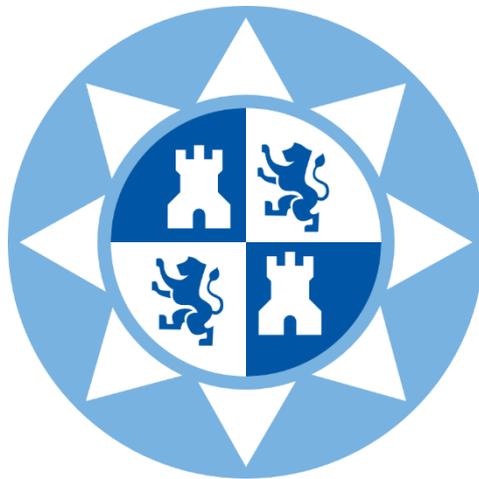


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



TRABAJO FIN DE GRADO

**Desarrollo e implementación de un sistema de  
medidas de coberturas radio basado en un  
analizador de espectros y un GPS.**



AUTOR: Antonio José Noguera Gil  
DIRECTOR: José María Molina García-Pardo

Febrero / 2018





<b>Autor</b>	Antonio José Noguera Gil
<b>E-mail del Autor</b>	anzonyosef@hotmail.com
<b>Director</b>	José María Molina García-Pardo
<b>E-mail del Director</b>	josemaria.molina@upct.es
<b>Título del TFG</b>	Campaña de medidas de coberturas radio basado en un analizador de espectros y un GPS.
<p><b>Resumen</b></p> <p>En la planificación de sistemas de radiocomunicaciones es común el uso de modelos de propagación para predecir las coberturas radio, y poder diseñar el sistema. Dichos modelos se basan en la recolección exhaustiva de medidas para poder tanto desarrollarlos como ajustarlos. Estas campañas de medidas permiten obtener parámetros como: potencia transmitida/recibida, dispersión del retardo, correlación, ancho de banda de coherencia etc. El grupo de investigación SiCoMo dispone de un analizador de redes FSH3 que permite medir el espectro radioeléctrico hasta los 3 GHz. El proyecto trata sobre el desarrollo de una campaña de medidas basada en el analizador de espectros, un ordenador y un GPS; en la que se mida la cobertura radioeléctrica de cualquier sistema inalámbrico 2G y 3G, permitiendo asimismo realizar mapas de cobertura registrando parámetros como la posición GPS, la potencia recibida y parámetros de calidad del enlace entre otros.</p>	
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Febrero 2018



# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Fases del proyecto.....	2
1.4. Contenido.....	3
<b>Capítulo 2: Canal radioeléctrico. Caracterización y sistemas de medida .....</b>	<b>1</b>
2.1. Introducción .....	1
2.2. Espectro radioeléctrico: características y clasificación de servicios.....	1
2.3. Caracterización del canal de propagación radio .....	3
2.4. Sistemas de medidas .....	12
2.4.1. Introducción .....	12
2.4.2. Sistemas de medida en banda estrecha.....	13
2.4.3. Sistemas de medida en banda ancha .....	16
<b>Capítulo 3: Radiopropagación en entornos urbanos .....</b>	<b>23</b>
3.1. Introducción .....	23
3.2. Modelos de propagación .....	23
3.2.1. Modelo de Okumura-Hata .....	24
3.2.2. Modelo de Walfisch-Bertoni .....	25
3.2.3. Modelo de Walfisch-Ikegami o COST-231.....	28
3.3. Evolución y comparación de las tecnologías móviles .....	31
3.3.1. Telefonía móvil de primera generación: 1G.....	32
3.3.2. Telefonía móvil de segunda generación: 2G .....	32
3.3.3. Telefonía móvil de tercera generación: 3G .....	35
3.3.4. Telefonía móvil de cuarta generación: 4G .....	37
3.3.5. Telefonía móvil de quinta generación: 5G .....	38
<b>Capítulo 4: Diseño del sistema de medida .....</b>	<b>41</b>
4.1. Introducción .....	41
4.2. Herramientas utilizadas.....	41
4.2.1. Hardware .....	41
4.2.2. Software .....	42
4.3. GPS .....	42
4.3.1. Introducción .....	42

4.3.2. Descripción del sistema de posicionamiento global .....	43
4.3.3. GPS Garmin eTrex Vista.....	44
4.3.4. Prestaciones .....	45
4.3.5. Menús .....	46
4.3.6. Aplicaciones .....	47
4.3.7. Conexión con el ordenador portátil.....	47
4.3.8. Utilidad dentro del proyecto.....	48
4.4. Analizador de espectros FSH3.....	48
4.4.1. Introducción .....	48
4.4.2. Prestaciones .....	49
4.4.3. Aplicaciones .....	49
4.4.4. Conexión con el ordenador portátil.....	50
4.4.5. Conexión con la antena .....	50
4.4.6. Funcionamiento de un analizador de espectros.....	51
4.4.7. Utilidad dentro del proyecto.....	55
4.5. Antena receptora .....	55
4.5.1. Prestaciones .....	56
4.5.2. Aplicaciones .....	57
4.5.3. Conexión con el analizador de espectros .....	58
<b>Capítulo 5: Metodología y resultados .....</b>	<b>59</b>
5.1. Introducción .....	59
5.2. Descripción y funcionamiento del sistema de medidas .....	59
5.2.1. Selección de los canales a medir.....	60
5.2.2. Campaña de medidas .....	67
5.2.3. Análisis y presentación de resultados .....	73
<b>Capítulo 6: Conclusiones .....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>83</b>

# Índice de figuras

Figura 1: Conexión de los equipos del sistema de medición.....	2
Figura 2: Tipos de propagación de las ondas electromagnéticas [9]. .....	4
Figura 3: Tipos de reflexión [6]. .....	5
Figura 4: Principio de Huygens (izquierda). .....	6
Figura 5: Principales mecanismos en la propagación multicamino [12]. .....	7
Figura 6: Propagación multicamino [12]. .....	7
Figura 7: Contribuciones de la onda que se acerca/aleja [9]. .....	10
Figura 8: Esquema para el cálculo del desplazamiento Doppler [9]. .....	10
Figura 9: Esquema general de un sistema de medida [9]. .....	12
Figura 10: Sistema de medida de la potencia transmitida por una estación base con un analizador de espectros. ....	14
Figura 11: Sistema de medida de la potencia transmitida por un receptor móvil con un analizador de espectros. ....	14
Figura 12: Medidor de campo NMB-552 Narda [16]. .....	15
Figura 13: Dispositivo TEMS pocket [15]. .....	16
Figura 14: Réplicas recibidas al transmitirse un pulso de corta duración (izquierda). Réplicas con aliasing en recepción al enviar un pulso de larga duración [9]. .....	17
Figura 15: Esquema de funcionamiento del sistema de medida.....	18
Figura 16: Esquema de funcionamiento del sistema de medida “Direct RF pulse system” [9]. .....	19
Figura 17: Esquema de funcionamiento del sistema de medida “Spread Spectrum sliding correlator channel sounding” [9]. .....	21
Figura 18: Entorno de propagación, elementos y contribuciones en el modelo de Walfisch-Bertoni [9]. .....	26
Figura 19: Cálculo de las pérdidas de propagación mediante el modelo COST-231 [23]. .....	28
Figura 20: Equipo 1G Ericsson NMT 450 [25]. .....	32
Figura 21: Esquemático de la campaña de medidas. ....	41
Figura 22: Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global [12]. .....	43
Figura 23: Vista frontal del GPS [2]. .....	44
Figura 24: Vista posterior del GPS [2]. .....	45
Figura 25: Conexión cable – dispositivo GPS [2]. .....	48
Figura 26: Conexión del cable RS-232-C al analizador de espectros con el ordenador portátil [1]. .....	50
Figura 27: Señal cuadrada en el dominio del tiempo y de la frecuencia [1]. .....	51
Figura 28: Diagrama de bloques de un analizador de espectros [1]. .....	52
Figura 29: Esquema de la conversión de frecuencia y filtrado de la señal RF a la entrada [1]. .....	53
Figura 30: Señal antes y después del detector de envolvente [1]. .....	54
Figura 31: Funcionamiento de los distintos tipos de detectores en el FSH3 [1]. .....	54
Figura 32: Antena bicónica Schwarzbeck SBA 9113 [21]. .....	55
Figura 33: Esquemático de la antena bicónica Schwarzbeck SBA 9113 [21]. .....	57
Figura 34: Conectores y cable coaxial utilizados. ....	58
Figura 35: Localización de las BTS en el Campus Muralla del Mar [22]. .....	59
Figura 36: Localización de primera BTS a medir [28]. .....	60
Figura 37: Mapa de cobertura 3G Movistar en Cartagena [26]. .....	61

Figura 38: Vista del menú “Measurement” del analizador de espectros FSH3.....	62
Figura 39: Canal 3G a medir [1805.10 - 1825.10] MHz con modo Analyzer.....	63
Figura 40: Canal 3G a medir [1805.10 - 1825.10]MHz con modo Channel Power.....	63
Figura 41: Localización del segundo emplazamiento a medir [28].....	64
Figura 42: Mapa de cobertura Vodafone 2G en Cartagena [27]. .....	65
Figura 43: Banda 2G a medir [949.9 – 959.9] MHz con modo Analyzer. ....	65
Figura 44: Canal 2G a medir [949.9 – 954.9]MHz con modo Analyzer.....	66
Figura 45: Canal 2G a medir [949.9 – 954.9]MHz con modo Channel Power.....	66
Figura 46: Montaje del sistema de medidas. ....	67
Figura 47: Configuración de puertos COM desde el administrador de dispositivos de Windows (arriba) y desde Matlab (abajo). ....	68
Figura 48: Distribución de zonas UTM en España [29].....	70
Figura 49: Primer recorrido. ....	73
Figura 50: Ficheros de medidas para ambos canales.....	74
Figura 51: Potencia del canal 3G frente a distancia en cada punto del primer recorrido. .....	76
Figura 52: Potencia del canal 3G frente a distancia en cada punto del primer recorrido (Unidades logarítmicas).....	76
Figura 53: Segundo recorrido. ....	77
Figura 54: Potencia del canal 2G frente a distancia en cada punto del segundo recorrido. .....	77
Figura 55: Potencia del canal 2G frente a distancia en cada punto del segundo recorrido (unidades logarítmicas).....	78
Figura 56: Potencia frente a distancia en cada punto del primer recorrido y recta de regresión. ....	80
Figura 57: Potencia frente a distancia en cada punto del segundo recorrido y recta de regresión. ....	80

## Índice de tablas

Tabla 1: División del espectro radioeléctrico [14]. ....	2
Tabla 2: Evolución de las tecnologías empleadas en comunicaciones móviles.....	31
Tabla 3: Especificaciones de la antena Schwarzbeck SBA 9113 [21]. ....	56
Tabla 4: Bandas frecuenciales asignadas al primer emplazamiento [22]. ....	61
Tabla 5: Bandas frecuenciales asignadas al segundo emplazamiento [22]. ....	64
Tabla 6: Valores de $L_0$ y $n$ obtenidos para ambos canales. ....	81

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1. Introducción

Este proyecto se enmarca en el ámbito de la planificación de sistemas de radiocomunicaciones, disciplina en la que se emplean modelos de propagación que permiten predecir las coberturas, jugando éstos un papel esencial en el diseño del sistema. Dichos modelos parten de una recolección de medidas experimentales previa que permita calibrar y desarrollar los modelos de propagación.

Durante la campaña de medidas, se obtendrán parámetros como: potencia transmitida/recibida, dispersión del retardo, correlación, ancho de banda de coherencia etc. Los dispositivos empleados para emprender este trabajo son elementos críticos y por lo tanto, es necesario tener un apropiado conocimiento de los mismos.

En este proyecto se diseñará un sistema basado en un analizador de espectros, un ordenador y un GPS que permita medir la cobertura radioeléctrica de cualquier sistema 2G y 3G, así como realizar mapas de cobertura, registrando parámetros como la posición geográfica, la potencia recibida y parámetros de calidad del enlace entre otros. Finalmente, tras la recolección de medidas, se representarán y se analizarán convenientemente.

### 1.2. Objetivos

En este proyecto se llevará a cabo un estudio previo que permita la gestión y el control de los equipos con que trabajaremos, analizador de espectros (R&S FSH-3) y GPS (Garmin eTrex Vista), para la realización de una campaña de medidas en un área geográfica determinada. Esta campaña permitirá efectuar la estimación de las pérdidas de propagación presentes en el canal de radiocomunicaciones. Además, se deberá representar y gestionar la información obtenida del analizador de espectros y del GPS, así como guardar los resultados para su posterior procesamiento.

Algunos de los parámetros radioeléctricos que serán cuantificados durante la campaña de medidas son: potencia transmitida/recibida, dispersión del retardo, correlación, ancho de banda de coherencia, etc. Por otro lado, las medidas deben estar georreferenciadas, de manera que se disponga en cada punto de un determinado recorrido, de la potencia recibida (obtenida del analizador de espectros) así como de las coordenadas de la posición geográfica en la que se tomó dicha medida (obtenida del GPS). Empleando estos datos, se podrá estimar la atenuación que sufre la señal mientras se propaga por el canal de radiocomunicaciones.

El parámetro esencial a obtener en el análisis de toda comunicación inalámbrica son las pérdidas que experimenta la señal desde que se emite desde la estación transmisora hasta que es recibida por la antena receptora. Será este el parámetro en que se centrará este estudio.

En cuanto a la utilización del software, se empleará el entorno Matlab tanto para la toma de coordenadas geográficas como para la gestión y representación de datos recolectados. Por otro lado, la sección hardware del sistema de medidas estará compuesta por un ordenador portátil, un analizador de espectros, un GPS y una antena bicónica; que se conectarán mediante un montaje como el mostrado en la siguiente figura.



Figura 1: Conexión de los equipos del sistema de medición.

Dada la naturaleza empírica de este proyecto, se realizará una campaña de medidas a pie de calle en Cartagena y se analizarán los resultados obtenidos con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de medición diseñado.

### 1.3. Fases del proyecto

- *Estado del arte en cuanto a la caracterización del espectro radioeléctrico.*

En esta primera etapa del proyecto se comenzó estudiando documentación acerca de las tecnologías y estándares en los que se enmarca el proyecto. Además se llevó a cabo una lectura exhaustiva de estudios y artículos previos similares, así como el repaso de asignaturas del grado, como Comunicaciones Móviles.

- *Familiarización con los equipos del laboratorio: Analizador de espectros, GPS y antena.*

Se continuó con el estudio de los manuales de uso de la instrumentación que se iba a emplear, a saber, el analizador de espectros FSH3 de Rhode & Schwarz, el GPS Garmin eTrex Vista y la antena Schwarzbeck bicónica.

- *Investigación sobre los protocolos de comunicación entre los equipos y el PC.*

Se realizó un estudio sobre el modo de conexión entre todos los equipos y la transferencia de información entre ellos y el ordenador.

- *Realización de campañas de medidas y presentación de resultados.*

Finalmente, se llevó a cabo la toma de mediciones práctica, empleando el sistema de medidas diseñado para comprobar la efectividad de dicho sistema en su conjunto.

#### 1.4. Contenido

En el capítulo 2 se lleva a cabo una contextualización sobre los temas a tratar en este proyecto, abordándose en primer lugar la gestión del espectro radioeléctrico y realizando posteriormente un estudio de la caracterización del canal de propagación. Además se hace un repaso de los sistemas de medida más relevantes, tanto en banda ancha como en banda estrecha.

El capítulo 3 trata sobre la radiopropagación en entornos urbanos, desde la presentación de los principales modelos de propagación diseñados para dichos entornos, hasta una revisión cronológica y comparación de las tecnologías empleadas en las comunicaciones móviles a lo largo de su historia.

En el capítulo 4 se describe el funcionamiento de los instrumentos que forman el sistema de medidas: el analizador de espectros, el GPS y la antena. En primer lugar se analizan las características del GPS, sus aplicaciones y su función dentro del proyecto. Posteriormente se describe de manera análoga la operación del analizador de espectros y finalmente se presentan las especificaciones y aplicaciones de la antena receptora empleada.

En el capítulo 5 se explica el método de trabajo seguido a la hora de realizar las mediciones y se muestran y analizan los resultados del proyecto.

En el capítulo 6 se recogen las conclusiones y futuras líneas de trabajo derivadas de este proyecto.

## **Capítulo 2: Canal radioeléctrico. Caracterización y sistemas de medida**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se presentan inicialmente unas nociones básicas en cuanto al espectro radioeléctrico, su gestión y los tipos de servicios en que se divide. Asimismo, se estudiará la caracterización de la respuesta del canal radio en los sistemas de comunicaciones móviles, es decir, aquellos sistemas de comunicaciones en los que existe un enlace vía radio entre varios dispositivos capaces de recibir y transmitir señales radioeléctricas.

### **2.2. Espectro radioeléctrico: características y clasificación de servicios**

El espectro radioeléctrico, esto es, el conjunto de bandas de frecuencia que pueden ser utilizados por los diversos servicios de radiocomunicación, constituye un recurso natural limitado de propiedad nacional, es decir, no puede emplearse libremente, dado que las emisiones en una frecuencia y lugar específicos deben ser únicas. De otra forma interferirían con otros servicios que se diesen en el mismo área. El organismo que, a nivel internacional, se encarga del estudio y asignación de las frecuencias en el espectro electromagnético es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), con sede en Ginebra, de la que son miembros prácticamente la totalidad de los países del mundo.

En el artículo 8 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT [14] se establece que las emisiones deben designarse de acuerdo a su clasificación y ancho de banda necesario. Para un tipo determinado de emisiones, el ancho de banda necesario se define como la banda de frecuencias necesaria que justamente garantice la transmisión de información con la calidad específica del tipo de servicio de que se trate (telefonía, televisión, datos, etc.).

El espectro radioeléctrico se subdivide en nueve bandas de frecuencias, que se designan por números enteros, en orden creciente, de acuerdo con la siguiente tabla<sup>1</sup>.

Número de la banda	Acrónimo	Rango de frecuencias	Subdivisión métrica
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriámétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12	THF	300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas

Tabla 1: División del espectro radioeléctrico [14].

### ***Tipos de servicios***

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones [14], los tipos de servicios de radiocomunicación que se asignan en las diferentes bandas del espectro radioeléctrico se clasifican según el siguiente listado:

- *Servicios fijos:* Son servicios de radiocomunicación entre puntos fijos específicos. Por ejemplo, circuitos de alta frecuencia punto a punto y radioenlaces de microondas.
- *Servicios móviles:* Servicios de radiocomunicación entre estaciones que pueden utilizarse estando éstas en movimiento, estáticos en lugares no especificados, o bien entre estaciones móviles y estaciones fijas.
- *Servicio móvil aeronáutico:* Servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y aeronaves o entre aeronaves.
- *Servicio móvil marítimo:* Servicios de radiocomunicación entre estaciones costeras y barcos o entre barcos navegando.
- *Servicio móvil terrestre:* Servicios de radiocomunicación entre una estación de base y una estación terrestre móvil, o entre estaciones móviles terrestres.
- *Radionavegación:* Servicios para determinar la posición de naves mediante las propiedades de propagación de las ondas radioeléctricas.

<sup>1</sup> Correspondencia de acrónimos: L (Low), M (Medium), H (High), V (Very), U (Ultra), S (Super), E (Extremely), T (Tremendously), F (Frequency).

- *Radionavegación aérea*: Servicios de radionavegación para la navegación aérea, por ejemplo: VOR<sup>2</sup>, TACAN<sup>3</sup>, radiofaros, sistemas de aterrizaje por instrumentos, radio-altímetros, radares de indicación de obstrucciones, etc.
- *Radionavegación marítima*: Servicios de radionavegación para la navegación marítima. Cabe destacar: radiofaros costeros, estaciones de radiolocalización, radares a bordo, etc.
- *Radiolocalización*: Servicios para determinación de la posición de naves con propósitos diferentes a los de navegación, tales como: radares terrestres, radares costeros, sistemas de seguimiento, etc.
- *Radiodifusión*: Servicios de radiocomunicación cuyo propósito es la recepción directa por el público en general. Como ejemplos pueden citarse la radiodifusión en ondas medias (AM), frecuencia modulada (FM) y Televisión.
- *Radioaficionados*: Servicios de radiocomunicación llevados a cabo por personas interesadas en las técnicas radioeléctricas, únicamente por interés personal y sin interés comercial alguno.
- *Espaciales*: Servicios de radiocomunicación entre estaciones o vehículos espaciales.
- *Tierra-espacio*: Servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y estaciones o vehículos espaciales. Por ejemplo, la comunicación entre una estación terrestre y un satélite.
- *Radioastronomía*: Astronomía basada en la recepción de ondas radioeléctricas de origen cósmico.
- *Estándares de frecuencia*: Transmisiones de radio de frecuencias determinadas y de alta precisión, cuyo propósito es la recepción y procesado con fines científicos, técnicos o de otra índole.

### 2.3. Caracterización del canal de propagación radio

El canal radio, también denominado canal móvil, está constituido por el espacio y todos los elementos que se encuentran entre transmisor y receptor. Como sabemos, los canales relativos a medios de comunicación cableados son estacionarios y predecibles [9]. Sin embargo, el canal móvil es aleatorio, siendo su respuesta variable en los dominios tanto temporal como frecuencial. Por tanto, es imprescindible una correcta caracterización del canal radio para que se puedan efectuar comunicaciones a su través.

Las ondas electromagnéticas se propagan a través del canal radio de diversos modos. En la siguiente figura se muestra un esquema que sintetiza las formas de propagación electromagnética.

---

<sup>2</sup> VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range): Sistema de radioayuda a la navegación que utilizan las aeronaves para seguir en vuelo una ruta preestablecida.

<sup>3</sup> TACAN (Tactical Air Navigation System): Sistema de navegación usado por aeronaves militares, a las que proporciona rumbo y distancia a una estación situada en tierra o a bordo de un barco. Es una versión más precisa del sistema VOR que proporciona información de rumbo y distancia para la aviación civil.

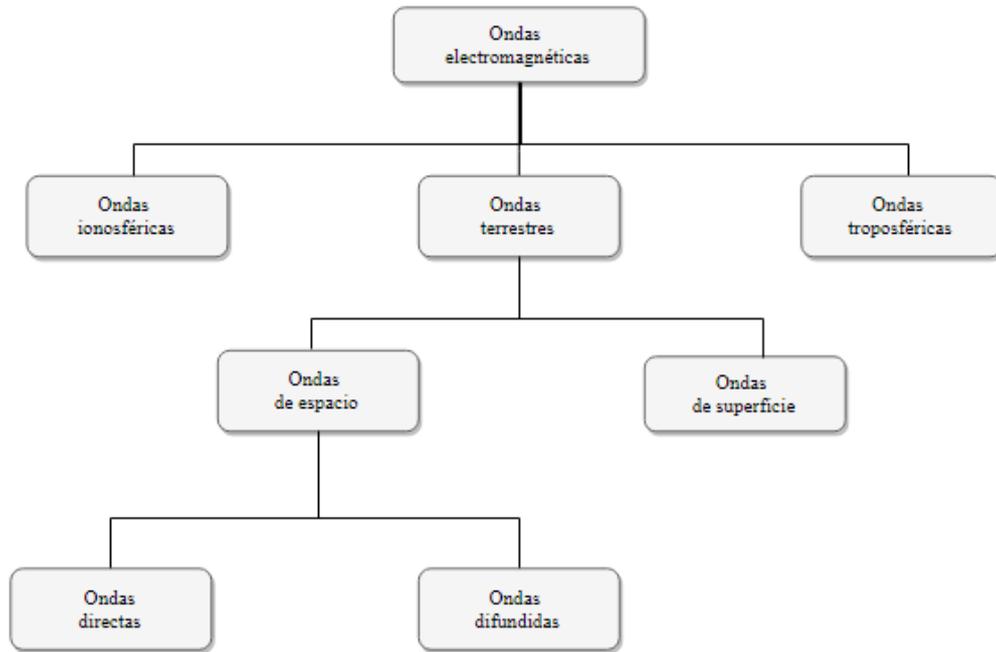


Figura 2: Tipos de propagación de las ondas electromagnéticas [9].

El diseñador del sistema de comunicaciones deberá conocer el canal para así elegir consecuente y adecuadamente la modulación adecuada, la técnica de acceso al medio y los mecanismos de ecualización necesarios, dados un ancho de banda disponible del canal radio y las limitaciones tecnológicas existentes. Del mismo modo, la caracterización del canal posibilitará la estimación realista de las coberturas, es decir, el máximo alcance de las estaciones base, razón por la que se podrá dimensionar el sistema de comunicaciones correctamente.

Entre transmisor y receptor pueden darse multitud de elementos influyentes en la propagación radioeléctrica (personas, coches, árboles, edificios, montañas, etc.) que producirán diversos efectos sobre la señal radio que provocan la aparición de las ondas difundidas presentes en la figura 2. Principalmente, los efectos incidentes sobre una determinada señal de radiofrecuencia pueden enmarcarse dentro de uno de los siguientes tres mecanismos de propagación:

## ***Reflexión***

El fenómeno de la reflexión tiene lugar cuando el objeto contra el que una onda electromagnética choca tiene propiedades electromagnéticas diferentes y una mayor dimensión que su longitud de onda. La Óptica Geométrica considera la reflexión desde el punto de vista de la Ley de Snell [10]. Si el objeto es conductor no tiene lugar ninguna onda transmitida y solo existe la onda reflejada. En caso de que el objeto sea un dieléctrico, parte de la energía se refleja en el primer medio y parte se transmite al segundo medio. Ambas ondas están relacionadas mediante el coeficiente de reflexión de Fresnell ( $\Gamma$ ). Este parámetro es función generalmente del ángulo de incidencia, de la frecuencia de la onda incidente y de la polarización de dicha onda.

Cuando la reflexión se produce sobre un objeto dieléctrico, las características de la onda reflejada dependen de la polarización de la onda incidente, estando ambas definidas en un plano de incidencia. Si dicha onda es paralela al plano de incidencia, se hablará de polarización vertical (perpendicular a la superficie de incidencia) y se llamará polarización “hard”. En cambio, si la onda es perpendicular al plano de incidencia, se tendrá una polarización horizontal (paralelo a la superficie de incidencia) recibiendo el nombre de polarización “soft”.

A continuación, se muestran las distintas polarizaciones y sus respectivos coeficientes de Fresnell:

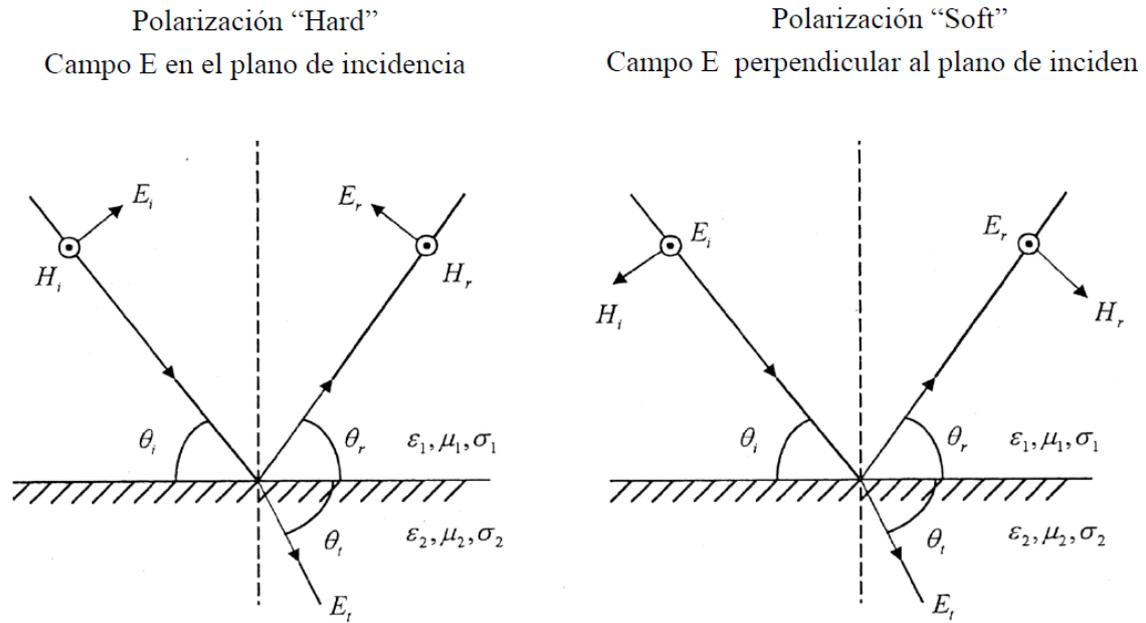


Figura 3: Tipos de reflexión [6].

Las expresiones de los coeficientes de reflexión para cada uno de los casos anteriores se presentan a continuación:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \text{sen}\theta_t - \eta_1 \text{sen}\theta_i}{\eta_2 \text{sen}\theta_t + \eta_1 \text{sen}\theta_i} \quad \Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \text{sen}\theta_i - \eta_1 \text{sen}\theta_t}{\eta_2 \text{sen}\theta_i + \eta_1 \text{sen}\theta_t} \quad (1)$$

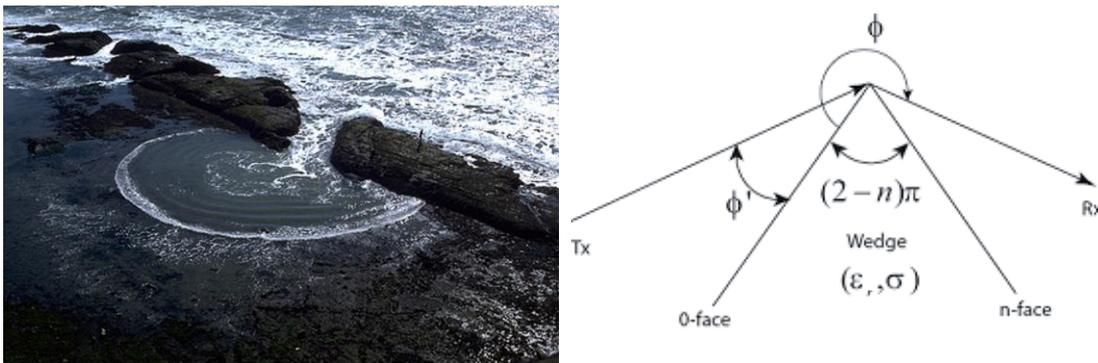
Siendo  $\theta_i$  y  $\theta_t$  los ángulos de incidencia y transmisión, y  $\eta$  la impedancia del medio que se calcula mediante:

$$\eta_i = \sqrt{\mu_i / \epsilon_i} \quad (2)$$

## ***Difracción***

La difracción encuentra su causa en la propagación de ondas secundarias dentro de la región de penumbra, es decir, la región donde no hay visión directa entre transmisor y receptor. Mediante este mecanismo se permite a las ondas electromagnéticas llegar hasta el receptor aun en ausencia de línea de visión directa. Este fenómeno se puede explicar por el Principio de Huygens, que expone que cualquier punto de un frente de ondas puede suponer una nueva fuente de producción de ondas secundarias creando, en conjunto, un nuevo frente de onda en la dirección de propagación.

Para altas frecuencias, el estudio del canal radio se resuelve con la Teoría Uniforme de Difracción (UTD), que utiliza un modelo donde solo se tiene en cuenta la geometría del objeto y la amplitud, fase, polarización y frecuencia de la onda incidente en el punto de difracción [10]. Considerando este punto como un obstáculo en forma de cuña, cuyos ángulos se miden desde la cara '0' y en ángulo interior  $(2 - n)\pi$ , siempre menor que  $180^\circ$ . Esta teoría proviene de la Teoría Geométrica de Difracción (GTD) [11], solucionando parcialmente situaciones en los que se obtenían resultados erróneos.



*Figura 4: Principio de Huygens (izquierda). Geometría de un obstáculo en la teoría UTD (derecha) [11].*

## ***Difusión o “Scattering”***

El efecto de la difusión o Scattering se da cuando la longitud de onda de la radiación incidente es similar a las dimensiones del objeto con que choca, o el número de objetos por unidad de volumen es alto. Este mecanismo conlleva un aumento de la potencia recibida en el receptor que no se suele predecir solo con los modelos de difracción y reflexión.

El hecho de que el número de objetos u obstáculos presentes en el canal radio sea alto, significa considerar una superficie o medio como rugoso. Produciéndose esta situación cuando se cumple el criterio de Rayleigh<sup>4</sup>. Cuando la altura crítica  $h_c$  es

<sup>4</sup>El criterio de Rayleigh constituye una medida de rugosidad del terreno. Indica que una superficie puede considerarse como suave si:  $h < \frac{\lambda}{8\sin\gamma}$ ; siendo  $h$  la rugosidad,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\gamma$  el ángulo de incidencia de la onda en el suelo [10].

superada por la altura de alguna protuberancia de la superficie, se considerará rugosa. En caso contrario, se hablará de superficie suave.

El conocido efecto multicamino [9], que se explica con claridad a continuación, producirá cambios en los parámetros módulo, fase y frecuencia de la señal recibida. Dichos cambios no serán permanentes, ya que variarán respecto al tiempo. Se habla, por tanto, de un canal de comunicaciones cronovariable. En la siguiente figura se pueden observar esquemáticamente los procesos de reflexión, difracción y difusión presentes en un canal móvil:

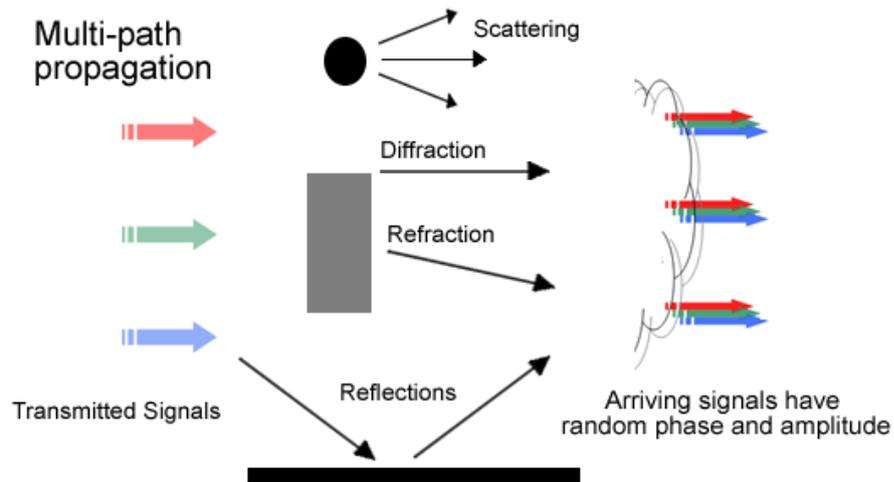


Figura 5: Principales mecanismos en la propagación multicamino [12].

Como consecuencia de estos efectos, el receptor será alcanzado por múltiples contribuciones o réplicas de la señal original transmitida, pudiendo sufrir cada réplica diversos procesos de reflexión, difracción y difusión. Las distintas réplicas recorrerán diferentes trayectorias de distinta longitud hasta su destino. Por tanto, alcanzarán el receptor con diferentes ángulos de incidencia, atenuaciones, desfases y retardos de propagación. Este efecto recibe el nombre de efecto multicamino. Finalmente, las distintas contribuciones se sumaran por superposición en el receptor tal que se puede producir una interferencia constructiva o destructiva.

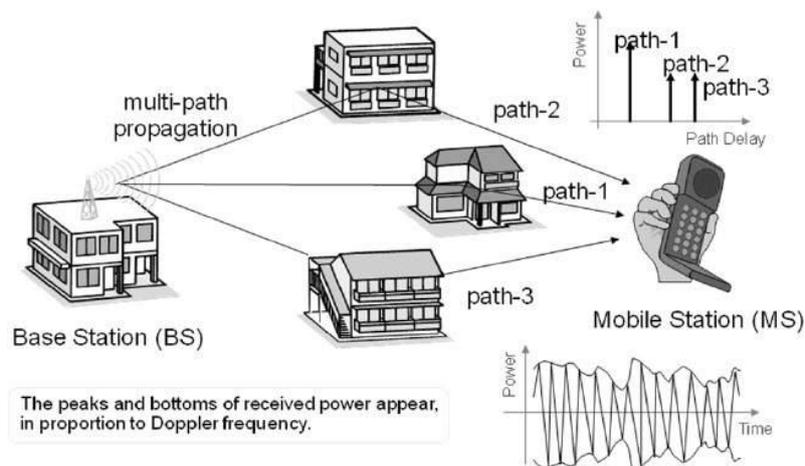


Figura 6: Propagación multicamino [12].

La causa de la variación temporal de la respuesta del canal es principalmente el movimiento de la estación móvil. Sin embargo, en caso de que la estación móvil permanezca estática, el canal también variará si los difusores se encuentran en movimiento. Además, esta variación será aleatoria ya que el movimiento de los elementos presentes en el canal no es determinista. Por consiguiente, se dice que el canal radio es cronovariable aleatorio, lo que a su vez implica que la potencia en el receptor varíe temporalmente de forma aleatoria.

Los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar en dos grupos [17]. Los sistemas de banda estrecha y los de banda ancha (“narrowband” y “wideband”, respectivamente). Con generalidad, un sistema de comunicaciones se considera de banda estrecha [9] si el ancho de banda de la señal es pequeño en comparación con la frecuencia de la portadora. En sistemas de comunicaciones móviles el efecto multicamino va a alterar de manera diferente a unas frecuencias u otras.

Por otro lado, el ancho de banda de coherencia ( $B_c$ ) se define como aquel ancho de banda dentro del cual todas las frecuencias son afectadas de igual forma por el efecto multicamino. Este parámetro es una medida estadística del rango de frecuencias en el que el canal se puede considerar “plano”, es decir, el ancho de banda en el que el canal tiene una ganancia aproximadamente constante y una fase lineal [12]. Las amplitudes de todas las componentes frecuenciales de la señal transmitida que se encuentren dentro del ancho de banda de coherencia serán afectadas del mismo modo. Adicionalmente, en el rango de frecuencias que abarca el ancho de banda de coherencia, las componentes frecuenciales de la señal bajo estudio tendrán una correlación elevada. La siguiente expresión define analíticamente el ancho de banda de coherencia como un parámetro inversamente proporcional al valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo:

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (3)$$

La constante que multiplica al parámetro temporal está relacionada con el grado de correlación exigido a las componentes frecuenciales. La anterior expresión es válida en caso de que el ancho de banda de coherencia se defina como el rango de frecuencias para el que la correlación entre componentes frecuenciales sea superior del 90%. Si, en cambio, el grado de correlación desciende hasta el 50% el ancho de banda de coherencia se obtiene mediante la siguiente ecuación. Cabe destacar que tanto ésta como la anterior ecuación son aproximaciones, puesto que no existe una relación exacta entre  $B_c$  y  $\sigma_\tau$ .

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (4)$$

De este modo, podemos presentar un sistema de banda estrecha [9] como aquél cuyo ancho de banda es menor que el ancho de banda de coherencia del canal.

Con el fin de caracterizar el canal móvil en banda estrecha se transmite una portadora sinusoidal  $x(t)$  sin modular de amplitud  $A$  y frecuencia  $f_c$ :

$$x(t) = Ae^{j\omega_c t} = Ae^{j2\pi f_c t} \quad (5)$$

La caracterización del canal consiste en la descripción de las variaciones y características de la señal recibida, que estará formada por múltiples contribuciones que habrán sufrido procesos de reflexión, difracción y difusión. Dichas contribuciones llegarán al receptor atenuadas y retardadas. Además, cada contribución llegará con un retardo y atenuación propios. El retardo presente en cada réplica o contribución implica una variación de fase de la señal transmitida.

Por tanto, la señal recibida puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$w(t) = \sum_{i=1}^N A_i x(t-\tau_i) \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de contribuciones,  $A_i$  es un fasor complejo que representa las variaciones en módulo y fase debidas a la reflexión, difusión y difracción de la contribución  $i$ -ésima, y  $\tau_i$  es el retardo de cada contribución.

Sustituyendo la expresión anterior de la portadora en la señal recibida, obtenemos:

$$w(t) = \left[ \sum_{i=1}^N A_i e^{-2\pi f_c \tau_i} \right] e^{j2\pi f_c t} \quad (7)$$

Además del cambio de fase debido a  $A_i$ , el retardo sufrido por cada réplica implica una variación de fase de la señal transmitida. Del mismo modo, en la anterior expresión se observa que la señal no presenta variación temporal, permaneciendo por tanto, la amplitud y la fase inalteradas con respecto a la contribución de esta exponencial. La causa de esto se encuentra en la suposición del canal estático, en el que tanto los difusores como el móvil se encuentran fijos. A pesar de la presencia del efecto multicamino en este canal, todos los elementos del sistema son invariantes con el tiempo y por tanto, la envolvente de la señal recibida también será invariante con el tiempo.

Sin embargo, en el caso real, tanto los difusores como la estación móvil estarán en movimiento. Debido a esta variación temporal del canal, la envolvente de la señal recibida también variará, obteniéndose finalmente la siguiente expresión:

$$w(t) = \left[ \sum_{i=1}^{N(t)} A_i(t) e^{-2\pi f_c \tau_i(t)} e^{jkvt \cos(\theta_i)} \right] e^{j2\pi f_c t} \quad (8)$$

En ella, varían con el tiempo tanto el módulo, como la fase del fasor  $A_i$ , además del número de contribuciones y el retardo de la contribución  $i$ -ésima. Aparece en esta ecuación un nuevo término que contiene la velocidad  $v$  de la estación móvil, el número de onda  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  y el ángulo  $\theta_i$  formado por la dirección de avance del móvil con la dirección de llegada de la contribución  $i$ -ésima. Este término exponencial representa el desplazamiento en frecuencia debido al efecto Doppler. Al acercarse la estación móvil a la fuente de ondas electromagnéticas, éstas se comprimen dando lugar a un aumento de frecuencia. En cambio, al alejarse el móvil de la fuente, las ondas sufren un proceso de descompresión que produce una disminución de la frecuencia. Cuando el móvil se acerca a la fuente transmisora, el término  $\cos(\theta_i)$  es positivo, por lo que el desplazamiento en frecuencia también lo será, es decir, la frecuencia de la señal recibida aumentará. Si el móvil se aleja de la fuente,  $\cos(\theta_i)$  será negativo, siéndolo también el desplazamiento en

frecuencia y, por tanto, la frecuencia de la señal recibida disminuirá. Todo ello se puede apreciar en el esquema mostrado en la siguiente figura:

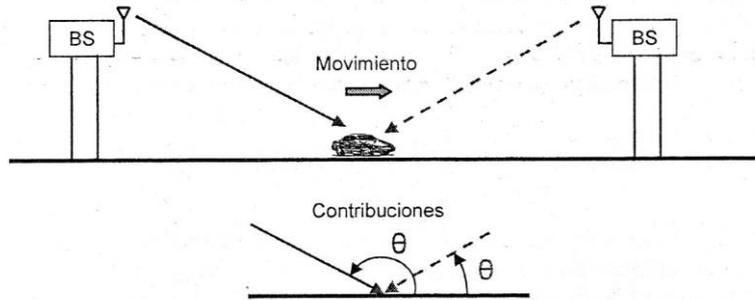


Figura 7: Contribuciones de la onda que se acerca/aleja [9].

En el caso de que los objetos presentes en el radiocanal se encuentren en movimiento, introducirán un desplazamiento Doppler variable con el tiempo en las componentes multicamino. No obstante, la velocidad de los objetos que circundan al receptor puede despreciarse, tal que sólo se tendrá en cuenta la velocidad del móvil.

A continuación, se procede a explicar el fenómeno del desplazamiento Doppler [12], en aras de justificar el cambio de frecuencia que tiene lugar en la ecuación 8. Para mayor claridad de este proceso, se muestra la siguiente figura.

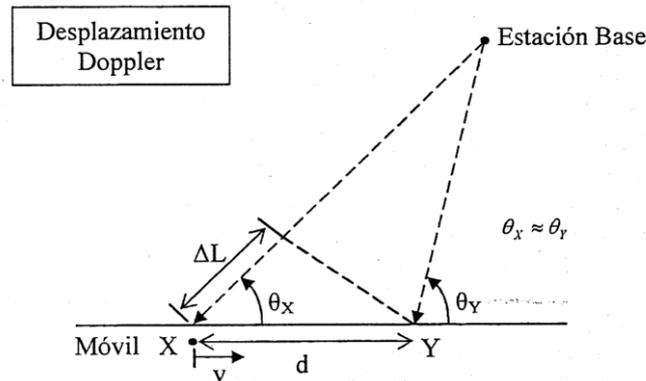


Figura 8: Esquema para el cálculo del desplazamiento Doppler [9].

El desplazamiento del móvil desde la posición X hasta la posición Y conlleva un cambio de fase expresado por la ecuación 9. Esta diferencia de fases depende de la diferencia de caminos  $\Delta L$ . Al ser la distancia entre los dos puntos lo suficientemente pequeña, se puede considerar la aproximación siguiente:  $\theta_x = \theta_y = \theta_i$

$$\Delta\phi = \frac{k \Delta L}{r} = \frac{2\pi \Delta L}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos(\theta_i) \quad (9)$$

Dado que la frecuencia consiste en la variación de la fase respecto al tiempo, obtenemos el siguiente desplazamiento en frecuencia:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos(\theta_i) \quad (10)$$

En el caso de que el ángulo  $\theta$  sea aproximadamente nulo (o de valor  $\pi$ ), el desplazamiento será máximo e igual a:

$$f_{dmax} = \frac{v}{\lambda} \quad (11)$$

Cuando el ángulo  $\theta_i$  es superior a  $\pi/2$ , es decir, cuando el móvil se aleja, hay que aplicar las siguientes relaciones para obtener la ecuación 9:

$$e^{j\omega_0 t} \cdot x(t) = e^{j2\pi f_0 t} \cdot x(t) \rightarrow X(f-f_0) \quad (12.1)$$

$$\text{Diferencia de caminos (al alejarse)} = -\Delta L = -\text{sen}(\theta') \quad (12.2)$$

$$\theta = \theta' + \frac{\pi}{2} \rightarrow \theta' = \theta - \frac{\pi}{2} \rightarrow -\Delta L = -\text{sen}\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \text{cos}(\theta) \quad (12.3)$$

Según se ha visto en la ecuación 8, el efecto multicamino producirá cambios en el módulo de la señal recibida, en fase y también en frecuencia. Dichos cambios no serán permanentes, debido a la variación temporal de la señal.

Dada la gran variabilidad de la respuesta del canal radio, tanto espacial como temporal, se hace necesario adoptar un modelo que nos facilite el análisis cuantitativo de los parámetros del canal deseados, entre los que destaca como parámetro básico, las pérdidas que experimenta la señal desde que se emite desde la estación transmisora hasta que se recibe en la antena receptora. Se opta en este estudio por un modelo sencillo que propone que la atenuación disminuye según la siguiente ley exponencial [9]:

$$L_b = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log(d) \quad (13)$$

donde  $n$  (decay factor en inglés) es función del medio de propagación, de la frecuencia y de la altura de la antena de transmisión;  $d$  es la distancia entre transmisor y receptor en unidades lineales, y  $L_0$  es la pérdida de propagación a una distancia unitaria en unidades logarítmicas. Cabe destacar que esta función mantiene una relación lineal entre las pérdidas en unidades logarítmicas y la distancia también expresada en unidades

logarítmicas. Debido a que las pérdidas de propagación constituyen una variable aleatoria, se puede completar la definición anterior del siguiente modo:

$$L_b = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log(d) + X_\sigma \quad (14)$$

siendo  $X_\sigma$  una variable aleatoria log-normal de media cero y varianza  $\sigma$  que depende del entorno y varía tanto con el tiempo como con la ubicación. Para caracterizar la propagación de las señales estudiadas se empleará la anterior ley exponencial, de la cual se obtendrá una estimación de la potencia recibida en cada medición realizada mediante una recta de regresión, es decir, la recta que mejor aproxime las medidas realizadas para cada canal. Será, finalmente, objeto de este proyecto el estudio de las pérdidas de propagación en el entorno urbano de Cartagena.

## 2.4. Sistemas de medidas

### 2.4.1. Introducción

Previamente en este capítulo, se ha hecho patente la complejidad e importancia de la caracterización del canal móvil. Las campañas de medidas son esenciales a la hora de realizar dicha caracterización, pues permiten conocer los atributos del entorno y, en consecuencia, realizar una planificación adecuada del modelo de propagación que mejor se ajuste a cada situación para predecir las coberturas radio, y poder diseñar el sistema. Por tanto, es necesario disponer de métodos e instrumentos adecuados para la medición del canal móvil.

Dado que el canal puede ser modelado como un filtro que modifica una señal entrante, los sistemas de medida constarán principalmente de un generador fijo de señales que son recibidas por los equipos de medida tras su propagación a través del canal. Conociendo la señal generada y la medición de la señal recibida, se estará en disposición de estimar diversas características del canal.

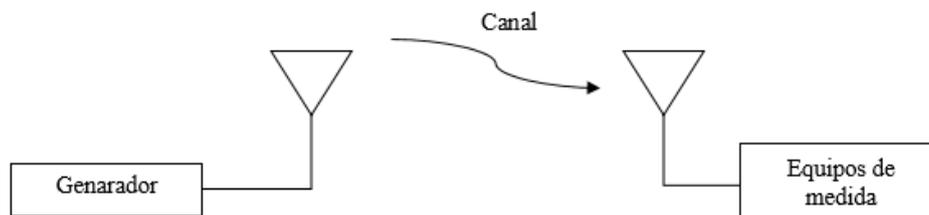


Figura 9: Esquema general de un sistema de medida [9].

Una primera clasificación de los sistemas de medida, se podría realizar atendiendo a sistemas de banda estrecha y de banda ancha [9].

### 2.4.2. Sistemas de medida en banda estrecha

Los sistemas de medida en banda estrecha permiten realizar mediciones en un determinado ancho de banda relativamente reducido, en comparación con la frecuencia de la portadora. Estos sistemas únicamente miden la potencia de la señal recibida, a menudo sin aportar información relativa a su fase. Una aplicación frecuente de los sistemas de banda estrecha [10] es el estudio de compatibilidad electromagnética<sup>5</sup>, que tiene como finalidad que los equipos con que se trabaje funcionen correctamente, estos es, sin causar interferencias electromagnéticas a otros equipos; además de ser insensibles a las perturbaciones que puedan causar otros sistemas. A continuación se estudian brevemente algunos equipos que permiten realizar mediciones en banda estrecha [9].

### *Analizador de espectros*

Dentro de los sistemas de medida en banda estrecha se enmarca el analizador de espectros, equipo empleado en la implementación de la aplicación bajo estudio en este proyecto. Este dispositivo permite calcular el espectro de una señal de RF<sup>6</sup> introducida en el mismo. Del mismo modo, un analizador de espectros es capaz de evaluar la potencia instantánea de la señal en el dominio del tiempo. Se pueden emplear diversas configuraciones para medir distintas características de potencia tanto en la estación base (también conocida como BS, “Base Station”) como en el receptor móvil (MS, “Mobile Station”).

En la figura 10 se muestra un posible montaje para la medida de potencia transmitida de una estación base. El procedimiento se puede explicar con las diversas conexiones de los equipos empleados. La BTS<sup>7</sup> transmite una portadora de RF producida con el generador de señales. Dicha señal no es radiada, sino que se introduce en el analizador de espectros mediante conexión cableada. El analizador de espectros se ha de ajustar para visualizar la potencia instantánea. El proceso de medición será gestionado desde el ordenador conectado a la BS.

---

<sup>5</sup> EMC: Electromagnetic Compatibility.

<sup>6</sup> RF: Radiofrecuencia.

<sup>7</sup> BTS (Base Transceiver Station): Estación base transeptora.

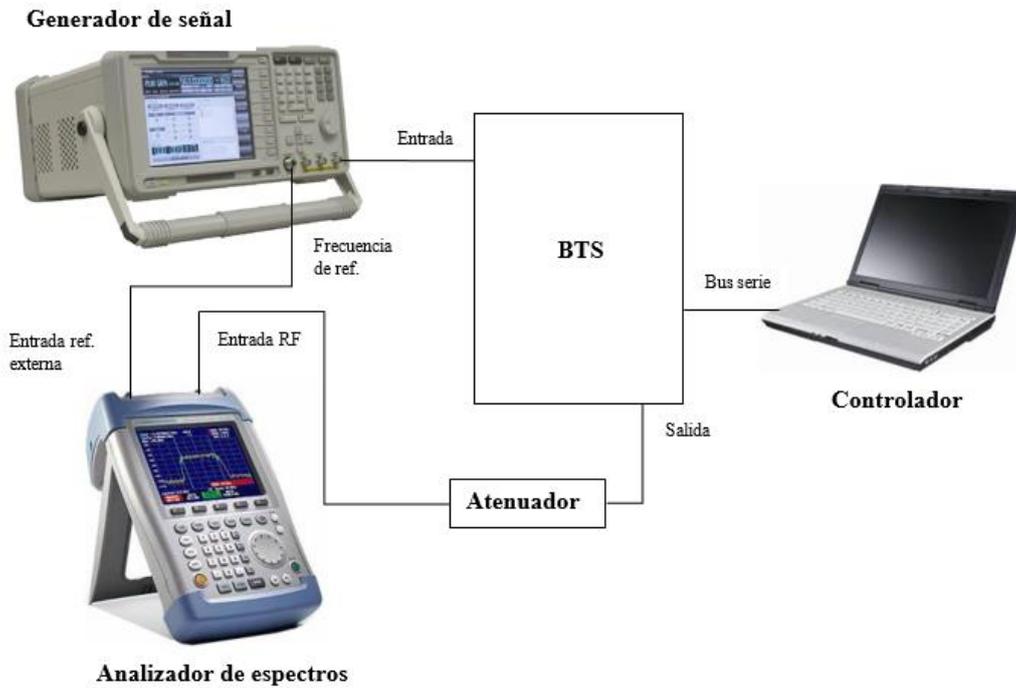


Figura 10: Sistema de medida de la potencia transmitida por una estación base con un analizador de espectros.

Con el fin de medir la potencia transmitida por el móvil se ha de implementar el montaje presentado en la figura 11. En este caso el analizador de espectros se ajusta para visualizar el espectro de la señal, concretamente la densidad espectral de potencia. El dispositivo móvil se conecta a un ordenador que le indicará cuando transmitir la señal que se desea medir. La salida de la señal se conecta al analizador de espectros que mostrará la potencia transmitida.

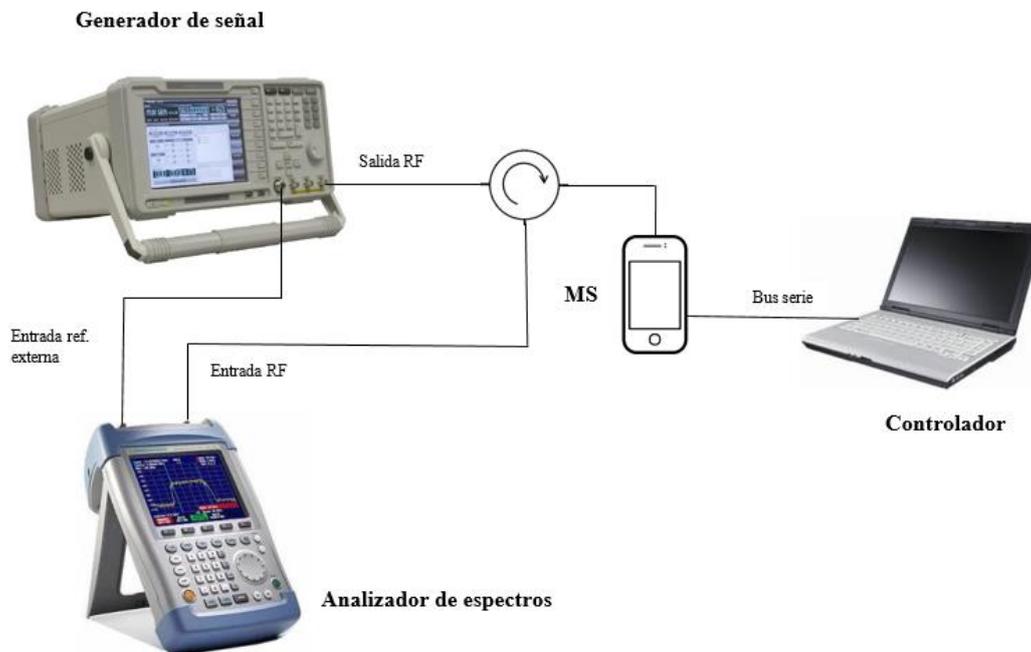


Figura 11: Sistema de medida de la potencia transmitida por un receptor móvil con un analizador de espectros.

## *Medidor de campo*

Este dispositivo permite medir el nivel de campo eléctrico que se recibe a través de una antena conectada a él. Una prestación a resaltar del medidor de campo es que ofrece la posibilidad de demodular la señal recibida en una amplia gama de modulaciones: QPSK<sup>8</sup>, OFDM<sup>9</sup>, QAM<sup>10</sup>, etc. Gracias a ello es muy utilizado en la orientación de antenas encargadas de la captación de señales de televisión. Asimismo es capaz de medir potencia o voltaje en diversas unidades (dBm, dB $\mu$ V, dBmV, etc.) en un ancho de banda determinado, tal que el último sea pequeño en comparación con la portadora. Además, este dispositivo puede medir tanto canales digitales como analógicos. En los canales analógicos sólo se mide la potencia, mientras que en los digitales se pueden obtener medidas del BER<sup>11</sup>, la potencia o la relación portadora-ruido (C/N)<sup>12</sup>. A pesar de que su uso está más extendido en los sistemas de comunicaciones vía satélite, también se ha usado en el sistema GSM<sup>13</sup>.



Figura 12: Medidor de campo NMB-552 Narda [16].

---

<sup>8</sup> QPSK (Quadrature Phase Shift Keying): Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura.

<sup>9</sup> OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): Multiplexación por división de frecuencias ortogonales.

<sup>10</sup> QAM (Quadrature Amplitude Modulation): Modulación de amplitud en cuadratura.

<sup>11</sup> BER (Bit Error Rate): Tasa de error de bit.

<sup>12</sup> C/N (Carrier-to-noise ratio): Relación portadora – ruido.

<sup>13</sup> GSM (Global System for Mobile communications): Sistema global para comunicaciones móviles.

## ***Dispositivo TEMS***

Este dispositivo consiste en un receptor móvil ideado para el estudio y planificación del sistema GSM. Este equipo puede medir gran cantidad de información en relación a los canales de control y tráfico transmitido y recibido por el móvil, así como la potencia de las señales enviadas y recibidas. Las principales funciones de la tecnología TEMS<sup>14</sup> consisten en medir, analizar y optimizar redes móviles. En la siguiente figura se muestra un dispositivo TEMS pocket de la marca Ericsson.



*Figura 13: Dispositivo TEMS pocket [15].*

### 2.4.3. Sistemas de medida en banda ancha

Los sistemas de medida del canal radio en banda ancha permiten obtener características adicionales de dispersión temporal y frecuencial, además de parámetros tales como el ancho de banda o tiempo de coherencia del canal. Con el fin de llevar a cabo el estudio y medición de dichas prestaciones, se hace imprescindible modelar de alguna forma el comportamiento multicamino del canal. Para ello, es necesario medir el perfil de retardo normalizado (PDP<sup>15</sup>), que se obtiene a partir de la función de respuesta al impulso cronovariable  $h(t,\tau)$  del canal, en un instante  $t$  a un impulso generado  $\tau$  segundos antes.

Es imposible transmitir un impulso<sup>16</sup>, no obstante, se puede transmitir un pulso de duración suficientemente corta ( $T_{BB}$ ) para obtener la respuesta aproximada a un impulso. Si dicho pulso se transmite periódicamente con un periodo de repetición superior al retardo máximo del canal, en el receptor obtendremos la función  $h(t,\tau)$ , que define al canal. En caso de que la duración del pulso transmitido sea mayor que la diferencia de

<sup>14</sup> TEMS (TESt Mobile System): Sistema móvil de testeo.

<sup>15</sup> PDP (Power Delay Profile): Perfil de Retardo de Potencia.

<sup>16</sup> La imposibilidad de transmitir un impulso se debe a que dicho estímulo consiste en un pulso de duración infinitamente reducida, que mantiene su área (caso ideal), por lo que se modela como un pico de amplitud infinita. Esta caracterización ideal del impulso permite trabajar posteriormente con este concepto, a la hora de la integración, respetando los supuestos teóricos [5].

retardos de las réplicas multicamino, en el receptor se producirá interferencia o aliasing entre réplicas, tal que la función  $h(t,\tau)$  no representará fehacientemente el comportamiento del canal. Por tanto, los sistemas de medida del PDP se fundamentan en la transmisión de pulsos de corta duración, que poseen un gran ancho de banda, el cual puede superar el ancho de banda de coherencia del canal. Razón por la cual estos sistemas reciben el nombre de banda ancha.

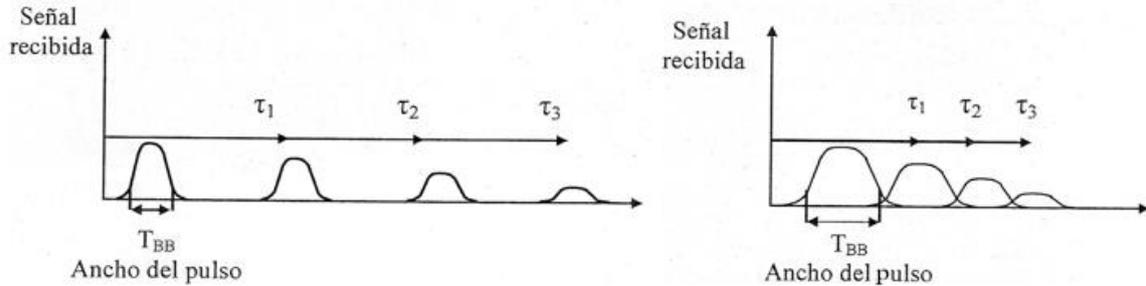


Figura 14: Réplicas recibidas al transmitirse un pulso de corta duración (izquierda). Réplicas con aliasing en recepción al enviar un pulso de larga duración [9].

El perfil de retardo de potencia (PDP) se define como la media de los módulos al cuadrado de distintas respuestas impulsionales cronovariantes tomadas en diferentes puntos cercanos. Es posible obtener cada respuesta impulsional mediante la transformada de Fourier inversa de la respuesta en frecuencia del canal en el punto correspondiente:

Respuesta impulsional: 
$$h(\tau) = TF^{-1}[H(f)] \quad (15)$$

Perfil de retardo de potencia: 
$$\tau = |h(t,\tau)|^2 \quad (16)$$

Siendo  $\tau$  el retardo desde la generación del impulso a la respuesta del canal. El PDP mide la densidad de potencia que depende del tiempo y del retardo en un canal multicamino. A partir de este parámetro se obtiene la dispersión temporal, caracterizada por el retardo medio que sufren las réplicas en su propagación hasta el receptor, en valor cuadrático medio (RMS<sup>17</sup>), que da una idea del ensanchamiento del retardo medio en torno al exceso de retardo medio (primer momento del PDP), es decir, la cantidad y potencia de las réplicas, y el exceso de retardo máximo, que indica el intervalo en que la energía supera un valor de energía concreto.

Retardo medio:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (17)$$

<sup>17</sup> Valor RMS (Root Mean Square): Se denomina también valor eficaz al valor cuadrático medio de una magnitud eléctrica.

RMS del ensanchamiento del retardo del PDP:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad \text{siendo} \quad \overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (18)$$

Los parámetros anteriores dependen del umbral de ruido. Este umbral discernirá los valores de potencia considerados como ruido, de los valores de potencia de las réplicas.

Con generalidad, la caracterización completa del canal implica que en su estudio se barra un gran ancho de banda, de modo que se caractericen adecuadamente sus parámetros tanto temporales como frecuenciales. A continuación se estudian brevemente algunos equipos que permiten realizar mediciones del canal radio en banda ancha [9].

### *Sondeo de canal en el dominio de la frecuencia*

El sondeo de canal se realiza aprovechando la dualidad entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Se basa en el uso de un analizador de redes para la generación de una señal, compuesta por un rango de frecuencias discretas centradas en la frecuencia de una portadora. La amplitud de este rango y el espaciado entre cada una de ellas determinará la resolución del sistema medido.

Este sondeo precisa de un cable de RF entre transmisor y receptor, además de una calibración cuidadosa, ya que dicho cable puede introducir atenuación y cambios de fase en la señal.

De forma esquemática, este proceso se resume en:

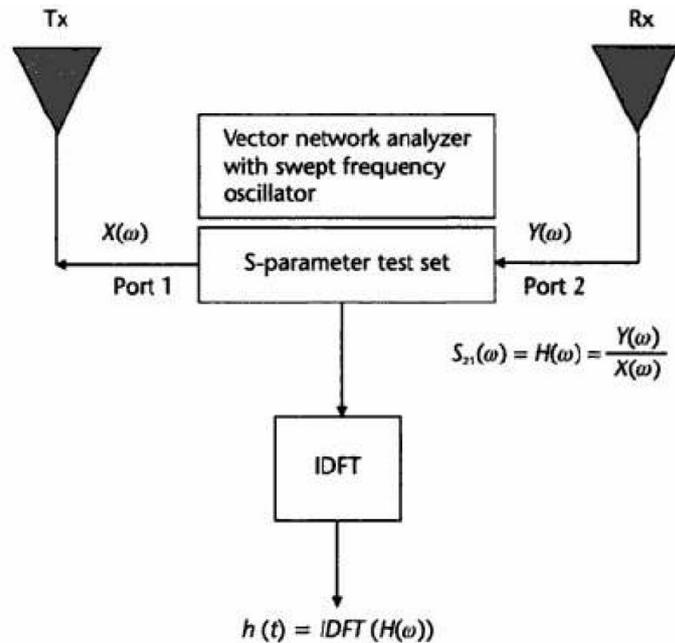


Figura 15: Esquema de funcionamiento del sistema de medida "Frequency domain channel sounding" [9].

De esta forma, el analizador de redes envía una señal conocida a través del transmisor, el receptor la recoge y se mide, en el dominio de la frecuencia, el parámetro  $S_{21}$ <sup>18</sup>, que permite construir la función de transferencia,  $H(f)$ . Gracias a la calibración, se consigue tener en cuenta, únicamente los efectos del canal. Con la transformada inversa de Fourier se podrá transformar dicha función al dominio del tiempo  $h(\tau)$ .

### Sistema de pulsos directos de RF

Otro sistema de medida del canal radio en banda ancha es el sistema de pulsos directos de RF<sup>19</sup>. Como se ha explicado anteriormente, la función del transmisor de este sistema consiste en el envío de un pulso de corta duración  $T_{BB}$  con un determinado periodo de repetición  $T_{REP}$ , según se muestra en la siguiente figura.

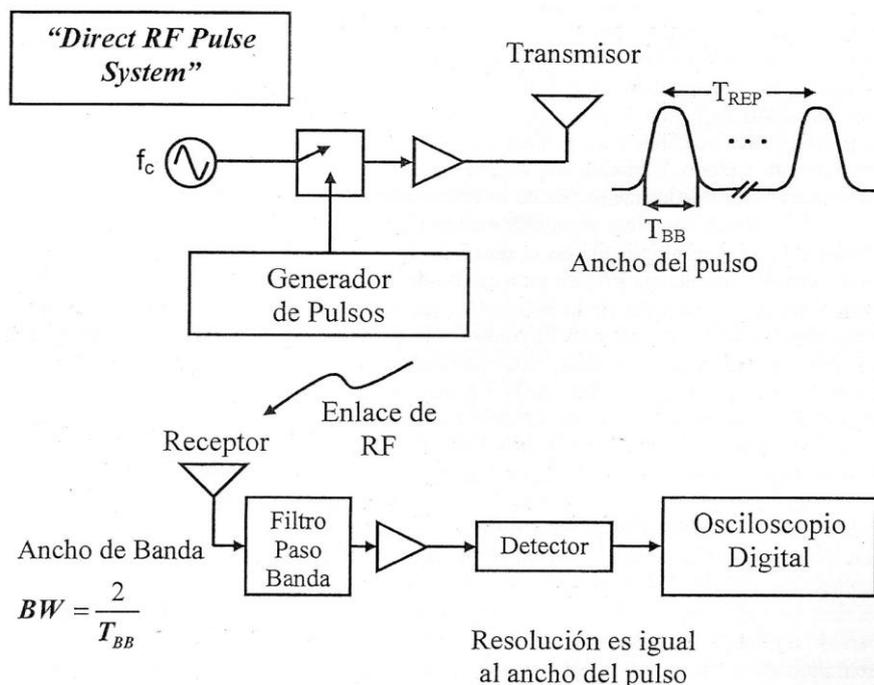


Figura 16: Esquema de funcionamiento del sistema de medida "Direct RF pulse system" [9].

El receptor capta la señal alterada por el canal, compuesta por réplicas de la señal transmitida. Posteriormente, el filtro paso banda selecciona una banda de anchura

<sup>18</sup> Los parámetros S (de Scattering o dispersión) son utilizados en la caracterización de redes con el fin de relacionar las potencias incidentes y reflejadas. Estos parámetros de dispersión son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada, que describen el comportamiento de un dispositivo bajo condiciones lineales en determinado rango de frecuencia. A pesar de ser aplicables a cualquier frecuencia, los parámetros S son usados principalmente para redes que operan en radiofrecuencia (RF) y frecuencias de microondas [10]. En concreto, el parámetro  $S_{21}$  representa la ganancia de transmisión directa, es decir, la potencia transmitida desde la entrada a la salida de la red.

<sup>19</sup> Direct Radiofrequency Pulse System.

$BW = 2/T_{BB}$  [Hz]. Este ancho de banda del filtro será grande al ser la duración del pulso  $T_{BB}$  reducida. Dicho filtrado, elimina el ruido situado fuera del ancho de banda seleccionado. Seguidamente, la señal es amplificada y detectada mediante un detector de envolvente. En la última fase del proceso, la señal es almacenada y visualizada en un osciloscopio. Este método posibilita una medida inmediata del cuadrado de la respuesta al impulso del canal convolucionado con el pulso transmitido. Dado que el pulso es prácticamente un impulso, como ya se explicó, la señal obtenida es la respuesta al impulso.

El retardo mínimo resoluble es igual a la duración del pulso  $T_{BB}$ . Si dos réplicas poseen retardos con una relación  $\tau_i - \tau_j$  menor que  $T_{BB}$ , no se podrá discernir entre ellas, detectándose una única réplica compuesta por las dos.

Las principales ventajas de este sistema de medida se basan en su sencillez, inmediatez y precio económico. Además, permite estimar la media del PDP en un área local, con la selección del modo media (“average”). Por otro lado, en cuanto a las desventajas, este sistema es propenso a sufrir perturbaciones como interferencias o ruido, dado el gran ancho de banda del filtro inicial. Otra desventaja de este sistema consiste en su incapacidad para medir las fases de las componentes multicamino, debido al uso del detector de envolvente.

### ***Sistema de correlación y desplazamiento de espectro ensanchado***

Este sistema utiliza la técnica de ensanchado espectral para solucionar ciertos inconvenientes del método anterior. En el empleo de esta técnica se puede utilizar un filtro paso banda de ancho de banda reducido, que rechazará gran parte del ruido e interferencias que previamente no eran eliminados. Además, la señal final detectada en el osciloscopio posee un ancho de banda pequeño, por lo que su almacenamiento será más sencillo. Actualmente, esta ventaja no es tan relevante como hace unos años, ya que se dispone de discos duros y memorias sólidas de gran capacidad.

El sistema completo se muestra en la figura 17. La señal portadora  $CW^{20}$  es multiplicada en el dominio del tiempo por una secuencia de ruido pseudoaleatorio (secuencia PA) de gran ancho de banda. El periodo de la señal CW es T, mientras que el periodo de la señal PA, denominado periodo de chip  $T_c$ , es mucho menor que T. Esta multiplicación produce un ensanchamiento de la señal resultante en el dominio de la frecuencia. La señal ensanchada resultante es transmitida a través del canal, en el cual existen señales interferentes y ruido aditivo a lo largo de toda la banda frecuencial.

En el receptor, la antena capta la señal compuesta por réplicas de la transmitida, ruido e interferencias. Un primer filtro de ancho de banda considerable  $BW = 2R_c = 1/T_c$ , selecciona la porción adecuada de la señal ensanchada. Seguidamente, en el mezclador, la señal filtrada se multiplica por la misma secuencia PA empleada en el transmisor con el objetivo de recuperar la señal CW inicial. Debido al efecto del canal a medir, no se recuperará una única señal original, sino varias réplicas de ella. El producto con la

---

<sup>20</sup> Se emplean señales portadoras de onda continua (CW, Continuous Wave).

secuencia PA conlleva un desensanchado de la señal original y de sus réplicas como se muestra en la figura. Además, las señales interferentes y el ruido aditivo son igualmente ensanchados en el producto mencionado. Así, gracias a un filtro paso banda de banda estrecha es sencillo eliminar gran parte de las interferencias y ruido. Finalmente, la señal filtrada se detecta en un detector de envolvente y se muestra y almacena en un osciloscopio.

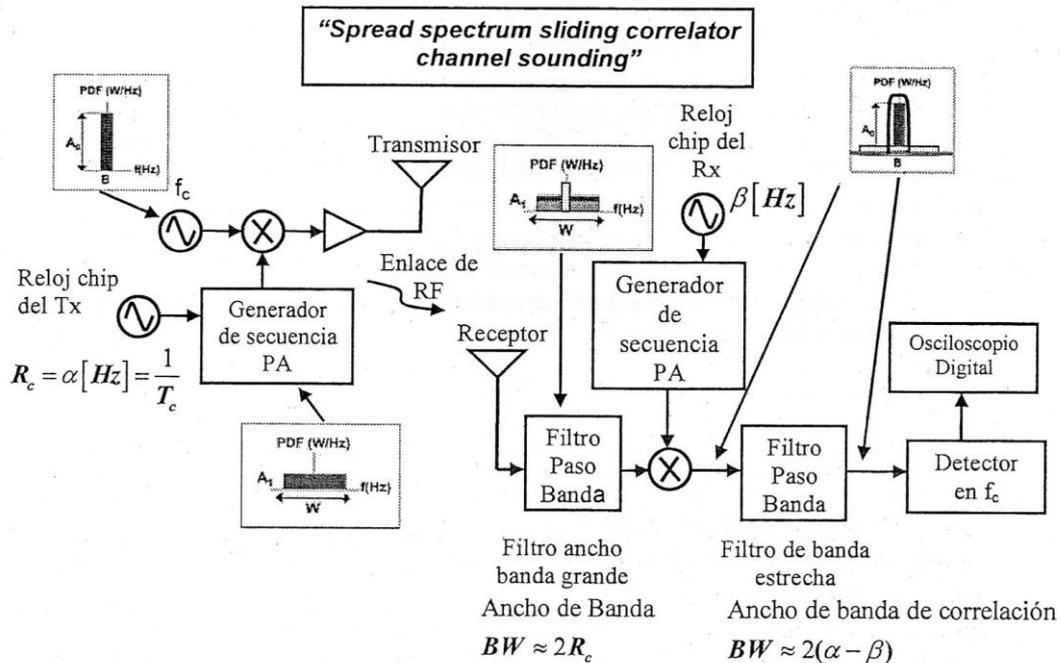


Figura 17: Esquema de funcionamiento del sistema de medida "Spread Spectrum sliding correlator channel sounding" [9].

Cabe destacar que el reloj de la secuencia PA del transmisor funciona a frecuencia  $\alpha$  [Hz], sutilmente más rápida que la frecuencia del receptor  $\beta$  [Hz]. Por este motivo, el desensanchado se da cada cierto periodo de tiempo, cuando el reloj del receptor coincide con el reloj de una réplica multicamino. En ese instante, la correlación entre la secuencia PA de transmisión y recepción aumentará. Cada réplica de la señal transmitida se representará como un máximo de correlación. A mayor retardo, mayor será la diferencia entre la secuencia PA transmitida y la secuencia PA generada en el receptor, por lo que la correlación tendrá menor amplitud en este caso. La primera réplica tendrá el mayor máximo de correlación, que irá decrementando en las sucesivas réplicas. La diferencia de frecuencias de los relojes produce una dilatación del tiempo de medida. Las réplicas parecen estar separadas un retardo mayor del real. Por tanto, la señal final almacenada debe ser procesada para obtener el PDP real.

El primer sistema descrito en este apartado, es decir, el sondeo del canal en el dominio de la frecuencia, no extrae directamente la función  $h(t, \tau)$ , sino su respuesta frecuencial. En cambio, en los otros dos casos sí se emplea dicha función para el estudio tanto temporal como frecuencial de las características del canal radio.

Considerando el comportamiento aleatorio, tanto en amplitud como en fase, de las réplicas multicamino, la potencia recibida será, consecuentemente, una función aleatoria. Por tanto, estos sistemas de banda ancha deben ser empleados en campañas de medidas realizadas en áreas locales, es decir, su operación se ajusta adecuadamente a las características de entornos interiores<sup>21</sup>. En caso de que el pulso sea lo suficientemente pequeño, la medición de potencia total del PDP se obtiene a partir del sumatorio de las potencias medias de las N componentes multicamino, según muestra la siguiente expresión.

$$E_{a,\theta} [P] = E_{a,\theta} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} |a_i e^{j\theta_i}|^2 \right] \approx \sum_{i=0}^{N-1} \overline{a_i^2} \quad (19)$$

Donde  $a_i$  es la potencia relativa a cada réplica y  $\theta_i$  el ángulo con el que es recibida.

---

<sup>21</sup> Según el standard IEEE 802.15.3c los entornos indoor se clasifican en 5 categorías: residencial, oficina, biblioteca, escritorio y quiosco [18]. Las aplicaciones tecnológicas de ondas milimétricas (ver *Tabla 1*) se aplican fundamentalmente a estos entornos interiores o a comunicaciones cortas de altas tasas de datos.

## Capítulo 3: Radiopropagación en entornos urbanos

### 3.1. Introducción

En las últimas décadas, las comunicaciones móviles han experimentado un crecimiento exponencial que ha hecho necesario el desarrollo de métodos capaces de caracterizar la propagación a través del canal radio. Además, en la planificación y replanteo de los sistemas tanto de radiocomunicaciones como de comunicaciones móviles, se emplean modelos de propagación que permiten predecir las coberturas en diferentes entornos (urbanos, suburbanos o rurales). Uno de los parámetros a tener en cuenta en el estudio de estos modelos es la variabilidad de propagación [23], según la cual la potencia recibida varía en función del tiempo y la distancia.

En el caso de los entornos urbanos, se emplean una serie de modelos de propagación [23], como son: Okumura-Hata, COST-231 y Walfish-Bertoni; que serán brevemente descritos en este capítulo. Dichos modelos permiten predecir las coberturas radio y, por tanto, diseñar el sistema de medidas que se pretende en base a ellos.

Además, en este capítulo se hará un repaso de la evolución de las comunicaciones móviles desde 1G hasta 5G, abordando las principales prestaciones de cada uno de estos sistemas.

### 3.2. Modelos de propagación

El modelado del entorno urbano no es tarea fácil debido a la multitud de elementos de propagación que se dan en el camino de propagación entre transmisor y receptor y que dificultan la predicción de pérdidas en la señal transmitida. Normalmente, los entornos urbanos son modelados mediante el uso de micro o macrocélulas, la diferencia estriba principalmente en el tamaño de las células en las que se reparte el área a cubrir por el sistema de comunicaciones móviles, y en el método empleado para evaluar las pérdidas.

Este apartado se centra principalmente en los modelos de entornos urbanos macrocelulares. Dentro de una macrocélula existen centenares de obstáculos que producen muy diversos efectos sobre la señal que llega al receptor, dichos efectos han sido estudiados en el capítulo 2. El efecto multicamino es por tanto, mucho más importante que en los entornos rurales. Los modelos iniciales para el cálculo de coberturas radioeléctricas en entornos urbanos incorporaban procedimientos empíricos para la estimación de las pérdidas básicas de propagación y la intensidad de campo recibida. Con posterioridad aparecieron modelos que incorporaban soluciones teóricas para ciertos mecanismos de propagación, es decir, modelos semi-empíricos. La totalidad de estos modelos tienen en cuenta una única contribución.

Los modelos que vamos a estudiar en esta sección [12] son los siguientes: el modelo de Okumura-Hata, Walfish-Bertoni y el COST-231 (también conocido como Walfisch-Ikegami). El primero es un modelo empírico mientras que los otros dos son semi-empíricos.

Los modelos de propagación en entornos urbanos utilizan modelos digitales del terreno (MDT) que simulan el cluster de la estructura urbana (calles, edificios,...) en el entorno bajo estudio. A mayor calidad del modelo digital del terreno, el modelo de propagación será más realista y preciso, pero a la vez más complejo.

### 3.2.1. Modelo de Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata es uno de los modelos más ampliamente utilizados para la predicción de pérdidas de señal en áreas urbanas. De naturaleza empírica, este modelo no tiene en cuenta el entorno real del receptor, solo parcialmente el grado de urbanización; y se puede aplicar en un amplio margen frecuencial (desde 150 MHz hasta 3 GHz) y en distancias entre 1 y 100 Km, pudiendo variar la altura de la estación base entre los 30 y 1000 metros.

Inicialmente, el método de Okumura empleaba en una serie de curvas de las cuales se extraían valores de la intensidad de campo en medios urbanos. Estas curvas estándar de propagación fueron diseñadas a partir de una campaña de medidas efectuada en Japón. La información obtenida de las curvas era completada por una serie de correcciones con el fin de tener en cuenta factores como la ondulación, pendiente y homogeneidad del terreno, presencia de obstáculos, altura de la antena receptora, potencia radiada aparente, orientación de calles o grado de urbanización. El modelo de Okumura está completamente basado en datos medidos y no proporciona ninguna explicación analítica. A pesar de ello, está considerado uno de los modelos más simples y precisos en la predicción de pérdidas en entornos celulares. La principal desventaja de este modelo es su lenta respuesta a cambios bruscos del terreno, por tanto, es un modelo notablemente bueno para entornos urbanos y suburbanos, pero no tanto para entornos rurales. Por otra parte, las desviaciones entre los valores predichos y medidos suelen oscilar entre 10 y 14 dB, errores debidos a que se trata de un modelo empírico.

Posteriormente, Hata desarrolló expresiones numéricas para las curvas de propagación de Okumura. Así, la fórmula para pérdidas de propagación en áreas urbanas viene dada por:

$$L_b(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{\text{Tx}}) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{\text{Tx}})) \log_{10}(d) \quad (20)$$

siendo:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_{\text{Rx}} - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (21)$$

donde:

- $f$  es la frecuencia en MHz, dentro del rango 150 - 1500 MHz.
- $h_{TX}$  es la altura efectiva de la antena transmisora, en metros, perteneciente al rango 30 - 200 metros. La altura efectiva es la altura del centro de radiación de la antena sobre el nivel medio del terreno.
- $h_{RX}$  es la altura efectiva de la antena receptora, en metros, en el rango 1 – 10 metros.
- $d$  es la distancia, en kilómetros, entre el transmisor y el receptor, entre 1 y 20 Km.

Según se deduce de las ecuaciones anteriores, Okumura-Hata solo tiene en cuenta el grado de urbanización, pero no la estructura real del área urbana en la se calculan las pérdidas. Este modelo no considera ni la altura de los edificios, ni la separación entre ellos, ni la anchura de las calles, entre otras características del área urbana que no se tienen en cuenta. Al ser un modelo empírico, supone que todos estos parámetros del medio de transmisión quedan englobados en las curvas y ecuaciones que los aproximan.

### 3.2.2. Modelo de Walfisch-Bertoni

Este modelo incorpora en el cálculo de las pérdidas de propagación la influencia de los edificios, concretamente, su altura y separación. Los estudios analíticos de este modelo parten de un entorno de propagación como el de la figura 18. Según Walfisch-Bertoni el camino principal de la señal incidente corresponde a la traza 1-2. El hecho de que la traza sea discontinua representa un rayo que se difracta en los tejados de los edificios de las cercanías al receptor. Otros mecanismos de propagación son posibles, como la propagación a través de un edificio de la traza 3 o las múltiples difracciones del trayecto 4. Sin embargo, estas contribuciones son generalmente despreciables y el modelo no las tiene en cuenta [24].

De este modo, el modelo incluye tres factores de pérdidas [19]:

- Pérdidas debidas a espacio libre.
- Pérdidas debidas a la obstrucción de la señal incidente por parte de los tejados de los edificios, a este factor se le denomina propagación sobre los edificios.
- Pérdidas provocadas por la difracción desde los tejados cercanos a la calle donde se ubica el receptor.

El aspecto esencial de este modelo consiste en el cálculo de las pérdidas por difracción en los tejados. El modelo representa los edificios como una serie de cilindros difractantes que se comportan como una fila de pantallas absorbentes (modelo de arista o filo de cuchillo). Esta representación será precisa si los edificios poseen una misma altura ( $h$ ), relativamente grande, y están dispuestos en forma de rejilla uniforme, con calles paralelas. En cada fila, los edificios se hallan separados por un ancho menor que el de los propios edificios. Por ello, el modelo funciona correctamente en las zonas de ensanche de

las ciudades. El rango de valores donde puede ser aplicado el modelo de Walfisch-Bertoni es:

- La frecuencia debe estar comprendida entre 300 MHz y 3 GHz.
- La altura de la antena transmisora debe ser tal que la antena se encuentre por encima del tejado de los edificios.
- La distancia entre el transmisor y el receptor debe estar comprendida entre los 200 metros y los 5 Km.

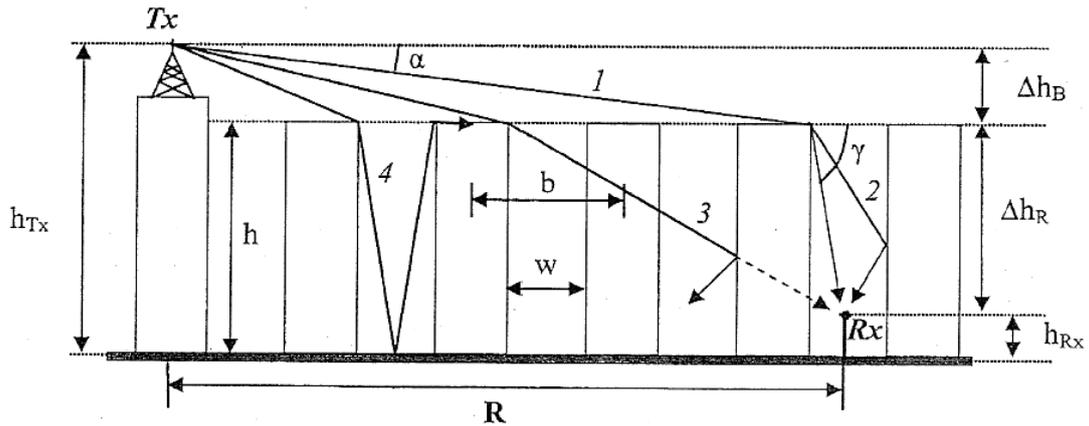


Figura 18: Entorno de propagación, elementos y contribuciones en el modelo de Walfisch-Bertoni [9].

El modelo de Walfisch-Bertoni asume que las antenas en los dos extremos son isótropas. En este caso, las pérdidas de espacio libre se obtienen con la siguiente expresión, adecuada para los rangos de los parámetros anteriormente citados:

$$L_0(\text{dB}) = 32.4 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(R) \quad (22)$$

donde  $f$  se expresa en MHz y  $R$  es la distancia entre transmisor y receptor en Km.

Para el cálculo de las pérdidas de propagación sobre los edificios se utiliza el factor  $Q(\alpha)$  que se define como [24]:

$$Q(\alpha) = 0.1 \left( \frac{\alpha \sqrt{b/\lambda}}{0.03} \right)^{0.9} \quad (23)$$

donde  $b$  es la distancia media entre edificios en el perfil que une al transmisor y al receptor como se puede apreciar en la figura 18. El ángulo  $\alpha$  se expresa en radianes y se calcula mediante la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{h_{Tx} - h}{R} - \frac{R}{2R_e} = \frac{\Delta h_B}{R} - \frac{R}{2R_e} \quad (24)$$

donde  $\Delta h_B$  es la diferencia entre la altura del transmisor ( $h_{Tx}$ ) y la altura media de los edificios ( $h$ ) en metros y  $R_e$  es el radio efectivo de la Tierra ( $8.5 \cdot 10^3$  Km).

Los edificios cercanos a la calle del receptor influyen en las pérdidas adicionales debidas a la difracción desde el tejado cercano al receptor. Se asume que la fila de edificios cercanos actúa como una pantalla (arista) absorbente localizada en el centro de la fila. En este caso, la amplitud del campo en el receptor se obtiene mediante el producto del campo en el tejado por el siguiente factor.

$$\frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (h - h_{Rx})^2 \right]^{-\frac{1}{4}} \left[ \frac{-1}{\gamma - \alpha} + \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha} \right] \quad (25)$$

donde las alturas se expresan en metros,  $\alpha$  y  $\gamma$  en radianes con:

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{2(h - h_{Rx})}{b} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2\Delta h_R}{b} \right) \quad (26)$$

La ecuación 25 se simplifica al despreciar el término  $1/(2\pi + \gamma - \alpha)$  frente al término  $1/(\gamma - \alpha)$ . Las pérdidas totales por difracción (exceso de pérdidas respecto a las de espacio libre) se obtienen al combinar las ecuaciones 23 y 26:

$$L_{ex}(\text{dB}) = 57.1 + A + \log_{10}(f) + 18 \log_{10}(R) - 18 \log_{10} \left[ 1 - \frac{R^2}{17\Delta h_B} \right] \quad (27)$$

El término A contiene la contribución de la geometría de los edificios:

$$\begin{aligned} A(\text{dB}) &= 5 \log_{10} \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (h - h_{Rx})^2 \right] - 9 \log_{10}(b) + 20 \log_{10} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{2(h - h_{Rx})}{b} \right) \right] \\ &= 5 \log_{10} \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (\Delta h_R)^2 \right] - 9 \log_{10}(b) + 20 \log_{10} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{2\Delta h_R}{b} \right) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

donde  $\Delta h_R$  es la diferencia entre la altura media de los edificios ( $h$ ) y la altura del receptor ( $h_{Rx}$ ).

Finalmente, las pérdidas totales son la suma de las pérdidas de difracción de la ecuación 28 más las pérdidas en espacio libre de la ecuación 22.

$$L(\text{dB}) = L_0 + L_{ex} = 89.55 + A + 21 \log_{10}(f) + 38 \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(\Delta h_B) - 18 \log_{10} \left[ 1 - \frac{R^2}{17\Delta h_B} \right] \quad (29)$$

### 3.2.3. Modelo de Walfisch-Ikegami o COST-231

Este modelo predicción de las pérdidas de propagación en un medio urbano está basado en los modelos de Walfisch-Bertoni y de Ikegami [24]. Su objetivo es el de mejorar la predicción de las pérdidas en el modelo de la figura 18. Dicha mejora es obtenida incorporando al anterior modelo correcciones empíricas para nuevos factores:

- Orientación de la calle respecto a la dirección de la línea que une transmisor y receptor.
- Anchura de las calles.
- Transmisión por debajo de los edificios, especialmente cuando la antena transmisora se halla dispuesta a una altura inferior a la de los tejados.
- Márgenes de distancia al transmisor y tipo de entorno urbano.

Este modelo fue desarrollado por el Grupo Europeo de trabajo COST-231, y se basa en la teoría de rayos con óptica geométrica ( $GO^1$ ) y análisis de la difracción, complementados con correcciones obtenidas mediante campañas de medidas. Para el cálculo de las pérdidas de propagación, este método supone una estructura idealizada de las ciudades con valores promedio para la altura y anchura de edificios, así como para la anchura de las calles. Las pérdidas de propagación se producen debido a la difracción en los tejados de los edificios situados en el trayecto estación base-móvil, y en la dispersión causada por los edificios más próximos al móvil.

El modelo supone que hay un rayo dominante, T-P, que se propaga desde la antena transmisora hasta el edificio más próximo al receptor, por encima de los edificios situados entre ambos. Este rayo se difracta en el último edificio y origina dos componentes: P-R, que llega directamente al receptor, y P-Q-R, que lo hace tras una reflexión en el edificio opuesto.

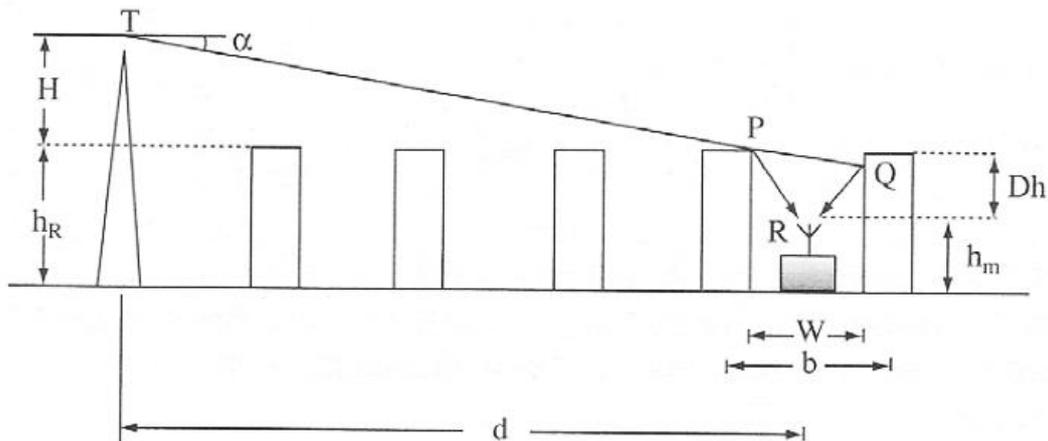


Figura 19: Cálculo de las pérdidas de propagación mediante el modelo COST-231 [23].

<sup>1</sup> GO: Geometrical Optics.

Las ondas que llegan desde la antena transmisora hasta el punto P sufren una pérdida por difracción debida a la proximidad entre el rayo T-P y los edificios existentes entre T y P. Este conjunto de edificios se modela como pantallas difractantes separadas entre sí una distancia constante “b” igual a la separación media entre edificios. Finalmente, llegan al receptor dos rayos: el P-R, difractado en P, y el P-Q-R, difractado en P y reflejado en Q.

Para la caracterización del entorno urbano, el método COST-231 utiliza los siguientes parámetros [23]:

- $h_B = H + h_R$ , altura de la antena transmisora sobre el suelo, en metros, dentro del rango 4 - 50 m.
- $h_R$ , altura media de los edificios, en metros.
- $h_m$ , altura de la antena receptora, en metros, entre 1 y 3 m.
- b, separación media entre edificios.
- d, distancia entre el transmisor y el receptor, en el rango de 20 m a 5 km.
- w, anchura media de las calles, en metros.
- $\alpha$ , ángulo de inclinación del rayo, en grados.
- Válido para frecuencias de 800 a 2000 MHz.

La fórmula para calcular las pérdidas de propagación según este método es la siguiente [3]:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (30)$$

siendo:

- $L_0$ , las pérdidas en espacio libre, en dB.
- $L_{rts}$ , las pérdidas por difracción y dispersión del tejado a la calle, en dB.
- $L_{msd}$ , las pérdidas por difracción multipantalla, en dB.

Las pérdidas en condiciones de espacio libre se calculan de la forma [23]:

$$L_0 = 32.45 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (31)$$

Las pérdidas por difracción y dispersión del tejado a la calle vienen dadas por [23]:

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log_{10} w(m) + 10\log_{10} f(\text{MHz}) + 20\log_{10} \Delta h_R(m) + L_{ori} \quad (32)$$

donde  $\Delta h_R = h_R - h_m$  y  $L_{ori}$  son las pérdidas debidas a la orientación de la calle, que dependen del ángulo  $\varphi$  entre el rayo directo y el eje de la calle, de esta forma [23]:

$$L_{ori}(dB) = \begin{cases} -10 + 0.3593\varphi & 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 35) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (33)$$

Si el valor de  $L_{rts}$  es menor de cero se toma  $L_{rts} = 0$ .

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (34)$$

Los parámetros que intervienen en esta expresión se calculan según la fórmula:

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_B) \quad (35)$$

$$\text{siendo: } \Delta h_B = h_B - h_R \quad \text{Si } \Delta h_B < 0 \rightarrow L_{bsh} = 0 \quad (36)$$

Las constantes  $k_a$  y  $k_d$  se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0.8\Delta h_B & \Delta h_B < 0 \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 1.6\Delta h_B / d & \Delta h_B < 0 \text{ y } d < 0.5 \end{cases} \quad (37)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_B}{h_R} & \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (38)$$

Para el caso de ciudades de tamaño medio y entornos suburbanos, el término  $k_f$  viene dado por:

$$k_f = -4 + 0.7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad (39)$$

Por otro lado, para grandes centros urbanos, se obtiene de la siguiente manera:

$$k_f = -4 + 1.5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad (40)$$

### 3.3. Evolución y comparación de las tecnologías móviles

El enorme crecimiento experimentado por las comunicaciones móviles en los últimos, tanto en número de usuarios como en tecnologías empleadas, es algo por todos conocido y una consecuencia una sociedad contemporánea, en la que cada habitante o usuario, demanda cada vez sistemas más avanzados que satisfagan sus necesidades.

Para una mejor comprensión de los sistemas de comunicación móviles actuales, es necesario entender la evolución que han tenido desde sus orígenes. Por ello, en este apartado se presenta un breve repaso de los distintos sistemas de comunicaciones móviles existentes a lo largo de la historia. Los distintos grados de evolución de la telefonía móvil reciben el nombre de generaciones, y son presentadas junto con sus principales características en este apartado.

1G	2G	3G	4G	5G
				?
1970 - 1990	1991 - 2000	2001 - 2010	> 2010	> 2020
Señal analógica	Señal digital	1ª banda ancha móvil	Protocolos basados en IP(LTE) Red de redes (UMTS)	Nuevo RAT/RAN (Tecnología y Red de Acceso Radio)
Tecnología AMPS	Tecnología GSM GPRS(2.5G) EDGE(2.75G)	Itinerancia global de datos(Roaming) Era smartphone	Banda ancha móvil y de datos MIMO OFDM CDMA	Conectividad ubícuca
Transmisión de voz, pero no datos	Servicio SMS, MMS, Email, Web, TDMA	CDMA	Eficiente en costes comparado con 3G	Mayor capacidad y velocidad CDMA
FDMA	Incorporación de cámara en terminales 2.5G	Servicio Web, TV y acceso multimedia, videoconferencia, Era Smartphone, Roaming	Evolución de 4G: LTE-A Mayor QoS	Incluirá las redes 4G M2M

Tabla 2: Evolución de las tecnologías empleadas en comunicaciones móviles.

### 3.3.1. Telefonía móvil de primera generación: 1G

En la década de los 70 surge la primera generación de comunicaciones móviles celulares [12], que contaba con sistemas analógicos basados en modulación de frecuencia y acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). Estos sistemas estaban capacitados para ofrecer servicios de comunicación de voz sobre conmutación de circuitos.

En 1981, el fabricante Ericsson lanza el sistema NMT 450 (Nordic Mobile Telephony 450 MHz). Este sistema, que empleaba canales de radio analógicos (frecuencias alrededor de los 450 MHz) junto con modulación en frecuencia (FM), fue el primero del mundo de telefonía móvil tal y como se entiende hasta hoy en día.

En 1986, la primera generación consiguió un nuevo avance mediante la comercialización del NMT 900, una versión mejorada del NMT 450, con funcionamiento análogo a éste pero que trabajaba a frecuencias superiores (del orden de 900 MHz). Gracias a esta mejora, se pudo dar servicio a un mayor número de usuarios y avanzar en la portabilidad de los terminales.



Figura 20: Equipo 1G Ericsson NMT 450 [25].

### 3.3.2. Telefonía móvil de segunda generación: 2G

La implantación de los sistemas de segunda generación comenzó a darse a principios de los años 90, introduciendo como innovación la utilización de señales digitales, por lo que mejoró la calidad de la señal, además del empleo de protocolos de seguridad y encriptación de datos [12]. Otra característica que diferenciaba a estos sistemas de los de la primera generación era la multiplexación del canal. Los sistemas 2G empleaban tanto la técnica de acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA) como por división en el tiempo (TDMA), tal que cada frecuencia era dividida en ocho ranuras de tiempo (time slots), permitiendo así la compartición del canal por parte de los usuarios.

Inicialmente, los sistemas 2G que se comercializaban trabajaban en la banda de 900 MHz, sin embargo, posteriormente se amplió su uso para la banda de 1800 MHz.

El estándar 2G europeo de telefonía móvil digital fue denominado GSM (Global System for Mobile Communications). Este estándar utiliza las bandas de frecuencia de 900 MHz y de 1800 MHz en Europa. Sin embargo, en Estados Unidos la banda de frecuencia utilizada es la de 1900 MHz. Se trata de un estándar abierto y evolutivo, convirtiéndose en el sistema de 2G de mayor éxito en el mundo.

A comienzos de la década de los 80, en Europa operaban nueve estándares de telefonía móvil celular incompatibles entre sí. Este hecho motivó que la CEPT (Conference of European Post and Telecommunications), en 1982, se marcara como objetivo la definición de un estándar común, para lo que creó un grupo de trabajo denominado Groupe Spécial Mobile (GSM), cuya tarea era desarrollar un estándar europeo de telefonía móvil digital.

Durante la década de los 90 se desarrollaron dos nuevas versiones del estándar: DCS1800<sup>2</sup> (denominado también GSM1800), que se ha empleado principalmente en Europa, y PCS1900<sup>3</sup> (o GSM1900), con gran presencia en América del Norte. La mayor novedad introducida por ambos estándares fue el uso de celdas de cobertura de menor tamaño que su predecesor para obtener mayor capacidad del sistema. De manera paralela, se cambió el nombre del grupo a Standard Mobile Group (SMG) y las siglas GSM a partir de este momento se usaron para el propio estándar.

Otro de los aspectos más destacados de GSM es el empleo del denominado Subscriber Identity Module (SIM), una tarjeta que almacena la información e identidad del cliente, y que incluye además la clave secreta para la autenticación y encriptado. El empleo de las tarjetas SIM asociadas a un usuario determinado permite que el cliente pueda cambiar fácilmente de terminal simplemente intercambiando su tarjeta SIM.

Entre los factores de éxito que condujeron a la rápida adopción de esta tecnología en todos los países europeos, con tasas de penetración que superan el 90%, suele citarse el enorme apoyo que obtuvo desde el marco regulatorio europeo. La implantación de GSM y de las tecnologías de la segunda generación para el año 2000 se había incrementado notablemente hasta llegar a implantarse en numerosos países a lo largo del mundo.

El sistema GSM [12] basa su división de acceso al canal en combinar los siguientes métodos de reparto del espectro disponible. El primero es determinante a la hora de especificar la arquitectura de red, mientras que el resto se resuelve con circuitería en los terminales y antenas del operador:

- Empleo de celdas contiguas a distintas frecuencias para repartir mejor las frecuencias (SDMA, Space Division Multiple Access o acceso múltiple por división del espacio); reutilización de frecuencias en celdas no contiguas.

---

<sup>2</sup> DCS: Digital Cellular Service.

<sup>3</sup> PCS: Personal Communication Service.

- División del tiempo en emisión y recepción mediante TDMA (Time Division Multiple Access, o acceso múltiple por división del tiempo).
- Separación de bandas para emisión y recepción y subdivisión en canales radioeléctricos (protocolo FDMA, Frequency Division Multiple Access o acceso múltiple por división de la frecuencia).
- Variación pseudoaleatoria de la frecuencia portadora de envío de terminal a red (FHMA, Frequency Hopping Multiple Access o acceso múltiple por saltos de frecuencia).

El interfaz de radio de GSM se ha implementado en diferentes bandas de frecuencia. En GSM900 se utilizan dos bandas de 25MHz para transmitir y para recibir. La banda de 890-915 se usa para las transmisiones desde el móvil (MS) hasta la estación base (BTS) en el enlace ascendente (uplink) y la banda 935-960MHz se usa para las transmisiones entre la BTS y el MS en el enlace descendente (downlink). Las bandas de frecuencias superiores e inferiores se dividen en canales de 200KHz llamados ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number). GSM emplea por lo tanto dos canales de 200 KHz para ofrecer la comunicación en ambos sentidos, permitiendo hasta ocho comunicaciones simultáneas utilizando la misma frecuencia.

En España y numerosos países de Europa, se utilizan mayoritariamente las bandas de frecuencia de 900MHz y 1800MHz. Es común que las operadoras empleen ambas bandas para transmitir y conmuten el tráfico en función de las circunstancias para así optimizar el rendimiento de la red.

Las principales aplicaciones del sistema GSM son las comunicaciones de voz (mediante conmutación de circuitos) y de datos (mensajes cortos de texto SMS) y permite alcanzar velocidades de transmisión de hasta 9600bps, eso sí, en las mejores condiciones. En zonas rurales, donde las torres de telefonía están muy alejadas, la velocidad puede disminuir notablemente. Para mejorar este rendimiento podríamos necesitar un amplificador GSM. Este estándar es adecuado para utilizar datos móviles con aplicaciones de mensajería o leer e-mails.

Como evolución de GSM surgen tecnologías como GPRS o EDGE, que constituyen las denominadas 2,5G o 2,75G respectivamente.

La segunda generación de comunicaciones móviles trajo consigo nuevos servicios, como el de mensajes cortos (SMS), que inicialmente tuvo poco éxito a pesar de ser gratuito. Otros servicios fueron introducidos, como el acceso WAP a internet, que codifica páginas web en XML, sin embargo, alcanzaba velocidades de transmisión muy bajas (9.6 Kbps aproximadamente), por lo que apareció una nueva generación, 2.5G, denominada GPRS (General Packet Radio Service), que trabajaba a mayores velocidades. En ella, se mantenía el anterior sistema de comunicación de voz, pero comenzó a introducir la conmutación de paquetes en la transmisión de datos, con lo que se ampliaba el ancho de banda para la transmisión de información.

Previa a la tercera generación, surgió un salto intermedio, 2.75G, que recibía el nombre de EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) y de nuevo conseguía un aumento de la velocidad de transmisión de datos sobre el enlace radio de GSM. Las principales mejoras que aportaba EDGE eran: una nueva técnica de modulación, más

eficiente, como la 8-PSK, mecanismos de control y una nueva codificación de canal aplicable tanto a voz como a datos por conmutación de circuitos y de paquetes.

A modo de ejemplo cuantitativo, mientras que GPRS permitía tasas de transmisión de 115 Kbps, (teóricamente de 160 Kbps en la capa física); los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación iniciales alcanzarían tasas de 384 Kbps reales, (teóricamente hasta los 473 Kbps).

### 3.3.3. Telefonía móvil de tercera generación: 3G

En el año 2000, la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones), introdujo de la tercera generación, de telefonía móvil, 3G, con pretensiones de que todos los países empleasen el mismo estándar [4]. Como consecuencia, se creó el organismo del 3GPP (3rd Generation Partnership Project), compuesto por diversas organizaciones que tenían como objetivo definir las especificaciones a nivel mundial de la tercera generación. Este intento de unificación de estándares a nivel mundial resultó fallido, creándose el sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) en Europa y el CDMA 2000 en Estados Unidos.

Pasamos del protocolo GPRS al UMTS [12], a través de la nueva tecnología W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Permitiendo tasas de 384 Kbps para datos entre varios usuarios de manera simultánea. Estas redes 3G (UMTS) siguieron evolucionando para mejorar las tasas de información y llegaron las redes HSPA, HSPA+ ASPA Advanced+ (High-Speed Packet Access) HSDPA (3,5G) y HSUPA (3,75G).

Los niveles de velocidad de transmisión de la información establecida por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) son de 100 Mbit/s para terminales en movimiento y 1Gbit/s para terminales en reposo.

Las especificaciones IMT-2000 de la ITU [14] definieron las características de la tercera generación de telefonía móvil. Las redes de 3G utilizan bandas con diferentes frecuencias a las redes anteriores: 1885 a 2025 MHz y 2110 a 2200 MHz.

Los sistemas 3G proporcionan distintas velocidades teóricas de acceso según la localización y la movilidad. Su estructura está compuesta por varios tipos de celdas [17]:

- *Macrocelas*, con radios de alcance desde 1km hasta 35km para ofrecer cobertura rural y carreteras para vehículos u otros objetos que se mueven a alta velocidad. Velocidad de transmisión de datos a 144 kbps.
- *Microcelas*, con radios entre 50m hasta 1km, ofrece servicio a usuarios fijos o que se mueven lentamente con elevada densidad de tráfico (urbana). Velocidad de 384 kbps.
- *Picoceldas*, con radios de hasta 50m, ofrecen coberturas localizadas en interiores. Velocidades del orden de los 2 Mbps.
- *Femtoceldas*: Estaciones base de menor escala que las anteriores, su radio de cobertura es de varias decenas de metros, comúnmente menor a 20 metros, permitiendo una pequeña área de cobertura con la necesidad de una conexión para

poder enlazarse con la red celular. Se pueden utilizar tanto en ambientes indoor como outdoor, aunque normalmente se usan en interiores, como hogares u oficinas.

Las prestaciones que los sistemas 3G deben ofrecer son:

- Alta velocidad de transmisión de datos :
  - 144 Kbps con cobertura total para uso móvil.
  - 384 Kbps con cobertura media para uso de peatones.
  - 2 Mbps con áreas de cobertura reducida para uso fijo.
- Compatibilidad mundial.
- Compatibilidad de los servicios móviles de 3G con las redes de segunda generación.
- Uso de ancho de banda dinámico, en función de la aplicación.
- Mayor capacidad y uso eficiente del espectro.
- Transmisión simétrica/asimétrica de alta fiabilidad.
- Personalización de los servicios, según el perfil de usuario.
- Servicios dependientes de la posición.
- Incorporación gradual en coexistencia con los sistemas actuales de 2G.
- Soporte tanto de conmutación de paquetes como de circuitos, acceso a Internet (navegación WWW), comercio electrónico, y vídeo y audio en tiempo real.
- Diferentes servicios simultáneos en una sola conexión.
- Calidad de voz como en la red fija.
- Cobertura mundial, con servicios terrestres y por satélite.

El estándar 3G más importante que se usa en Europa, UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles) es uno de los principales sistemas móviles de tercera generación que fue desarrollado en el marco definido por la ITU conocido como IMT-2000. UMTS permite llevar imágenes, gráficos, comunicaciones de vídeo y otra información de banda ancha, así como voz y datos, de manera directa a los usuarios, quienes además, mientras podrán encontrarse en movimiento.

UMTS presenta tres grandes características:

- Velocidad de acceso a internet elevada, la cual también le permite transmitir audio y vídeo en tiempo real.
- Transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas.
- Capacidades multimedia.

Además, UMTS dispone de una variedad de servicios (nuevos y mejorados) muy extensa, entre otras, cabe destacar su facilidad de uso y bajos costes o su rápido acceso.

La implantación de las tecnologías de la tercera generación para el año 2010 se había incrementado notablemente hasta llegar a implantarse en numerosos países a lo largo y ancho del mundo.

### 3.3.4. Telefonía móvil de cuarta generación: 4G

El LTE (Long Term Evolution) supone el siguiente escalón tras la tecnología UMTS (3G), que se presenta como inicio a la cuarta generación de telefonía móvil, o 4G, introduciendo importantes mejoras en cuanto a la gestión de las conexiones de datos y la eficiencia en la transmisión, lo que en último término redundará en redes móviles con alta capacidad para la descarga de datos y con menores costes de operación y mantenimiento [12].

El sistema móvil de cuarta generación fue gestado en la primera década de los años 2000. En 2008, la UIT-R<sup>4</sup> publicó formalmente las especificaciones y requisitos de los sistemas 4G. Esta nueva tecnología está totalmente basada en IP. Los objetivos principales de estos sistemas eran: proporcionar altos niveles de velocidad, calidad, capacidad, seguridad y servicios de bajo coste para voz y datos, multimedia e internet a través de IP. Para usar la red de comunicación móvil 4G, los terminales de los usuarios deben de ser capaces de seleccionar el sistema inalámbrico de destino.

Los estándares que emplea esta nueva generación móvil son Long Term Evolution (LTE) y WiMAX móvil (estándar 802.16m del IEEE), además de las siguientes tecnologías de multiplexación o acceso al medio: OFDM, CDMA, MC-CDMA<sup>5</sup> y LMDS<sup>6</sup>. Gracias a los cuales se obtienen velocidades de hasta 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps cuando el dispositivo permanece inmóvil.

LTE cubre una amplia gama de bandas frecuenciales, empleándose en Europa las bandas 3,7 y 20, que corresponden a las frecuencias 700, 800, 900, 1800 y 2600 MHz [32].

Como ya se ha mencionado, las redes 4G se basan en los protocolos IP así como en tecnologías de rendimiento avanzadas de radio, MIMO<sup>7</sup> y OFDM están basadas completamente en el protocolo IP ya que se unen redes de cable e inalámbricas. De este modo es más eficaz la transferencia de información y se pueden alcanzar los niveles establecidos por la UIT.

Los servicios ofrecidos por las redes de la cuarta generación se enumeran a continuación [32]: acceso web móvil, telefonía IP, TV móvil de alta definición, videoconferencia, televisión 3D, servicio de juegos online, almacenamiento en la nube, gestión de flujos múltiples de difusión, Digital Video Broadcasting (DVB), radio digital o Digital Audio Broadcasting (DAB/DAB+) acceso a información dinámica y dispositivos portátiles.

---

<sup>4</sup>Las Recomendaciones UIT-R, constituyen un compendio de normas técnicas internacionales desarrolladas por el Sector de Radiocomunicaciones de la UIT.

<sup>5</sup>MC-CDMA (Multi Carrier - CDMA): Acceso al medio por división de Código Multi - Portadora.

<sup>6</sup>LMDS (Local Multipoint Distribution Service): Servicio de Distribución Local Multipunto.

<sup>7</sup>MIMO (Multiple Input - Multiple Output): Característica de aquellos sistemas que utilizan múltiples antenas tanto para la transmisión como para la recepción de señales.

Las características de las redes 4G las hacen idóneas para soportar las redes móviles del futuro, sin embargo, han implicado importantes modificaciones en las infraestructuras de los operadores y, al mismo tiempo, se necesitan terminales móviles compatibles, por lo que para su despliegue y funcionamiento se han requerido y se siguen requiriendo, inversiones tanto por parte de los operadores como de los usuarios.

El LTE permite una velocidad teórica de descarga de 300 Mbit/s. La evolución de esta tecnología, conocida como LTE Advanced (LTE-A) presenta asimismo las características necesarias para ser denominada como 4G, al ofrecer velocidades teóricas de hasta 1 Gbit/s para usuarios en una ubicación fija y de 100 Mbit/s para usuarios en movilidad.

Al igual que para las conexiones 3G, hay que tener en cuenta que la capacidad de ancho de banda de las tecnologías móviles de 4G es compartida por todos los usuarios que se encuentran simultáneamente conectados a una misma estación base, y al mismo tiempo la calidad de la conexión depende de la distancia del usuario a la estación y de las interferencias existentes, por lo que las velocidades de descarga individuales para cada usuario pueden variar y, de hecho, tienden a ser menores que los máximos teóricos [17].

### 3.3.5. Telefonía móvil de quinta generación: 5G

Finalmente, se tratará la nueva generación de comunicaciones móviles, 5G, sistema que comenzó a ser investigado en el año 2015 y cuya implantación se prevé para el 2020 [30].

En esta tecnología, el diseño de las capas física y de enlace de datos define la tecnología inalámbrica 5G como una tecnología OWA (Open Wireless Architecture), que pretende introducirnos en una nueva era inalámbrica: la WWW (Wireless-World Wide Web). Para este fin, la capa de red se subdivide en otras dos capas: la capa de red superior, para el terminal móvil y la capa de red inferior, para la interfaz. La totalidad del enrutamiento de este sistema se hace a través del protocolo IP. Además, otro protocolo denominado Protocolo de Transporte Abierto (OTP) tiene gran implicación en la obtención de las elevadas velocidades que alcanzarán los sistemas 5G (hasta 10 Gbps). El OTP es soportado por las capas de sesión y transporte. La función de la capa de aplicación consiste en mantener la calidad de gestión de servicio a través de varios tipos de redes.

Este nuevo sistema tendrá una serie de características que le convertirán en toda una revolución. A continuación se enumeran algunas de ellas [31]:

- Tecnología de multiplexación / acceso: CDMA
- Rendimiento a tiempo real de respuesta rápida, baja fluctuación, latencia y retardo.
- Muy alta velocidad de banda ancha: Velocidades de datos del orden de los Gigabits por segundo, cobertura de alta calidad, multi-espectro.
- Infraestructura virtualizada: Software de red definido, escalable, bajo coste.

- Soporta Internet de las Cosas (IoT<sup>8</sup>) y M2M<sup>9</sup>: 100 veces más dispositivos conectados, cobertura en interiores y eficiencia de señalización que en 4G.
- Reducción de aproximadamente el 90% en el consumo de energía a la red.

La interconexión humano-dispositivo en cualquier momento y lugar que nos proporcionará esta nueva generación, hará que el mundo real sea una zona Wi-Fi en sí. A continuación, se listan algunos servicios que traerá 5G consigo [31]:

- Dirección IP para móviles asignada de acuerdo con la red conectada y la posición geográfica.
- Señal de radio también a mayor altitud.
- Múltiples servicios paralelos, con los que conocer información de distinta y muy variada índole.
- El seguimiento y monitorización de cualquier parte del mundo se hace posible. Esto posibilitará multitud de aspectos, como el diagnóstico médico remoto, la reducción de la tasa de criminalidad, la visualización del universo, galaxias y planetas conocidos; la rápida detección de desastres naturales incluyendo tsunamis o terremotos, etc.

De la mano de la noticia de la irrupción de la quinta generación de comunicaciones móviles, van avances y predicciones que, a día de hoy nos suenan vagamente a ciencia-ficción; tales como los coches con conducción autónoma, la digitalización del entorno rural o la realidad aumentada [30]. Pero a pesar de parecer invenciones descabelladas, no solo se van a materializar, sino que lo harán dentro de poco. Concretamente, en 2018 hay previsiones de mostrar en sociedad el enorme avance tecnológico que esta nueva generación de comunicaciones móviles supone durante los Juegos Olímpicos de Invierno en Pyonyang por parte de la operadora coreana KT Telecom. Además, varios operadores estadounidenses prevén pruebas con sistemas 5G en ese mismo año. En general, se espera que en 2019 las conexiones 5G mundiales superen los 1000 millones, gran parte de las cuales serían cubiertas entre Estados Unidos, China y Japón. Por otra parte, en España, como en el resto de los 28 países de la Unión Europea, se espera que para 2020 la mayoría de naciones tenga alguna ciudad con acceso a redes 5G.

El Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital [33] ha anunciado medidas para favorecer el desarrollo de la tecnología 5G en España. Entre ellas está la convocatoria de ayudas públicas para fomentar la puesta en marcha de proyectos piloto y soluciones tecnológicas innovadoras basadas en 5G. Además, las primeras bandas de frecuencia identificadas para 5G en España son: 3,6 GHz (3.600 MHz-3.800 MHz) y 1,5 GHz (1.452-1.492 MHz). En estas bandas se ofrecerá cobertura principal dedicada a zonas urbanas, gracias al uso de smart-cells<sup>10</sup>, que ofrecerán velocidades comprendidas entre 1

---

<sup>8</sup> IoT (Internet of Things): Concepto basado en la interconexión de cualquier objeto o dispositivo con cualquier otro, utilizando para ello el protocolo IPv6 y obteniendo mayor inteligencia e independencia del ser humano.

<sup>9</sup> M2M (Machine to Machine): Concepto genérico referido al intercambio de información entre dos máquinas remotas de diversa tecnología.

<sup>10</sup> Smart-cells o Celdas inteligentes: Son nodos intermedios de acceso móvil, pequeñas estaciones base, en tamaño y potencia de emisión, que conectan dispositivos móviles a redes de operadoras mediante conexiones de banda ancha fija como ADSL, cable, o fibra óptica y manteniendo la tecnología de red móvil existente.

y 3 Gbps. Son las más indicadas, para el avance en ciudades inteligentes y conectadas, con proyectos innovadores y sostenibles y nuevos dispositivos, como los sistemas inteligentes de transporte, aprovisionamiento de agua y energía, control de alumbrado, semáforos, recogida de basuras, etc., que hacen de la quinta generación de comunicaciones móviles, el complemento perfecto para las ciudades inteligentes del futuro cercano en el primer mundo.

Si bien es cierto que el acceso a la quinta generación de comunicaciones móviles para toda la sociedad aún se ve lejano, pronto comenzaremos a estar en contacto con estas redes.

## Capítulo 4: Diseño del sistema de medida

### 4.1. Introducción

En este capítulo se procede al desglose explicativo de los distintos componentes del sistema con que se llevará a cabo la campaña de medidas pretendida. Se presentan en profundidad tanto los dispositivos físicos, (GPS, analizador de espectros y antena), como el software necesario que se empleará.

Estas herramientas servirán para integrar el sistema de medidas del canal radioeléctrico. En primer lugar se exponen las características y aplicaciones del GPS Garmin eTrex Vista y finalmente se describen tanto el analizador de espectros FSH3 de Rohde & Schwarz como la antena Schwarzbeck bicónica.



Figura 21: Esquemático de la campaña de medidas.

### 4.2. Herramientas utilizadas

#### 4.2.1. Hardware

Con el propósito de implementar el sistema de medidas se utilizará un equipo constituido por la siguiente instrumentación hardware:

- Ordenador portátil con procesador x64 Intel Core i7-3537U a 2.50 GHz y 4GB de memoria RAM.
- Analizador de espectros portátil FSH3 de Rohde & Schwarz con rango frecuencial operativo comprendido entre 100 KHz y 3 GHz.
- GPS Garmin eTrex Vista.
- Convertidor de puerto serie a puerto USB.
- Antena Schwarzbeck bicónica de bajas pérdidas, monopolo omnidireccional con polarización vertical y rango frecuencial operativo entre 0.5 y 3 GHz.

### 4.2.2. Software

La aplicación de medición del canal radioeléctrico será implementada empleando el entorno Matlab, concretamente la versión R2014b. Este lenguaje de computación técnica de alto nivel ofrece gran versatilidad, eficiencia y simplicidad a la hora de diseñar el sistema de control, llevar a cabo las comunicaciones entre los equipos descritos en la sección anterior, efectuar las pruebas y mediciones necesarias, así como procesar y presentar los resultados. Es por todo ello que se ha elegido este software para la implementación de la campaña de medidas bajo estudio.

## 4.3. GPS

### 4.3.1. Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global , conocido también por el acrónimo GPS (Global Positioning System), es un sistema de navegación dotado de 24 satélites, que proporcionan posiciones geográficas en tres dimensiones, velocidad y tiempo. Este sistema da cobertura las 24 horas del día, en cualquier localización del mundo y bajo cualquier condición climática. Dado que la comunicación entre el usuario y los satélites no es directa, el GPS puede dar servicio a un número ilimitado de usuarios.

Desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, el Sistema de Posicionamiento Global Navstar se creó en 1973 con el fin de reducir los crecientes problemas en la navegación. Al ser un sistema que solucionaba las limitaciones de la mayoría de los sistemas de navegación existentes hasta entonces, el GPS consiguió gran aceptación entre la mayoría de los usuarios. Desde los primeros satélites, se ha empleado con éxito en las aplicaciones de navegación habituales. Puesto que puede accederse a sus funciones de forma asequible mediante equipos reducidos y económicos, el GPS ha fomentado el desarrollo de numerosas aplicaciones.

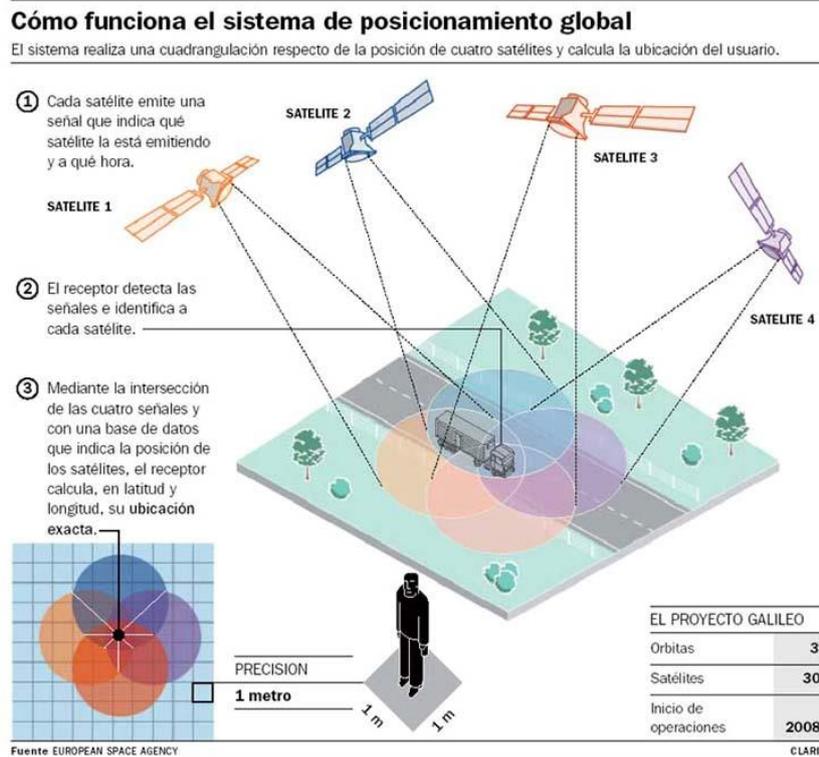


Figura 22: Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global [12].

### 4.3.2. Descripción del sistema de posicionamiento global

La red de satélites GPS, que orbita alrededor de la Tierra a 20.200 Km de altura, cuenta con trayectorias sincronizadas para cubrir la totalidad de superficie de nuestro planeta. Estos satélites incorporan relojes atómicos de alto grado de precisión. La información horaria se localiza en los códigos de transmisión mediante los satélites, de forma que un receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal. Esta señal contiene datos que serán empleados por el receptor para calcular la ubicación de los satélites y realizar los ajustes necesarios para extraer las posiciones precisas. El receptor se vale de la diferencia de tiempo entre el instante de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite. Además, el receptor tiene en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debidos a la ionosfera y a la troposfera. A partir de tres distancias a tres satélites (triangulación) y conociendo la ubicación del satélite desde donde se envió la señal, el receptor calcula su posición en tres dimensiones.

No obstante, para calcular directamente las distancias, el usuario debe disponer de un reloj atómico sincronizado con el Sistema de Posicionamiento Global. Realizando la medición desde un satélite adicional se evita la necesidad de un reloj atómico por parte del receptor. Por consiguiente, el receptor utiliza cuatro satélites para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo, obteniendo finalmente la posición en tres dimensiones.

### 4.3.3. GPS Garmin eTrex Vista

El dispositivo GPS que se empleará en este proyecto es el modelo eTrex Vista de Garmin. Se trata de un instrumento ligero, con un diseño compacto, resistente al agua y con una interfaz fácil e intuitiva. Es compatible con WAAS, EGNOS y MSAS<sup>1</sup>. Las principales funciones de este modelo de GPS son accesibles por medio de cinco teclas situadas en sus laterales que facilitan su manejo con una sola mano. Además, la tecla joystick central permite desplazarse por los menús de cada pantalla, confirmar las opciones y marcar waypoints<sup>2</sup> de forma muy rápida. Está dotado de un altímetro barométrico y una brújula electrónica. En las siguientes figuras se presentan los controles principales de este GPS, explicando algunas de sus funcionalidades básicas.

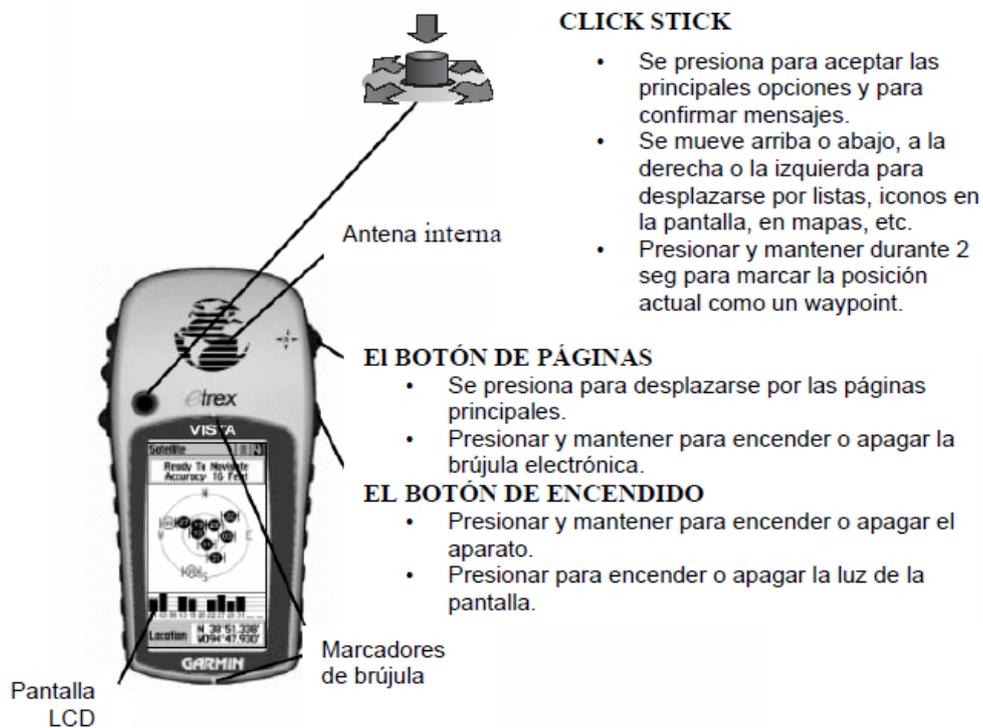


Figura 23: Vista frontal del GPS [2].

<sup>1</sup> Estos sistemas anexionados respectivamente a satélites geoestacionarios homónimos, mejoran notablemente la precisión de GPS, permitiendo efectuar correcciones de posición en tiempo real. Son independientes pero compatibles entre ellos y se emplean en distintas zonas del globo terráqueo, a saber: WAAS (Wide Area Augmentation System) en EEUU, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) en Europa y MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) en Japón.

<sup>2</sup> Un waypoint es un punto de ruta dentro de la representación de nuestro recorrido en el GPS.



Figura 24: Vista posterior del GPS [2].

#### 4.3.4. Prestaciones

Las características más notables del GPS Garmin eTrex Vista [2] son listadas a continuación:

- Pantalla LCD de alto contraste y una de las de mayor resolución de la gama Garmin (280x160 píxeles).
- Alta precisión. El cálculo de la posición se lleva a cabo con un error menor a 5 metros.
- Actualización de la posición una vez por segundo en modo de funcionamiento normal.
- Interfaces NMEA 0183 y puerto serie RS-232, que permiten su conexión con un ordenador u otros dispositivos compatibles.
- Un registro de rutas automático con capacidad para 3000 puntos o para guardar 10 rutas con 250 puntos cada una.
- Capacidad de creación de rutas, con almacenamiento para 20 rutas de 50 waypoints cada una.
- Visualiza una gran variedad de datos de navegación como la velocidad, el tiempo estimado de llegada, el cuentakilómetros o servicios circundantes.
- Muestra los ascensos y descensos totales, la media ascensos/descensos, el máximo ascenso o descenso, la elevación máxima, etc.

- Localiza waypoints, ciudades, salidas de autopistas, direcciones de calles e intersecciones.
- Almacenamiento de 500 waypoints de usuario con iconos gráficos.
- Dispone de 24 MB para almacenamiento de mapas de datos.
- Consta de capacidad para usar WAAS.
- Posee un barómetro digital de alta precisión.
- Dispone de una brújula magnética digital.
- Es sumergible a una profundidad de 1 metro.
- Dimensiones<sup>3</sup>: 111,76 mm x 50,8 mm x 304,8 mm.
- Peso: 150 g aproximadamente (con pilas).

#### 4.3.5. Menús

La totalidad de la información necesaria para el uso del GPS Garmin eTrex Vista se encuentra en las siguientes 6 páginas principales del menú. Presionando el botón de páginas circulamos de una página a otra según muestra la siguiente figura. Dichas páginas proporcionan diversos tipos de información para la navegación, sin embargo, todas comparten aspectos similares como los menús de opciones y el menú de página principal.

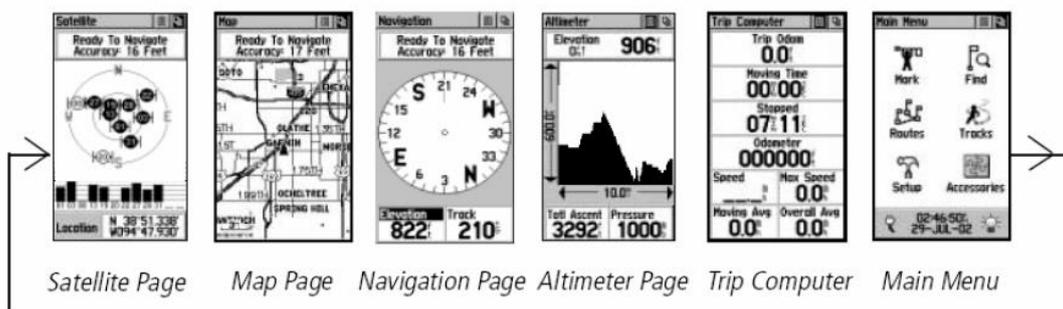


Figura 26: Opciones del menú principal del GPS [2].

- *Satellite Page*: Presenta la disposición de los satélites detectados. Indica cuándo el GPS está preparado para la navegación y muestra las coordenadas de localización del dispositivo. El gráfico representa una vista mirando al cielo desde la posición actual del GPS mostrando los satélites con sus números asignados.
- *Map Page*: Posibilita visualizar la posición actual del dispositivo y la dirección del movimiento usando el icono triangular de posición situado en el centro del mapa. Según nos desplazamos el mapa muestra el rastro de nuestro movimiento. En el mapa también se pueden visualizar aspectos geográficos y del entorno como ríos, lagos o ciudades. En la parte superior de la ventana podemos acceder a la ventana de estado, que proporciona información precisa sobre la posición.

<sup>3</sup> Las dimensiones de los equipos se especifican como H x W x D. Es decir, Height, Width, Depth; que se corresponden con Altura, Anchura y Profundidad, respectivamente.

- *Navigation Page*: Proporciona orientación con una brújula que muestra el camino mientras el usuario se desplaza. La flecha indica la dirección actual hacia destino. La ventana de estado muestra en este caso el nombre del destino, la distancia y el tiempo restante para llegar a destino.
- *Altimeter Page*: Permite representar el perfil de altura de los recorridos, así como visualizar otras opciones tales como altitudes máximas y mínimas alcanzadas, velocidad de ascensión o descenso actual, máxima y mínima.
- *Trip Computer Page*: Muestra ocho tipos de datos diferentes de navegación que son programables por el usuario. Cada campo se puede seleccionar y puede contener una de muchas opciones.
- *Main menu*: Proporciona un directorio con las funciones avanzadas del dispositivo. Desde la página del menú principal se pueden marcar y crear nuevos waypoints, encontrar elementos en mapas tales como ciudades, salidas de autopistas, direcciones, puntos de interés, etc...; crear y guardar rutas, o permitir el acceso a los accesorios del GPS.

#### 4.3.6. Aplicaciones

En este subapartado se mencionan diversos ámbitos en los que se emplea el GPS hoy en día. El GPS se emplea actualmente en aviones y barcos para dirigir la navegación en las aproximaciones a los aeropuertos y puertos, así como a lo largo de todo su trayecto. Los sistemas de control de seguimiento emplean camionetas y vehículos de emergencia con información óptima sobre las rutas. Existe una técnica denominada ‘granja de precisión’ que utiliza el GPS para dirigir y controlar la aplicación de fertilizantes y pesticidas. También se dispone de sistemas de control de seguimiento como elemento de ayuda a la navegación en los vehículos utilizados por excursionistas. Sin olvidar uso del GPS por particulares a través de smart phones, cada vez más extendido.

#### 4.3.7. Conexión con el ordenador portátil

Uno de los objetivos del proyecto es controlar y configurar el GPS desde el ordenador, por lo que se debe hacer un estudio del modo de conexión entre ambos equipos. La conexión con el ordenador portátil se realiza a través de la interfaz serie. Tanto el analizador de espectros como el GPS se conectan al ordenador mediante el puerto USB (utilizando un convertidor USB/COM). El GPS incluye un cable destinado a esta función, el PC Interface Cable, cuyo aspecto se muestra en la imagen. Se trata de un cable con un extremo con conector COM y con otro extremo con un conector especial para conectarlo al GPS por la parte superior que permite la transferencia de datos entre el ordenador y el GPS.

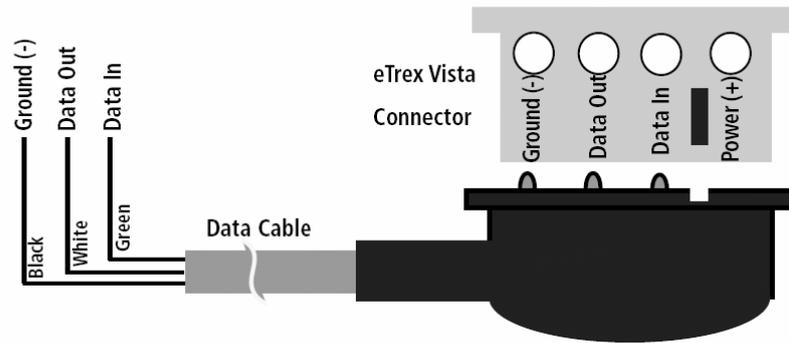


Figura 25: Conexión cable – dispositivo GPS [2].

#### 4.3.8. Utilidad dentro del proyecto

La función del GPS en el proyecto será la de proporcionar la localización geográfica del equipo móvil de medición y posicionamiento. Este equipo estaría compuesto por el ordenador portátil, el GPS, el analizador de espectros y la antena receptora.

Como se indicó al inicio del capítulo, las medidas de potencia deben estar georreferenciadas, por tanto es necesario también que el sistema de medidas incluya un GPS. De esta manera en cada punto de un recorrido se dispone de la potencia recibida (obtenida del analizador de espectros) y de la posición del espacio en la que se tomó dicha medida. La información que nos proporcionará el GPS serían las coordenadas de la posición (latitud y longitud).

### 4.4. Analizador de espectros FSH3

#### 4.4.1. Introducción

El analizador de espectros utilizado es el FSH3 de Rohde & Schwarz, un equipo portátil cuya función consiste principalmente en medir el nivel de potencia y la frecuencia de una porción del espectro electromagnético.

Además, permite visualizar en su pantalla las componentes espectrales de las señales presentes en sus entradas. En el eje de ordenadas se presenta en una escala logarítmica el nivel en dB del contenido espectral de la señal, mientras que en el eje de abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y del número de muestras capturadas.

#### 4.4.2. Prestaciones

A continuación se presentan las principales características del analizador de espectros FSH3 de Rohde & Schwarz [1]:

- Las teclas de función y una estructura de menús simple, hacen al FSH3 un analizador de muy fácil manejo.
- Posee las mejores características en radiofrecuencia y la más alta precisión de medida de esta gama de analizadores de espectros.
- Dispone de 4 horas de funcionamiento continuo con batería.
- La transferencia de datos al ordenador es rápida y sencilla.
- Rango operacional de frecuencias: 100 KHz a 3 GHz.
- Resolución del ancho de banda de 1 KHz a 1 MHz.
- Dimensiones: 170 mm x 120 mm x 270 mm.
- Peso: 2.5 Kg.

#### 4.4.3. Aplicaciones

El analizador Rohde & Schwarz FSH3 tiene todas las prestaciones de un analizador de espectros convencional, añadiendo la gran ventaja de su fácil portabilidad debido a su pequeño tamaño y peso. Algunas de las aplicaciones prácticas [1] más comunes de este equipo son las siguientes:

- *Medidas de Potencia de Canal:* El analizador de espectros puede determinar la potencia de un canal de transmisión determinado.
- *Medidas en cables (distancia al fallo):* Esta función se emplea para una determinación rápida y precisa de la distancia a un fallo en un cable RF. Esta medida nos aporta una perspectiva inmediata del estado del dispositivo que se está testeando, ya que obtenemos las pérdidas del cable y la distancia.
- *Medidas de Potencia TDMA:* El analizador puede efectuar medidas de potencia en el dominio del tiempo dentro de un timeslot con el método TDMA (Time Division Multiple Access). Todos los parámetros de configuración requeridos por los estándares GSM y EDGE<sup>4</sup> se hallan predefinidos en el analizador para facilitar la toma de mediciones al usuario.
- *Medidas de Potencia:* Los sensores de potencia FSH-Z1 y FSH-Z18 hacen que el analizador tenga una precisión mayor a la hora de realizar las medidas. Con dichos sensores, el valor exacto RMS de la señal medida se obtiene sobre el rango de medida completo, que va desde -67 dBm hasta +23 dBm, independientemente de la forma de onda de la señal.

---

<sup>4</sup>Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE), es una tecnología de telefonía móvil celular, que actúa como puente entre las redes 2G y 3G, concretamente se le denomina 2.75G. Considerada una evolución del GPRS (General Packet Radio Service), EDGE es compatible con las redes GSM. Aunque EDGE funciona con cualquier equipo GSM que tenga implementado GPRS, el operador debe efectuar las actualizaciones necesarias [4].

- *Análisis Escalar de Redes*: Permite realizar medidas precisas de las características escalares de transmisión de filtros, amplificadores y convertidores de frecuencia sobre un amplio rango dinámico y de frecuencias.

#### 4.4.4. Conexión con el ordenador portátil

La comunicación entre el analizador de espectros y el ordenador nos permitiría controlar el analizador desde la aplicación en Matlab. El instrumento puede ser manejado de forma remota desde un ordenador portátil, sin embargo, en este caso se configuró manualmente desde el panel de control del propio analizador.

La conexión con el ordenador portátil se lleva a cabo mediante el interfaz óptico RS-232-C. Dicha conexión evita las medidas de espúreos causadas por interferencias desde estos dispositivos. Debido a que el cable óptico del analizador se conecta al ordenador mediante el puerto serie, es necesario el uso de un convertidor para realizar la conexión por uno de los puertos USB que tiene el ordenador.

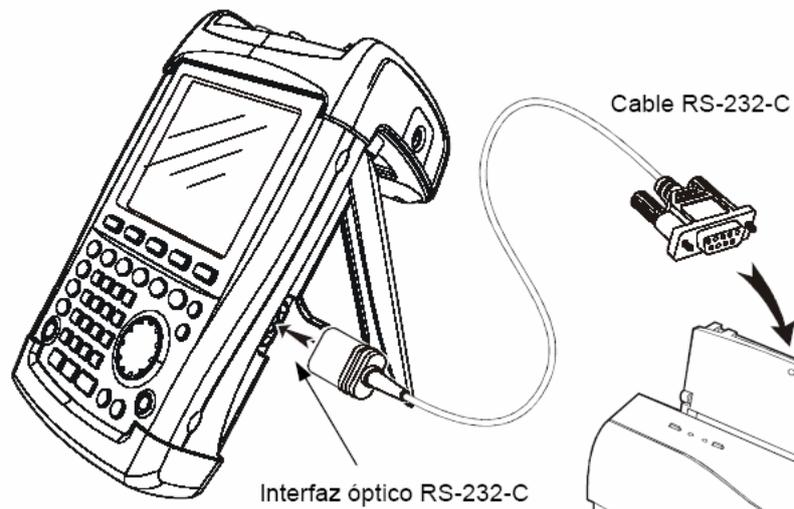


Figura 26: Conexión del cable RS-232-C el analizador de espectros con el ordenador portátil [1].

#### 4.4.5. Conexión con la antena

La conexión de la antena con el analizador se realiza a través de la entrada de RF (radiofrecuencia), que se encuentra en la parte superior izquierda del equipo. La máxima potencia continua permitida en la entrada RF es de 20 dBm (100 mW). La entrada de RF presenta acoplamiento en corriente alterna. Sin embargo, la tensión de entrada en corriente continua nunca debe exceder el nivel especificado en el equipo. De otra manera, el condensador de acoplamiento de entrada se podría dañar y como consecuencia también el atenuador de entrada o el mezclador. La entrada de RF se encuentra protegida de descargas estáticas y pulsos de tensión mediante una combinación de circuitos limitadores y detectores de alta tensión. Cabe destacar que la antena tratada en este apartado es la antena de Rohde & Schwarz que es accesorio propio del analizador, y no la antena Schwarzbeck SBA 9113 empleada finalmente.

#### 4.4.6. Funcionamiento de un analizador de espectros

En este apartado se explica detalladamente la operación de un analizador de espectros, particularizando para el modelo de analizador empleado en este proyecto, el FSH3 de Rohde & Schwarz [1].

Básicamente, una señal de radiofrecuencia puede ser analizada en el dominio temporal o frecuencial. En el primero de los dos dominios, se puede observar la variación de una señal mediante un osciloscopio, por ejemplo. En cambio, en el dominio de la frecuencia, un analizador de espectros puede emplearse para representar las componentes frecuenciales de una señal.

Ambas alternativas son equivalentes, dado que al aplicar la Transformada de Fourier a cualquier señal temporal, se obtienen sus componentes espectrales. No obstante, dependiendo de las características de la señal que se quieran medir, será más apropiado elegir un método u otro. Simplemente observando un osciloscopio, se puede dilucidar si la señal a medir es cuadrada, sinusoidal o un diente de sierra. Sin embargo, la información contenida en los armónicos de la señal o la intrusión de otras señales superpuestas no es tan obvio a simple vista. Esta información es fácilmente detectable con un analizador de espectros.

En la siguiente figura se muestra la base teórica de las dos técnicas de medición mencionadas. Como se puede apreciar, en el dominio temporal, un osciloscopio muestra una porción de señal que es aproximadamente cuadrada. La misma señal queda representada como líneas espectrales, es decir, la frecuencia fundamental y los armónicos de la señal.

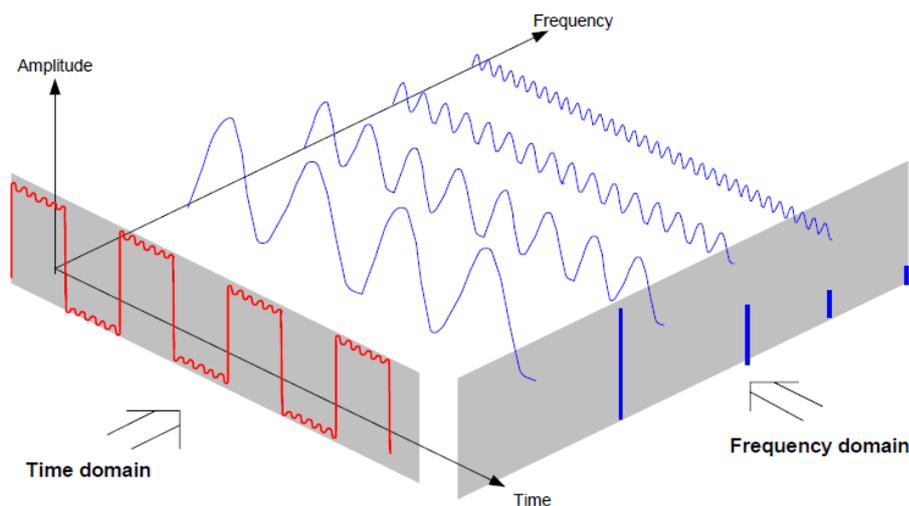


Figura 27: Señal cuadrada en el dominio del tiempo y de la frecuencia [1].

La señal cuadrada periódica en el dominio temporal pasa al frecuencial mediante la transformada de Fourier, obteniéndose la frecuencia fundamental (con la misma frecuencia que la onda cuadrada) y sus armónicos impares. Mediante el uso de un filtro

paso banda lo suficientemente estrecho, el analizador de espectros realiza mediciones en el dominio de la frecuencia. Sólo a frecuencias donde haya señal, se podrá realizar una lectura que proporcione la amplitud de la componente frecuencial.

En el siguiente diagrama de bloques se muestra el funcionamiento de un analizador de espectros.

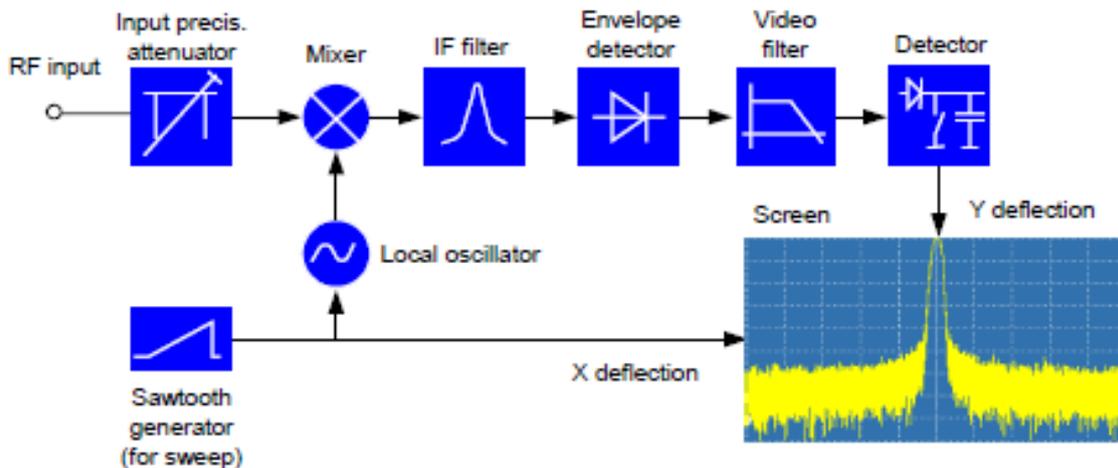


Figura 28: Diagrama de bloques de un analizador de espectros [1].

El atenuador de precisión que encuentra la señal de radiofrecuencia a la entrada del analizador de espectros ajusta el nivel de la señal de medición a un nivel dentro del rango de operación del mezclador. El atenuador de precisión a la entrada del FSH3 es ajustable en pasos de 10 dB desde 0 dB hasta 30 dB.

El mezclador traslada la señal de radiofrecuencia a la entrada a una frecuencia intermedia (IF) fija. Normalmente esta conversión se realiza en varias etapas hasta obtener una frecuencia intermedia adecuada para los filtros de banda estrecha de que se dispone. El analizador FSH3 consta de tres etapas de mezclado, donde las frecuencias intermedias son: 4031 MHz, 831.25 MHz y 31.25 MHz.

Por otro lado, un oscilador local que puede ser sintonizado desde 4031 MHz hasta 7031 MHz se emplea para la conversión a la primera IF. El resto de conversiones se realizan mediante osciladores de frecuencia única.

La frecuencia del oscilador local determina la frecuencia de entrada que emplea el analizador de espectros para realizar las medidas, según la siguiente expresión:

$$f_{in} = f_{LO} - f_{IF} \quad (41)$$

El primer mezclador produce tanto la suma de frecuencias  $f_{LO} + f_{in}$  (= frecuencia imagen,  $f_{imagen}$ ) como la diferencia de frecuencias  $f_{LO} - f_{in}$ .

La frecuencia imagen es rechazada por el filtro paso banda centrado en la frecuencia intermedia como se muestra en la siguiente figura, por lo tanto,  $f_{imagen}$  no interfiere con las dos conversiones de frecuencia siguientes.

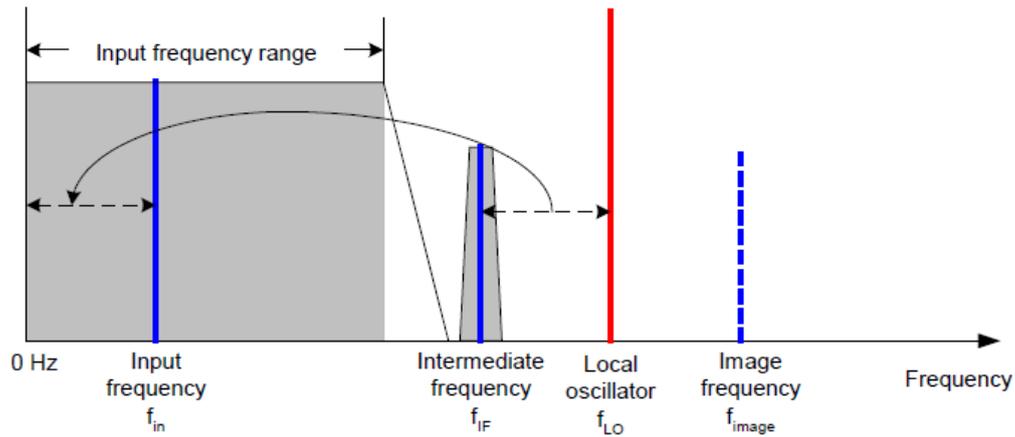


Figura 29: Esquema de la conversión de frecuencia y filtrado de la señal RF a la entrada [1].

El primer oscilador local se sintoniza con una señal diente de sierra que actúa a la vez como la tensión de desviación para el display. No obstante, en la práctica se emplean sintetizadores para generar la frecuencia del primer oscilador local y para el display digital. Por lo tanto, la tensión instantánea en diente de sierra determina la frecuencia de entrada del analizador de espectros.

El ancho de banda del filtro IF determina el ancho de banda que se emplea para las mediciones. Las señales senoidales puras son aceptadas por el filtro. Esto significa, en términos de resolución, que las señales entre las que exista una diferencia frecuencial menor que el ancho de banda del filtro IF no serán detectadas. Esta es la razón por la que el ancho de banda del filtro IF en un analizador de espectros, también suele ser denominado ancho de banda de resolución. El ancho de banda de resolución del FSH3 está comprendido entre 1KHz y 1MHz.

La frecuencia intermedia limitada en banda llega entonces al detector de envolvente, que elimina la frecuencia intermedia de la señal y produce a la salida su envolvente. La señal de salida en el detector de envolvente recibe el nombre de señal de video. Dado que ha sido demodulada, esta señal solo contiene información de la amplitud, perdiéndose la información de fase.

Con señales RF senoidales a la entrada, la señal de video es una tensión continua. Con señales AM, la señal de video contiene una componente continua cuya amplitud corresponde a la potencia de la portadora y una componente alterna cuya frecuencia es igual a la frecuencia de modulación, dado que dicha frecuencia de modulación está dentro del ancho de banda de resolución.

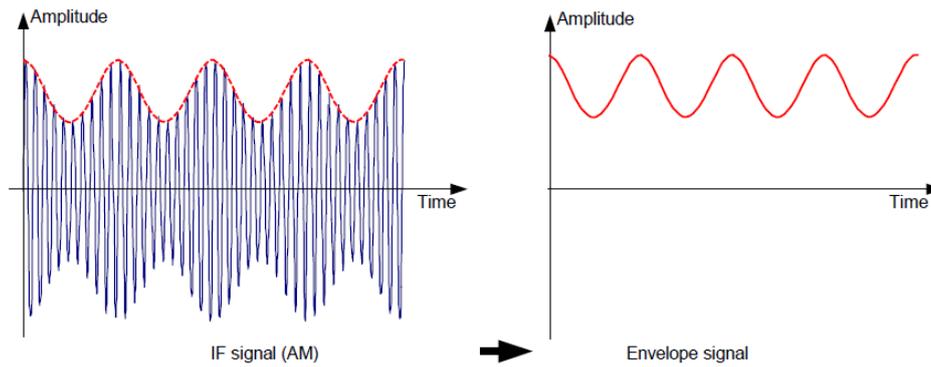


Figura 30: Señal antes y después del detector de envolvente [1].

Continuando con el diagrama de bloques, la señal atravesaría el filtro de video. Éste, es un filtro paso bajo con frecuencia de corte ajustable, la cual limita el ancho de banda de la señal de video. La limitación del filtro de video suaviza la traza a medir considerablemente, lo que facilita en gran medida la determinación del nivel de señal medido.

Tras el filtro de video se encuentra el detector, que combina la porción de espectro medido de forma que se pueda representar como un píxel de la traza. El analizador FSH3 empleado, utiliza 301 píxeles para representar la traza, es decir, todo el espectro medido debe ser representado utilizando dichos píxeles. Generalmente, los tipos de detectores empleados son: el detector de pico (Peak), el detector de muestras (Sample) y el detector de valor eficaz (RMS, Root Mean Square). Además, el FSH3 presenta un detector de pico automático que representa a la vez los picos máximo y el mínimo. La siguiente figura explica el funcionamiento de estos detectores:

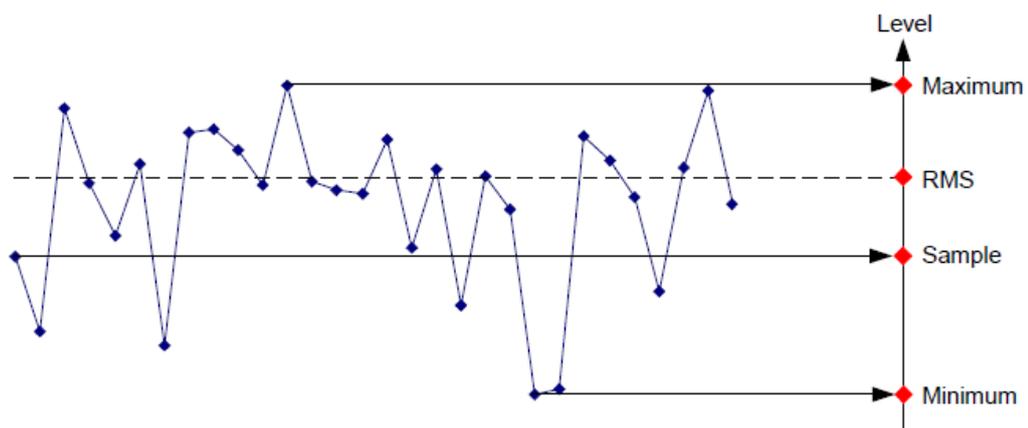


Figura 31: Funcionamiento de los distintos tipos de detectores en el FSH3 [1].

La gráfica anterior muestra 30 valores medidos representados en un solo píxel. El detector de pico determina y representa en la pantalla del analizador el máximo valor

medido. El detector de pico automático toma los valores máximo y mínimo y los representa simultáneamente. Ambos valores se unen mediante un segmento vertical. Esto da una buena indicación de la variación del nivel a lo largo de los valores medidos representados por un único píxel. El analizador de espectros emplea el detector RMS para determinar el valor eficaz de los niveles medidos. Por tanto, la última es una medida de potencia espectral representada en un píxel. El detector de muestras toma una valor medido arbitrario y lo representa (en la gráfica anterior, este valor es el primero), ignorando el resto de valores medidos.

Finalmente, la señal medida es mostrada por el display del analizador, donde la desviación en el eje de ordenadas es controlada por el detector y, en el eje de abscisas, la desviación es controlada por la señal de tensión con forma de diente de sierra.

#### 4.4.7. Utilidad dentro del proyecto

Como se ha mencionado con anterioridad, el analizador de espectros se utilizará básicamente para medir y visualizar el nivel de potencia de la señal de entrada, dados un ancho de banda y una frecuencia central determinados. Obteniendo una serie de muestras de la potencia recibida, verificaremos si las pérdidas por propagación del canal de radiocomunicaciones son significativas o, por el contrario, si la atenuación que sufre la señal no es demasiado grande.

#### 4.5. Antena receptora

La antena seleccionada para recibir potencia en este estudio es el modelo Schwarzbeck SBA 9113. Las principales características de esta antena bicónica de banda ancha son su diagrama omnidireccional en el plano horizontal, su polarización lineal y un rango de frecuencias de trabajo entre 0.5 MHz y 3 GHz.



Figura 32: Antena bicónica Schwarzbeck SBA 9113 [21].

#### 4.5.1. Prestaciones

A continuación se listan las especificaciones técnicas de la antena bicónica Schwarzbeck SBA 9113; la cual es una antena de microondas, linealmente polarizada y de banda ancha.

<b>Especificaciones de la antena receptora</b>	
Fabricante	Schwarzbeck
Modelo	SBA 9113
Rango frecuencial	80 MHz – 3GHz
Conector	Hembra tipo N, 50 $\Omega$
Tubo de montaje	$L_H = 560$ mm, $d = 22$ mm
Anilla de enganche	$L_R = 190$ mm
Longitud total	$L_E = 140$ mm
Diámetro	$D = 49$ mm
Accesorio	M 4
Ganancia isotrópica	[-1.5, ..., +1.5] dBi [600 MHz, ..., 3GHz]
Factor de antena	[25, ..., 60]dB/m
ROE	1-4
Balun (bajas pérdidas)	1:1
Simetría de inversión	< 0.2 dB
Máxima potencia de entrada	20 W
Ancho de haz a mitad de potencia (Plano E)	$90^\circ - 50^\circ$
Rango de intensidad de campo	1 mV/m, ..., 1000 V/m
Peso	760 g

Tabla 3: Especificaciones de la antena Schwarzbeck SBA 9113 [21].

#### 4.5.2. Aplicaciones

Las principales aplicaciones de la antena de microondas bicónica Schwarzbeck modelo SBA 9113, son la realización de tests de evaluación en emplazamientos, la medida de potencia de campo y la generación de potencia de campo (por ejemplo, PRE<sup>5</sup> o PIRE<sup>6</sup>). Gracias al amplio ancho de banda que presenta esta antena, no es necesario realizar cambios de elementos de la misma, tal y como se requiere al operar con dipolos sintonizados de media onda. Los elementos bicónicos permiten un barrido continuo del rango frecuencial en su totalidad. Dados su diagrama de radiación direccional de tipo dipolo, su centro de fase fijo<sup>7</sup> y su capacidad para trabajar con potencias elevadas, la antena SBA 9113 es apta para sustituir a un dipolo de media onda sintonizado en numerosas aplicaciones. La antena bicónica SBA 9113 no está diseñada para tests de emisión con límites muy bajos, bocinas ni antenas log-periódicas<sup>8</sup>. Una aplicación típica de la antena SBA 9113 es la determinación de la exposición a intensidad de campo en áreas cercanas a estaciones base en las bandas GSM.

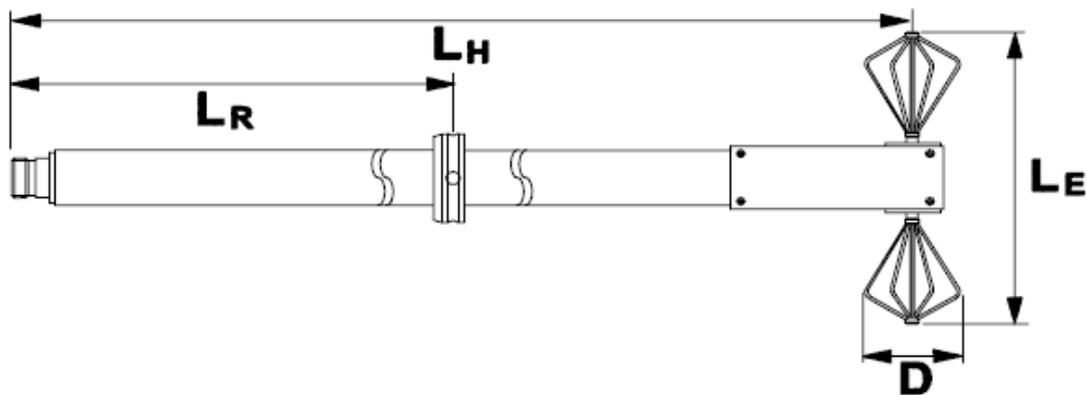


Figura 33: Esquemático de la antena bicónica Schwarzbeck SBA 9113 [21].

<sup>5</sup> PRE: Potencia radiada efectiva.

<sup>6</sup> PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.

<sup>7</sup> El centro de fase de una antena se define como la fuente de radiación aparente. Si dicha fuente fuese ideal, presentaría una equifase esférica; sin embargo, en el caso real, la equifase es irregular y cada segmento tiene su propio origen de radiación. Por tanto, el centro de fase de una antena no solo depende del ángulo (elevación y azimut), sino también de la frecuencia de la señal con que se trabaje [10].

<sup>8</sup> Una antena log-periódica es una multi-elemento direccional que normalmente consiste en una serie de dipolos conocidos como "elementos" dispuestos a lo largo de un brazo que se extiende a lo largo del eje de la antena. Los elementos están espaciados a intervalos siguiendo una función logarítmica de la frecuencia, conocida como  $d$  o  $\sigma$ . Estas antenas se diseñan para funcionar sobre una amplia banda de frecuencias.

### 4.5.3. Conexión con el analizador de espectros

La conexión entre la antena Schwarzbeck y el analizador de espectros FSH3 se realiza a través de un cable coaxial y dos conectores macho tipo N, como los mostrados en la siguiente figura.



*Figura 34: Conectores y cable coaxial utilizados.*

## Capítulo 5: Metodología y resultados

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modo de empleo del sistema de medidas así como los resultados obtenidos en las distintas mediciones efectuadas.

El primer objetivo para realizar la campaña de medidas es conocer la ubicación de las estaciones base de telefonía móvil de Cartagena. Para ello se recurrió a la página web del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital [22], donde se puede consultar la ubicación de las antenas transmisoras de todas las compañías de telefonía móvil del país. Una vez conocidas, el siguiente paso es la selección de las antenas a estudiar, así como sus bandas frecuenciales asignadas. Se tomarán dos antenas, de 2G y 3G, respectivamente. Con el fin de estimar las pérdidas de potencia que sufre la señal desde que ésta sale de la antena transmisora hasta que es recibida por la antena receptora, se llevará a cabo una campaña de medidas en la que se registrará la potencia recibida junto con la posición geográfica de cada medición a lo largo de sendos recorridos realizados en Cartagena para cada antena seleccionada. Posteriormente, se representarán los datos recolectados utilizando para ello el entorno Matlab y, finalmente, se analizarán los resultados convenientemente.

### 5.2. Descripción y funcionamiento del sistema de medidas

Inicialmente se realizó un estudio de las estaciones base que emiten en el entorno de Cartagena. Esta información fue extraída de la web del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital [22]. En la siguiente figura se muestran, representadas con círculos en violeta, las estaciones base situadas en el campus Muralla del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, desde la plaza de Bastarrece (al norte) hasta el Hospital de Marina (al sur).



Figura 35: Localización de las BTS en el Campus Muralla del Mar [22].

### 5.2.1. Selección de los canales a medir

La primera antena a estudiar será la situada entre el Cuartel de Antigones y el Hospital de Marina, su emplazamiento detallado, así como sus bandas asignadas se muestran en las siguientes figuras:

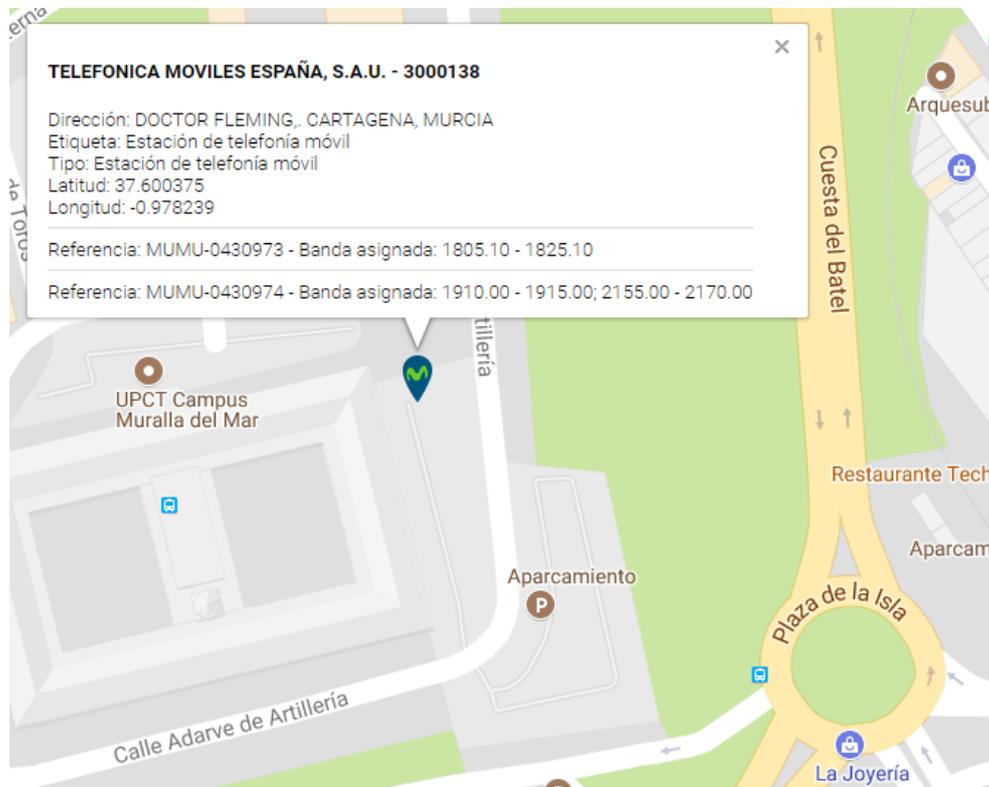


Figura 36: Localización de primera BTS a medir [28].

El primer canal a medir seleccionado será el asignado a la banda frecuencial comprendida entre 1805.10 y 1825.10 MHz, que corresponde a la tecnología móvil de tercera generación.

ESTACIONES DE TELEFONÍA MÓVIL		
LOCALIZACIÓN		
Código	Dirección	
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA, S.A.U. - 3000138	DOCTOR FLEMING,, CARTAGENA, MURCIA	
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
Operador	Referencia	Banda Asignada (MHz)
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA, S.A.U.	MUMU-0430973	1805.10 - 1825.10
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA, S.A.U.	MUMU-0430974	1910.00 - 1915.00; 2155.00 - 2170.00
NIVELES MEDIDOS EN EL ENTORNO		
Distancia (m)	(*) Acimut (°)	Valor Medido ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
100.0	310.0	0.57320

Los niveles medidos cumplen la normativa legal vigente, al encontrarse muy por debajo de los niveles de referencia establecidos.

El nivel de referencia más restrictivo para los servicios de radiocomunicación es de  $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . El nivel de referencia para los distintos servicios de telefonía móvil es siempre superior al valor más restrictivo ( $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) anteriormente indicado. Por ejemplo, para el servicio de telefonía móvil en la frecuencia de 2000 MHz, el nivel de referencia es  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

(\*) Acimut es el ángulo que tiene una determinada dirección. Para calcularlo se toma como referencia el norte geográfico y a partir de ahí se gira en el sentido de las agujas del reloj.

Tabla 4: Bandas frecuenciales asignadas al primer emplazamiento [22].

En principio, por la situación de la antena, la zona debería estar dotada de buena cobertura. No obstante esto es comprobado acudiendo a los mapas de cobertura dados en la web del operador [26].

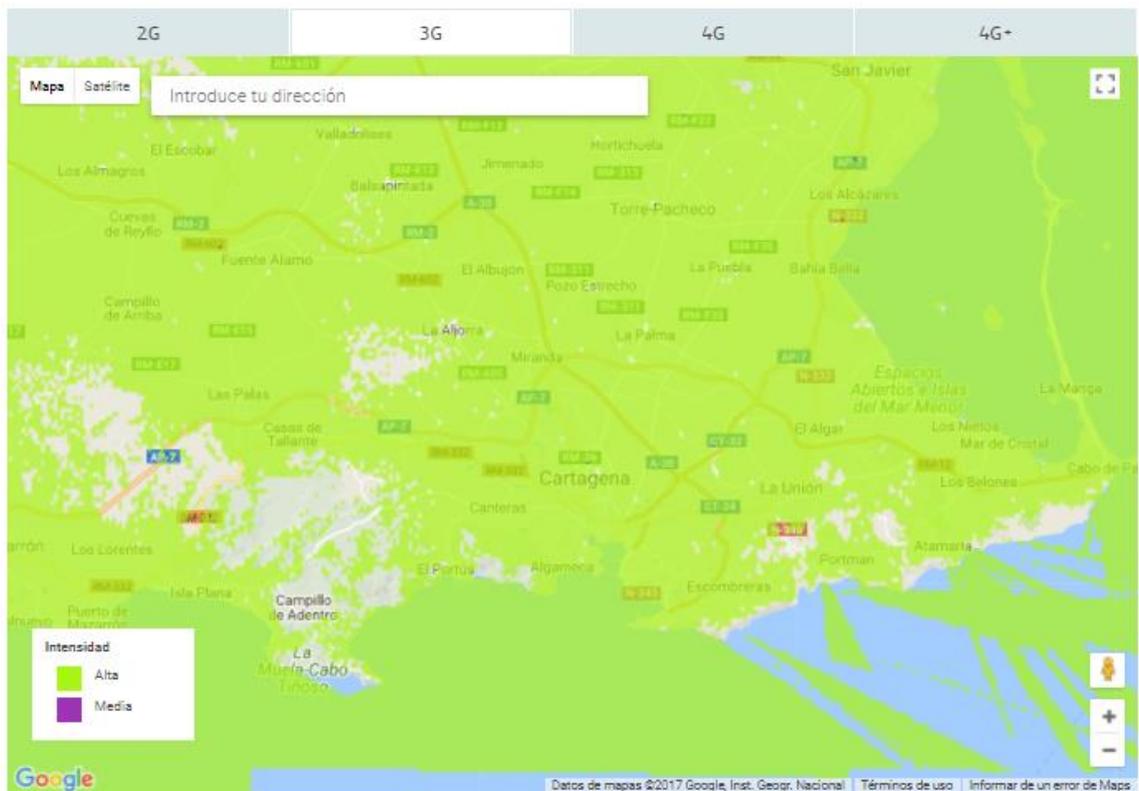


Figura 37: Mapa de cobertura 3G Movistar en Cartagena [26].

Tras esta comprobación, se procede a la detección del canal con el analizador de espectros. En la figura 38 se muestra el menú de medidas (“Measurement”) del analizador de espectros, al cual se accede presionando la tecla “MEAS”. Entre sus opciones, cabe destacar el modo analizador (“Analyzer”) y potencia de canal (“Channel Power”), que serán principalmente las utilizadas durante la campaña de medidas.

Gracias a la función de medida “Channel Power”, es posible medir selectivamente la potencia de señales moduladas. Al contrario que un medidor de potencia, que realiza medidas de potencia a lo largo de todo su rango de operación, la función “Channel Power”, permite que se evalúe la potencia de un canal perteneciente a una transmisión específica, de manera que otras señales en el espectro no tendrán efecto en el resultado de las mediciones. Cuando se selecciona la función “Channel Power”, el FSH3 determina el espectro dentro del canal seleccionado usando un ancho de banda de resolución que es pequeño en comparación con el ancho de banda del canal. Los valores medidos son integrados para obtener la potencia total. El analizador FSH3 tiene en cuenta el modo de display (absoluto o relativo), el detector seleccionado y el ancho de banda de resolución, lo que implica que el resultado es comparable al que se habría obtenido empleando un medidor de potencia térmico. El pequeño ancho de banda de resolución actúa como un filtro de canal estrecho y por tanto evita que las emisiones fuera del canal afecten al resultado.

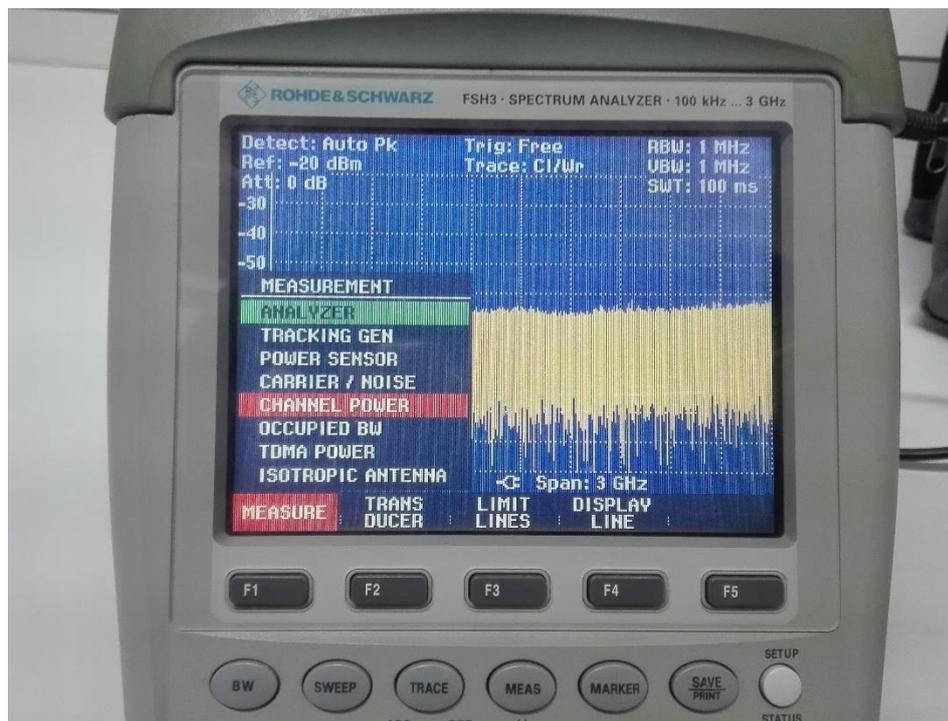


Figura 38: Vista del menú “Measurement” del analizador de espectros FSH3.

Empleando la opción “Analyzer” del analizador FSH3 y seleccionando las frecuencias inicial y final de la banda deseada, somos capaces de visualizar el canal bajo estudio.

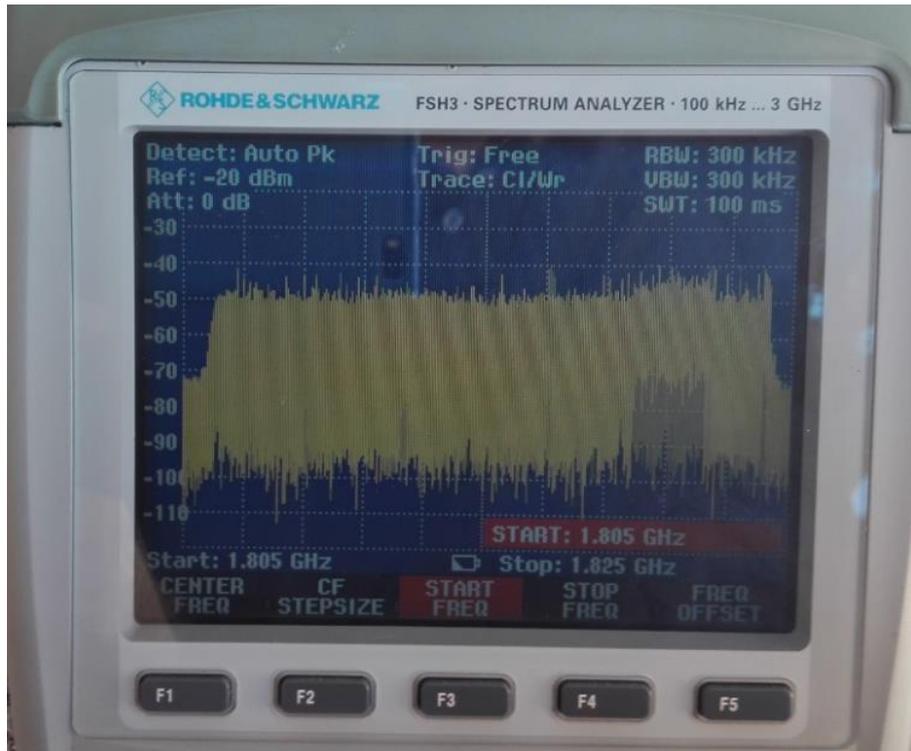


Figura 39: Canal 3G a medir [1805.10 - 1825.10] MHz con modo Analyzer.

Si ahora se selecciona el modo Channel Power del menú Measurement se obtendrá la siguiente representación del canal:

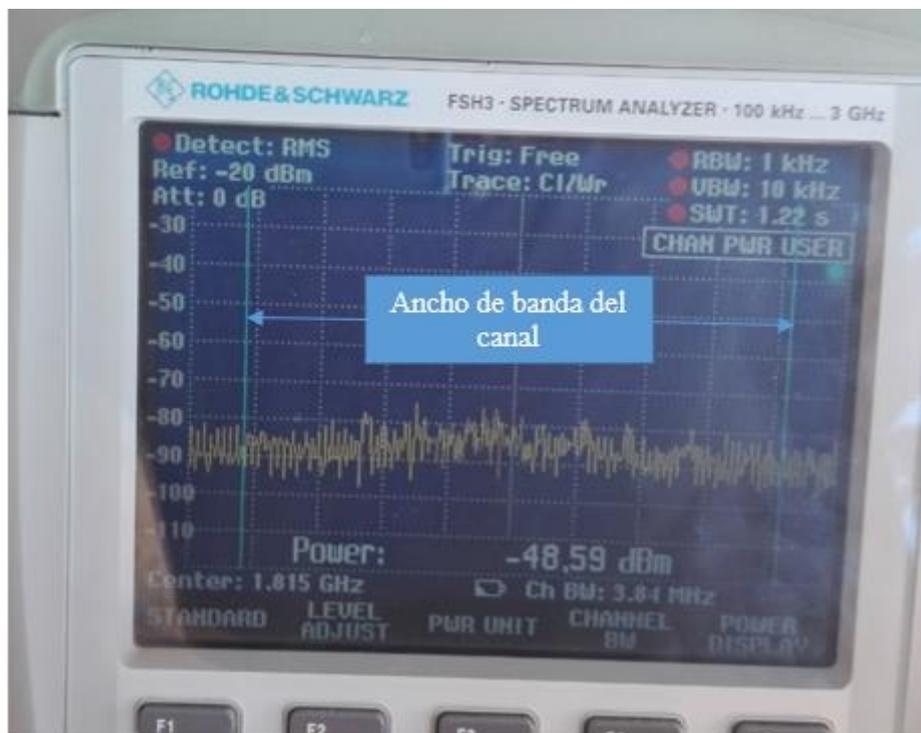


Figura 40: Canal 3G a medir [1805.10 - 1825.10]MHz con modo Channel Power.

Al acceder a la función de medida de potencia del canal, aparecen dos líneas verticales en el diagrama de medida que indican el ancho de banda del canal. La potencia medida en el canal se muestra en letras grandes bajo el diagrama de medida, como se puede apreciar en la figura anterior.

A continuación se muestra el emplazamiento de la segunda antena a medir.

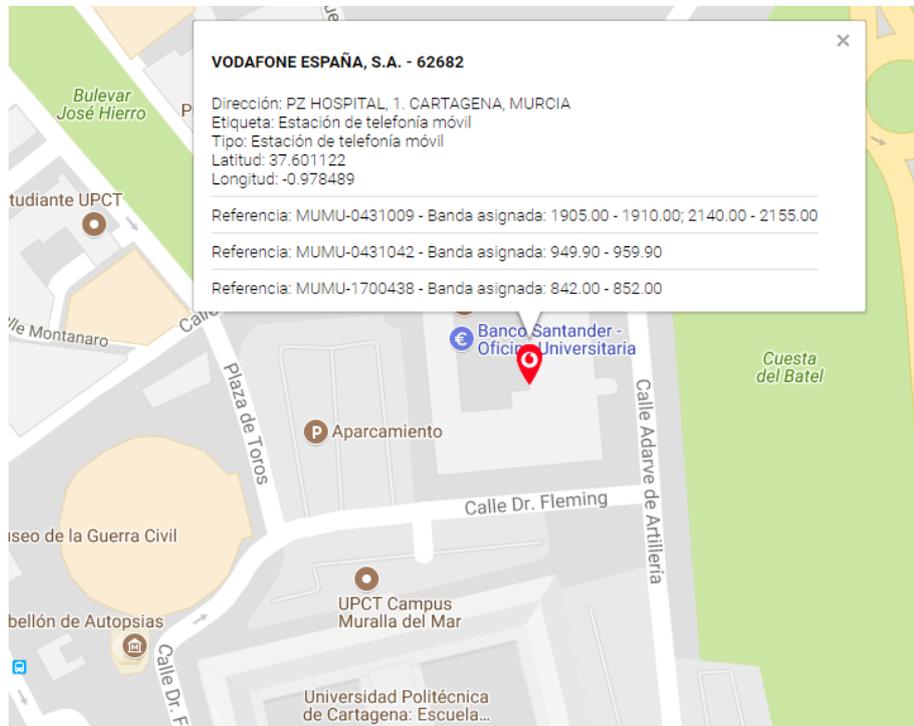


Figura 41: Localización del segundo emplazamiento a medir [28].

En la siguiente figura se puede apreciar con mayor detalle la información que aporta el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital acerca de esta estación base.

ESTACIONES DE TELEFONÍA MÓVIL		
LOCALIZACIÓN		
Código	Dirección	
VODAFONE ESPAÑA, S.A. - 062682	CL ANTIGUO CUARTEL DE ANTIGONES (UPTC). CARTAGENA, MURCIA	
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
Operador	Referencia	Banda Asignada (MHz)
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	MUMU-1400187	949.90 - 959.90
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	MUMU-1400186	2660.00 - 2680.00
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	MUMU-1400185	1825.10 - 1845.10
NIVELES MEDIDOS EN EL ENTORNO		
Distancia (m)	(*) Acimut (°)	Valor Medido (µW/cm <sup>2</sup> )
40.0	136.0	0.01528
80.0	312.0	0.23940

Tabla 5: Bandas frecuenciales asignadas al segundo emplazamiento [22].

La primera banda asignada a este emplazamiento es seleccionada. En este caso se trata de una banda que es emitida en el rango frecuencial [949.90 – 959.90] MHz, correspondiente a la segunda generación de comunicaciones móviles.

Se verifica, en este caso, la cobertura 2G en la zona mediante la visualización del mapa de cobertura en la web del operador [27].

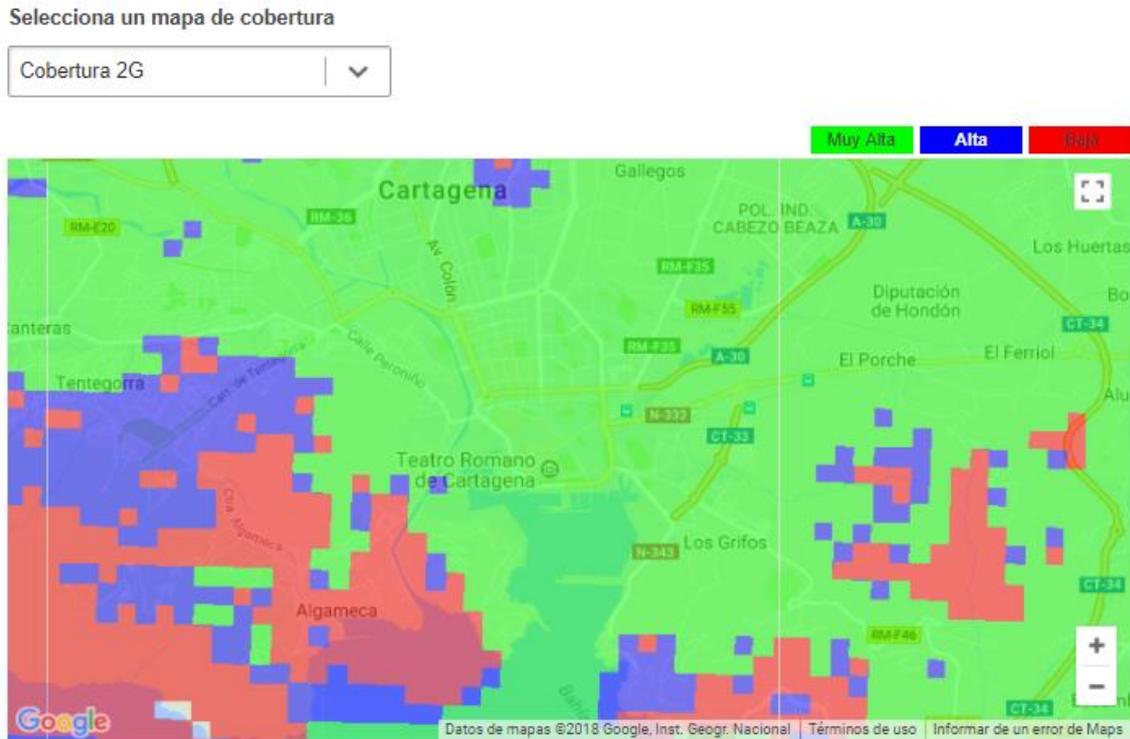


Figura 42: Mapa de cobertura Vodafone 2G en Cartagena [27].

El siguiente paso es visualizar el canal en el analizador de espectros, especificando su intervalo frecuencial en el modo “Analyzer”, como se aprecia en la siguiente figura.

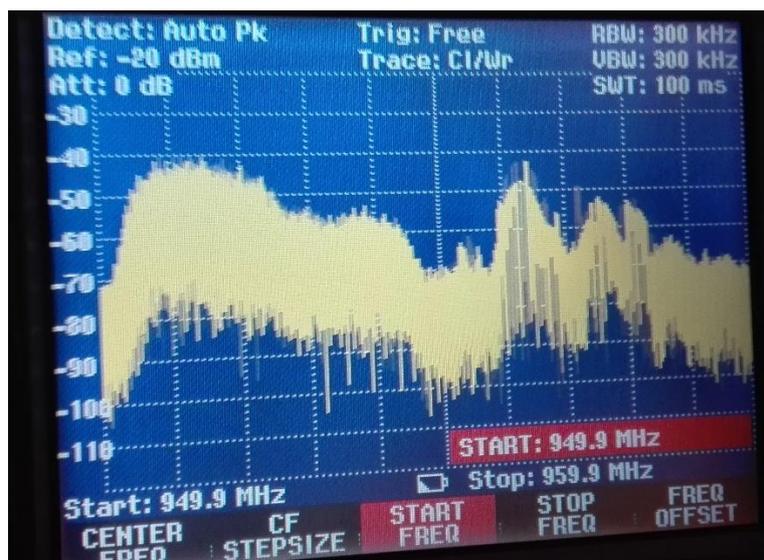


Figura 43: Banda 2G a medir [949.9 – 959.9] MHz con modo Analyzer.

En este caso observamos no solo uno, sino diversos canales en la banda [949.90 – 959.90] MHz asignada a esta antena. En la siguiente figura se muestra el canal a medir, seleccionado con mayor precisión, que se encuentra aproximadamente entre [949.9 – 954.9] MHz.

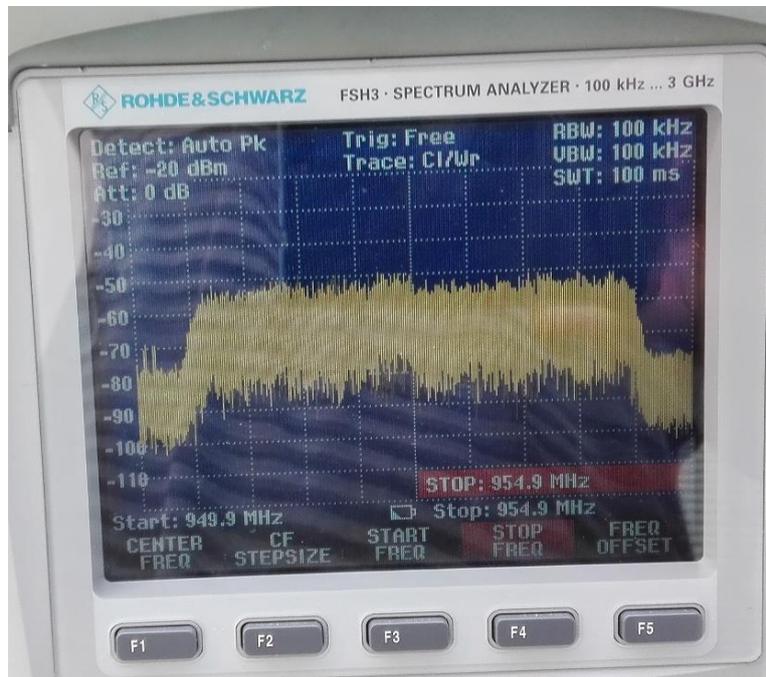


Figura 44: Canal 2G a medir [949.9 – 954.9]MHz con modo Analyzer.

A continuación se presenta este mismo canal empleando el modo “Channel Power” del analizador.

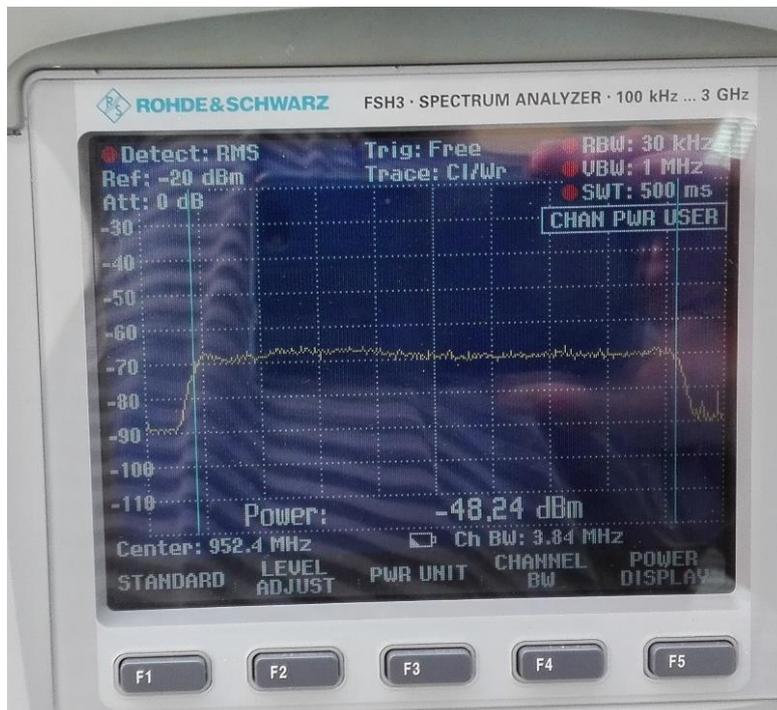


Figura 45: Canal 2G a medir [949.9 – 954.9]MHz con modo Channel Power.

Una vez determinadas las bandas frecuenciales donde se emiten los canales a medir y enmarcadas dichas bandas en los estándares móviles bajo estudio, se está en disposición de realizar la campaña de medidas.

Se realizarán dos recorridos en de Cartagena, uno para la medición de cada canal, donde se registrarán las coordenadas y la potencia recibida a lo largo de cada camino. El registro de los valores de potencia será realizado a mano, mientras que las coordenadas geográficas se tomarán mediante el ordenador portátil y el GPS de manera periódica a través de Matlab.

Posteriormente, la información recolectada será tratada en Matlab. Mediante este mismo entorno de programación realizaremos la transformación de coordenadas decimales a UTM. Se crearán dos archivos en los que se registre, para cada canal, las medidas tanto de potencia como sus respectivas coordenadas geográficas y por último, las medidas de potencia georreferenciadas serán representadas gráficamente. Por lo tanto, se podrán evaluar las pérdidas que introduce cada canal en función de la distancia.

### 5.2.2. Campaña de medidas

Teniendo localizados los canales a medir, se procede a la toma de mediciones con el equipo mostrado en la siguiente figura.

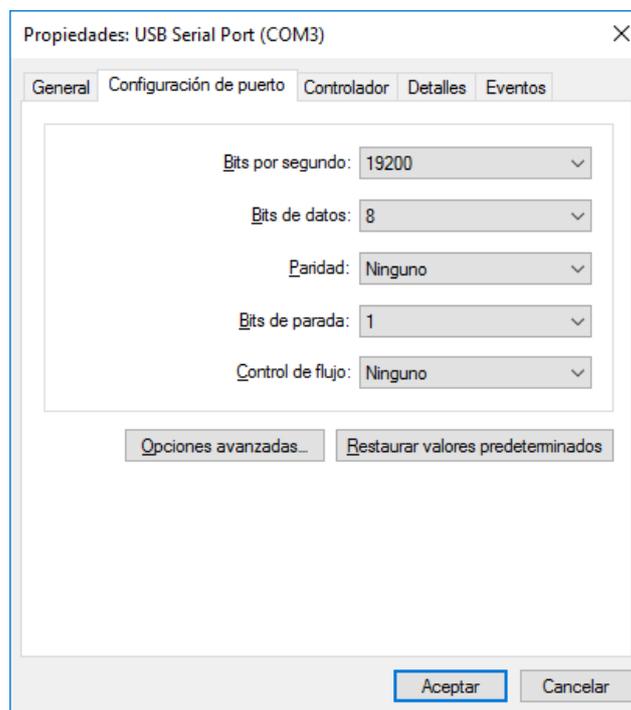


*Figura 46: Montaje del sistema de medidas.*

Se realizarán dos recorridos en coche por Cartagena en el que se registrarán por separado, las lecturas de potencia del analizador de espectros, tomadas a mano; y las lecturas de coordenadas geográficas tomadas del analizador de espectros y almacenadas en un archivo de Matlab.

Para establecer el protocolo de comunicación entre el GPS y el ordenador portátil, sería necesario instalar unas librerías que habiliten la utilización de las funciones propias del GPS. Tanto las librerías como las licencias de éstas, se obtienen de la web del fabricante. Gracias a su instalación se eludirá el estudio del protocolo de comunicaciones Garmin.

Sin embargo, en nuestro caso concreto, debido a problemas de incompatibilidades entre distintas versiones del software y el sistema operativo del ordenador, se ha recurrido a poner en práctica la comunicación entre el ordenador y el GPS a través de la capa física, es decir, directamente a través de los puertos COM empleando comandos AT<sup>40</sup>. Dichos puertos pueden ser configurados directamente desde el administrador de dispositivos en Windows o mediante comandos relativos a la comunicación del puerto serie en Matlab. En la siguiente figura se muestran ambas alternativas.



```
%Creación del objeto puerto serie x, representa la conexión con el
dispositivo
x = serial('COM3');
%Configuración de propiedades puerto COM3
set(x, 'BaudRate', 19200, 'DataBits', 8, 'Parity', 'None', 'StopBits', 1, 'Flow
Control', 'None');
```

Figura 47: Configuración de puertos COM desde el administrador de dispositivos de Windows (arriba) y desde Matlab (abajo).

<sup>40</sup> Comandos AT: El conjunto de comandos AT [4], también denominados comandos Hayes, son instrucciones codificadas que constituyen un lenguaje de comunicación entre el usuario y un terminal modem. Fueron desarrollados por la compañía Hayes Communications y prácticamente se convirtieron en estándar abierto de comandos para configurar y parametrizar módems. Los caracteres “AT”, que preceden a todos los comandos, significan “Atención”, e hicieron que se conociera también a este conjunto de comandos como comandos AT. Posteriormente, se generalizó su uso para diversos dispositivos.

La configuración de los parámetros del puerto COM en Matlab debe coincidir con la configuración que se indique en la ventana del administrador de dispositivos.

A lo largo de cada recorrido se ejecutará el siguiente código Matlab periódicamente, que proporcionará las coordenadas correspondientes a la posición geográfica ocupada cada vez que se realice una medición de potencia.

```

%% Código para lectura de coordenadas del GPS Garmin eTrex Vista

clc,clear all;
delete(instrfindall);
s=serial('COM3');
set(s,'Baudrate',4800,'StopBits',1,'DataBits',8,'Parity','none');
set(s,'Terminator','LF','OutputBufferSize',1000,'InputBufferSize',1000,
,'Timeout',100);
fopen(s);
s.ReadAsyncMode='continuous';
data='';

while isempty(strmatch('$GPGLL',data))
    data=fgets(s);
end

% Transformar el string para obtener las coordenadas
[lat,data] = strtok(data,',' );
[lat,data] = strtok(data,',' );
[nsCardinal,data] = strtok(data,',' );
[long,data] = strtok(data,',' );
[ewCardinal,data] = strtok(data,',' );
lat = str2double(lat);
long = str2double(long);

% Representación de resultados
disp({lat,nsCardinal,long,ewCardinal});

% Conversión de coordenadas a grados minutos y segundos
lat1=floor(lat);%°
lat2=floor(60*(lat-lat1));%'
aux=60*(lat-lat1);
aux2=aux-lat2;
lat3=floor(60*aux2);%'

long1=floor(long);%°
long2=floor(60*(long-long1));%'
auxa=60*(long-long1);
aux2a=auxa-long2;
long3=floor(60*aux2a);%'

% Presentación de coordenadas
fprintf('Coordenadas:\n')
fprintf('Latitud: \n',lat,nsCardinal)
fprintf('Longitud:\n',long,ewCardinal)

fclose(s);

```

Las coordenadas geográficas que nos proporciona este código en cada punto de medición vendrán dadas por el par latitud-longitud de la posición en cuestión. Por otra parte, en el archivo que recoge las coordenadas junto con el nivel de potencia en cada medición para representar las pérdidas en cada canal, dichas coordenadas geográficas estarán representadas en el sistema UTM.

El sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) [29] está basado en la proyección cartográfica transversal de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal (proyección cilíndrica tangente al Ecuador), pero en lugar de ser tangente al Ecuador, es secante a un meridiano. A diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros al nivel del mar, que es la base de la proyección del elipsoide de referencia. Los valores de las coordenadas UTM (X e Y) son siempre positivos; los ejes cartesianos X e Y se establecen sobre el huso, siendo el eje X el ecuador y el eje Y el meridiano.

En esta proyección, la Tierra queda dividida en 60 husos de 6° de longitud, numerándose cada huso con un dígito entre 1 y 60. Por ejemplo, la Península Ibérica está situada en los husos 29, 30 y 31, y Canarias está situada en los husos 27 y 28. Además, la Tierra se divide en 20 bandas de 8° de latitud, que son denominadas con letras desde la C hasta la X, excluyendo las letras “I” y “O”, para evitar confusiones con los números “1” y “0”. De modo que, una banda pertenecerá al hemisferio norte si su letra identificadora es igual o mayor que “N”, mientras que pertenecerá al hemisferio sur si su letra es menor que “N”. Concretamente, la zona UTM en la que se encuentra la ciudad de Cartagena corresponde a la 30S, como se puede comprobar en la siguiente figura.

Un ejemplo de coordenadas UTM es 30S 678415 4163494, que es la ubicación del Cuartel de Antigones en Cartagena, donde 30 indica la zona UTM, S la banda UTM, el primer número (678415) es la distancia en metros al Este y el segundo número (4163494) es la distancia en metros al Norte.

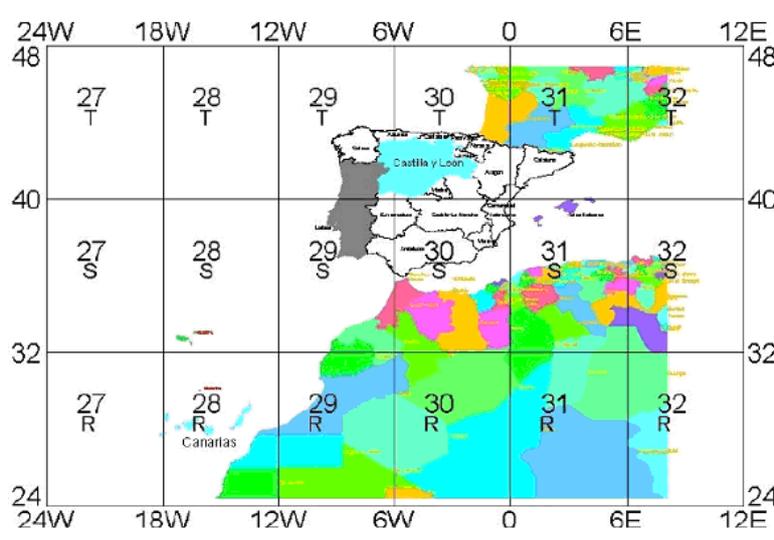


Figura 48: Distribución de zonas UTM en España [29].

Por lo tanto, será necesaria la conversión de coordenadas geográficas medidas con el GPS cuyos parámetros son latitud y longitud, a los parámetros o coordenadas X e Y del sistema de UTM. Para ello, se emplea la función “deg2utm” implementada en el siguiente código [3] Matlab:

```
function [x,y,utmzone] = deg2utm(Lat, Lon)
error(nargchk(2, 2, nargin)); %2 arguments required
n1=length(Lat);
n2=length(Lon);
if (n1~=n2)
    error('Lat and Lon vectors should have the same length');
end

% Memory pre-allocation

x=zeros(n1,1);
y=zeros(n1,1);
utmzone(n1,:)= '60 X';

% Main Loop

for i=1:n1
    la=Lat(i);
    lo=Lon(i);

    sa = 6378137.000000 ; sb = 6356752.314245;
    e2 = ( ( ( sa ^ 2 ) - ( sb ^ 2 ) ) ^ 0.5 ) / sb;
    e2cuadrada = e2 ^ 2;
    c = ( sa ^ 2 ) / sb;
    lat = la * ( pi / 180 );
    lon = lo * ( pi / 180 );
    Huso = fix( ( lo / 6 ) + 31);
    S = ( ( Huso * 6 ) - 183 );
    deltaS = lon - ( S * ( pi / 180 ) );

    if (la<-72), Letra='C';
    elseif (la<-64), Letra='D';
    elseif (la<-56), Letra='E';
    elseif (la<-48), Letra='F';
    elseif (la<-40), Letra='G';
    elseif (la<-32), Letra='H';
    elseif (la<-24), Letra='J';
    elseif (la<-16), Letra='K';
    elseif (la<-8), Letra='L';
    elseif (la<0), Letra='M';
    elseif (la<8), Letra='N';
    elseif (la<16), Letra='P';
    elseif (la<24), Letra='Q';
    elseif (la<32), Letra='R';
    elseif (la<40), Letra='S';
    elseif (la<48), Letra='T';
    elseif (la<56), Letra='U';
    elseif (la<64), Letra='V';
    elseif (la<72), Letra='W';
    else Letra='X';
end
```

```

a = cos(lat) * sin(deltaS);
epsilon = 0.5 * log( ( 1 + a ) / ( 1 - a ) );
nu = atan( tan(lat) / cos(deltaS) ) - lat;
v = ( c / (( 1 + ( e2cuadrada * ( cos(lat) ) ^ 2 ) ))^0.5)*0.9996;
ta = ( e2cuadrada / 2 ) * epsilon ^ 2 * ( cos(lat) ) ^ 2;
a1 = sin( 2 * lat );
a2 = a1 * ( cos(lat) ) ^ 2;
j2 = lat + ( a1 / 2 );
j4 = ( ( 3 * j2 ) + a2 ) / 4;
j6 = ( ( 5 * j4 ) + ( a2 * ( cos(lat) ) ^ 2 ) ) / 3;
alfa = ( 3 / 4 ) * e2cuadrada;
beta = ( 5 / 3 ) * alfa ^ 2;
gama = ( 35 / 27 ) * alfa ^ 3;
Bm = 0.9996 * c * ( lat - alfa * j2 + beta * j4 - gama * j6 );
xx = epsilon * v * ( 1 + ( ta / 3 ) ) + 500000;
yy = nu * v * ( 1 + ta ) + Bm;

if (yy<0)
    yy=9999999+yy;
end

x(i)=xx;
y(i)=yy;
utmzone(i,:)=sprintf('%02d %c',Huso,Letra);
end

```

El anterior código, recibirá como parámetros de entrada un array de latitudes y otro de longitudes, donde cada pareja latitud-longitud corresponderá a la posición geográfica donde se realizó cada medición. Y devolverá otros dos arrays X e Y, que representarán las mismas posiciones geográficas en el estándar UTM. En el siguiente código se puede apreciar a modo de ejemplo, la conversión de ciertas coordenadas tomadas en Cartagena.

```

%%Conversión coordenadas decimales a UTM

%Introducción de coordenadas decimales obtenidas del GPS
Lat = [37.600596; 37.599843; 37.599473; 37.599275; 37.598193;
37.598136; 37.598106; 37.598043; 37.598009; 37.597937; 37.59828;
37.599007; 37.599491; 37.600288; 37.60109];
Lon = [-0.978231; -0.97791; -0.978942; -0.979909; -0.97972; -0.980884;
-0.982303; -0.983475; -0.984469; -0.985591; -0.986729; -0.987325; -
0.988209; -0.988345; -0.988641];

%Obtención de coordenadas UTM
[x,y,utmzone] = deg2utm(Lat,Lon);

>> fprintf('%7.0f ',x)
 678474  678504  678414  678329  678348  678246  678120  678017
677929  677830  677729  677675  677596  677582  677554

>>fprintf('%7.0f ',y)
4163424 4163341 4163298 4163274 4163154 4163146 4163140 4163130
4163125 4163115 4163150 4163230 4163282 4163370 4163459

```

Cabe destacar que para cada recorrido se realizarán al menos un centenar de mediciones, tanto de potencia como de coordenadas geográficas. En el siguiente apartado, todas estas lecturas serán unidas en un mismo fichero y posteriormente representadas para cada canal estudiado.

### 5.2.3. Análisis y presentación de resultados

En este apartado se realiza la presentación de datos recolectados, a saber: posición geográfica y nivel de potencia; cuya obtención ha sido explicada en el apartado anterior. Posteriormente se realizará un ajuste de las mediciones al modelo de pérdidas básicas y se analizarán los resultados.

Para cada canal estudiado se trabajará con un fichero-M<sup>41</sup> completado manualmente como los que muestra la figura 50, donde la primera columna corresponde al orden de medida, las siguientes dos columnas corresponden a las componentes de cada coordenada UTM (x e y respectivamente) donde se tomó la medición, y la tercera columna corresponde al valor de potencia medido en dBm.

El primer recorrido realizado se muestra en la siguiente figura:



Figura 49: Primer recorrido.

A lo largo de este recorrido se realizó la toma de medidas tanto de potencia como de coordenadas geográficas para el canal 3G, [1805.1 - 1825.1]MHz, que se recogieron en el archivo “Medidas\_Canal1.m”.

<sup>41</sup> Estos ficheros serán denominados: “Medidas\_Canal\_1.m” y “Medidas\_Canal\_2.m”.

Medidas_Canal_1	Medidas_Canal_2
152	188
153 90 677532 4163483 -66.86	189 95 678478 4164473 -64.21
154	190
155 91 677535 4163491 -67.07	191 96 678478 4164480 -64.37
156	192
157 92 677532 4163493 -67.15	193 97 678477 4164488 -64.44
158	194
159 93 677528 4163515 -67.24	195 98 678476 4164495 -64.62
160	196
161 94 677520 4163525 -67.38	197 99 678476 4164502 -64.75
162	198
163 95 677518 4163537 -67.60	199 100 678475 4164509 -64.86
164	200
165 96 677515 4163547 -68.25	201 101 678476 4164516 -64.95
166	202
167 97 677513 4163557 -68.39	203 102 678475 4164523 -65.17
168	204
169 98 677509 4163567 -68.74	205 103 678475 4164529 -65.32
170	206
171 99 677507 4163577 -69.28	207 104 678473 4164541 -65.48
172	208
173 100 677504 4163592 -69.53	209 105 678473 4164546 -65.63
174	210
175 101 677500 4163595 -69.75	211 106 678473 4164552 -65.81

Figura 50: Ficheros de medidas para ambos canales.

Se ejecutará en Matlab el código siguiente, que, teniendo en cuenta la posición UTM de la antena transmisora y el fichero cargado con las medidas realizadas, calculará la distancia entre la antena transmisora y el punto donde se recibió cada medida de potencia y, por último, representará la potencia recibida a lo largo de cada recorrido frente a la distancia entre la antena y cada punto de medición de potencia.

```

%Representación de las medidas para ambos canales
clc
clear

%Cargar Archivos
medida1 = load('Medidas_Canal_1');
% medida2 = load('Medidas_Canal_2');

%Calculo de la distancia entre Tx y Rx Canal 2
pos_tx1 = [678473, 4163399];
pos_tx2 = [678444, 4163488];

dist_1 = sqrt((medida1(:,2)-pos_tx1(1)).^2+(medida1(:,3)-
pos_tx1(2)).^2);
%dist_2 = sqrt((medida2(:,2)-pos_tx2(1)).^2+(medida2(:,3)-
pos_tx2(2)).^2);
    
```

```
%Representar pérdidas en funcion de las distancias

%%Canal 1: [1805.1 - 1825.1]MHz

%Lineal
figure
plot(dist_1,medida1(:,4))
hold on
title('Distancia-Potencia recibida')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('Potencia recibida (dBm)')
hold off

%Logaritmico
figure
plot(10*log10(dist_1),medida1(:,4))
hold on
title('Distancia-Potencia recibida (Logaritmico) ')
xlabel('Distancia')
ylabel('Potencia recibida (dBm)')
hold off

%%Canal 2: [949.9 - 954.9]MHz

%Lineal
figure
plot(dist_2,medida2(:,4))
hold on
title('Distancia-Potencia recibida')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('Potencia recibida (dBm)')
hold off

%Logaritmico
figure
plot(10*log10(dist_2),medida2(:,4))
hold on
title('Distancia-Potencia recibida (Logaritmico) ')
xlabel('Distancia')
ylabel('Potencia recibida (dBm)')
hold off
```

Para el primer canal se obtiene la siguiente gráfica, donde se observa la potencia recibida frente a la distancia a la estación transmisora.

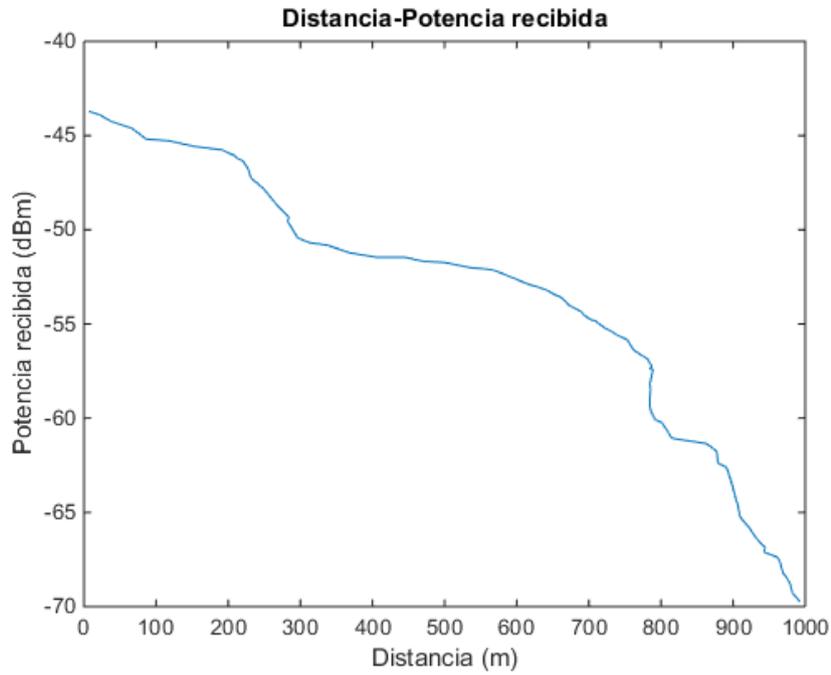


Figura 51: Potencia del canal 3G frente a distancia en cada punto del primer recorrido.

Realizamos esta representación en unidades logarítmicas para apreciar visualmente la incidencia del cambio entre unidades lineales y logarítmicas.

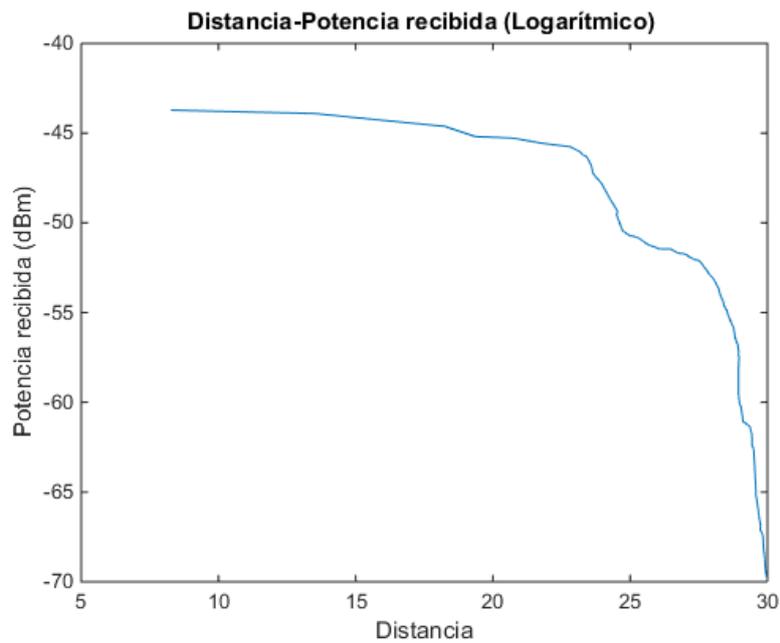


Figura 52: Potencia del canal 3G frente a distancia en cada punto del primer recorrido (Unidades logarítmicas).

A continuación se muestra el recorrido a lo largo del cual se realizaron las medidas del segundo canal:



Figura 53: Segundo recorrido.

Análogamente al canal anterior, se obtuvieron las siguientes gráficas para el canal 2G situado entre 949.9 y 954.9 MHz.

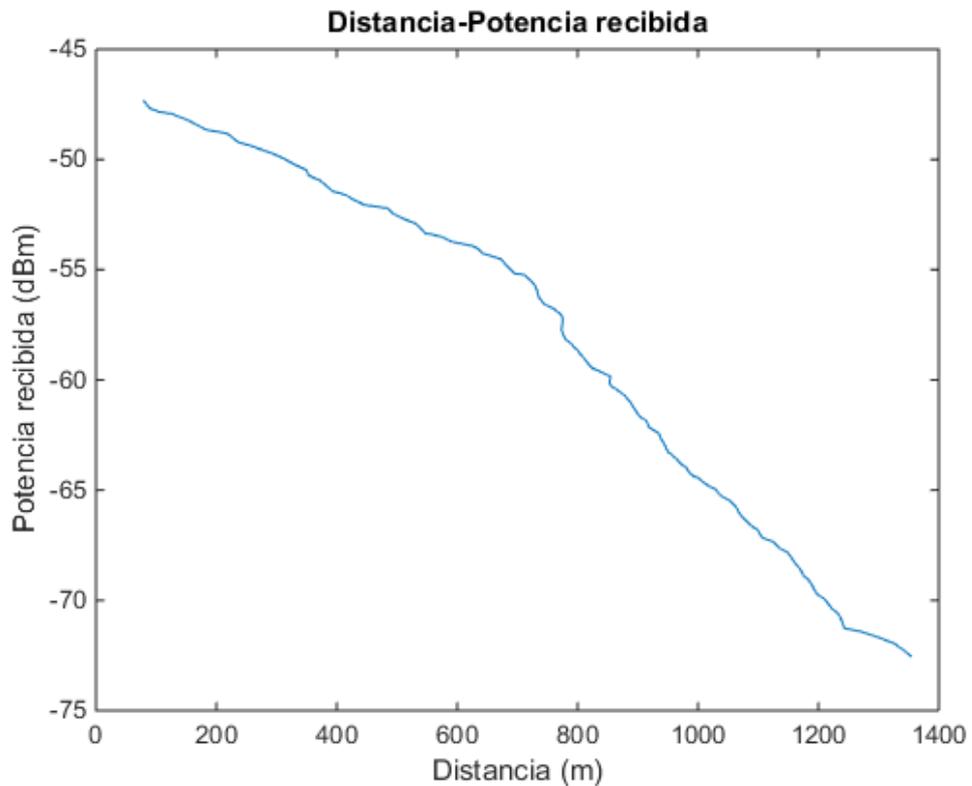


Figura 54: Potencia del canal 2G frente a distancia en cada punto del segundo recorrido.

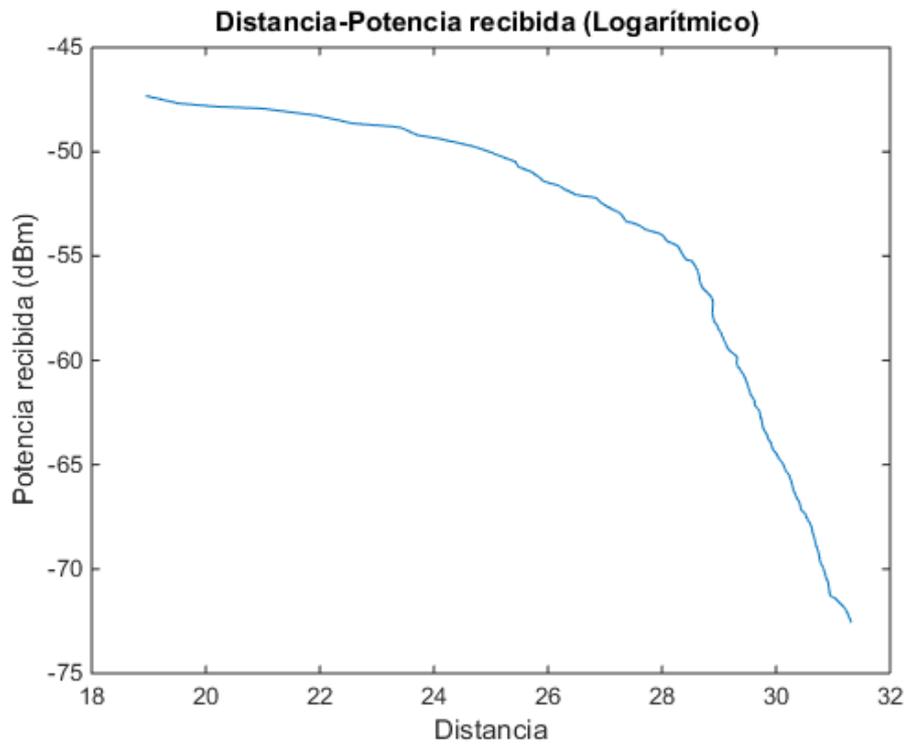


Figura 55: Potencia del canal 2G frente a distancia en cada punto del segundo recorrido (unidades logarítmicas).

En general, se aprecia que al usar ejes en escala lineal y logarítmica, la gráfica con la distancia expresada en unidades logarítmicas se aproxima más a una recta. Esto se debe a que trabajamos en gran escala<sup>42</sup>, donde se producen fluctuaciones aleatorias alrededor de un valor constante (media) y la caracterización estadística se aproxima por una recta.

El resultado de las representaciones anteriores consiste en curvas formadas por la unión del nivel de potencia medido en cada punto a lo largo de los recorridos realizados, que se puede aproximar por la recta de regresión indicada en el capítulo 2, es decir:  $L_b = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log(d) + X_\sigma$ . La representación de la recta obtenida mediante Matlab para cada recorrido y el código empleado para ello, se muestra a continuación:

<sup>42</sup> Los modelos de propagación a gran escala predicen el comportamiento del canal radio para distancias muy superiores a su longitud de onda, es decir, para distancias  $\gg \lambda$ . Corresponden a cambios del valor medio de la señal cuando la distancia del transmisor al receptor varía significativamente [9].

```

%Ajuste al modelo de pérdidas y recta de regresión
clc
clear

%Cargar Archivos
medida1 = load('Medidas_Canal_1');
% medida2 = load('Medidas_Canal_2');

%Calculo de la distancia entre Tx y Rx
pos_tx1 = [678473, 4163399];
pos_tx2 = [678444, 4163488];
dist_1 = sqrt((medida1(:,2)-pos_tx1(1)).^2+(medida1(:,3)-
pos_tx1(2)).^2);
%dist_2 = sqrt((medida2(:,2)-pos_tx2(1)).^2+(medida2(:,3)-
pos_tx2(2)).^2);

%% Canal 1: [1805.10 - 1825.10] MHz
L0 = polyfit(10*log10(dist_1),medida1(:,4),1);
n = L0(1)
L0 = L0(2)
L = L0 + 10*n*log10(dist_1);

%Representar Curva de Regresion L
figure
plot(10*log10(dist_1),medida1(:,4),'.')
hold on

plot(10*log10(dist_1),L,'r')
title('Recta de Regresion Canal 1')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('Perdidas (dB)')
hold off

%% Canal 2: [949.9 - 954.9]MHz
L0 = polyfit(10*log10(dist_2),medida2(:,4),1);
n = L0(1)
L0 = L0(2)
L = L0 + 10*n*log10(dist_2);

%Representar Curva de Regresion L
figure
plot(10*log10(dist_2),medida2(:,4),'.')
hold on

plot(10*log10(dist_2),L,'r')
title('Recta de Regresion Canal 2')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('Perdidas (dB)')
hold off

```

Recta de regresión para el primer canal [1805.1 – 1825.1] MHz:

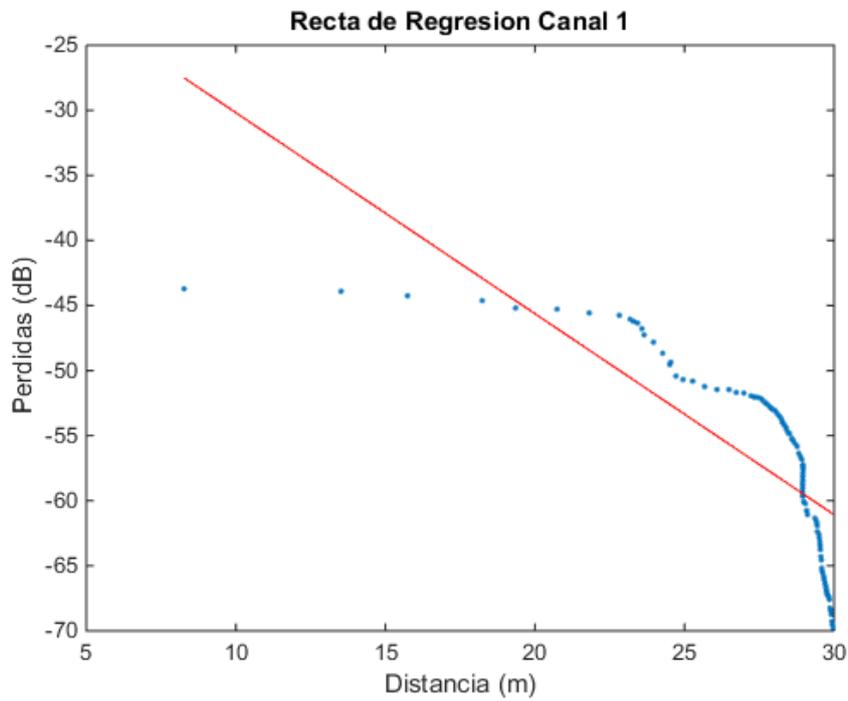


Figura 56: Potencia frente a distancia en cada punto del primer recorrido y recta de regresión.

Recta de regresión para el segundo canal [949.9 – 954.9] MHz:

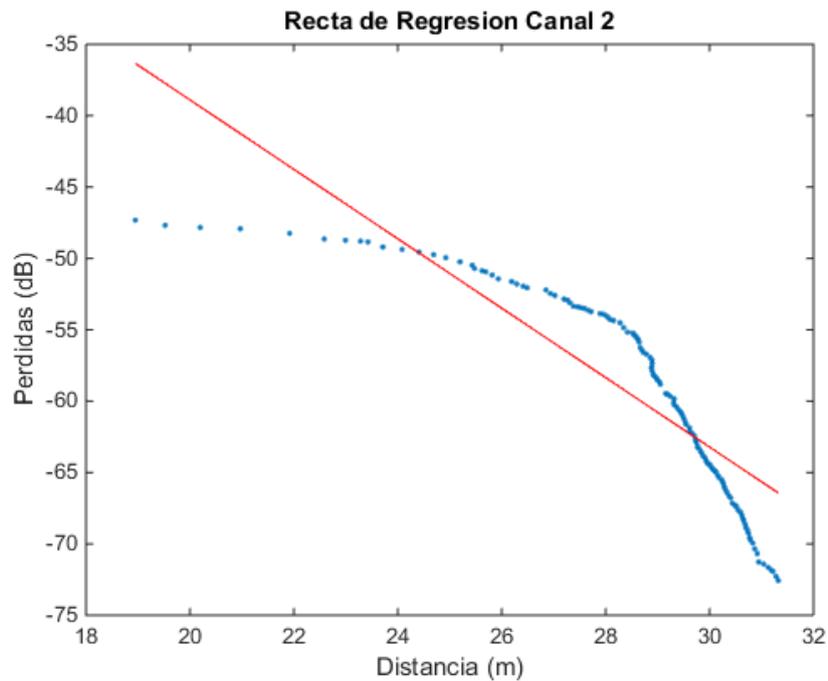


Figura 57: Potencia frente a distancia en cada punto del segundo recorrido y recta de regresión.

Tanto  $L_0$  como  $n$  son dos parámetros que dependen de la frecuencia y del entorno de propagación. Sus valores suelen estar tabulados para su uso práctico. Los valores experimentales de  $n$  y  $L_0$  obtenidos mediante el ajuste al modelo de pérdidas básicas para cada canal estudiado son:

Canal	$L_0$	$n$
1 [1805.1 - 1825.1] MHz	-14.7407	-1.5445
2 [949.9 - 954.9] MHz	9.7501	-2.4323

Tabla 6: Valores de  $L_0$  y  $n$  obtenidos para ambos canales.

El parámetro  $n$  corresponde a la pendiente de la recta de regresión, que será negativa ya que se está representando la potencia recibida frente a la distancia a la antena transmisora. Este parámetro  $n$ , constituye un índice de la variación de la potencia con la distancia, tal que, a mayor  $n$  se tendrán mayores pérdidas.

Por otro lado, el parámetro  $L_0$  corresponderá con el corte de la recta de regresión con el eje de ordenadas en las figuras 56 y 57, por lo que será una constante de ajuste dependiente de la potencia recibida durante la campaña de medidas, y por lo tanto, del valor de  $n$  calculado. Este parámetro  $L_0$  es una constante que representa las pérdidas a una distancia de la antena transmisora de 1m.

La recta de regresión es aquella que mejor aproxima los puntos de medida de cada uno de los canales que forman parte de esta campaña de medida. Esto se consigue gracias al empleo de la función de Matlab “polyfit”, la cual ajusta el polinomio que se le pasa como argumento a los datos con que trabajamos, es decir, las mediciones realizadas, definidas asimismo como argumento de esta función.

Un ejemplo de uso vendría dado por la sentencia: `polyfit(X,Y,N)` que encuentra los coeficientes del polinomio  $P(X)$  de grado  $N$  que se ajusta mejor a los datos  $Y$  en cuanto a mínimos cuadrados. Además  $P$  es un vector fila de longitud  $N+1$  que contiene los coeficientes del polinomio en potencias (orden) descendentes.

El valor de  $n$  obtenido en el primer caso (canal 3G) es superior al calculado para el caso 2G. Ésto se debe principalmente a que en el recorrido realizado para el primer canal (figura 49) no hay prácticamente ninguna situación de visión directa con la antena transmisora, y por lo tanto, la potencia recibida disminuye. Por otro lado, las medidas del primer canal se realizan para una frecuencia mayor que la del segundo, y a frecuencias superiores las pérdidas de propagación son mayores, por lo que el nivel de potencia recibida se atenúa más rápidamente con la distancia para el primer caso, es decir, para el canal

## Capítulo 6: Conclusiones

Como ya ha sido comentado en diversas ocasiones, este proyecto ha tenido como objetivo el diseño e implementación de una campaña de medidas del canal de radiocomunicaciones, compuesto por un GPS y un analizador de espectros.

A lo largo de las distintas etapas del proyecto se han enfrentado numerosas dificultades, que no han hecho más que permitir un conocimiento en profundidad del funcionamiento de la totalidad de equipos que constituyen el sistema.

Además, las medidas realizadas han posibilitado la verificación del correcto funcionamiento de la instrumentación con que se ha trabajado y de la comprobación experimental de la contextualización teórica.

Por tanto, con la realización de este proyecto, se han sentado unas bases que ayudarán a potenciales desarrollos subsecuentes en este ámbito de estudio. Algunas de estas líneas futuras se enumeran a continuación:

- Diseñar una aplicación informática para la automatización, gestión y el control del sistema de medidas del canal de radiocomunicaciones, que podría ser extendida con nuevas prestaciones que permitan el procesado posterior de las medidas realizadas: media, desviación típica, etc.
- Ampliar la capacidad del sistema de medidas incluyendo otros equipos y funcionalidades que nos proporcionen información adicional sobre el canal de radiocomunicaciones.

Se ha comprobado satisfactoriamente y de forma experimental, que los resultados de la campaña de medidas se adecúan al estudio teórico previo del canal radio para el que fue diseñada. En consecuencia, se han cumplido los objetivos propuestos al inicio de la elaboración del proyecto, al obtener unos resultados óptimos y coincidentes con los teóricos extraídos de la bibliografía considerada.

La realización de este proyecto ha conllevado el asentamiento y puesta en práctica de conocimientos adquiridos a lo largo de la etapa estudiantil, así como el aprendizaje del análisis general del canal de radiocomunicaciones.

## Bibliografía

- [1] Manual de referencia y programación del analizador de espectros R&S-FSH3.
- [2] Manual de usuario del navegador GPS Garmin Etrex Vista.
- [3] Ayuda web de Matlab: <https://es.mathworks.com/>
- [4] J. M. Hernando Rábanos y C. Lluch, *Comunicaciones Móviles de Tercera Generación Vols I y II*, Edita Telefónica Móviles España S.A., 2000.
- [5] Bello Phillip A., *Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels*, *IEEE Transactions on communications systems*, 1963.
- [6] J. M. Hernando Rábanos, *Transmisión por Radio*, Centro de Estudios Ramón Areces S.A., 1998.
- [7] Mazda, F. *Telecommunications Engineer's Reference Handbook*, 2nd Ed. Focal Press, 2001.
- [8] Rohde, U.L. and Newkirk, D.P. *RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 2000.
- [9] Juan Pascual García, José María Molina García-Pardo, Leandro Juan Llácer, *Caracterización del Canal Móvil*, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [10] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, May 1989.
- [11] J. B. Keller, *Geometrical theory of diffraction*, *Journal Optical Society American*, vol. 52, no. 2, pp. 116-130. 1962.
- [12] Rappaport, Theodore S., *Wireless Communications principles and practice*, Second Edition, Prentice Hall, ISBN 0130422320.
- [13] Cohen, Malcolm (ed.) (2001) ISO/IEC TR 15581(E) *Technical Report: Information technology – Programming languages – Fortran – Enhanced data type facilities* (second edition). ISO, Geneva.
- [14] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Reglamento de Radiocomunicaciones*, Edición 2016, ISBN 978-92-61-19123-8.
- [15] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*, 2nd Ed., Prentice Hall, 2005.
- [16] Web del fabricante: <https://www.narda-sts.com/>

- [17] J. M. Hernando Rábanos, *Comunicaciones móviles*, Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S. A., 1997.
- [18] IEEE 802.15.3: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension*. New York: IEEE, 2009.
- [19] Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice Hall, 2000.
- [20] John A. Phillips, Gerard Mac Namee, *Mobile Communications Series: Personal Wireless Communication with DECT and PWT*, Artech House Publishers, 1998.
- [21] Hoja de especificaciones de la antena Schwarzbeck SBA 9113:  
<http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9113.pdf>
- [22] <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do>
- [23] José María Hernando Rábanos, *Comunicaciones Móviles*, Madrid, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces. Segunda Edición.
- [24] Parsons J.D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, Second Edition, John Wiley & Sons, ISBN 047198857X.
- [25] [http://ctputelefonoscelulares10-1.blogspot.com.es/2014/09/los-primeros-telefonos-celulares\\_15.html](http://ctputelefonoscelulares10-1.blogspot.com.es/2014/09/los-primeros-telefonos-celulares_15.html)
- [26] <http://www.movistar.es/particulares/coberturas/movil/4G/>
- [27] <https://www.vodafone.es/conocenos/es/vodafone-espana/mapa-de-cobertura/consulta-de-cobertura-movil/>
- [28] <http://www.antenasgsm.com>
- [29] Ignacio Alonso Fernández-Coppel, *La Proyección UTM*, Universidad de Valladolid, 2001.
- [30] T.Venkat Narayana Rao, *5g technologies – An anecdote of network service for the future*, Journal of Global Research in Computer Science Volume 2 No (7), July 2011 164-170.
- [31] Toni Janevski, *5G Mobile Phone Concept*, Consumer Communications and Networking Conference, 2009 6th IEEE.
- [32] B. G. Evans and K. Baughan, *Visions of 4G*, Electronics and Communication Engineering Journal, Dec. 2002.
- [33] <http://www.minetad.gob.es/es-ES/GabinetePrensa/NotasPrensa/2017/Paginas/plan-nacional-5g20171201.aspx>