

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

**Optimización de un sistema de radiocomunicaciones para la transmisión de la telemetría de una moto en un entorno real de un circuito.**



AUTOR: David Hernández Mejías  
DIRECTOR: José María Molina Pardo-García  
Septiembre / 2015



<b>Autor</b>	David Hernández Mejías
<b>E-mail del autor</b>	<a href="mailto:David.hm91@gmail.com">David.hm91@gmail.com</a>
<b>Director</b>	José María Molina García-Pardo
<b>E-mail del director</b>	<a href="mailto:Josemaria.molina@upct.es">Josemaria.molina@upct.es</a>
<b>Título del TFG</b>	Optimización de un sistema de radiocomunicaciones para la transmisión de la telemetría de una moto en un entorno real de un circuito.
<b>Resumen</b>	<p>Motostudent es una competición promovida por la fundación Moto Engineering Foundation (MEF) entre universidades españolas y europeas. Consiste en diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición de 125 centímetros cúbicos y dos tiempos, y superar unas pruebas de evaluación que se llevarán a cabo en las instalaciones de la Ciudad del Motor de Aragón.</p> <p>El proyecto se enmarca dentro de un trabajo multidisciplinar que parte de la recopilación de los datos de la telemetría en una placa situada en la moto, que se transmiten vía radio y que posteriormente, se muestran a través de un software desarrollado específicamente para este propósito.</p> <p>El objetivo de este es la optimización de un sistema de radiocomunicaciones, ya implementado de forma básica en un anterior proyecto de la primera versión del sistema de telemetría ya nombrado, para conseguir un sistema robusto que permita la transmisión de datos bidireccional entre la fuente de datos de una moto de competición y un servidor, donde serán recopilados y transformados para ser almacenados, permitiendo la monitorización del estado de la moto en cada tramo del circuito en tiempo real.</p> <p>La aplicación estará compuesta por un dispositivo denominado “CMW-500 fabricado por Rohde&amp;Schwarz” que actuará como estación base GSM/UMTS para dar cobertura a todo el circuito para transmitir a tiempo real independientemente de cualquier operador. Este equipo actuará como unión entre los extremos para implementar la comunicación sobre el protocolo IP/UDP.</p>
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Intensificación</b>	Sistemas y Redes de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de presentación</b>	Septiembre de 2015



---

## Índice general

---

1. Introducción .....	9
1.1. Motivación .....	9
1.2. Objetivos .....	10
1.2.1. Objetivo general .....	10
1.2.2. Fases del proyecto .....	13
1.2.3. Objetivos específicos .....	15
1.4. Estructura de la memoria .....	15
2. Estado del arte de telemetría .....	17
2.1. Introducción a la telemetría .....	17
2.2. Origen y evolución de la telemetría .....	17
2.3. Aplicaciones actuales de la telemetría .....	19
2.3.1. Competición: Fórmula 1 y Moto GP .....	19
2.3.2. Domótica .....	22
2.3.3. Robótica .....	22
2.3.4. Medicina .....	23
2.4. Líneas de investigación en la telemetría .....	24
2.4.1. Láser de estado sólido de pulsos cortos para telemetría .....	24
2.4.2. Control de vehículos aéreos no tripulados .....	24
2.4.3. Integración de la monitorización y control eficiente en tiempo real de redes de agua potable .....	25
2.4.4. Metodologías para la colecta de muestras en fauna silvestre <i>in situ</i> .....	25
2.5.5. Alerta de desborde de ríos y consulta de parámetros de humedad y temperatura vía SMS .....	25
2.4.6. Medición de profundidad de ríos y lagos .....	26
3. Sistemas de comunicaciones móviles .....	27
3.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles .....	27
3.2. Estándar de comunicaciones móviles .....	28
3.2.1. Sistemas de comunicaciones móviles 2G .....	28
3.2.2. Sistemas de comunicaciones móviles 2.5G .....	30
3.2.3. Sistemas de comunicaciones móviles 3G .....	33
3.2.4. Sistemas de comunicaciones móviles 4G .....	34
3.2.5. Comparativa .....	36
4. Entorno de trabajo .....	37
4.1. Escenario de la aplicación .....	37



4.2. Instrumento de radiocomunicaciones Rohde & Schwarz CMW500 .....	39
4.2.1. Funcionamiento de R&S CMW500 según el tipo de aplicación .....	40
4.3. Entorno software .....	41
4.3.1. R&S CMW500 como analizador .....	41
4.3.2. R&S CMW500 para aplicaciones de radiofrecuencia. ....	42
4.4. Diseño implementado en su primera versión.....	44
5. Diseño del nuevo sistema de radiocomunicación .....	46
5.1. Novedades.....	46
6. Configuraciones GSM Y UMTS mediante el R&S CMW500 .....	50
6.1. Configuración de UMTS.....	50
Ajustes en la atenuación externa de salida .....	52
Ajustes en la atenuación externa de entrada.....	55
6.2. Configuración de GSM .....	58
Ajustes en la atenuación externa de salida .....	60
Ajustes en la atenuación externa de entrada.....	62
7. Balance de potencias .....	64
7.1. Balance de potencias en GSM 900 .....	65
7.2. Balance de potencias en GSM 1900 .....	65
7.3. Balance de potencias en UMTS .....	66
8. Estudio del comportamiento del sistema en diferentes entornos .....	67
8.1. Estudio en un entorno cerrado sin rayo directo .....	67
8.1.1. Ubicación y dirección del estudio sobre plano.....	67
8.1.2. Comparativa de potencia y tasa de transferencia respecto de la distancia. ....	68
8.1.3. Comparativa de FFT respecto de la distancia. ....	72
8.2. Estudio en un entorno abierto con rayo directo .....	74
8.1.1. Ubicación y dirección del estudio sobre plano.....	74
8.1.2. Comparativa de potencia y tasa de transferencia respecto de la distancia. ....	75
8.1.3. Comparativa de FFT respecto de la distancia. ....	79
9. Conclusiones .....	81
9.1. Conclusiones .....	81
9.2. Líneas futuras.....	82
Bibliografía.....	83
Anexo A.....	85
A.1. Material empleado y justificación.....	85
A.1.1. Instrumento de radiocomunicaciones Rohde&Swarch CMW500 .....	85



Especificaciones GSM por el fabricante.....	86
Especificaciones UMTS por el fabricante.....	88
A.1.2. Antena (bicónica) SBA 9113 .....	91
A.1.3. Modem USB ZTE MF190 3G CDMA.....	92
A.1.4. Tarjeta SIM Mini-UICC R&S CMW-Z04 .....	92
A.1.5. Cables .....	92
A.2. Metodologías para la puesta en marcha del instrumento R&S CMW500 .....	93
A.2.1. Metodología para generar una señal y célula móvil UMTS.....	93
A.2.2. Metodología para generar una señal y célula móvil GSM .....	94
A.2.3. Metodología para configurar el componente DAU .....	95



## Índice de figuras

Figura 1-1. Segunda posición del equipo de Moto-UPCT en “ModoDes”, Cheste. ....	9
Figura 1-2. Diseño del conjunto de proyectos de obtención, envío, recepción y visualización de datos. ....	11
Figura 1-3. Equipo usado en el trabajo realizado por Belén Pérez Muñoz. ....	11
Figura 1-4. Representación de los datos en el TFG desarrollado por Pedro José Conesa Sánchez. ....	12
Figura 1-5. Representación de la posición GPS en el TFG desarrollado por Pedro José Conesa Sánchez. ....	12
Figura 2-1. Regulador Watt [4]. ....	18
Figura 2-2. Circuito de vía [6]. ....	18
Figura 2-3. Antena de telemetría de un monoplaça [8]. ....	20
Figura 2-4. Centralita de datos de un monoplaça [9]. ....	20
Figura 2-5. Esquema completo de un monoplaça [8]. ....	21
Figura 2-6. Ejemplo de telemetría en MotoGP [10]. ....	22
Figura 2-7. Electrocardiograma obtenido por telemetría [13]. ....	23
Figura 2-8. Telemetría láser [15]. ....	24
Figura 3-1. Evolución de la red celular [17]. ....	27
Figura 3-2. Arquitectura GPRS [20]. ....	31
Figura 3-3. Ejemplo de encaminamiento de paquetes [19]. ....	32
Figura 3-4. Arquitectura UMTS [21]. ....	33
Figura 3-5. Arquitectura LTE [23]. ....	35
Figura 4-1. Comunicación inalámbrica a través de la red pública de Internet. ....	38
Figura 4-2. Comunicación inalámbrica a través de la red privada del R&S CMW500. ....	38
Figura 4-3. Rohde & Schwarz CMW500. ....	39
Figura 4-4. Primera pantalla del programa. ....	41
Figura 4-5. R&S CMW500 como analizador. ....	42
Figura 4-6. R&S CMW500 como generador/estación base. ....	43
Figura 4-7. Transferencia de paquetes en sentido ascendente hacia el servidor por GSM. ....	45
Figura 5-1. Momento de las pruebas en el laboratorio de la Facultad de Telecomunicaciones de la UPCT. ....	46
Figura 5-2. Momento de las pruebas en el patio de la Facultad de Telecomunicaciones de la UPCT. ....	47
Figura 5-3. Esquema general del sistema de radiocomunicación empleado en el sistema de telemetría. ....	48
Figura 5-4. Esquema de bloques interno del R&S CMW500 en una señal UMTS. ....	49
Figura 6-1. Configuración del APN para conectar al CMW500. ....	50
Figura 6-2. Red del CMW500 reconocida por el modem USB. ....	51
Figura 6-3. Modem USB registrado y enlazado a la red por el CMW500. ....	51
Figura 6-4. Modem USB conectado con éxito por paquetes al CMW500. ....	52
Figura 6-5. Conexión por conmutación de paquetes establecida. Datos reportados del UE (User Equipment, Modem USB en nuestro caso). ....	52
Figura 6-6. Output power demasiado bajo para conectar con el equipo. ....	53
Figura 6-7. Conexión por conmutación de paquetes establecida. ....	54
Figura 6-8. Ajuste de la atenuación externa de salida. ....	55
Figura 6-9. Target Power configurado en el control de potencia de transmisión del UE. ....	56
Figura 6-10. Comprobación de estabilidad con la atenuación externa de entrada a 45 dB. ....	57
Figura 6-11. Configuración del APN para conectar al CMW500. ....	58
Figura 6-12. Red del CMW500 registrada y conectada por el modem USB. ....	58



Figura 6-13. Modem USB registrado y enlazado a la red por el CMW500. ....	59
Figura 6-14. Conexión por conmutación de paquetes establecida en GSM 1900. ....	60
Figura 6-15. Conexión por conmutación de paquetes establecida en GSM 1900 con atenuación externa de salida de 40 dB. ....	61
Figura 6-16. Conexión realizada con atenuación externa de salida de 32 dB con problemas de estabilidad. ....	61
Figura 6-17. Potencia baja recibida por el UE con atenuación externa de salida de 40 dB y a la entrada de 45 dB. ....	62
Figura 6-18. Potencia adecuada recibida por el UE con atenuación externa de salida de 40 dB y a la entrada de 57 dB. ....	63
Figura 8-1. Pano del sótano de la ETSIT donde se realizaron las medidas. ....	67
Figura 8-2. Comparativa de potencias de TX de cada extremo en UMTS en el sótano. ....	68
Figura 8-3. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS a 1.5 metros del CMW500. ....	69
Figura 8-4. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS al final del tramo en el sótano. .	69
Figura 8-5. Potencia transmitida por el CMW500 en GSM 1900 en el sótano. ....	70
Figura 8-6. Potencia transmitida por el CMW500 en GSM 900 en el sótano. ....	70
Figura 8-7. Tasas de transferencia de paquetes antes de girar la esquina en GSM. ....	71
Figura 8-8. Tasas de transferencia de paquetes después de girar la esquina en GSM. ....	71
Figura 8-9. Espectro de frecuencias de UMTS a 1 metro de la estación base. ....	72
Figura 8-10. Espectro de frecuencias de UMTS tras recorrer 21 metros con rayo directo y girar una esquina de 90° hasta alcanzar otros 5 metros. ....	73
Figura 8-11. Pano del sótano de la ETSIT donde se realizaron las medidas. ....	74
Figura 8-12. Comparativa entre potencias transmitidas por ambos extremos. UMTS en el patio. ....	75
Figura 8-13. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS desde 1 a 14 metros del CMW500 con rayo directo. ....	76
Figura 8-14. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS desde 1 a 35 metros del CMW500 con rayo directo. ....	76
Figura 8-15. Potencia de TX del enlace GSM1900 de bajada en el patio para máxima amplitud y alcance. ....	77
Figura 8-16. Potencia de TX del enlace GSM900 de bajada en el patio para máxima amplitud y alcance. ....	77
Figura 8-17. Tasas de transferencia de paquetes en GSM desde 1 a 50 metros del CMW500 con rayo directo. ....	78
Figura 8-18. Espectro de frecuencias de UMTS a 1.5 metros de la estación base. ....	79
Figura 8-19. Espectro de frecuencias de UMTS tras recorrer 43 metros en situación de línea de visión directa (Line of Sight). ....	80



## Agradecimientos

Ya no sólo por este proyecto, sino por mi etapa universitaria y el cambio de ciclo que se presenta actualmente... Gracias a mi familia por aguantarme, aguantar aquellos días ofuscados en los que yo no veía más allá y tenían que “comerse” mi mal humor, son los que se llevan la peor parte sin lugar a dudas, y los que aun así ahí estarán siempre al pie del cañón. Mi hermano y mis padres en especial, aunque hay que decir que todavía tienen que entendernos a nosotros, los ingenieros!

Prácticamente con la misma importancia, no me puedo olvidar de los únicos que han sido capaces de evadirme de la realidad al menos durante unas horas, a veces incluso obligado por ellos, y por eso mismo les estaré eternamente agradecido! Sin ellos habría sido más caótico.

Sin olvidarme del equipo de telemetría al completo, desde los directores Jose María Molina y Javier Garrigós hasta con mis tres compañeros Andrés, Victor y Paco, con quienes era imposible no llevarse bien y avanzar en esta pequeña aventura.

Gracias

David Hernández Mejías



---

# 1. Introducción

---

## 1.1. Motivación

La competición MotoStudent [1], promovida por la fundación Moto Engineering Foundation, plantea el desafío entre distintas universidades españolas y europeas de diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición de 125 centímetros cúbicos y 2 tiempos.

La motocicleta debe superar unas pruebas de evaluación que se llevan a cabo en las instalaciones de la Ciudad del Motor de Aragón, como se acostumbra en todas las ediciones hasta hoy día. En ellas se tienen en cuenta aspectos técnicos de la moto como son la aceleración, la frenada, la manejabilidad y la durabilidad, y también se pone a prueba la capacidad de innovación en el diseño y estética de la moto.

Por tanto, este proyecto se enmarca dentro de un trabajo multidisciplinar que comprende distintas tareas relacionadas con la elaboración de un sistema de telemetría de una moto de competición. Aunque, la memoria de este trabajo se centra, en particular, en la configuración del sistema de transmisión de datos.

El comienzo de la participación de la ETSIT en MotoStudent data del curso 2008-2009. Esta iniciativa surgió con el propósito de hacer posible que los alumnos alcanzasen las competencias reales y de largo alcance mediante la articulación de proyectos de carácter técnico, dirigidos al diseño y construcción de prototipos de elementos, dispositivos o sistemas tecnológicos vinculados a las titulaciones universitarias estudiadas.

En 2013, el equipo de estudiantes de la ETSIT consiguió alcanzar la segunda posición en el campeonato de velocidad “MotoDes” celebrado en Cheste (figura 1.1).



*Figura 1-1.* Segunda posición del equipo de Moto-UPCT en “MotoDes”, Cheste.



## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general, de cara a estas pruebas técnicas, consiste en obtener el mayor rendimiento de la moto, así como mejorar sus prestaciones prueba tras prueba, y para conseguirlo, en la UPCT se apostó por la necesidad de recopilar la mayor cantidad posible de información en tiempo real, con las ventajas que ello conlleva, pues en casos normales, el resto de equipos analiza los datos una vez la moto llega al box.

Este objetivo consistiría en diseñar un sistema de transmisión de datos bidireccional, en el cuál, los datos generados por la moto sean transmitidos inmediatamente después de ser registrados. Pretendiéndose monitorizar el estado de la moto en cada uno de los tramos del circuito en tiempo real y así, poder comprobar la eficiencia del desarrollo elegido.

Con este último propósito, el año pasado, durante el curso 2013-2014 se inició el proyecto inicial del sistema de telemetría, con el fin de introducir esta tecnología en el proyecto de MotoUPCT de la Universidad. Para ello se llevó a cabo una división de trabajo según el diseño de telemetría; estos eran complementarios, pues en su conjunto constituían un sistema completo de telemetría para una motocicleta de competición. Esta división abarcaba los tres grandes componentes de la telemetría: obtención y envío de datos, transmisión a través de un canal y recepción y visualización de la información.

El primer caso, “Desarrollo de un dispositivo de telemetría basado en la plataforma Arduino y Shield 3G+GPS”, PFC que fue llevado a cabo por Pedro Celestino López Jiménez. En él, se describe el diseño de un dispositivo, usando la plataforma Arduino, que junto al código creado para esta aplicación y los sensores conectados debidamente para simular las acciones de la moto, era capaz de recibir la información, de procesarla y enviarla. Se optó por hardware libre (Arduino) por su disponibilidad en el mercado y poseer la capacidad suficiente para la tarea objetivo, además de disponer de la posibilidad de ampliar su funcionalidad con shields añadidos. La información a enviar se generaba por sensores sencillos con el fin de demostrar que la aplicación era posible, ya que sensores reales para uso en la motocicleta serán empleados en esta segunda edición del proyecto de telemetría. Para la extracción y envío de datos se optó por un shield 3G+GPS de Arduino, que usándolo con la tarjeta de un operador de telefonía móvil, proporcionaba un ancho de banda suficiente para el propósito del trabajo. Por último se diseñó en común una trama de datos con el autor del software del sistema de recepción. A continuación tenemos una imagen de los resultados finales:

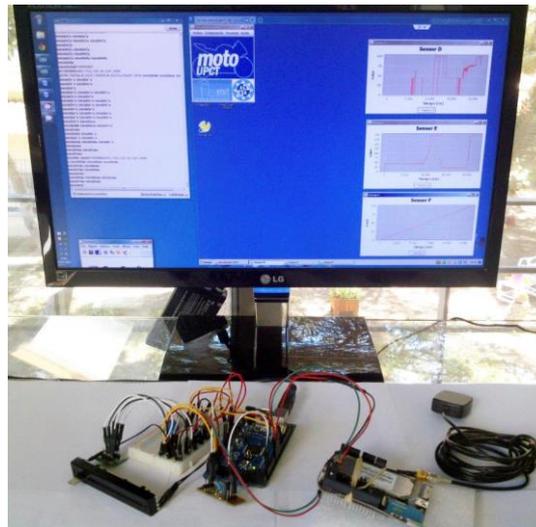


Figura 1-2. Diseño del conjunto de proyectos de obtención, envío, recepción y visualización de datos.

El segundo proyecto, predecesor del actual TFG, “Implementación de un sistema de radiocomunicaciones para la transmisión de la telemetría de una moto de carreras”, fue un TFG realizado por María Belén Pérez Muñoz. Este trabajo tenía como objetivo el uso de la herramienta R&S CMW500 para el despliegue de una red privada de GSM/UMTS en un circuito que proporcionase soporte físico al canal a través del cual se enviaría la información recopilada por los sensores en la motocicleta (trama de datos). Se llevaron a cabo pruebas con distintas configuraciones utilizando tanto la tecnología GSM como la UMTS con el fin de demostrar que la conexión entre ambos extremos mediante el CMW500 era posible. En resumen, el sistema se basa en una estación base de GSM/UMTS que pueda dar cobertura a todo el circuito, y así la comunicación sea independiente a cualquier operador.



Figura 1-3. Equipo usado en el trabajo realizado por Belén Pérez Muñoz.

Por último, si seguimos avanzando a través del camino que recorre la trama de datos en el sistema de telemetría tenemos el proyecto de recepción y visualización de datos, un TFG llamado: “Desarrollo de un software de telemetría para el control de una moto de carreras”, que fue llevado a cabo por Pedro José Conesa Sánchez. Este trabajo tenía el propósito de desarrollar un software que recibiese, decodificase y representase la trama de datos enviada por el sistema de transmisión instalado en la moto y transferida por el CMW500. Todo el software desarrollado en este proyecto se llevó a cabo usando como lenguaje de programación Java. El resultado fueron dos herramientas, la primera de ellas un programa que se encargaba de recibir, procesar y almacenar la información en una base de datos en MySQL y de representarlos gráficamente; y una segunda encargada de llevar a cabo simulaciones.

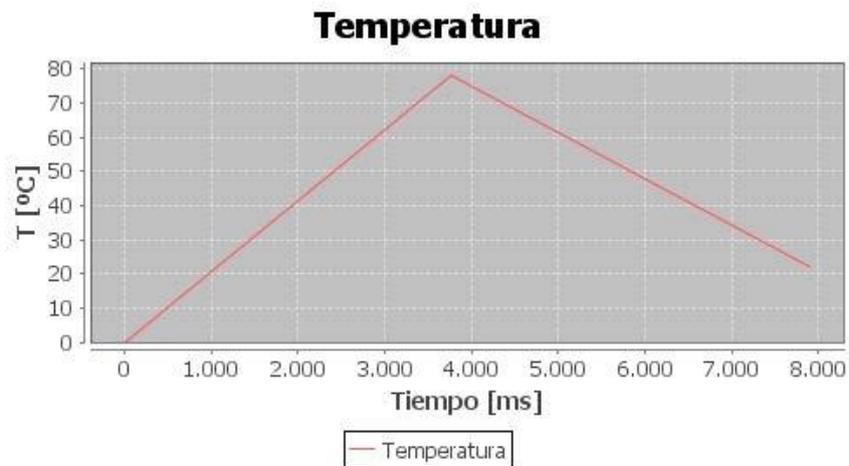


Figura 1-4. Representación de los datos en el TFG desarrollado por Pedro José Conesa Sánchez.

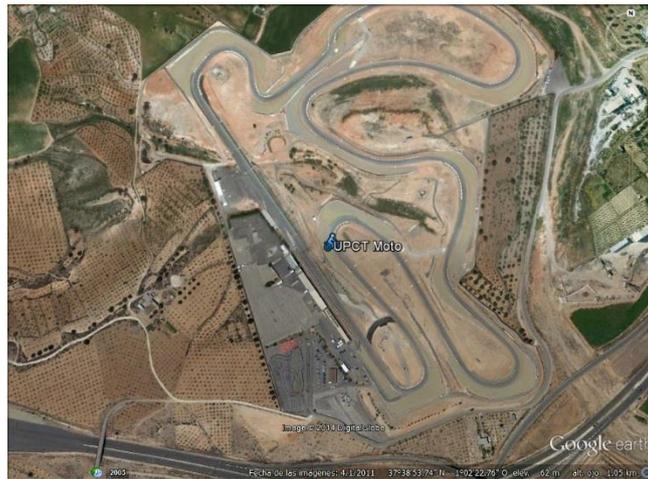


Figura 1-5. Representación de la posición GPS en el TFG desarrollado por Pedro José Conesa Sánchez.

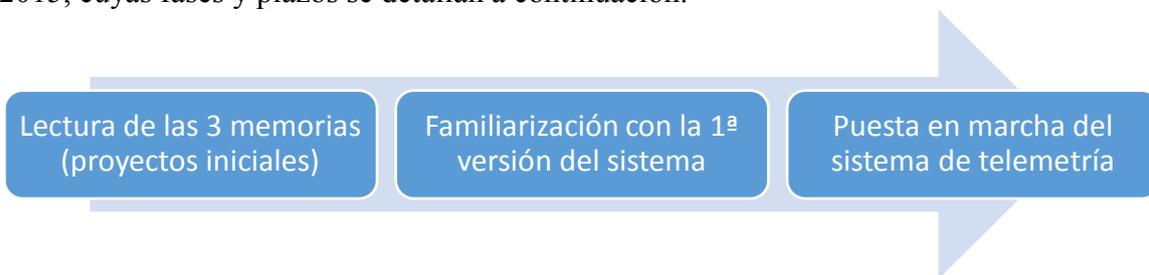


En definitiva, este primer diseño, aunque era funcional, también era demasiado simple, ya que no llegó a probarse en una moto de competición y realizar las correspondientes pruebas de campo.

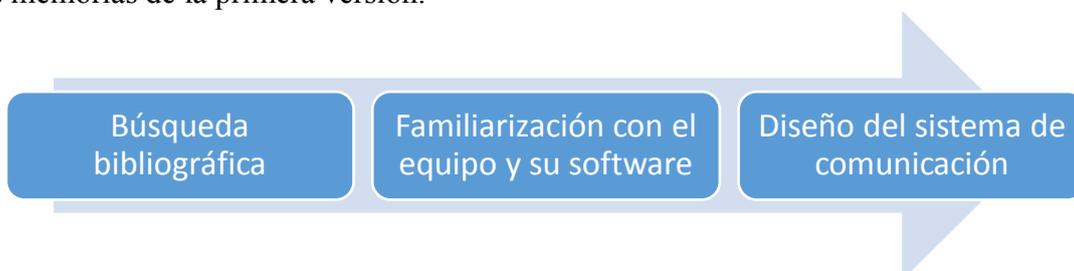
Con el desarrollo de este proyecto, aumentamos la complejidad y la funcionalidad del conjunto, utilizando sensores reales que se instalarán en la moto llevando así a la práctica el diseño realizado, junto con pruebas reales en circuito, tanto del funcionamiento de la placa en la moto como del comportamiento del sistema de radiocomunicaciones en entornos reales y en ese entorno en concreto; además de mejorar aspectos del software para una mayor eficiencia de cara a analizar los datos.

### 1.2.2. Fases del proyecto

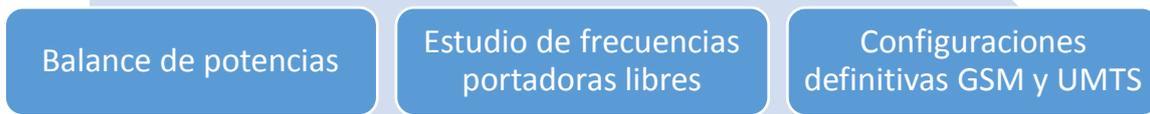
El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo a lo largo de nueve meses aproximadamente, exceptuando reuniones previas en noviembre de 2014 con los componentes del equipo de telemetría y profesores responsables, las primeras tomas de contacto con el sistema en su primera versión (curso 2013-2014) tuvieron lugar en diciembre de 2014, hasta la redacción y entrega de la presente memoria en septiembre de 2015, cuyas fases y plazos se detallan a continuación.



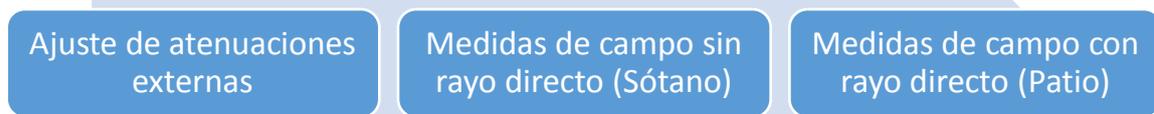
La primera fase, fue iniciada en diciembre del 2014, primeramente consistió en la lectura de los tres anteriores proyectos de forma individual, para poder familiarizarnos con el sistema y el diseño implementado por los compañeros del anterior curso, de cara a entender el sistema como ellos para partir de ahí la mejora que realizaríamos más adelante. Inmediatamente después, se realizaron continuas reuniones, en las que junto a mis compañeros Andrés Gil Calín, Victor Huéscar López y Francisco Javier Martínez Abellán, se reprodujo el conjunto completo y el funcionamiento del mismo como se especificaba en las memorias de la primera versión.



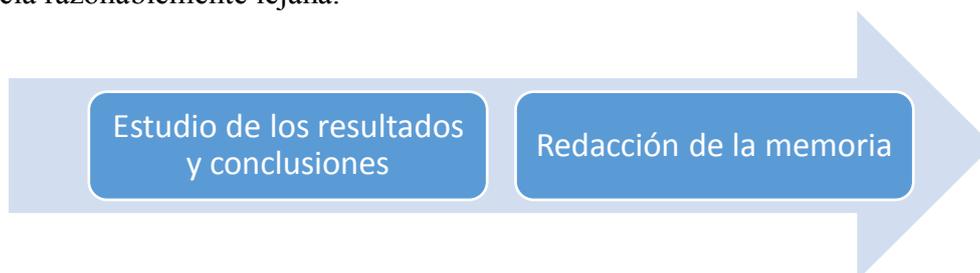
La segunda fase se llevó a cabo a partir de los meses febrero-marzo, tras finalizar la anterior fase, ya de forma más individualizada, mediante búsquedas bibliográficas respecto a posibles configuraciones, ajustes de atenuación, diferentes conexiones con el UE y la capacidad de medición del CMW500 conforme a sus limitaciones de licencia. Mientras se realizaba estas consultas se compaginaba con el uso del equipo para familiarizarlo, y constituir además, un nuevo diseño de comunicación implementado con dos antenas para menor saturación del enlace, y la posibilidad de usar amplificadores, que finalmente descartamos.



La tercera fase (mayo-junio) fue constituida por un previo balance de potencias para ver la realidad en la calidad de la señal, y poder tener un margen de pérdidas máximas que tener en cuenta. Tras esto, antes de continuar debíamos saber que portadoras estarían libres de operadoras en cada tecnología, este estudio tuvo sus peculiaridades que en el apartado de diseño del sistema se detallan. Por último las configuraciones que permiten un funcionamiento robusto evitando caídas del enlace de subida.



En la cuarta fase (julio-septiembre) se afinaron las configuraciones definitivas con un ajuste de las atenuaciones externas de entrada y salida del equipo CMW500 para poder obtener unas medidas lo más cercanas a la realidad. Tras esto, ya sólo nos quedaba probar su comportamiento simulando situaciones en distancia-obstáculos reales, para ello se escogieron dos escenarios, el sótano para comprobar y comparar comportamientos sin rayo directo al girar esquinas, y en el patio sin obstáculos para ver la calidad de la señal a una distancia razonablemente lejana.



Y finalmente, en la quinta podemos observar un estudio de las últimas medidas realizadas, comparando y evaluando la viabilidad de su aplicación final. Tras esto, la redacción de la memoria en el mes de septiembre 2015.



### 1.2.3. Objetivos específicos

- Mejorar la comunicación inalámbrica punto-a-punto ya diseñada, de una forma robusta entre la fuente de datos instalada en la moto, y nuestro instrumento de radiocomunicación R&S CMW500, sobre el estándar GSM o UMTS.
- Estudiar mediante medidas de campo en diferentes entornos, el mejor estándar para dar cobertura a una moto de competición.
- Realizar la transferencia de paquetes de datos a través del protocolo UDP/IP para que sea lo más rápida posible y sin interrupciones, comprobando tasas de velocidad en diferentes entornos.
- Gracias al resto de objetivos, poder realizar el sistema de telemetría de forma privada, independientemente de cualquier operador, y en manos de nuestras necesidades con libertad de poder planificar la red.

### 1.4. Estructura de la memoria

- Una introducción acerca de MotoStudent y el sistema de telemetría diseñado por la UPCT, que incluye objetivos y fases del proyecto.
- Un segundo capítulo sobre el estado del arte de la telemetría, que consta de 4 partes:
  - o Telemetría de forma general.
  - o Origen y evolución de la telemetría.
  - o Aplicaciones más populares de la telemetría en la actualidad.
  - o Líneas futuras de la telemetría.
- En el tercer capítulo tratamos la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, explicando cada estándar, y detallando en aquellos que se pueden implementar en el R&S CMW500.
- En el cuarto capítulo detallamos todos los entornos de aplicación posibles, y describimos la función del R&S CMW500 en la aplicación que desarrollamos en este proyecto; así como un pequeño resumen del diseño y trabajo de Belén, el anterior proyecto, a partir del cual parte este trabajo.
- El quinto capítulo es un nuevo diseño del sistema de radiocomunicación del R&S CMW500, en el cuál se basará el resto del proyecto.
- El sexto capítulo se basa en las configuraciones definitivas para realizar las medidas. En las cuales se incluirá el cálculo de las atenuaciones externas.
- En el séptimo capítulo, una vez obtenidas las atenuaciones, visualizamos un balance de potencias más correcto.
- En un octavo capítulo podemos ver las medidas en los diferentes entornos escogidos y las comparativas entre tecnologías.



- Por último, el noveno capítulo abarca conclusiones sobre la globalidad de los estudios, las comparativas, viabilidades y del proyecto en sí, pues también se valoran unas posibles líneas de futuro con el fin de facilitar y mejorar circunstancias.



---

## 2. Estado del arte de telemetría

---

### 2.1. Introducción a la telemetría

La telemetría incluye un conjunto de procedimientos para medir magnitudes físicas y químicas desde una posición distante al lugar donde se producen los fenómenos que queremos analizar y además, abarca el posterior envío de la información hacia el operador del sistema [2]. El término telemetría procede de los términos griegos “*tele*” que significa remoto, y “*metron*”, que significa medida. Aunque el término telemetría, se suele aplicar para sistemas remotos sin cables, en algunas bibliografías también se puede encontrar para definir sistemas de transmisión cableados.

El sistema de telemetría va a estar formado por multitud de sensores repartidos por la moto y su mecánica, el sistema de transmisión de datos, que será expuesto posteriormente en esta memoria, y un dispositivo para el procesamiento y tratamiento de los datos que permitirá su visualización.

- El sensor es el elemento encargado de responder ante las variaciones de estado de las magnitudes físicas que estudiamos en la moto, como la velocidad, las revoluciones del motor, la posición de la moto o el estado de las suspensiones.
- El medio de transmisión se ocupa de establecer un enlace virtual entre ambos extremos de la comunicación, transparente a la comunicación. Se puede establecer de forma guiada por medios como redes de telefonía clásica, redes de ordenadores o enlaces de fibra óptica, o de forma no guiada a través de ondas de radio, comunicación por *bluetooth* o *wifi*, o mediante redes de telefonía móvil.
- El dispositivo de procesamiento se dedica a analizar y transformar los datos, según sea conveniente, para almacenar toda la información en una base de datos interna al propio ordenador. Además, implementa una herramienta software capaz de mostrar automáticamente los valores recogidos en las gráficas pertinentes y de representar la posición GPS de la moto en tiempo real.

### 2.2. Origen y evolución de la telemetría

Aunque el origen de la telemetría no está claro, el primer circuito conocido de transmisión de datos se creó en 1915, durante la I Guerra Mundial, desarrollado por el alemán Khris Osterhein y el italiano Franchesco Di Buonanno para medir la distancia hasta los objetivos de artillería. Otras fuentes aseguran que el origen de la telemetría es algo anterior, situando el primer sistema de telemetría en la revolución industrial [3].

Los sistemas impulsados a vapor representan las raíces de la telemetría industrial, pues se consideran los primeros procesos industriales controlados de forma fiable y determinista. En concreto, los avances introducidos por James Watt en el motor de vapor de Thomas Newcomen's incluyen varios aparatos de monitorización y control, como el indicador de presión de mercurio o su famoso “flyball governor”, conocido actualmente como el regulador de Watt (figura 2.1). Estos dispositivos monitorizaban y controlaban el proceso interno de un motor de vapor a distancia. La distancia no resultaba ser muy grande pero el lugar donde se realizaba la medición era bastante inaccesible.

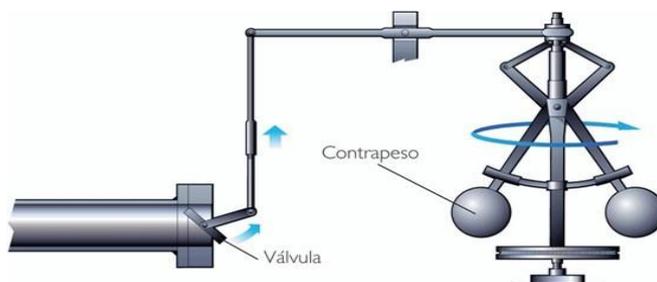


Figura 2-1. Regulador Watt [4].

Otra de las primeras aplicaciones de monitorización y control remoto fue el desarrollo de un sistema de seguridad ferroviaria (figura 2.2), patentado en 1872 por William Robinson [5]. Consistía en un circuito eléctrico formado por las vías férreas del tren. Éstas creaban una diferencia de potencial, y al entrar un tren en el circuito, las ruedas metálicas cortocircuitan los carriles y así, se detectaba que esa sección estaba ocupada. Este aviso era “telemetrado” a varias millas de distancia para indicar al tren que se aproximaba, que debía esperar hasta que la zona quedase libre.

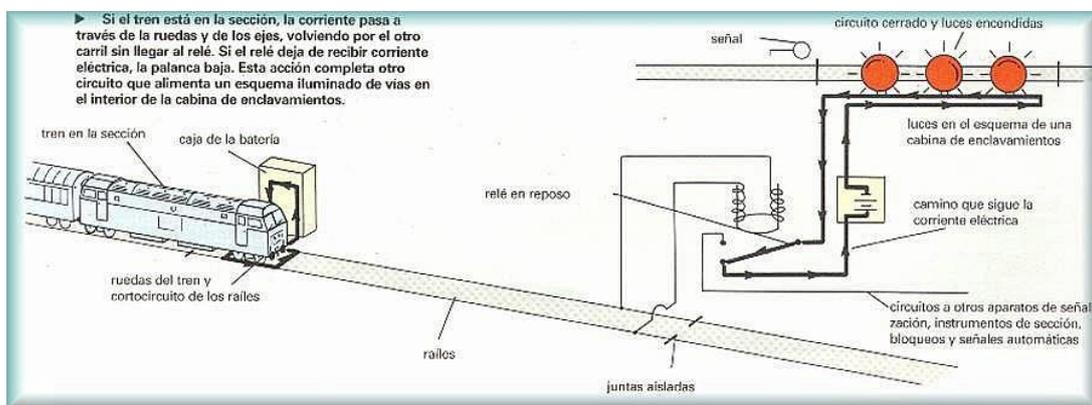


Figura 2-2. Circuito de vía [6].



Con la invención de la radiosonda en 1930 [7], se comenzó a observar la temperatura, la humedad y la presión de la atmósfera. Podía alcanzar altitudes de hasta 50000 pies.

Durante la Segunda Guerra Mundial también se idearon nuevas soluciones para establecer una comunicación a distancia, ante la necesidad de dirigir señales de aviso.

Como vemos, la historia de la telemetría industrial abarca cerca de 200 años, eventos como la Revolución Industrial, las dos Guerras Mundiales y el desarrollo de los ordenadores y la informática. En la actualidad, la telemetría abarca multitud de ámbitos industriales como el aeroespacial, el control de plantas químicas, la exploración científica de naves no tripuladas (submarinos, aviones de reconocimiento y satélites), ámbitos médicos, y el mundo de la competición, entre los que destacan categorías como Moto GP y Fórmula 1.

En la Fórmula 1, los primeros sistemas de telemetría llegaron en los años noventa, de la mano de las escuderías Williams y McLaren. Supuso un gran avance tecnológico, y todos los equipos que no la usaron se quedaron atrás en la competición. Gracias a esta tecnología, los ingenieros recibían en tiempo real información sobre los monoplazas que rodaban por la pista (tiempo por vuelta, revoluciones del motor, presión del aceite, velocidad del viento, constantes vitales del piloto, etc.) e incluso podían modificar parámetros del coche desde el propio muro de boxes. La mejora de los sistemas fue tan grande, que a partir del año 2003 la Federación Internacional de Automovilismo (FIA) prohibió que los parámetros del monoplaza fuesen manipulados desde los garajes, y ahora sólo el piloto es el que puede hacerlo desde su volante.

## **2.3. Aplicaciones actuales de la telemetría**

En este apartado vamos a enumerar algunos de los numerosos campos en los que se aplica esta tecnología:

### **2.3.1. Competición: Fórmula 1 y Moto GP**

En el caso de Fórmula 1, los sistemas de telemetría son los sistemas auxiliares más importantes de los que se dispone [8].

Los sistemas que utilizan se basan en ondas microondas en la banda UHF (300 Mhz-300 GHz), y en conexiones punto a punto coche-portátil (PC). En las transmisiones inalámbricas la propagación ha de ser por línea de vista, es decir, que no haya ningún obstáculo sólido entre las antenas, porque las ondas utilizadas no son capaces de superarlos. Por ello se trabaja con envío de información a corta distancia mediante el uso de distintas antenas, aunque cuando el coche pasa lejos de los boxes puede haber pérdida de información. Podrían usarse también ondas de radio, que serían más rápidas, pero también menos fiables y con un menor ancho de banda, por lo que no podría transmitirse tanta información.



Para poder enviar información a corta distancia, a lo largo de todos y cada uno de los circuitos del Mundial, existen una serie de antenas repetidoras a las que llegan los datos desde los monoplazas.

Cada monoplaza lleva incorporada una pequeña y aerodinámica antena (figura 2.3) situada en el morro y a más de 10 cm de altura, para evitar que la curvatura de la tierra sea un obstáculo más. Es omnidireccional, trabaja a una frecuencia de entre 1,45 y 1,65 GHz, tiene una ganancia de aproximadamente +3 dBi y una potencia de 160 W. En la parte trasera del coche también se incorpora una segunda antena, en este caso unidireccional.



*Figura 2-3. Antena de telemetría de un monoplaza [8].*

Esta antena base se conecta a una unidad emisora/receptora CBR-610 que actúa como modem y des/cripta la señal con los datos codificados (figura 2.4). Cuenta con una tasa de transferencia con picos de hasta 100 Mbps. Esta unidad prepara la información registrada por los sensores del coche, de tal forma que pueda gestionarse mediante el potente software “Atlas”, que permite la lectura de los datos mediante complejas gráficas.



*Figura 2-4. Centralita de datos de un monoplaza [9].*

Desde la propia "centralita de datos" también se envía la información directamente a la fábrica de la escudería vía satélite, usando antenas parabólicas trabajando en la banda SHF.



Sin embargo, el elemento clave sin el cual no sería posible la telemetría en la Fórmula 1 es la ECU (Electronic Control Unit). Podríamos decir que es la CPU del monoplaza, que se encarga de recoger todos los datos de los sensores. Es estándar y obligatoria para los 24 coches de la parrilla, y está fabricada por la escudería McLaren en colaboración con Microsoft.

La ECU está basada en la arquitectura Power-PC, cuenta con dos procesadores de 40 MHz, 1 GB de memoria estática, 1 MB de memoria flash ROM y 1 MB de memoria SRAM. Su tasa máxima de transmisión de datos es de 230Kbps. Los ingenieros usan un cable Ethernet o RS-232 para conectarla con un ordenador portátil y configurarla adecuadamente, aunque está bastante limitada por la normativa de la FIA.

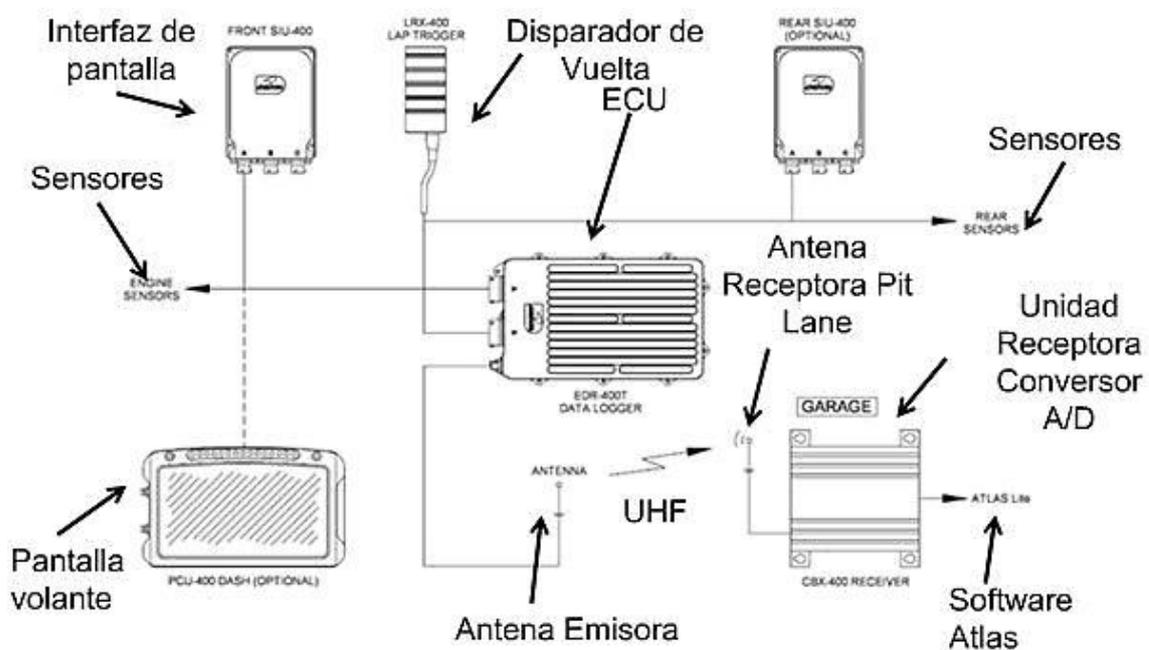


Figura 2-5. Esquema completo de un monoplaza [8].

En la competición MotoGP se lleva a cabo un sistema de telemetría totalmente distinto [10]. Por reglamento, en MotoGP la telemetría es offline, es decir, se recaba la información mientras el piloto está en pista, y luego, mediante el software propio de cada centralita, se descarga en el ordenador desde el que se trabaja. A diferencia de la Fórmula 1 que se trabaja en tiempo real, en MotoGP este sistema está prohibido.

En esta competición cada moto descarga toda la información después de cada expedición en pista. La información se transmite a través de canales, por ejemplo la Ducati GP 11 puede llegar a tener más de doscientos. Una vez registrada la información, los gráficos resultantes de la misma ayudarán al piloto, junto al analista de datos y al ingeniero de pista, a conocer la situación de su moto y de su propio pilotaje, en cada curva del circuito. Asimismo, podrá averiguar la marcha con la que negocia cada ángulo o la presión que ejerce sobre los frenos en todo momento, para conocer sus límites, y la mejor estrategia para sobrepasarlos sin exponerse a un accidente.

A continuación, podemos ver un gráfico que contempla variables como las

revoluciones por minuto, las marchas, las suspensiones. Es un gráfico real de la telemetría del piloto MAPFRE Aspar, Héctor Barberá, en el circuito australiano de Phillip Island (figura 2.6).

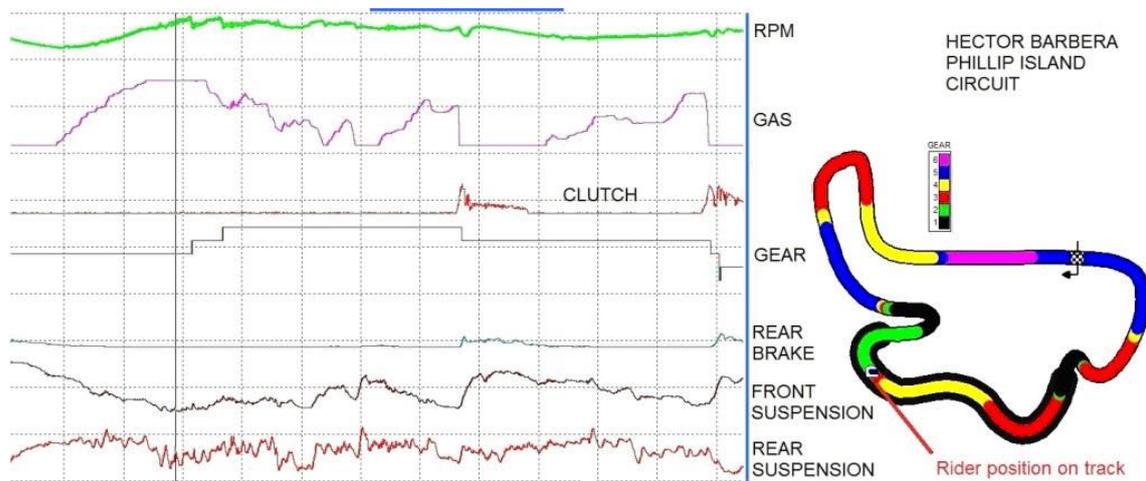


Figura 2-6. Ejemplo de telemetría en MotoGP [10].

### 2.3.2. Domótica

Con la integración de la telemetría en el campo de la domótica, es posible conocer el estado de cada componente domótico instalado en la vivienda de forma remota.

El acceso a la red domótica de la vivienda es posible a través de un teléfono móvil, PDA o un ordenador con acceso a internet [11], de manera que el particular puede controlar el sistema desde cualquier lugar donde se encuentre, ya sea en cualquier estancia de la casa o incluso fuera de la misma, y en tiempo real.

Además, esta técnica permite controlar cada dispositivo de forma individual, modificando variables como la iluminación, la climatización o la propia seguridad de la vivienda.

### 2.3.3. Robótica

La telemetría en robótica es esencial para obtener información sobre el entorno y sobre variables como la velocidad o la inclinación del sistema. De esta forma, podemos controlar el sistema y monitorizar el desarrollo de la tarea realizada por el equipo, como puede ser la manipulación de materiales radioactivos, la limpieza de residuos tóxicos, la búsqueda y rescate de personas o la localización de minas terrestres, para mantener los parámetros y niveles de medición en los valores deseados, y que se pueda modificar en un momento dado el resultado de la operación o corregir posibles fallos durante la ejecución.

También se utiliza la telemetría en robots para otros fines. Por ejemplo, determinar la distancia a la que se encuentran los objetos y así poder desplazarse por su entorno e interactuar con los objetos que lo rodean. Una de esas técnicas se denomina telemetría láser [12].



### 2.3.4. Medicina

En medicina, la telemetría es comúnmente usada para registrar eventos electrocardiográficos a distancia (figura 2.7).

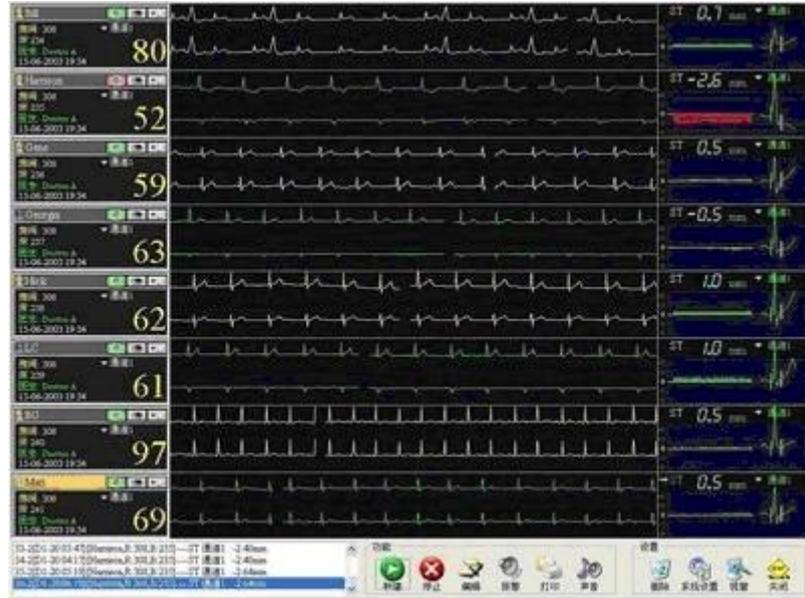


Figura 2-7. Electrocardiograma obtenido por telemetría [13].

El sistema utiliza radiotransmisores que están conectados al paciente mediante 5 electrodos adheridos a la piel, y que permiten dotar de mayor libertad a los pacientes para deambular y moverse.

El ordenador central refleja los E.C.G. de los pacientes conectados a él y guarda los eventos importantes ocurridos durante las últimas 24 horas. En un estudio realizado por Pérez Titos CB y Oliver Ramos MA, del Hospital Universitario Médico-Quirúrgico «Virgen de las Nieves» de Granada [14] se obtuvo que el 80% de los pacientes estudiados registraron eventos en la Telemetría y el 23%, de éstos, fueron eventos graves.

## 2.4. Líneas de investigación en la telemetría

A continuación se presentan diversos estudios actuales que muestran las distintas posibilidades que ofrece la telemetría de cara al futuro [15].

### 2.4.1. Láser de estado sólido de pulsos cortos para telemetría

La determinación de distancias por telemetría láser es una de las aplicaciones de mayor interés y de las primeras en que se utilizara esta fuente de radiación. Uno de los procedimientos más frecuentemente utilizado, requiere del diseño de una cavidad que funcione en régimen pulsado, generando pulsos cortos adecuados para su empleo en técnicas de medidas remotas, en que la medición a realizar es el tiempo transcurrido entre el envío de la señal y el registro del eco producido por un objetivo elegido como “blanco” (figura 2.8). Por la rapidez en la determinación, el grado de colimación propio del láser y la condición de incerteza fija en todo el rango de medición, es el método más difundido, cuando es tolerable la incerteza característica del mismo. Basa su funcionamiento en la detección del eco de una señal láser de muy corta duración, a partir de la determinación del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la misma (tiempo de vuelo).

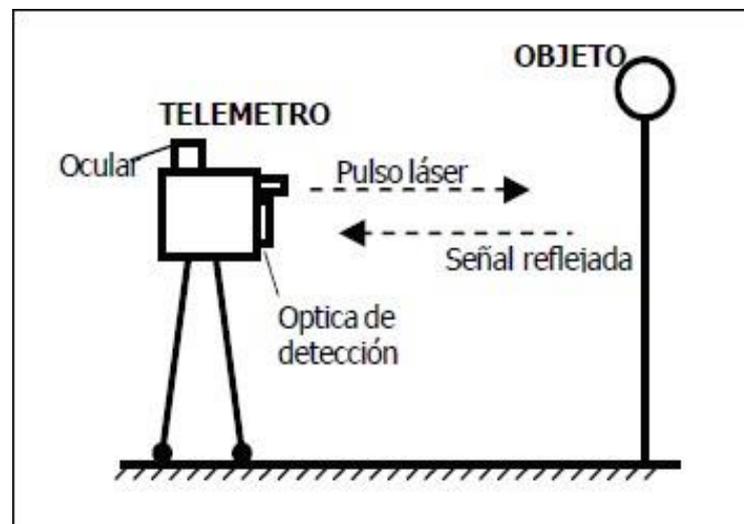


Figura 2-8. Telemetría láser [15].

### 2.4.2. Control de vehículos aéreos no tripulados

En el entorno de los aviones aéreos no tripulados (UAV), una de las partes más importantes es la telemetría del avión. Gracias a ella se consigue localizar, monitorizar y extraer medidas en tiempo real relevantes para el estudio de la aerodinámica del aparato. Para que la transferencia de datos sea adecuada, hace falta tener en cuenta muchos factores como por ejemplo la calidad del envío de la señal, la banda de frecuencia en la que se trabaja, las interferencias con otros dispositivos, etc.



### **2.4.3. Integración de la monitorización y control eficiente en tiempo real de redes de agua potable**

La gestión de la redes de agua potable comprende dos niveles. El primer nivel consiste en la monitorización de la red, que implica la observación del sistema mediante la utilización de los sistemas de telemetría, registrando las variables más significativas del funcionamiento de la red así como la correcta operación de los sistemas de control/actuación instalados en la red (fallos en sensores/actuadores, fugas, etc.). El segundo nivel consiste en el control operacional de la red que se encarga de determinar las estrategias de control admisibles para los actuadores del sistema (bombas y válvulas), de forma que optimicen el funcionamiento de la red minimizando el consumo de agua y energía de la red.

### **2.4.4. Metodologías para la colecta de muestras en fauna silvestre *in situ***

El estudio de la fauna silvestre implica el manejo de las poblaciones y su hábitat, ya sea para el aprovechamiento de las especies cinegéticas y de importancia comercial, el control de las poblaciones que causan daño a los intereses humanos, o para la conservación de especies amenazadas. Determinar los diferentes métodos para la colecta de muestras en la investigación del médico de la conservación se hace una actividad transversal a otras ciencias de forma transdisciplinaria cuando se trabaja en condiciones *in situ*. Gran parte de la diversidad biológica se pierde como consecuencia de las enfermedades o de problemas de tipo antrópico que afectan la fauna silvestre, la incidencia de enfermedades y de contaminantes provoca cambios en las poblaciones afectando procesos evolutivos y ecológicos que regulan la biodiversidad; debido a esto se han establecido y aplicado nuevas metodologías y técnicas de recolección de muestras con el fin de tomar datos en campo, estas actividades se están mostrando eficaces para establecer planes de conservación y así avanzar en la comprensión del conocimiento en las ciencias veterinarias según los resultados ofrecidos en la investigación científica, en este campo, la telemetría de las variables de interés juega un papel principal.

### **2.5.5. Alerta de desborde de ríos y consulta de parámetros de humedad y temperatura vía SMS**

Se trata del desarrollo de un módulo de telemetría basado en la red de telefonía móvil GSM (Global System Mobile) con el fin de alertar a una persona o grupo de personas ante el posible desborde de un río, y permitir la consulta de parámetros de temperatura y humedad relativa vía mensaje de texto ó SMS (Short Message Service). Para la medición del nivel de agua se utilizó tecnología de ultrasonido y para la medición de humedad y temperatura el sensor digital SHT-11.



#### **2.4.6. Medición de profundidad de ríos y lagos**

Para tratar los problemas de sequías e inundaciones es necesario conocer bien los caudales de los ríos o la profundidad de los lagos, ya que esta labor ha sido siempre realizada de manera artesanal. A través de un sistema de telemetría por radio capaz de medir la profundidad a la que se encuentra el suelo del nivel del agua y estaciones hidrométricas para obtener los valores de caudal del río, podemos obtener los valores reales y actualizados para el correcto funcionamiento de las centrales hidroeléctricas y controlar mejor las posibles sequías e inundaciones que pudiera haber.

Como podemos ver, existen infinidad de campos en los que la telemetría juega un papel fundamental, por lo que poco a poco, y con la evolución de la tecnología, su uso se hace más común y necesario en todos los campos de trabajo y estudios.

## 3. Sistemas de comunicaciones móviles

### 3.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles

La creación de los primeros sistemas de comunicaciones móviles data de mediados de los años 40 del siglo XX. El primer servicio público de telefonía móvil se introdujo en 1946. Los sistemas estaban compuestos por un único transmisor de alta potencia y una torre de gran altura, que transmitían con la máxima potencia para proporcionar un área de cobertura lo más extensa posible, y así tener en cuenta la movilidad de vehículos.

Más tarde se produjo un hecho significativo en la historia de las comunicaciones móviles, el desarrollo del concepto de reutilización celular de las frecuencias (figura 3.1), propuesto por primera vez en 1947, por un ingeniero de los laboratorios Bell, Douglas H. Ring. El concepto de red celular proponía dividir el espectro disponible en varios canales, limitar la potencia de los transmisores y extender la cobertura instalando un número mayor de éstos, con lo que se conseguía reducir el coste, tamaño y peso de los transmisores y aumentar la capacidad. La clave de su funcionamiento residía en reutilizar la misma frecuencia en aquellos transmisores que estuviesen lo suficientemente alejados para no interferirse entre sí. Estos sistemas de comunicaciones móviles comenzaron a instalarse a principios de los años setenta [16].

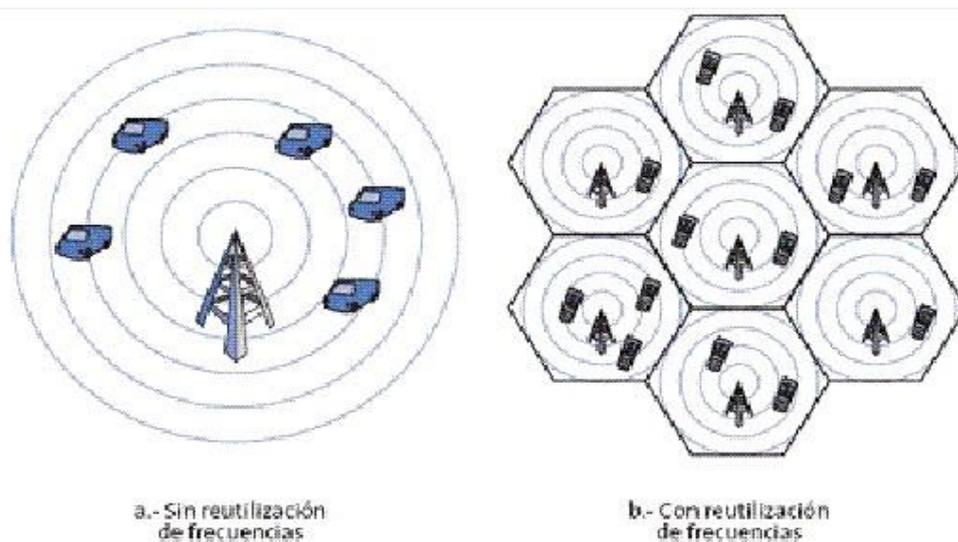


Figura 3-1. Evolución de la red celular [17]

En los años ochenta surgieron los sistemas de primera generación. Cada país desarrolló un sistema propio, citamos por ejemplo el sistema NMTS escandinavo, el TACS británico, el AMPS estadounidense, el sistema C alemán, el Radiocom francés o el RTMS italiano.

La primera red celular de telefonía móvil pública fue instalada por la operadora japonesa NTT en 1979, se denominó al sistema NAMTS. Esta red no soportaba el traspaso de la conexión, pero se consiguió con la red instalada en Australia en 1981.



A finales de la década de los ochenta, se comprobó que los sistemas analógicos de primera generación no iban a ser capaces de satisfacer la demanda de servicios de comunicaciones móviles de las siguientes décadas, así que se produjo la digitalización de los sistemas de comunicaciones móviles, que fueron denominados como sistemas de segunda generación.

Esta transición supuso además, el diseño de un estándar único europeo denominado GSM (Group Special Mobile), puesto que en Europa las fronteras entre los países europeos prácticamente dejaban de existir y la existencia de varios sistemas de comunicaciones móviles incompatibles carecía de sentido. Este sistema debía dar servicio a un gran número de abonados, con cobertura internacional y además, estar abierto a la interacción con las futuras redes avanzadas de telecomunicaciones.

Los primeros estudios se centraron en establecer una banda de frecuencias común reservada para GSM, una estructura celular digital, un sistema de acceso múltiple TDMA de banda estrecha, un algoritmo de codificación de fuente de baja velocidad binaria, y señalización avanzada.

El sistema GSM (Global System for Mobile communications) inició su operación comercial en 1992 en base a las especificaciones GSM Phase-1 concluidas por el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) en 1990 [18].

El sistema ofrecía servicios básicos como teleservicios y servicios portadores, y algunos suplementarios. Más tarde, se introdujeron nuevos servicios portadores y teleservicios, y numerosos servicios suplementarios. Por último, se aplicaron algunas mejoras como el sistema HSCSD y GPRS, el primero permitía alcanzar mayores tasas de transmisión de datos, y el segundo introdujo la conmutación de paquetes.

Los sistemas de 3G actuales fueron establecidos mediante el proyecto de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) sobre Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000). Las tecnologías de 3G habilitaron mayores velocidades de transmisión de datos, mayor capacidad de las redes y más servicios de red avanzados.

La llegada de la última generación 4G es reciente, se podría definir como “all-IP”, donde se busca un sistema que permita conjugar una capacidad multimedia con una movilidad plena.

## **3.2. Estándar de comunicaciones móviles**

En esta sección de la memoria, vamos a centrarnos principalmente en los estándares de comunicaciones móviles que son soportados por el R&S CMW500.

### **3.2.1. Sistemas de comunicaciones móviles 2G**

#### **Introducción al sistema GSM**

La red GSM proporcionaba todas las ventajas de los sistemas digitales, además de la



interconexión con la red fija de telefonía móvil RDSI [18]. Ofrecía servicios de voz de alta calidad y preveía unos servicios de transmisión de datos desde su fase inicial. Sin embargo, se trataban de servicios con modalidad de transferencia por conmutación de circuitos. Esto significaba que la red, una vez establecida la conexión física entre dos usuarios, dedicaba los recursos propios hasta que no fuera solicitada expresamente la liberación de la conexión, independientemente del hecho de que los dos usuarios se intercambiaban datos o no durante el proceso de conexión.

Este modo de transferencia era adecuado para las señales de voz, ya que mantener los recursos ocupados durante todo el proceso de intercambio de información facilitaba el tráfico de señales sensibles a retardos. Sin embargo, no era el mejor tipo de conexión para la transmisión de paquetes de datos.

### **Arquitectura del sistema GSM**

La estructura de la red del sistema GSM es de tipo jerárquica. Los elementos que la integran y que vamos a ver a continuación, están conectados mediante interfaces definidas en el estándar.

- Estación móvil, MS (Mobile Station Equipment): es el dispositivo móvil con el que el usuario se conecta a la red a través de la interfaz Um, estableciendo un enlace radio entre la estación móvil y la estación base de su misma área [20].
- Estación Base, BTS (Base Transceiver Station): está formada por transmisores/receptores de radio (transceptores), los elementos de conexión al sistema radiante, las antenas y las instalaciones accesorias (torre soporte, pararrayos, tomas de tierra, etc.) para dar servicio a una o varias células (sectorizada) [16].
- Controlador de estaciones base, BSC (Base Station Controller): constituye el primer nivel de concentración de tráfico para minimizar los costes de transmisión [18].
- Centro de conmutación de servicios móviles, MSC (Mobile Service Switching Center) se encarga de realizar labores de conmutación dentro de la red y señalización básicas [18].
- Registro de localización local, HLR (Home Location Register): es una base de datos que contiene información relativa a todos los usuarios abonados de la red móvil [16].
- Registro de localización de visitantes, VLR (Visited/Visitor Location Register): es una base de datos que contiene información sobre los abonados que se encuentran actualmente en alguna de las LA (agrupación de BSC) que forman parte del MSC al que está asociado el VLR [16].
- Puerta de Enlace, SMS-GMSC (Gateway Mobile Service Switching Center): es un nodo que permite interrogar al HLR para obtener información de encaminamiento para una llamada dirigida a un móvil. Por lo tanto, es el nexo de unión de la red GSM con otras redes externas [18]. También se encarga de la gestión de los SMS [16].
- Centro de operación y mantenimiento, OMC (Operation and Maintenance Center):



como su propio nombre indica se dedica a tareas de mantenimiento y gestión, por eso se comunica con todos los elementos de la red [16].

- Registro de identificación de registros, EIR (Equipment Identity Register): su función consiste en evitar que se utilicen equipos móviles no autorizados [18].
- Centro de autenticación, AUC (Authentication Center): gestiona los datos de seguridad y autenticación de los usuarios [18].

### **3.2.2. Sistemas de comunicaciones móviles 2.5G**

#### **Introducción al sistema GPRS**

El estándar GPRS (General Packet Radio System) fue establecido por el ETSI (European Telecommunication Standard Institute) a mediados de la década de los 90 [19].

Este sistema estaba basado en la interfaz aire del sistema GSM para la transmisión de paquetes vía radio y además, permite una adecuada integración de los protocolos de Internet TCP/IP con la red móvil instalada GSM. Esta tecnología se ideó para subsanar las deficiencias de GSM en cuanto a la transmisión de datos, introduciendo para ello una red de conmutación de paquetes.

#### **Arquitectura del sistema GPRS**

Para permitir el modo de transferencia de paquetes de datos, GPRS introduce dos nuevos elementos denominados GSN (Gateway Support Node) sobre la arquitectura de GSM (figura 3.2):

- Nodo de soporte servidor de GPRS, SGSN (Serving GPRS Support Node): es el elemento responsable de entregar los paquetes a las estaciones móviles dentro de su área de servicio. Entre sus tareas también figuran la gestión de la movilidad de la estación móvil, funciones relacionadas con la seguridad como el cifrado y la autenticación, y la recopilación de la información necesaria para efectuar la tarificación.
- Nodo de soporte pasarela de GPRS, GGSN (Gateway GPRS Support Node): este nodo actúa como una pasarela hacia las redes de conmutación de paquetes (RCP) externas, que usualmente son redes IP o redes públicas de conmutación de paquetes X.25.

La comunicación entre ambos nodos tiene lugar sobre una red IP de carácter privado, que forma parte de la infraestructura de la red de comunicaciones móviles. Sobre esta red, que recibe el nombre de red troncal GPRS, se establece un túnel entre los nodos GSN mediante un protocolo específico denominado protocolo de túnel de GPRS, GTP (GPRS Tunneling Protocol). A través de este túnel se transmiten los paquetes de usuario y los mensajes de señalización entre los nodos.

Si los nodos SGSN y GGSN perteneciesen a redes distintas, se precisaría una tercera red troncal a la que se conectarían ambas redes, pero como no es nuestro caso no entraremos en detalles.

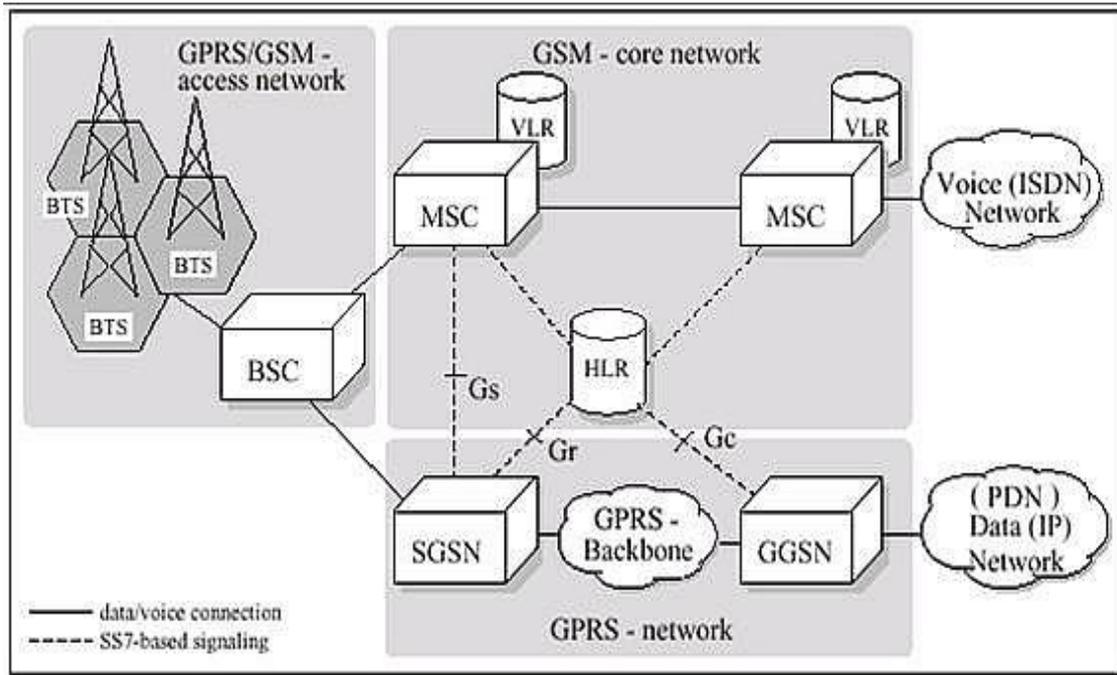


Figura 3-2. Arquitectura GPRS [20].

### Proceso de conexión

En esta sección vamos a ver qué sucede cuando queremos transmitir un paquete de datos a través de GPRS y cómo llega a su destino. Sólo vamos a profundizar en este aspecto con GPRS, puesto que es el sistema que se ha utilizado para desarrollar la comunicación inalámbrica que mostraremos posteriormente en el ejemplo (apartado 4.1).

Cuando se desea transmitir un mensaje, éste se divide en paquetes cortos que contienen las direcciones origen y destino en su cabecera. Al transmitir cada paquete, se pueden transmitir por canales radio distintos, por eso cada paquete tiene un identificador de conexión que lo asocia al mensaje de partida. En el receptor, conforme se recibe cada paquete se van almacenando en un buffer de datos hasta recibir todos los paquetes para componer el mensaje inicial.

El proceso de enrutamiento que sigue cada paquete por la interfaz radio hasta alcanzar su destino se explica a continuación (figura 3.3):

1. Para transmitir un paquete generado por la estación móvil, ésta debe entablar primero una relación con la estación base que se encuentre dentro de su área (SGSN-S) denominada “attach”.
2. Después la estación base SGSN-S establece una relación con la puerta de enlace GGSN- S conocida como “contexto PDP (Packet Data Protocol)”. De este modo, se establece un túnel GTP entre los nodos SGSN y GGSN, y los recursos se dedican a esta conexión establecida.
3. El paquete de datos se encamina hacia el nodo SGSN-S, y una vez recibido, se



liberan los recursos establecidos entre la estación móvil y el nodo SGSN-S para que puedan ser utilizados por otro usuario. El nodo encapsula los paquetes y envía a través del túnel GTP establecido por la red troncal IP, hacia la puerta de enlace GGSN-S. Una vez que la transferencia nodo a nodo está completada, se liberan de nuevo los recursos utilizados (y así sucesivamente conforme el paquete va avanzando).

4. El nodo GGSN-S proporciona el acceso a la red de paquetes adyacente donde se encuentra el servidor. A partir de ahora los paquetes se encaminarán mediante el protocolo de transporte UDP.
5. El nodo GGSN-D desencapsula el paquete, y en función de la dirección IP de destino que contiene la cabecera, será transmitido al SGSN-D correspondiente.
6. Por último, el SGSN-D entregará el paquete recibido a su destinatario final.

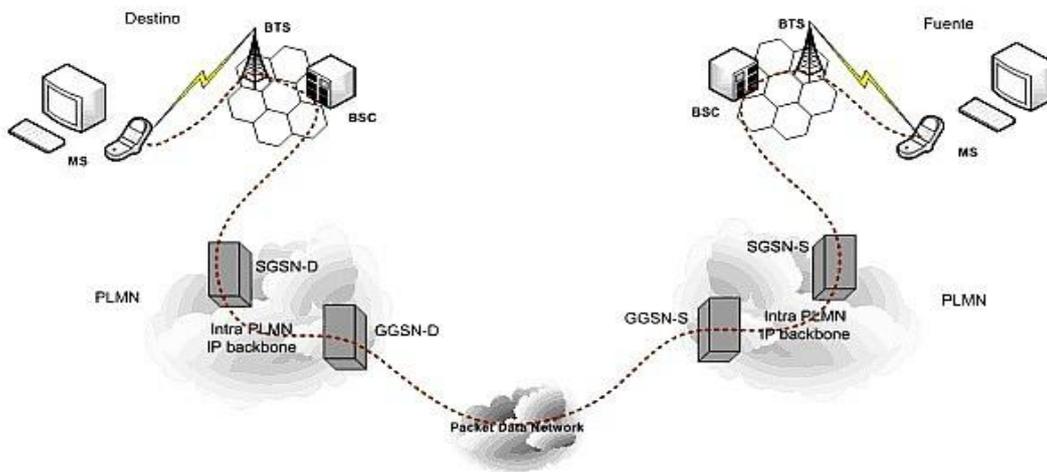


Figura 3-3. Ejemplo de encaminamiento de paquetes [19].



### 3.2.3. Sistemas de comunicaciones móviles 3G

#### Introducción al sistema W-CDMA

W-CDMA es un estándar de comunicaciones desarrollado para el sistema UMTS (Universal Telecommunication Standard System) y estandarizado por la UIT. Utiliza la técnica de acceso múltiple CDMA, que permite a los usuarios compartir una misma banda de frecuencias en el mismo intervalo de tiempo, asignando un código único a cada uno de ellos [16].

Tiene dos modos de operación:

- FDD (Frequency Division Duplex): los enlaces ascendente y descendente utilizan canales de 5 MHz diferentes y separados por una frecuencia de 190 MHz.
- TDD (Time Division Duplex): los enlaces ascendente y descendente comparten la misma banda de 5MHz. Por tanto, se introduce la técnica TDMA para distinguir a un usuario de otro dentro del mismo radiocanal.

#### Arquitectura del sistema W-CDMA

La arquitectura general del sistema UMTS consta básicamente de tres bloques [21]: la estación móvil, la red terrestre de acceso radio UTRAN (UTRA Network) formado por los Nodos B y Controladores radio de la red, y la red troncal CN (Core Network) formada por los equipos encargados de la conmutación de paquetes y de circuitos (figura 3.4).

- Estación móvil, UE (User Equipment): Es el terminal móvil junto con su módulo de identidad de servicios de usuario equivalente a la SIM en GSM (USIM).
- Nodo B: responsable de la transmisión y recepción hacia/desde los terminales de usuario, equivalente a la estación base en GSM.
- Controlador radio RNC (Radio Network Controller): controla uno o más Nodos B, y está encargado de la señalización, del control del uso e integridad de los recursos radio, y de funciones de separación y combinación.

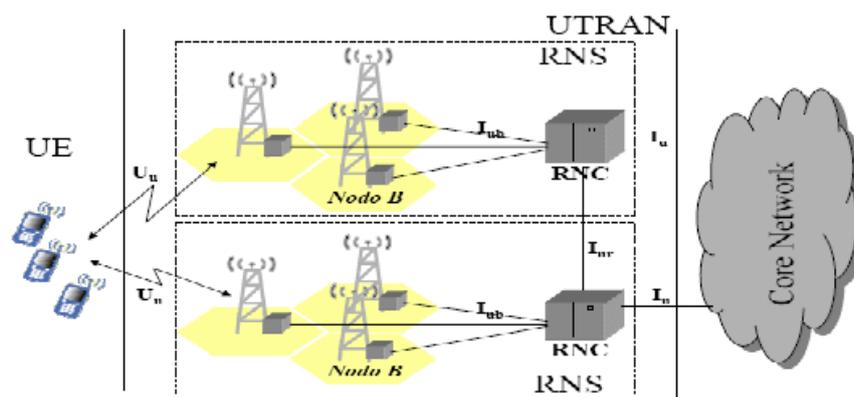


Figura 3-4. Arquitectura UMTS [21].



### 3.2.4. Sistemas de comunicaciones móviles 4G

#### Introducción al sistema LTE

Con LTE (Long Term Evolution) se introduce una gran variedad de novedades. Destaca el hecho de que todos los servicios, incluida la voz, son soportados por el protocolo IP [22].

Además, debido a las técnicas de transmisión utilizadas, junto con las estructuras de transmisión y recepción con múltiples antenas, las velocidades que se alcanzan en la interfaz radio aumentan con respecto a la última generación, llegando a un rango de 100 Mbps y 1 Gbps. En el enlace descendente se usa la técnica de acceso múltiple denominada OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y para el enlace ascendente, la técnica denominada CS-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).

#### Arquitectura del sistema LTE

En las especificaciones se denomina a la arquitectura del sistema LTE (figura 3.5) como EPS (Evolved Packet System). El sistema queda dividido en un equipo de usuario, una nueva red de acceso que denominaremos E-UTRAN, formada únicamente por estaciones base eNB, y una red troncal denominada EPC formada por los elementos MME, S-GW, P-GW y HSS:

- Equipo de usuario: es el equipo que permite al usuario conectarse a la red LTE y disfrutar de los servicios que nos proporciona a través de la interfaz radio. La arquitectura funcional de un equipo de usuario es la misma que se definió para GSM y UMTS. Está formado por el módulo de suscripción SIM/USIM y equipo móvil ME.
- Estación base eNB (Nodo B evolucionado): encargados de la conexión entre los usuarios y la red troncal EPC, y las funcionalidades de la red de acceso.
- MME: es el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. Todo terminal tiene una entidad MME asignada, dependiendo de la ubicación geográfica del terminal en la red, así como a criterios de balanceo de cargas.
- S-GW: es la pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Todo usuario registrado en la red LTE también tiene asignado una entidad S-GW en la red EPC, a través de la cual transcurre su plano de usuario.
- P-GW (PDN Gateway): es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas, haciendo de pasarela entre una red y otra. Por lo tanto, un paquete IP generado en la red LTE resulta “invisible” en la red externa, a través de la entidad P-GW. Un usuario tiene asignada como mínimo una pasarela P-GW desde su registro en la red LTE.
- HSS: es la base de datos principal que almacena los datos de todos los usuarios de



la red relativa a la suscripción del usuario, y a lo necesario para la operatividad de la red. Esta base de datos es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red encargadas de prestar los servicios de conectividad o servicios finales.

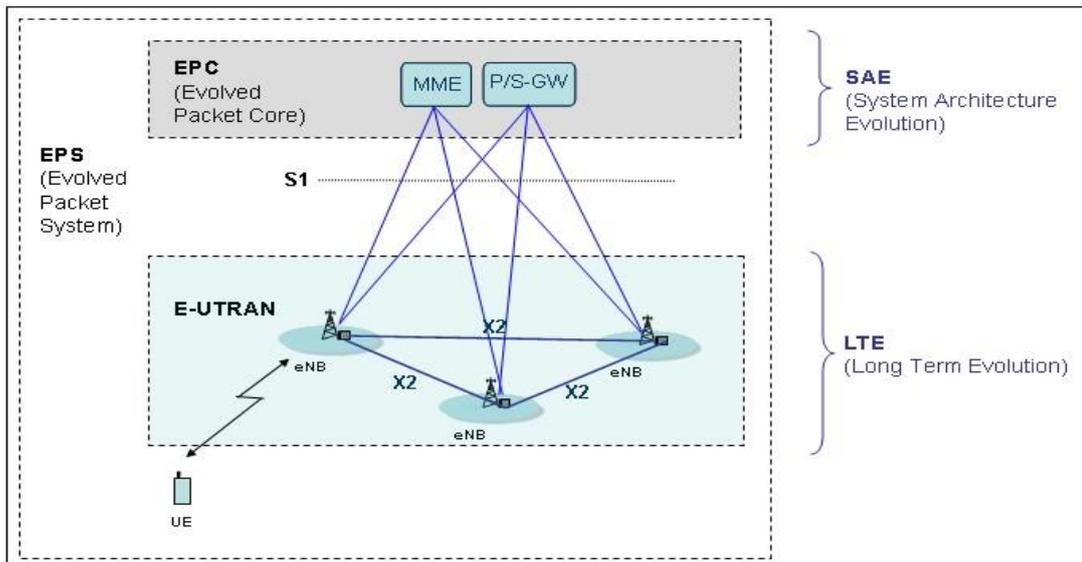


Figura 3-5. Arquitectura LTE [23].



### 3.2.5. Comparativa

En este apartado vamos a ver una tabla que resume las principales características de todos los sistemas de comunicaciones de telefonía móvil mencionados en el apartado anterior.

	GSM/GPRS	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA/HSUPA	LTE
Velocidad Máx. DL	10-150 Kbps	384 Kbps	14 Mbps	100 Mbps
Velocidad Máx. UL	10-150 Kbps	128 Kbps	5.7 Mbps	50 Mbps
Latencia (aprox.)	600 ms	150 ms	100 ms	10 ms
Versiones 3GPP	97	99/4	5/6	8
Año de lanzamiento	1991	2003/4	2005/6 (HSDPA) 2007/8 (HSUPA)	2009/10
Técnicas de acceso	TDMA / FDMA	WCDMA	WCDMA	OFDMA / SC-FDMA
Ancho de banda	200 KHz	5 MHz	5 MHz	1.2-20 MHz
Tipos de modulación que soporta	GMSK, 8- PSK	QPSK	QPSK, 16-QAM	QPS, 16- QAM, 64- QAM
Potencia de salida del dispositivo móvil (dBm)	30-33	21	21	23

Tabla 3-1. Comparativa de los sistemas de comunicaciones móviles [24].



---

## 4. Entorno de trabajo

---

### 4.1. Escenario de la aplicación

Hay varios modelos que se pueden implementar para desarrollar un enlace de comunicación inalámbrica (figura 4.1).

En primer lugar, la comunicación se puede realizar a través de la red pública comercial, utilizando en el dispositivo móvil una tarjeta SIM comercial, de manera que los datos se transmitan por Internet a una IP pública a la que el servidor se pueda conectar y acceder a la información recogida.

De otra forma, se puede crear una red privada a través del R&S CMW500. En este caso, el R&S CMW500 debe ser equipado de una antena conectada a uno de los conectores frontales RF del equipo para que el conjunto sea capaz de proporcionar cobertura a todo el área del circuito y desarrollar la función de una estación base. En nuestro caso se trata de una antena pequeña bicónica omnidireccional (descrita en el Anexo A.1.2). Además, el R&S CMW500 va a estar conectado con el servidor vía Ethernet, de manera que los paquetes de datos transmitidos pasen de forma transparente por el instrumento, y se encaminen después por la red local hasta alcanzar el destino final. Así, es posible desarrollar una comunicación independiente a cualquier operador (modelo desarrollado en este proyecto).

A efectos prácticos, la estación móvil va a estar configurada por un sistema de adquisición y transmisión de datos denominados Arduino, integrado en la moto. Mientras que para realizar las pruebas en el laboratorio, este sistema ha sido implementado por el conjunto de un Módem USB (descrito en el Anexo A.1.3) conectado a un PC portátil. Aunque en ambos casos, es preciso utilizar una tarjeta SIM específica de Rohde & Schwarz (descrita en el Anexo A.1.4) para que el dispositivo pueda ser detectado por la estación base, y ésta le permita conectarse a la red móvil.



### Mediante Internet

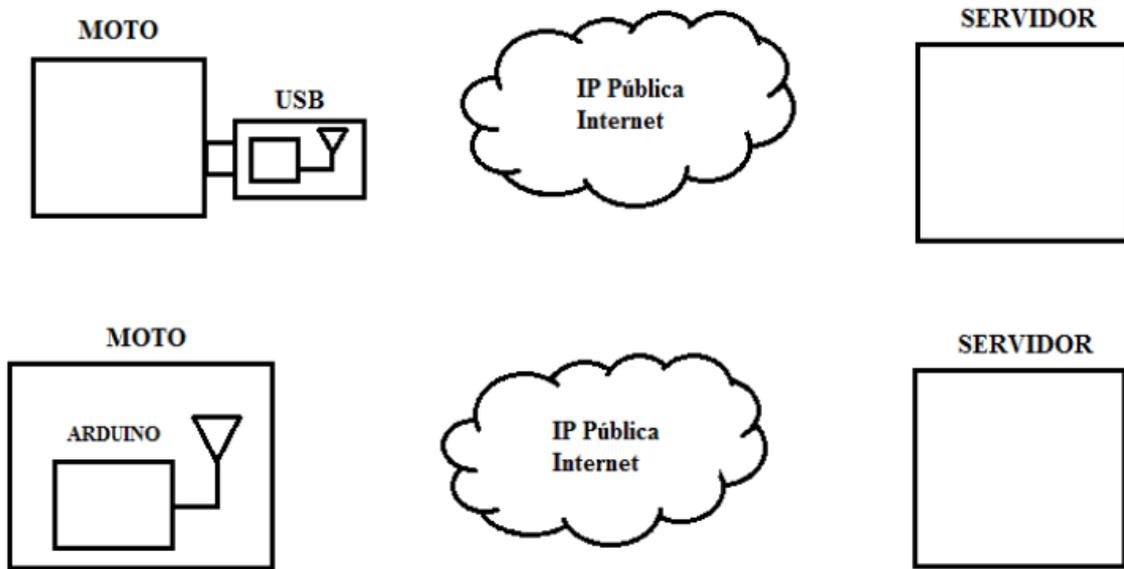


Figura 4-1. Comunicación inalámbrica a través de la red pública de Internet.

### Mediante R&S CMW500

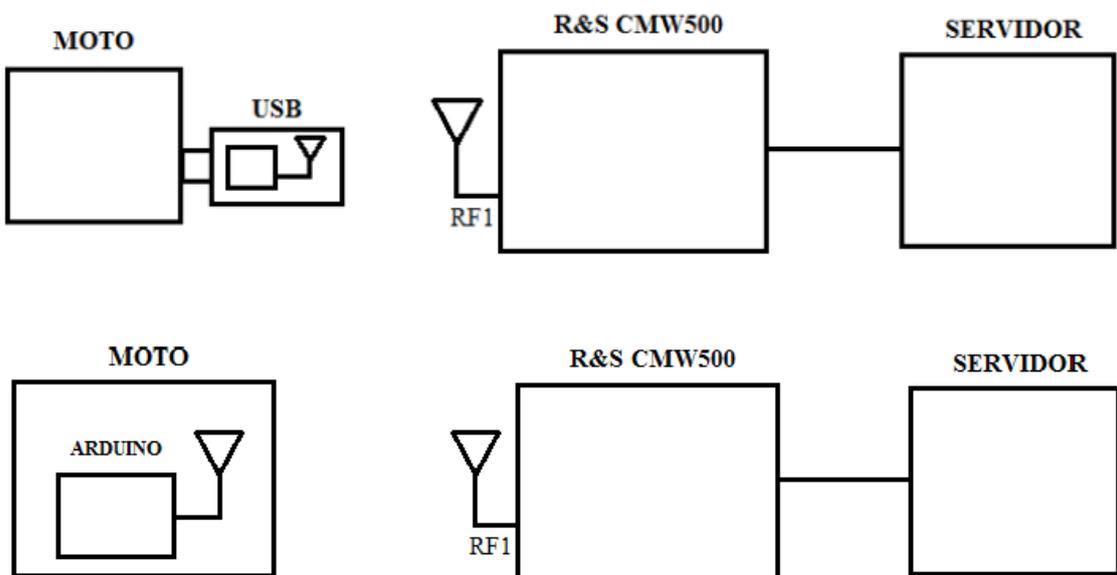


Figura 4-2. Comunicación inalámbrica a través de la red privada del R&S CMW500.



## 4.2. Instrumento de radiocomunicaciones Rohde & Schwarz CMW500

El R&S CMW500 es un equipo multidisciplinar, capaz de implementar todas las fases de desarrollo, verificación y producción de un proyecto (figura 4.2).

Además, permite realizar sofisticadas tareas de medición inalámbrica durante la ejecución de una aplicación, lo que nos ha permitido ajustar parámetros como la atenuación externa (parámetro que veremos en el capítulo 7) durante el transcurso de la prueba, y con ello mejorar el índice de potencia recibida en el dispositivo móvil, como veremos posteriormente.

El equipo proporciona dos generadores de señal de RF para hacer pruebas de carácter general, y una serie de generadores para emitir sobre diferentes tecnologías de comunicación celulares y no celulares. Además, el equipo permite realizar una serie de medidas del sistema diez veces más rápido que cualquier otro sistema convencional, tanto en transmisión como en recepción, y representar los resultados de forma estadística. Además, garantiza una alta precisión en la producción debido a la captura y evaluación de datos simultánea.



Figura 4-3. Rohde & Schwarz CMW500.

También consta de varios conectores frontales de RF que permiten al equipo implementar varias aplicaciones en paralelo, tantas como permita el número de conectores RF del instrumento.

Tiene un PC integrado que trabaja con el sistema operativo Windows XP que simplifica la manejabilidad del sistema. Desde aquí se puede ejecutar el software de aplicación del instrumento, que incorpora una interfaz gráfica para manipular el instrumento y desde la que es posible seleccionar la función que va a realizar y ser configurado según corresponda (se verá en detalle en siguientes apartados).

El software proporciona unos valores de configuración prefijados para cada una de las aplicaciones posibles, que ajusta todos los parámetros según los requerimientos de cada aplicación para simplificar con ello la labor del usuario.



### **4.2.1. Funcionamiento de R&S CMW500 según el tipo de aplicación**

A su vez, es un instrumento de medida, capaz de realizar la función de un generador de radiofrecuencia, un analizador de radiofrecuencia y una estación base, a través de un sólo equipo. Éste soporta estándares de telefonía móvil tan comunes como son GSM y WCDMA, y otros más recientes como LTE (incl. MIMO) [25].

#### **R&S CMW500 como generador de RF**

En esta aplicación, la función del R&S CMW500 permite proporcionar una señal de radiofrecuencia a una frecuencia constante, o en cambio, a una serie de frecuencias y niveles configurables. También permite generar una señal de radiofrecuencia modulada según otra forma de onda determinada, que sea representada en el software del equipo a partir de un archivo [26].

#### **R&S CMW500 como analizador de RF**

La actuación del R&S CMW500 como analizador, garantiza una precisión absoluta, repetibilidad y linealidad para optimizar el rendimiento, por eso es capaz de realizar una medición diez veces más rápido que otras soluciones más convencionales [27]. Generalmente, cubre un intervalo de tiempo de base que puede repetirse periódicamente para calcular los resultados también de forma estadística.

#### **R&S CMW500 como estación base**

Esta aplicación, permite establecer un canal radio entre los extremos de una comunicación, de manera que se puedan intercambiar mensajes de control y obtener información relativa al dispositivo móvil, como su capacidad, y también al enlace radio. Además, esta aplicación incorpora una interfaz que permite configurar todos los parámetros que intervienen en la comunicación.

Cuando el R&S CMW500 actúa como estación base, lo que hace es transmitir una señal en sentido descendente para que el dispositivo móvil pueda sincronizarse a la red y establecer un enlace directo [26].



### 4.3. Entorno software

En este apartado explicaremos el programa de forma resumida, ya que estos pasos están detallados en la primera versión del proyecto [28], para ver las opciones que ofrece, y describir algunos parámetros característicos que tiene en cuenta el equipo en cada configuración.

Al arrancar el programa, la primera pantalla de la aplicación del instrumento muestra dos opciones a elegir (figura 4.3). Estas opciones van a determinar la función que va a realizar el R&S CMW500 (Como analizador o generador).



Figura 4-4. Primera pantalla del programa.

#### 4.3.1. R&S CMW500 como analizador

En este paso se muestran las posibles medidas que se pueden realizar (figura 4.4).

- La opción “General Purpose RF” permite medir una serie de parámetros de la señal de RF generada por el instrumento, cuando éste actúa como generador.
- En “GSM” no permitirá analizar el enlace ascendente en transmisión y recepción. Para ello tenemos varios modos de adquisición de datos: El modo “RX Measurement” se utiliza para capturar parámetros característicos en recepción como el BER. El modo “Multi Evaluation” se utiliza para realizar un análisis múltiple en transmisión y recepción. Permite visualizar los resultados en todas las modulaciones y espectros; y extraer resultados estadísticos de todos ellos, medir el tiempo de referencia según el número de símbolos, y puede llegar a medir y almacenar la potencia de hasta 8 slot consecutivos. Su ventaja es que utiliza un generador adicional en recepción para poder hacer aplicaciones de señal en paralelo. La desventaja es que esta última opción sólo está disponible bajo licencia con el fabricante, estando limitada en la que disponemos.



- Las medidas que se realizan al seleccionar la opción “Extended BLER” para “LTE” son especialmente adecuadas para evaluar las características y el rendimiento del dispositivo bajo prueba como receptor, a bajos niveles de potencia de RF. Para ello el instrumento se encarga de transmitir una serie de datos al dispositivo bajo prueba, y en función de los ACK y NACK recibidos, determina el BLER y throughput del canal.
- En “WCDMA” también disponemos de una serie de gráficas para representar los resultados del análisis en transmisión, y en recepción el análisis se fundamenta en parámetros antes mencionados como BER, BLER, y también DBLER, con el fin de obtener el porcentaje de error en la comunicación. En este caso el modo “Multi Evaluation” puede medir y almacenar hasta 120 slot consecutivos en cada ciclo (8 tramas).
- Para la tecnología WIMAX y WLAN, los resultados se van a basar en el análisis del parámetro PER en función del número de tramas transmitidas.

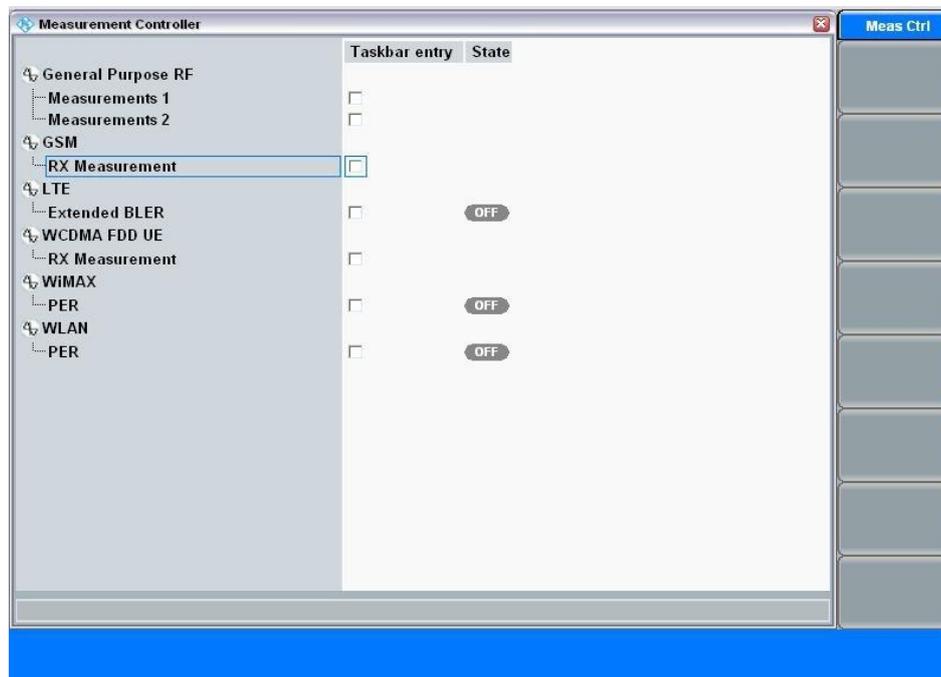


Figura 4-5. R&S CMW500 como analizador.

### 4.3.2. R&S CMW500 para aplicaciones de radiofrecuencia.

Esta opción permite seleccionar el papel que va a representar el R&S CMW500 en el sistema (figura 4.5).

- Si seleccionamos la primera opción, el R&S CMW500 va a actuar como un generador de señal de radiofrecuencia genérico que puede proporcionar una señal RF de frecuencia constante o de frecuencias y niveles configurables, con el fin de realizar pruebas con ella.



- Si elegimos la segunda opción, el R&S CMW500 va a simular la función de una estación base móvil sobre el estándar GSM. Con esta opción se puede realizar llamadas por conmutación de circuitos y transmitir paquetes de datos por conmutación de paquetes sobre el sistema avanzado de GSM, GPRS.
- Para desarrollar comunicaciones más avanzadas tenemos la siguiente opción. En este caso el R&S CMW500 va a representar la función de una estación base móvil apoyada sobre el estándar LTE.
- También podemos desarrollar comunicaciones de tercera generación con la opción “WCDMA FDD UE” donde el R&S CMW500 va a actuar como estación base móvil sobre UMTS.
- El R&S CMW500 también puede desarrollar comunicaciones sobre tecnologías no celulares como WIMAX y WLAN que podemos implementar seleccionando una de las dos últimas opciones.

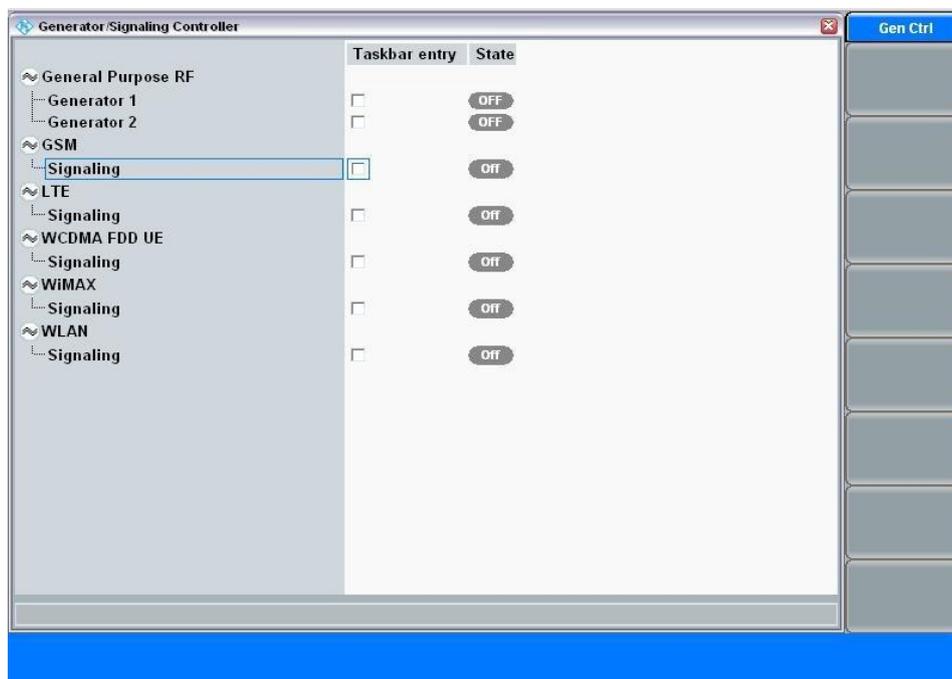


Figura 4-6. R&S CMW500 como generador/estación base.



## 4.4. Diseño implementado en su primera versión

A continuación se resume el diseño realizado por Belén Pérez Muñoz en la primera versión de este sistema de telemetría, en el cual nos basaremos para realizar los avances, mejoras y estudios de las diferentes señales de radiocomunicación soportados por el CMW500 para dar cobertura en un circuito.

Como primer aporte, se explicó como configurar el CMW500 para enviar al servidor cada trama de datos, esto se realiza mediante el componente interno del R&S CMW500, que se utiliza en las aplicaciones donde se va a realizar un intercambio de paquetes de datos, es llamada DAU (Data application Unit). En el capítulo 7, entre las diferentes configuraciones haremos hincapié en esta característica para permitir esta función.

Posteriormente tenemos las configuraciones realizadas por Belén, las cuales detallo en la siguiente tabla resumiendo los aspectos más relevantes:

	GSM	UMTS
Banda de frecuencias	1800 MHz	1 (2112.6 y 1922.6 MHz)
Canal de comunicación	Por defecto	Por defecto
Configuración de slot / Código de identificación	Automática	Por defecto
Dominio de conmutación de paquetes	Activo	Activo
Servicio de conmutación de paquetes / Tipo de conexión	Modo de prueba A/e2e:maximizar UL	Modo de prueba / HSPA (no precisa dom. De conmutación de circuitos)
Atenuación externa a la entrada	35.9 dB	35.9 dB
Atenuación externa a la salida	80 dB	80 dB
Distancia	1.5m	1m

Tabla 4-1. Comparativa de configuraciones de comunicaciones inalámbricas. [28].

Entre estas características hay detalles más importantes que otros de cara a este proyecto, la mayoría han sido de utilidad para realizar las configuraciones del presente proyecto, pero hay dos cambios importantes:

- En su primera versión, se utilizó una sola antena bicónica (Anexo A.1.2.) para dirigir la señal tanto en enlace descendente como ascendente.
- Las atenuaciones externas tanto a la salida como a la entrada fueron recalculadas y ajustadas en este proyecto tras un estudio del entorno, de las condiciones, y de contactos con el fabricante al presentarse nuestra situación, de altas reflexiones que provocaban valores bastante altos de atenuación respecto a la aplicación que tiene este equipo (medir o analizar señales móviles conectadas mediante cable a un dispositivo llamado R&S CMW-Z10 [31], el cuál aísla el dispositivo para analizar las señales en un entorno conocido), pero en nuestro caso, éramos



pioneros en esta aplicación, teniendo que llevar a cabo unos ajustes que se detallan en el capítulo 7.

Finalmente, se demostraba que la conexión funcionaba en ambas tecnologías, manteniendo en el enlace lo suficiente para realizar pruebas de conexión con el Servidor UDP (figura 4.6); todo de forma muy detallada y precisa, haciéndose fácil su lectura para comprender y familiarizarse con el equipo de cara a emprender este proyecto como si uno mismo hubiera realizado la primera versión. Esto ayudó a agilizar las cosas y poder preocuparnos más por detalles importantes, como buscar los límites al R&S CMW500 en las dos tecnologías que nos interesaban para esta aplicación, GSM y UMTS.

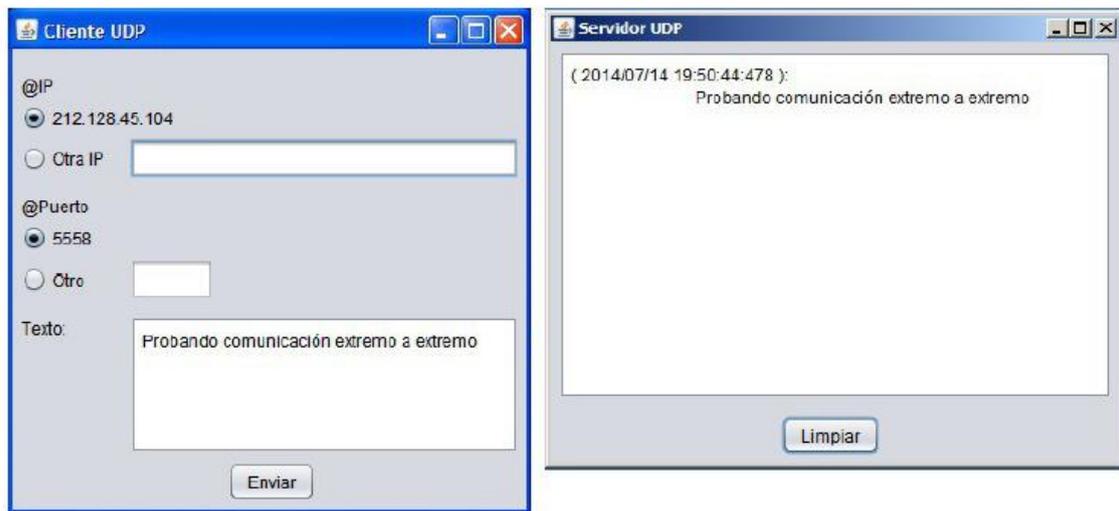


Figura 4-7. Transferencia de paquetes en sentido ascendente hacia el servidor por GSM.

## 5. Diseño del nuevo sistema de radiocomunicación

### 5.1. Novedades

Una vez planteada la situación, llevamos a cabo un nuevo diseño el cual destacaba por una transmisión/recepción de paquetes a través de dos antenas conectadas a las clavijas RF de entrada y salida para evitar solapamientos y pérdidas de información al usar el mismo canal. Con este cambio ganaríamos la certeza de evitar cualquier problema que pudiera haber al realizarlo con una sola antena. Tan sólo es suficiente cambiar la dirección de la señal de transmisión y recepción mediante un pequeño panel llamado “Routing” que veremos en el capítulo 6.

Tras aplicar este cambio, estudiamos la posibilidad de realizar las pruebas directamente con la placa Intel (con tecnología Arduino), que por ende el cambio de esta placa es debido a la mejora en el cuello de botella ocasionado por la limitada velocidad de procesado que tiene la placa Arduino; estas pruebas fueron realizadas en parte con esta placa, pero al no tener la implementación del código terminada no nos fue posible realizar una conexión por paquetes para poder hacer las medidas que necesitábamos. Por tanto, se decidió seguir apostando por el modem USB que se utilizó en el anterior proyecto para simular la señal del Arduino, ya que en principio, había muy pequeñas diferencias en los niveles de señal.



Figura 5-1. Momento de las pruebas en el laboratorio de la Facultad de Telecomunicaciones de la UPCT.

El sistema una vez montado, quedó como muestra la figura 5.2., donde se refleja una instantánea de uno de los momentos de las medidas de campo, en las cuales, como se puede observar, se hicieron independientes de la conexión al servidor al ser prescindible en estos casos; podremos ver que la conexión se hace perfectamente, pero dejaremos de lado esa parte del sistema de telemetría para hacer las pruebas más cómodamente (prescindiendo de la conexión LAN que nos era inaccesible para las pruebas).



Figura 5-2. Momento de las pruebas en el patio de la Facultad de Telecomunicaciones de la UPCT.

Por último, uno de los estudios más importantes fue la búsqueda de frecuencias portadoras libres de los operadores de telefonía móvil, para evitar interferencias. Para esto tuvimos que ver tanto el rango de frecuencias soportado por el CMW500 como las frecuencias ocupadas en el territorio español [32], pudiendo consultarlas sin problema en la consulta del Registro Público de Concesiones de Telecomunicaciones; con estas dos fuentes elegimos las mejores frecuencias para ambas tecnologías (GSM y UMTS) en la siguiente tabla:

	2100 MHz (UMTS)	1900 MHz (EDGE)	900 MHz (EDGE)
Bandas ocupadas (Downlink / Uplink)	2110-2170 / 1920-1980 MHz	Ninguna*	925.1-959.9 / 880.1-914.9 MHz
Bandas libres	Ninguna	-	Ninguna
Bandas soportadas por CMW500 (Downlink / Uplink)	2112.4-2167.6 / 1922-1977 MHz	1930-1989.8 / 1850-1909.8 MHz	935.0-959.8 / 890.0-914.8 MHz
Portadora escogida (MHz)	2125.0** 1935.0**	1960.0 1888.0	959.8 914.8

\* En el Registro Público no consta 1900 MHz, si no de 1800 MHz.

\*\* Se escogieron para las medidas en el sótano: 2112.6-1922.6 MHz. Afectadas por Xfera Moviles (Yoigo).

Tabla 5-1. Comparativa de rangos frecuenciales a la hora de elegir portadora.

Como podemos ver, para UMTS no tendríamos ninguna banda libre, esto, como veremos en el capítulo 8 no fue un impedimento en los pasillos de los sótanos, sin afectar a la señal prácticamente, seguramente por la poca cobertura de ese entorno evitando así interferencias; sin embargo en el patio para medidas de larga distancia con línea de visión directa tuvimos que aplicar una frecuencia intermedia, entre dos bloques de dos operadoras diferentes, cogiendo justo los extremos de sus espectros; para así intentar que afectase lo menos posible, este cambio funcionó, pues sin aplicarlo, el modem USB no enlazaba a la red del CMW500, pero con la nueva frecuencia pudimos terminar las medidas sin problema hasta distancias cercanas a GSM. Respecto a estos problemas de disponibilidad de bandas, se podría haber optado por una banda de otro rango de frecuencias como podría ser 850/900/1900 MHz para UMTS, pero el modem USB no soportaba más que 2100 MHz [33].

Tras esto, podríamos resumir nuestro sistema en el siguiente esquema de forma simple:

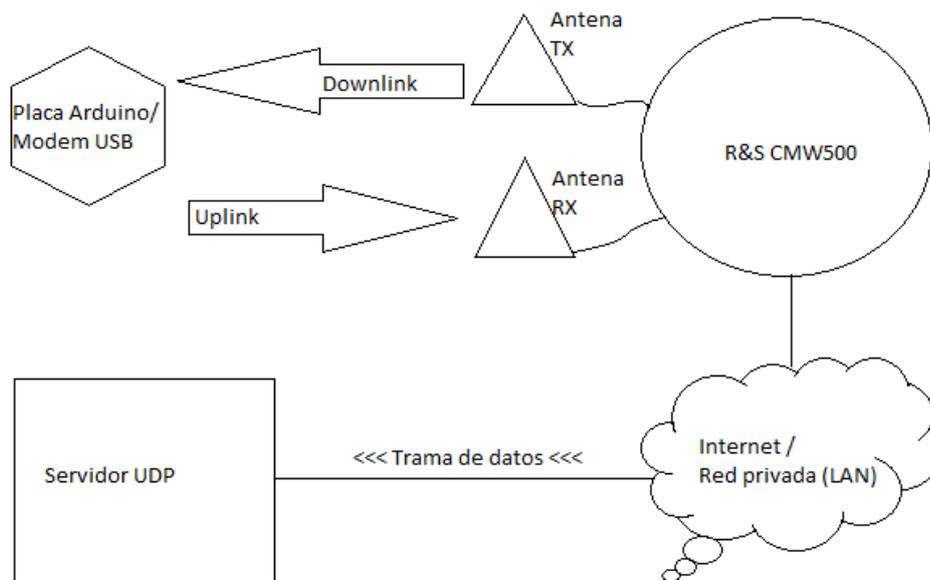


Figura 5-3. Esquema general del sistema de radiocomunicación empleado en el sistema de telemetría.



Quedando el sistema de la siguiente forma:

	GSM	UMTS
Banda de frecuencias	1900 / 900 MHz	1 (2125 / 1935 MHz)
Canal de comunicación	Por defecto	Por defecto
Configuración de slot / Código de identificación	Automática	Por defecto
Dominio de conmutación de paquetes	Activo	Activo
Servicio de conmutación de paquetes / Tipo de conexión	Test Mode A / Packet Switched	Test Mode / RMC (Loop Mode 2)
Atenuación externa a la entrada	45 dB*	45 dB*
Conector antena de entrada	RF1COM	RF1COM
Atenuación externa a la salida	40 dB*	40 dB*
Conector antena de salida	RF1OUT	RF1OUT
Distancia	1.5m**	1.5m**
Altura antenas	1.175m	1.175m
Altura receptor modem	0.5m	0.5m
USB		

\* Atenuaciones ajustadas en el capítulo 6.

\*\* Todos los ajustes se han realizado con esta distancia inicial, posteriormente se aumenta para ver su comportamiento.

Tabla 5-2. Configuraciones de las dos tecnologías que estudiaremos en el proyecto.

Internamente, en el CMW500 nuestro sistema se puede definir mediante este sistema de bloques:

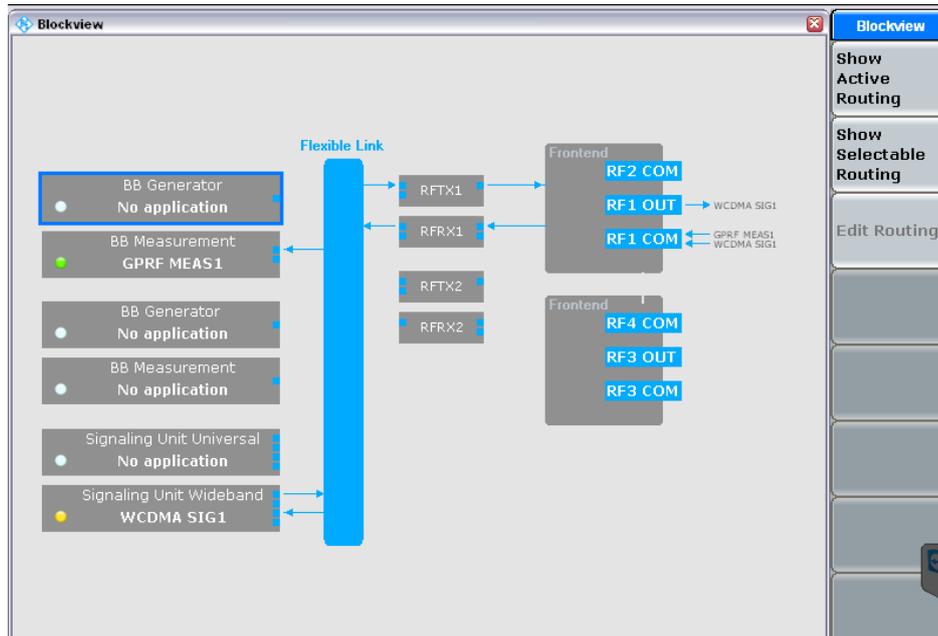


Figura 5-4. Esquema de bloques interno del R&S CMW500 en una señal UMTS.

## 6. Configuraciones GSM Y UMTS mediante el R&S CMW500

En este capítulo mayormente podremos ver, una vez creadas las configuraciones básicas para generar la célula móvil, los instantes en los que el dispositivo se identifica con la red generada por el CMW y este se enlaza a ella (Attached).

Pero se verá más hincapié en ajustar el parámetro característico de la “atenuación externa” del equipo CMW500. Este representa la atenuación de la señal como resultado de propagarse por el medio de comunicación. De manera que cuanto mayor sean las pérdidas provocadas por el entorno como consecuencia de las pérdidas por propagación, ruido e interferencias, absorciones del cuerpo, cables utilizados, etc; mayor deberá ser el valor de atenuación externa que debemos considerar.

El instrumento consta de dos parámetros diferentes para distinguir la atenuación de la señal en función del sentido en el que ésta se transmita, puesto que los efectos no van a ser los mismos. La atenuación externa, tanto a la salida como a la entrada del R&S CMW500, se configura por defecto a un valor igual a 0 dB; Pero hay que tener cuidado con este parámetro puesto que es un parámetro complejo y difícil de determinar, por esta razón estudiaremos cual es a nuestro juicio y por recomendaciones del fabricante los mejores valores de atenuación externa a configurar para nuestras medidas a diferentes distancias y entornos.

### 6.1. Configuración de UMTS

Una vez hayamos configurado correctamente el generador para crear una célula móvil que dé cobertura a nuestro dispositivo USB (ver apartado A.2.1 del Anexo) podremos activar este mediante un gestor de redes desde nuestro portátil, por ejemplo el Escritorio Movistar, donde configuraremos el APN correspondiente del CMW500 para que reconozca la red 3G que acabamos de crear:



Figura 6-1. Configuración del APN para conectar al CMW500.



Una vez configurado, nuestro modem reconocerá la red 3G y se identificará en la red, y se registrará como podemos ver en ambos extremos, en uno de ellos en la figura 6.2, e inmediatamente se enlazará a la red (Attached) como en la figura 6.3.



Figura 6-2. Red del CMW500 reconocida por el modem USB.

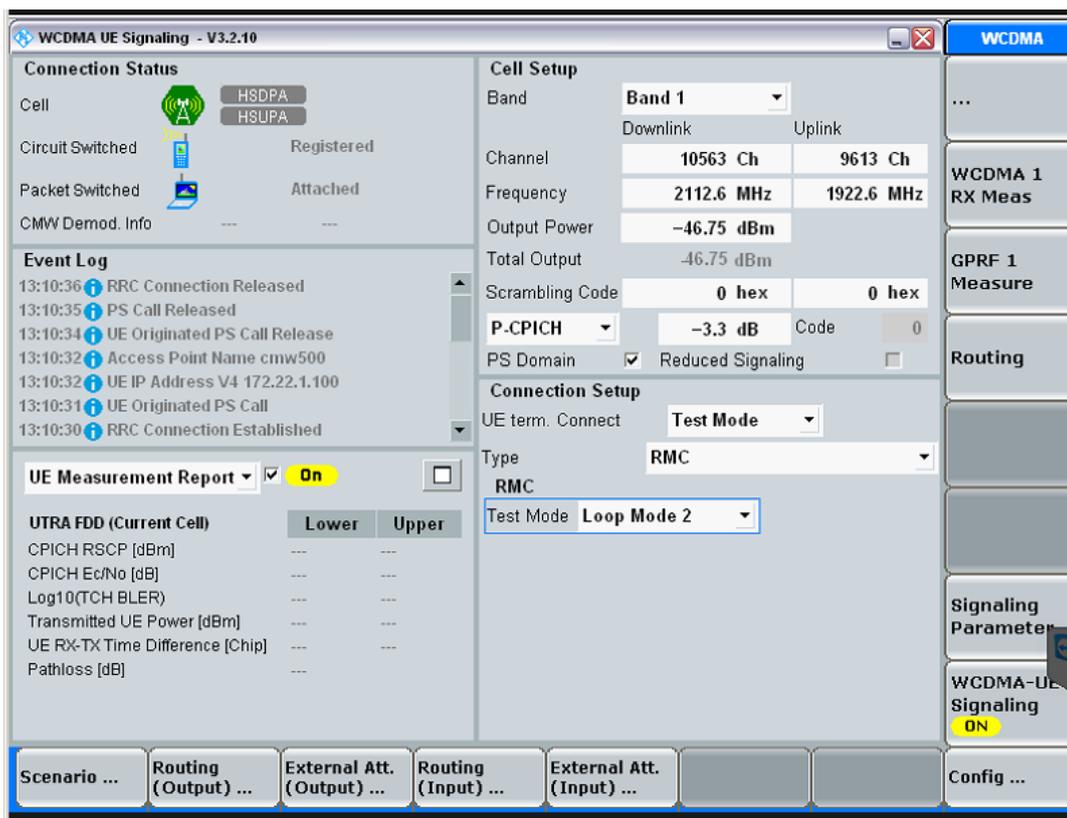


Figura 6-3. Modem USB registrado y enlazado a la red por el CMW500.

Los niveles de potencia que se pueden ver en la figura 6.3 aún son irrelevantes, son valores por defecto que tendremos en cuenta de cara a calcular las atenuaciones externas para tener una conexión estable para dar su máximo en alcance.

Posteriormente damos a conectar en la aplicación de Escritorio Movistar para realizar una conexión por conmutación de paquetes y poder realizar los análisis posteriores. Una vez conectan ambos extremos (figura 6.4 y 6.5) podemos ver que el CMW500 nos muestra datos muy valiosos como puede ser el CPICH-RSCP; que es la potencia que realmente llegará al modem USB pues este parámetro tiene en cuenta la atenuación externa.



Figura 6-4. Modem USB conectado con éxito por paquetes al CMW500.

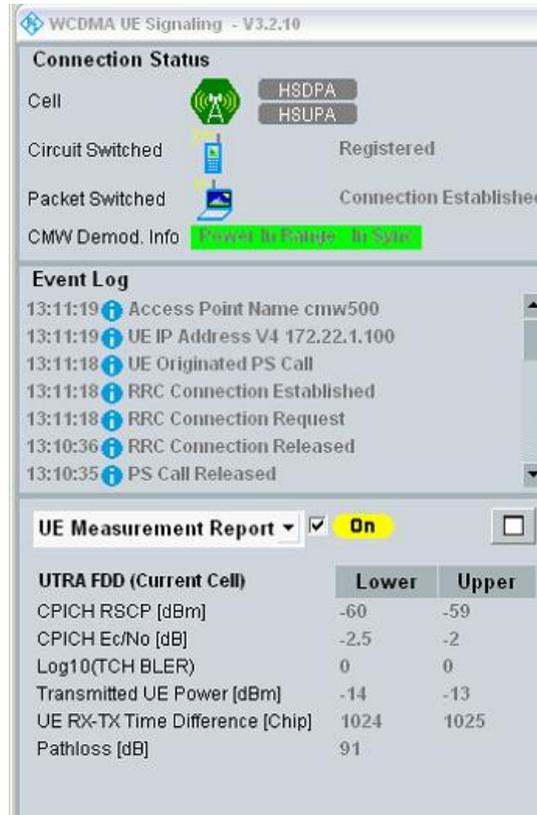


Figura 6-5. Conexión por conmutación de paquetes establecida. Datos reportados del UE (User Equipment, Modem USB en nuestro caso).

Una vez lograda la conexión entre ambos extremos, realizada a escasos 1,5 metros para recibir los valores más óptimos y con menores pérdidas para un buen cálculo de la atenuación externa que veremos a continuación, y así conseguir un margen dinámico mayor.

### Ajustes en la atenuación externa de salida

Para realizar el proceso de forma más efectiva lo más recomendable es comenzar por la atenuación externa de salida, y una vez calculada ver lo más adecuado para la de entrada.

Este proceso lo realizamos para poder obtener mediciones fiables, esto nos definirá la atenuación entre el conector del CMW500 y el conector (antena) del UE de la forma más precisa posible.

Si entramos en el menú “Routing” podemos comprobar que el valor de “External Att. (Output)” se mantiene a 0 dB, y así realizamos cambios en “Output power” bajando el valor



hasta donde no es capaz de conectar, a raíz de ahí afinar la búsqueda para obtener la potencia límite a partir de la cual sí es capaz. Estos han sido los resultados:

- Con -66.10 dBm ni siquiera el UE consigue registrarse.
- Con -56.10 dBm consigue registrarse con un nivel muy bajo de cobertura, pero por ello no conecta, por potencia demasiado baja.
- Con -48.10 dBm como podemos ver en la figura 6.6 no consigue conectar adecuadamente, en este caso mejoraban las condiciones y conseguía conectar pero con valores por debajo del límite para mantener un enlace estable.

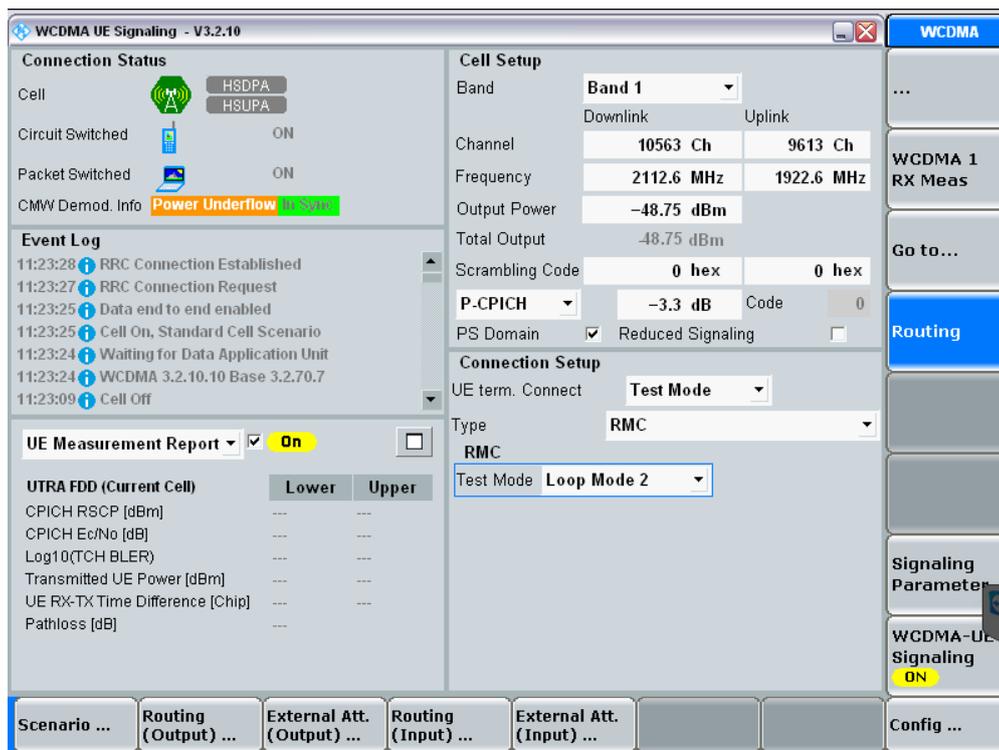


Figura 6-6. Output power demasiado bajo para conectar con el equipo.

- Con -46.10 dBm conseguimos un enlace estable dentro del rango de potencia adecuado y en sincronización (Ver figura 6.7). Vemos que es una potencia adecuada para continuar calculando la atenuación.

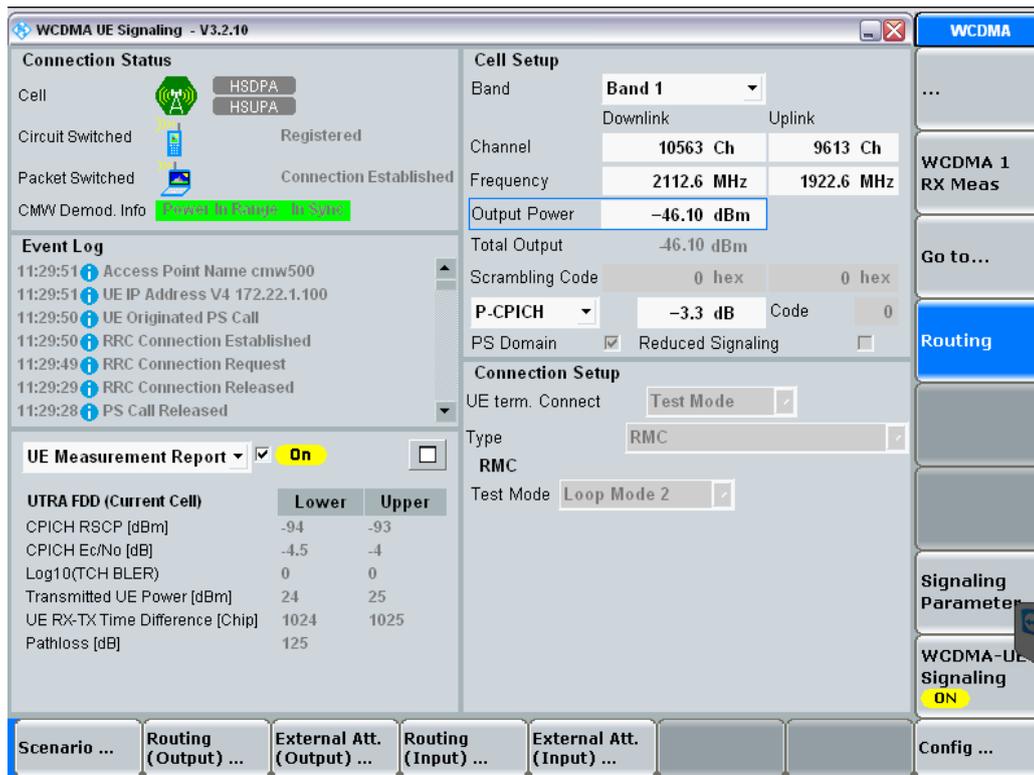


Figura 6-7. Conexión por conmutación de paquetes establecida.

Una vez ya tenemos nuestra potencia adecuada, observamos que realmente es la ideal, pues los valores que llegan al UE son cercanos a su sensibilidad, para calcular la atenuación externa debemos seguir la siguiente relación:

$$\{\text{Atenuación Externa de salida}\} = \{\text{Output Power}\} + \{\text{P-CPICH}\} - \{\text{CPICH RSCP}\}$$

En este caso, sustituyendo por los datos de la figura 6.7 tenemos, para el valor del CPICH-RSCP realizamos la media de los dos valores que tenemos (Lower y Upper):

$$\{\text{Atenuación Externa de salida}\} = \{-46.10 \text{ dBm}\} + \{-3.3 \text{ dB}\} - \{-93.5 \text{ dBm}\} = \{44.1 \text{ dB}\}$$

La atenuación externa de salida según el proceso debería ser 44 dB, aunque en este caso nos encontramos con un problema, y es que al ajustar la atenuación a 44 dB el CMW500 limita la potencia de salida a un máximo de -50.75 dBm, y como hemos estudiado antes, con esta potencia le era imposible conectar; por tanto, reducimos la atenuación a 40 dB para tener un máximo de potencia de salida de -46.75 dBm, donde podemos ver en la siguiente figura número 6.8 que con estos valores obtenemos una conexión estable y de éxito que en el capítulo 8 estudiaremos sus límites reales.

Se observa ahora un CPICH más realista, con más margen de pérdidas máximas admisibles. Con este valor, deberemos calcular la atenuación externa de entrada.

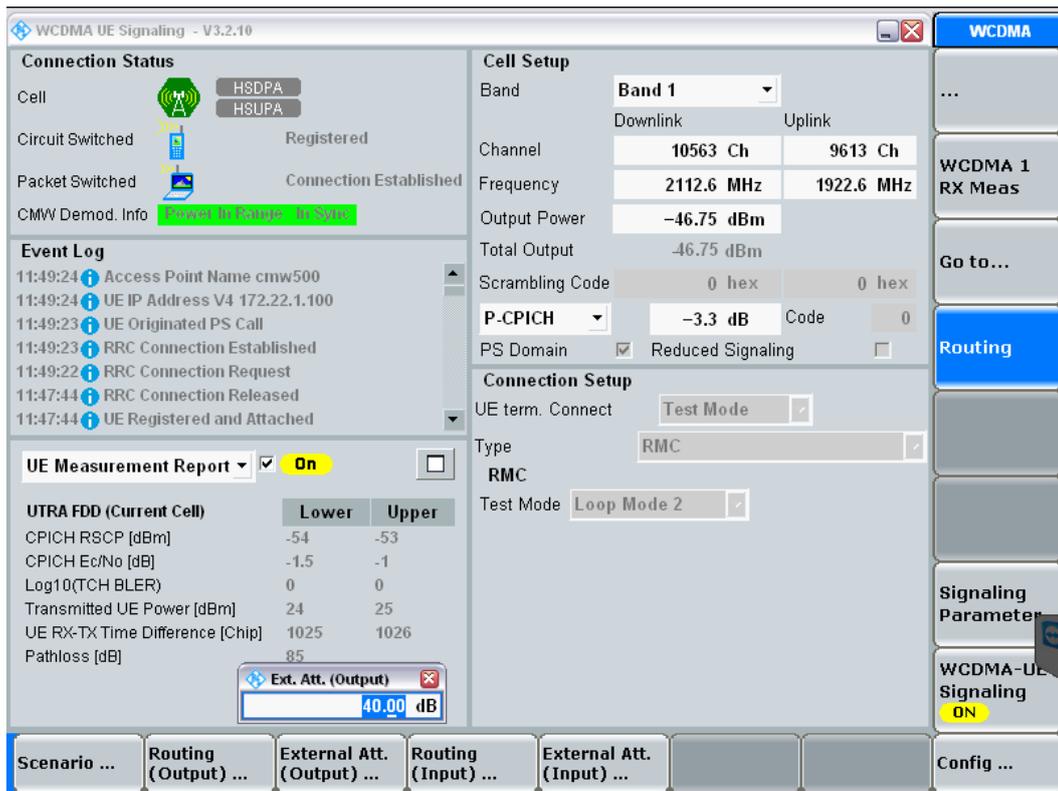


Figura 6-8. Ajuste de la atenuación externa de salida.

## Ajustes en la atenuación externa de entrada

Para este valor, el fabricante R&S nos asegura que estos cálculos son estimados, y que podríamos escoger la anterior atenuación para el enlace ascendente también. Por tanto, aunque esto no sea correcto porque el enlace ascendente es independiente del descendente y tiene por norma general una atenuación diferente, en este caso partiremos de 40 dB para hacer una estimación adecuada, pues sabemos que las condiciones son similares (muchas reflexiones y gran atenuación).

En primer lugar, las indicaciones del fabricante para medir lo más preciso posible esta atenuación no son posibles de aplicar en nuestro caso, pues para ello se necesita el analizador Multievaluation de medidas de transmisión del UE, y como confirmamos, la licencia actual del equipo no incluye este bloque; pero el fabricante da una alternativa que puede aproximarse bastante, y esta consiste en que si la atenuación de por sí es mayor de 10dB (en nuestro caso lo sobrepasamos) es aconsejable estimar la atenuación realizando pruebas de conexión (partiremos de 40dB y analizamos su comportamiento), y si tuviéramos un buen ajuste no debería diferir mucho del “Target Power”:

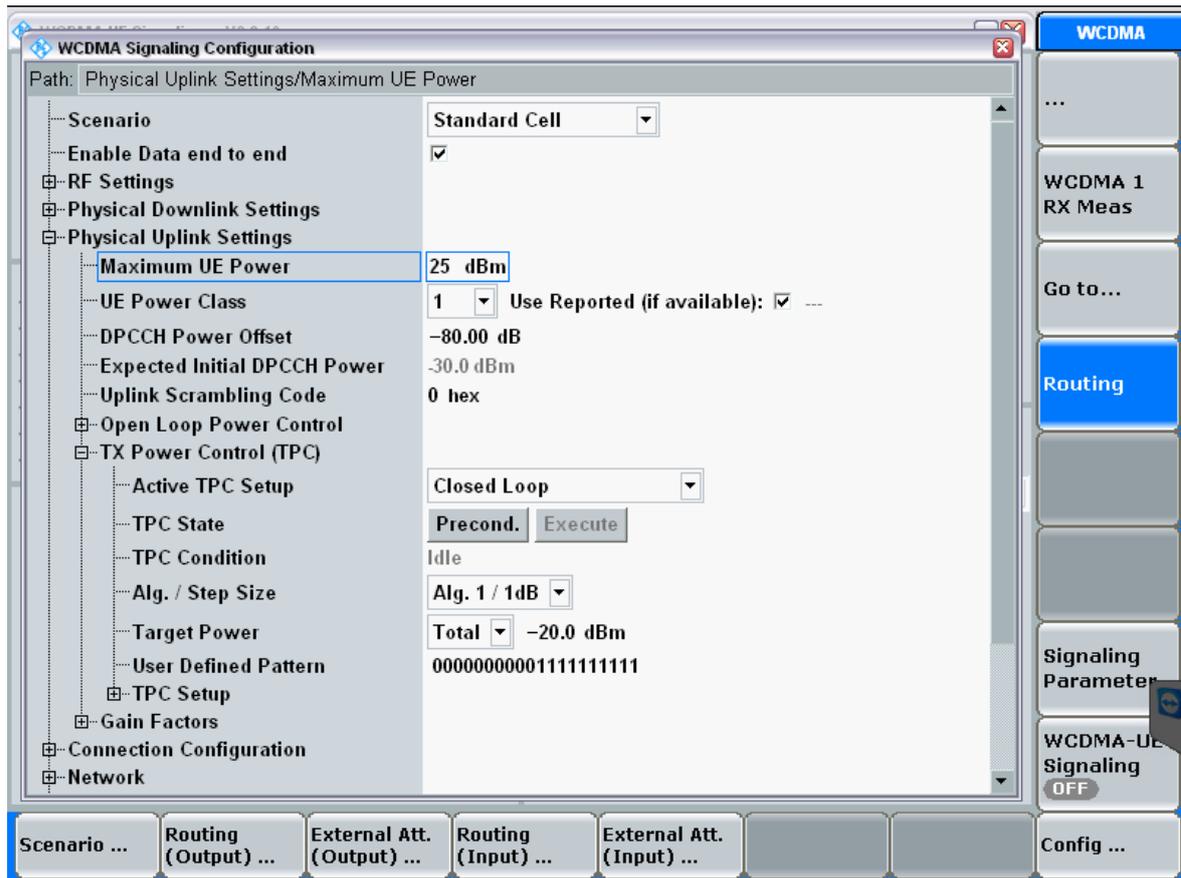


Figura 6-9. Target Power configurado en el control de potencia de transmisión del UE.

Por tanto, si partimos de estos datos, podríamos deducir que la atenuación más adecuada sería:

$$\{\text{Atenuación Externa de entrada}\} = \{\text{Potencia máx. transmitida}\} - \{\text{Target power}\}$$

En este caso, sustituyendo por los datos de la figura 6.7 tenemos, para el valor del CPICH-RSCP realizamos la media de los dos valores que tenemos (Lower y Upper):

$$\{\text{Atenuación Externa de entrada}\} = \{25 \text{ dBm}\} - \{-20 \text{ dBm}\} = \{45 \text{ dB}\}$$

Aun teniendo estos resultados, comprobamos que los resultados son viables, estables y que además parece cumplir con el pathloss total y el balance que veremos en el próximo capítulo a raíz de estos datos:



WCDMA UE Signaling - V3.2.10

**Connection Status**

Cell: HSDPA / HSUPA

Circuit Switched: Registered

Packet Switched: Connection Established

CMW Demod. Info: **Power to Change** / **In Same**

**Event Log**

- 12:48:59 Access Point Name cmw500
- 12:48:59 UE IP Address V4 172.22.1.100
- 12:48:58 UE Originated PS Call
- 12:48:58 RRC Connection Established
- 12:48:57 RRC Connection Request
- 12:47:58 RRC Connection Released
- 12:47:58 UE Registered and Attached

**UE Measurement Report**  **On**

UTRA FDD (Current Cell)	Lower	Upper
CPICH RSCP [dBm]	-54	-53
CPICH Ec/No [dB]	-2	-1.5
Log10(TCH BLER)	0	0
Transmitted UE Power [dBm]	-19	-18
UE RX-TX Time Difference [Chip]	1024	1025
Pathloss [dB]	85	

**Cell Setup**

Band: **Band 1**

Downlink: 10563 Ch, 2112.6 MHz, -46.75 dBm

Uplink: 9613 Ch, 1922.6 MHz, -46.75 dBm

Scrambling Code: 0 hex

P-CPICH: -3.3 dB, Code: 0

PS Domain:  Reduced Signaling

**Connection Setup**

UE term. Connect: Test Mode

Type: RMC

Test Mode: Loop Mode 2

**Ext. Att. (Input)**: 45.00 dB (Min = -50.00 dB, Max = 90.00 dB)

Buttons: Scenario ..., Routing (Output) ..., External Att. (Output) ..., Routing (Input) ..., External Att. (Input) ..., Config ...

Figura 6-10. Comprobación de estabilidad con la atenuación externa de entrada a 45 dB.

## 6.2. Configuración de GSM

En este caso, la configuración se realizará de la misma manera, equiparada a GSM. Primeramente configuramos correctamente el generador para crear una célula móvil que dé cobertura a nuestro dispositivo USB (ver apartado A.2.2 del Anexo) podremos activar este mediante un gestor de redes desde nuestro portátil, por ejemplo el Escritorio Movistar, donde configuraremos el APN correspondiente del CMW500 para que reconozca la red 2.5G que acabamos de crear:



Figura 6-11. Configuración del APN para conectar al CMW500.

Una vez configurado, nuestro modem reconocerá la red 2.5G y se identificará en la red, y se registrará como podemos ver en ambos extremos, en uno de ellos en la figura 6.12, e inmediatamente se enlazará a la red (Attached) como en la figura 6.13.



Figura 6-12. Red del CMW500 registrada y conectada por el modem USB.

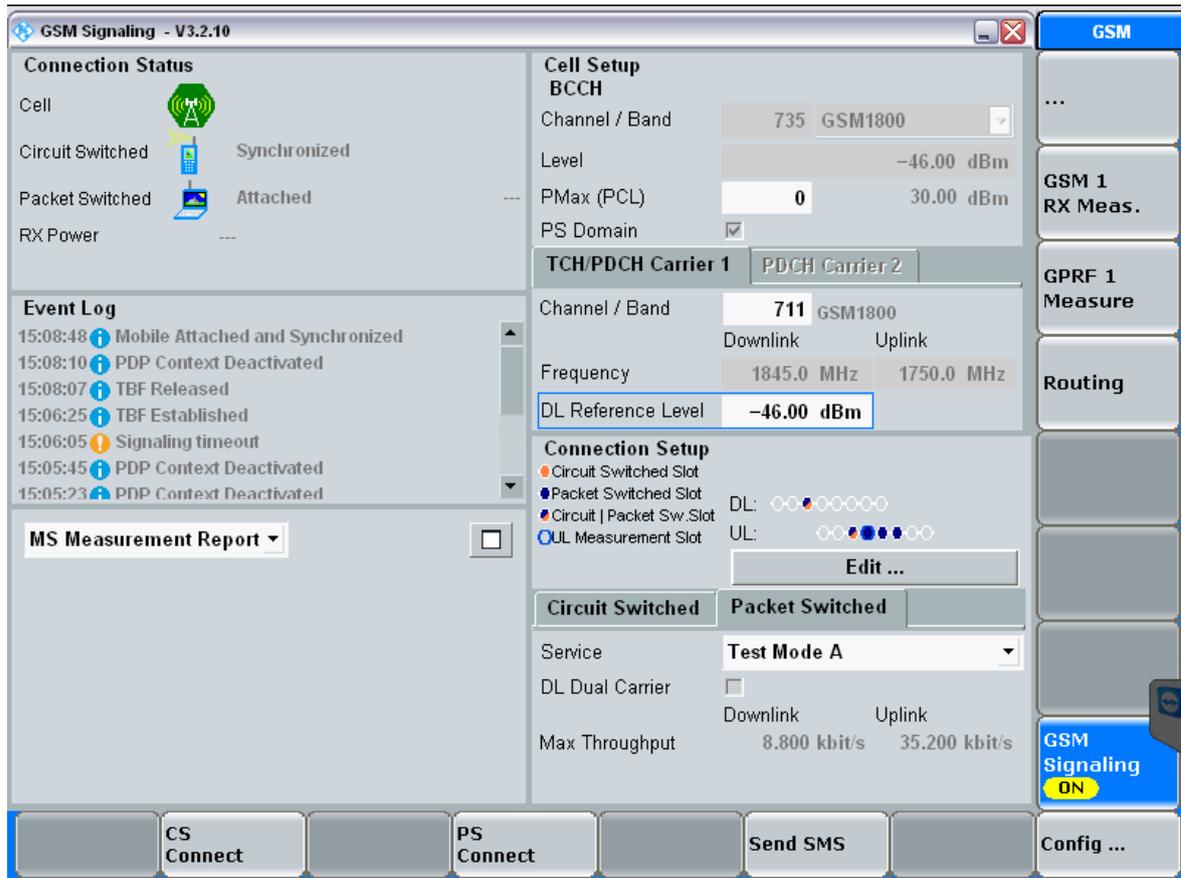


Figura 6-13. Modem USB registrado y enlazado a la red por el CMW500.

Los niveles de potencia que se pueden ver en la figura 6.3 aún son irrelevantes, son valores por defecto que tendremos en cuenta de cara a calcular las atenuaciones externas para tener una conexión estable para dar su máximo en alcance.

Posteriormente damos a conectar en la aplicación de Escritorio Movistar para realizar una conexión por conmutación de paquetes y poder realizar los análisis posteriores. Una vez conectan ambos extremos (figura 6.14) podemos ver que el CMW500 en el analizador de redes GSM no nos aporta demasiados datos, este detalle nos afectará directamente en el cálculo de la atenuación externa, que solventaremos a base de pruebas que mantengan el UE dentro del rango correcto para el CMW500.

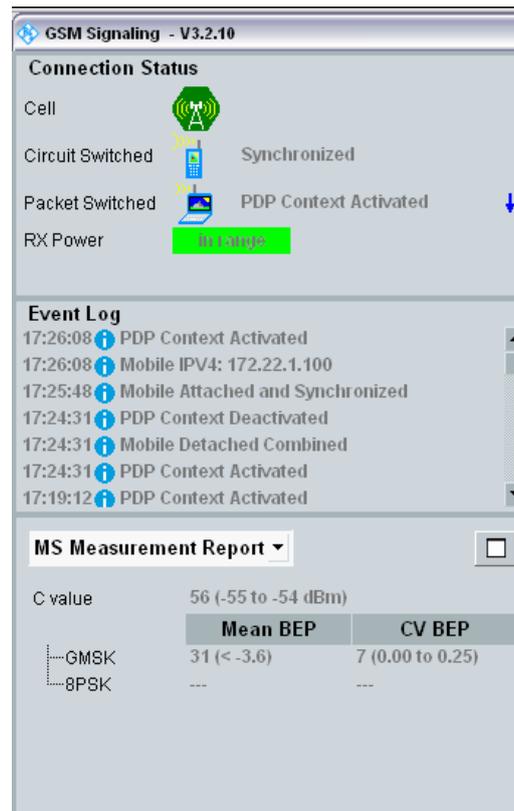


Figura 6-14. Conexión por conmutación de paquetes establecida en GSM 1900.

Una vez lograda la conexión entre ambos extremos, realizada a escasos 1,5 metros para recibir los valores más óptimos y con menores pérdidas para un buen cálculo de la atenuación externa que veremos a continuación, y así conseguir un margen dinámico mayor.

- Para alternar entre bandas de frecuencia basta con seleccionar en “Channel / Band” GSM900 o GSM1900 según nuestro interés o necesidad y posteriormente para modificar la portadora deberemos modificar el canal del subapartado “TCH/PDCH Carrier 1”, en nuestro caso deberían ser los siguientes canales para conseguir las portadoras que nos hemos propuesto:
  - Para GSM 900 seleccionamos el canal 124 para obtener las frecuencias portadoras 959.8 MHz – 914.8 MHz.
  - Para GSM 1900 seleccionaremos el canal 661 para tener por frecuencias portadoras las 1960 MHz – 1888 MHz.

## Ajustes en la atenuación externa de salida

Como ya comentamos anteriormente, en este caso al no proporcionarnos más que los parámetros de calidad de señal recibida por el UE, realizaremos pruebas con los mismos valores de atenuación anteriores, para el cálculo de la atenuación externa de salida aplicamos 40 dB, y mantenemos a 0 dB la de entrada; observamos que si sería suficiente para permitir la conexión:

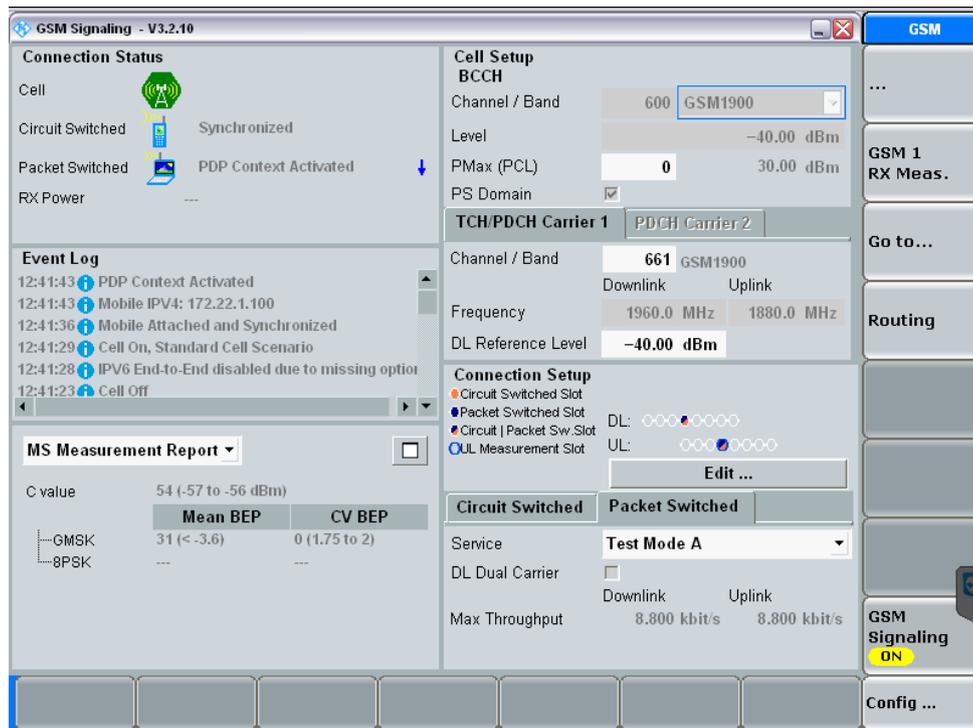


Figura 6-15. Conexión por conmutación de paquetes establecida en GSM 1900 con atenuación externa de salida de 40 dB.

Tras esto buscamos los límites observando el comportamiento de la conexión al bajar la atenuación, deduciendo que 40 dB es un valor viable, pues al bajar a 32 dB el CMW500 ya nos alerta que la conexión está peligrando por una potencia baja:

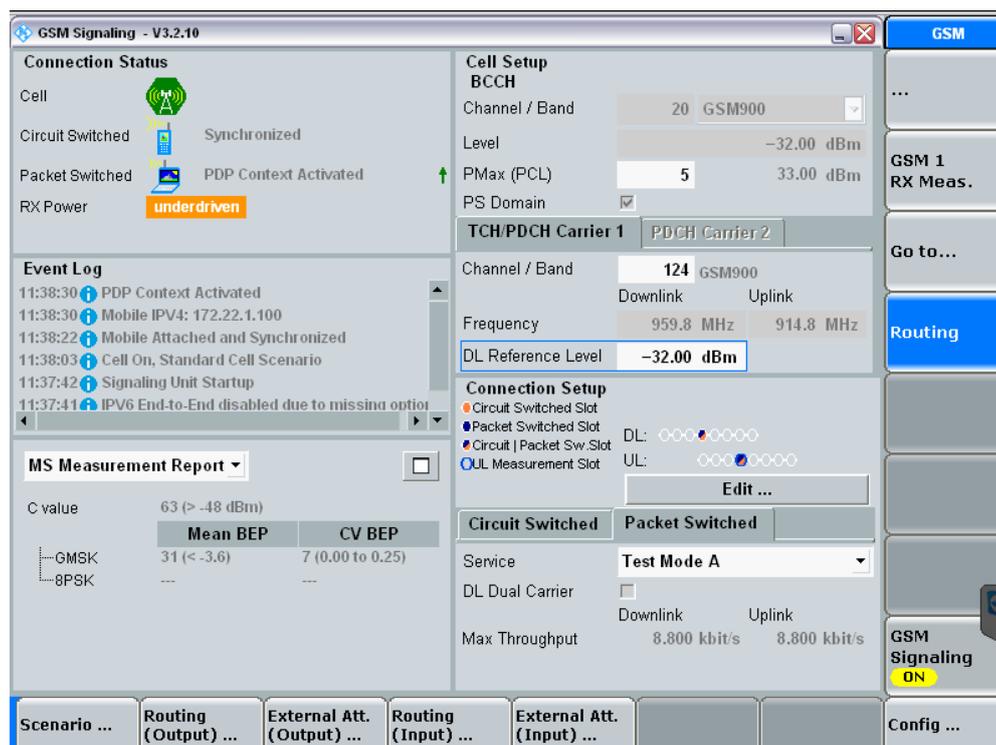


Figura 6-16. Conexión realizada con atenuación externa de salida de 32 dB con problemas de estabilidad.



## Ajustes en la atenuación externa de entrada

Tras las pruebas con la atenuación externa de salida, ya podemos analizar la de entrada con un valor fijo de 40 dB a la salida.

Y en este caso, comenzando por la atenuación calculada para UMTS, es decir 45 dB, nos hemos encontrado con la dificultad de mantener el enlace conectado, por una potencia recibida del UE baja:

The screenshot displays the 'GSM Signaling - V3.2.10' interface. The 'Connection Status' section shows the device is 'Synchronized' and 'PDP Context Activated', but the 'RX Power' is 'underdriven'. The 'Event Log' shows a sequence of events including PDP Context activation, Mobile IPv4, and Mobile Attached. The 'MS Measurement Report' shows a C value of 63 (> -48 dBm) and Mean BEP of 31 (< -3.6). The 'Cell Setup' section shows Channel/Band 20 GSM900, Level -32.00 dBm, and PMax (PCL) 5 (33.00 dBm). The 'TCH/PDCH Carrier 1' section shows Channel/Band 124 GSM900, Downlink Frequency 959.8 MHz, and Uplink Frequency 914.8 MHz, with a DL Reference Level of -32.00 dBm. The 'Connection Setup' section shows 'Circuit Switched Slot' selected. The 'Circuit Switched' section shows 'Test Mode A' service and Max Throughput of 8.800 kbit/s for both Downlink and Uplink. The 'GSM Signaling ON' indicator is visible in the bottom right corner.

Figura 6-17. Potencia baja recibida por el UE con atenuación externa de salida de 40 dB y a la entrada de 45 dB.

Por tanto, el proceso para llegar a un valor adecuado es conseguir el máximo de potencia posible sin sobrecargar el modem USB, para ello hemos subido la atenuación hasta que nos alerta de “Overdriven”, a partir de este punto, reducimos un poco la atenuación para conseguir la estabilidad con una potencia máxima posible recibida por el receptor, como podemos ver en la figura 6.18, este valor ha sido 57 dB, por tanto ya tenemos los parámetros característicos para proceder a calcular el balance de potencias de ambos sistemas:



The screenshot displays the 'GSM Signaling - V3.2.10' interface. The 'Connection Status' section shows the device is 'Synchronized' and 'PDP Context Activated'. The 'Event Log' shows a sequence of events including PDP Context Activation, Mobile IPv4 configuration, and Mobile Attachment. The 'MS Measurement Report' shows a C value of 63 and Mean BEP of 31. The 'Cell Setup' section shows Channel/Band 20 GSM900 and Level -40.00 dBm. The 'Connection Setup' section shows DL and UL measurement slots. The 'Circuit Switched' section shows Service 'Test Mode A' and Max Thru of 8.800 kbit/s. The 'Routing' button is highlighted in blue. The 'GSM Signaling ON' indicator is visible in the bottom right corner.

Figura 6-18. Potencia adecuada recibida por el UE con atenuación externa de salida de 40 dB y a la entrada de 57 dB.



## 7. Balance de potencias

En este capítulo vamos a calcular las máximas pérdidas admisibles a partir de la siguiente tabla:

	UMTS	GSM 1900	GSM 900
Sensibilidad UE	-100 dBm	-106 dBm	-107 dBm
Potencia TX UE	0,25 W	1 W	2 W
At. Ext. Entrada	45 dB	57 dB	
Sensibilidad CMW	-84 dBm		
Potencia TX CMW	-6,75 dBm	0 dBm	0 dBm
At. Ext. Salida	40 dB	40 dB	40 dB

Tabla 7-1. Datos característicos para los balances del sistema.

Los valores han sido obtenidos gracias al Datasheet del R&S CMW500 [34] y a la ficha técnica del modem empleado, el SIM5218 [35], aunque estos últimos valores son típicos en este tipo de redes, al igual que las sensibilidades del modem USB. El resto, como pueden ser las potencias transmitidas desde el CMW500, en lugar de los 3dBm que soporta de forma máxima el equipo, hemos indicado las potencias reales, que son las que finalmente trataremos.

Las atenuaciones externas en este caso sustituyen todo tipo de pérdidas que se analizarían en cualquier caso de planificación de red, ignorando márgenes de desvanecimiento, pérdidas por absorción del cuerpo, cables, etc. En este caso indicamos -6.75 dBm de potencia transmitida por el CMW500 porque es la potencia real que aplica, pues cuando ajustamos la atenuación, esta la añade a la potencia de salida compensando así esas pérdidas y mostrando un valor “real” de esta forma, por este motivo en el balance debemos separarlo para conocer el desencadenamiento de los resultados.

Estos balances nos servirán para hacernos a la idea de los límites a los que podremos llegar y compararlos con la distancia recorrida.



## 7.1. Balance de potencias en GSM 900

	ENLACES			
	DESCENDENTE		ASCENDENTE	
	CMW500		ARDUINO	
Potencia Transmitida	0	dBm	2	W
Atenuac. Ext. Salida	40	dB	33,0103	dBm
<b>PIRE (Transmitida)</b>	<b>-40</b>	<b>dBm</b>	<b>33,0103</b>	<b>dBm</b>
Sensibilidad final RX	-107	dBm	-84	dBm
Atenuac. Ext. Entrada			57	dB
<b>PIU</b>	<b>-107</b>	<b>dBm</b>	<b>-27</b>	<b>dBm</b>
<b>(sensibilidad en la antena RX)</b>				
<b>PIRE-PIU</b>	<b>67 dB</b>		<b>60,0103 dB</b>	
<b>Pérdidas de propagación máximas</b>				

Tabla 7-2. Balance de potencias de GSM 900 MHz.

## 7.2. Balance de potencias en GSM 1900

	ENLACES			
	DESCENDENTE		ASCENDENTE	
	CMW500		ARDUINO	
Potencia Transmitida	0	dBm	1	W
Atenuac. Ext. Salida	40	dB	30	dBm
<b>PIRE (Transmitida)</b>	<b>-40</b>	<b>dBm</b>	<b>30</b>	<b>dBm</b>
Sensibilidad final RX	-106	dBm	-84	dBm
Atenuac. Ext. Entrada			57	dB
<b>PIU</b>	<b>-106</b>	<b>dBm</b>	<b>-27</b>	<b>dBm</b>
<b>(sensibilidad en la antena RX)</b>				
<b>PIRE-PIU</b>	<b>66 dB</b>		<b>57 dB</b>	
<b>Pérdidas de propagación máximas</b>				

Tabla 7-3. Balance de potencias de GSM 1900 MHz.



### 7.3. Balance de potencias en UMTS

	ENLACES			
	DESCENDENTE		ASCENDENTE	
	<b>CMW500</b>		<b>ARDUINO</b>	
Potencia Transmitida	<b>-6,75</b>	<b>dBm</b>	<b>0,25</b>	<b>W</b>
			<b>23,9794</b>	<b>dBm</b>
Atenuac. Ext. Salida	<b>40</b>	<b>dB</b>		
<b>PIRE (Transmitida)</b>	<b>-46,75</b>	<b>dBm</b>	<b>23,9794</b>	<b>dBm</b>
	<b>ARDUINO</b>		<b>CMW500</b>	
Sensibilidad final RX	<b>-100</b>	<b>dBm</b>	<b>-84</b>	<b>dBm</b>
Atenuac. Ext. Entrada			<b>45</b>	<b>dB</b>
<b>PIU</b>	<b>-100</b>	<b>dBm</b>	<b>-39</b>	<b>dBm</b>
<b>(sensibilidad en la antena RX)</b>				
<b>PIRE-PIU</b>	<b>53,25 dB</b>		<b>62,9794 dB</b>	
<b>Pérdidas de propagación máximas</b>				

Tabla 7-4. Balance de potencias de UMTS 2100 MHz.

## 8. Estudio del comportamiento del sistema en diferentes entornos

Finalmente, en este capítulo procederemos a realizar las medidas de campo en dos entornos diferentes caracterizados por someter al enlace de radiocomunicaciones a traspasar obstáculos y transmitir la información tanto sin rayo directo como con él para comprobar la máxima distancia posible. Tras estos dos estudios compararemos su comportamiento y analizaremos qué tecnología se comporta mejor en distancia, en tasa de transferencia, estabilidad, calidad de señal, etc.

### 8.1. Estudio en un entorno cerrado sin rayo directo

Primero comenzamos por analizar un entorno que nos obligue a transmitir la información sin una situación de línea de visión directa tras alejarnos unos cuantos metros de la estación base simulada por el R&S CMW500.

#### 8.1.1. Ubicación y dirección del estudio sobre plano.

Este entorno se trata del sótano de la Escuela Técnica de Telecomunicaciones de la UPCT, aprovechando los pasillos y la esquina más próxima para tener un gran obstáculo, podemos ver el recorrido que se ha realizado por medio de la línea discontinua de la siguiente figura:

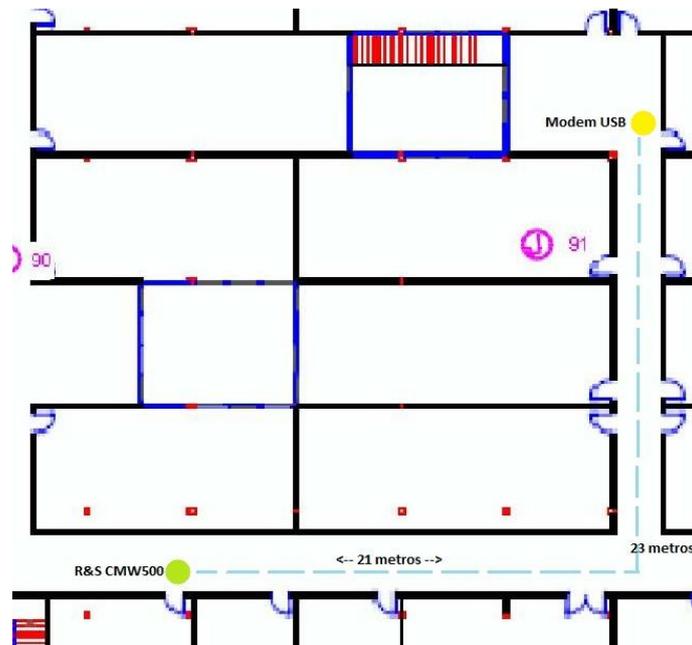


Figura 8-1. Plano del sótano de la ETSIT donde se realizaron las medidas.

Como podemos ver el estudio se basará en un primer tramo con rayo directo de 21 metros y un segundo tramo de 23 metros tras girar 90 grados.



### 8.1.2. Comparativa de potencia y tasa de transferencia respecto de la distancia.

En estas comparativas sería interesante comparar ambas tecnologías directamente, pero no el analizar de cada uno no ofrece los mismos datos, y por ello representaremos los estudios por separado, aunque comparando a simple vista en dos gráficas separadas la potencia transmitida por el CMW500 y el alcance logrado hasta la desconexión por inestabilidad del enlace provocada por la distancia.

#### En el caso de UMTS (Potencia transmitida por ambos enlaces)

En este caso, podemos ver el avance de ambas potencias conforme aumentamos la distancia con la estación base.

Como dato, se puede observar de forma sencilla el control automático de potencia de transmisión del UE (modem USB) que aumenta esta potencia conforme lo necesita el enlace al alejarnos, compensando esas pérdidas, hasta llegar a su nivel de saturación de 25 dB a partir de 24 metros aproximadamente (después de haber girado la esquina), después de la cual se hacía muy difícil mantener la conexión con esta tecnología al carecer de rayo directo en condiciones muy ambiguas.

Recordar que la esquina comienza a partir de los 21 metros de rayo directo.

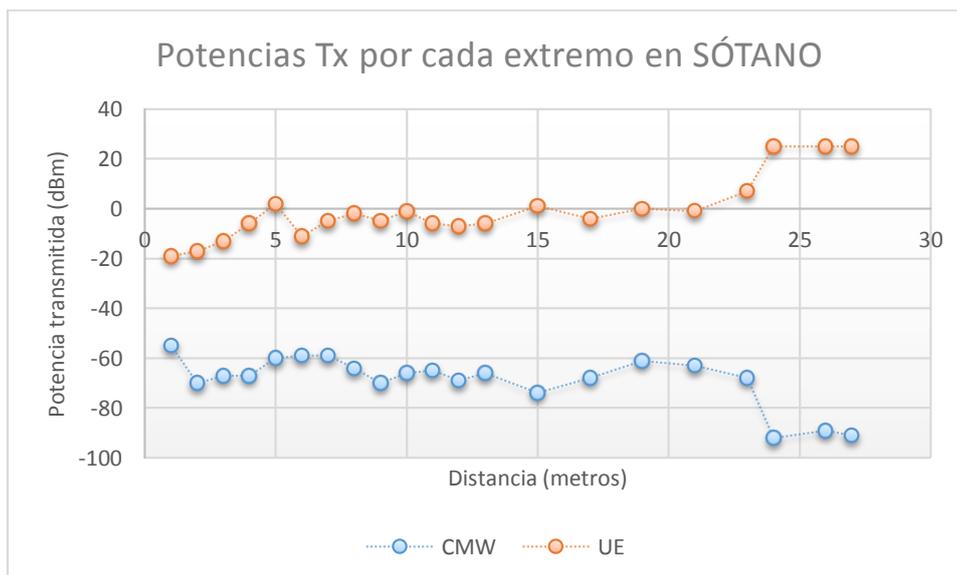


Figura 8-2. Comparativa de potencias de TX de cada extremo en UMTS en el sótano.



## Tasas de transferencia en UMTS

Observamos en la figura 8.3 la tasa de transferencia a escasos 1,5 metros, y posteriormente en la segunda figura 8.4 tras recorrer 21 metros y 5 metros tras girar 90°:

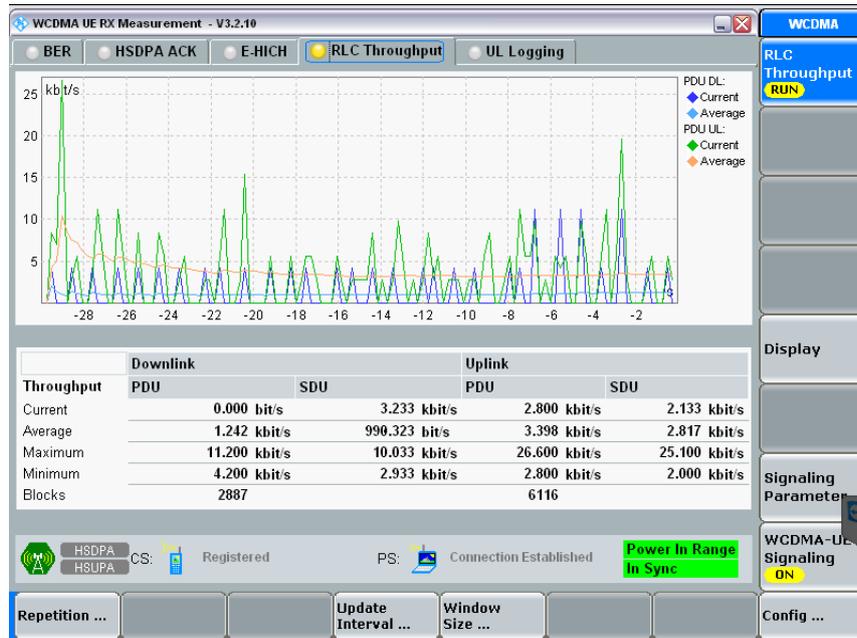


Figura 8-3. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS a 1.5 metros del CMW500.

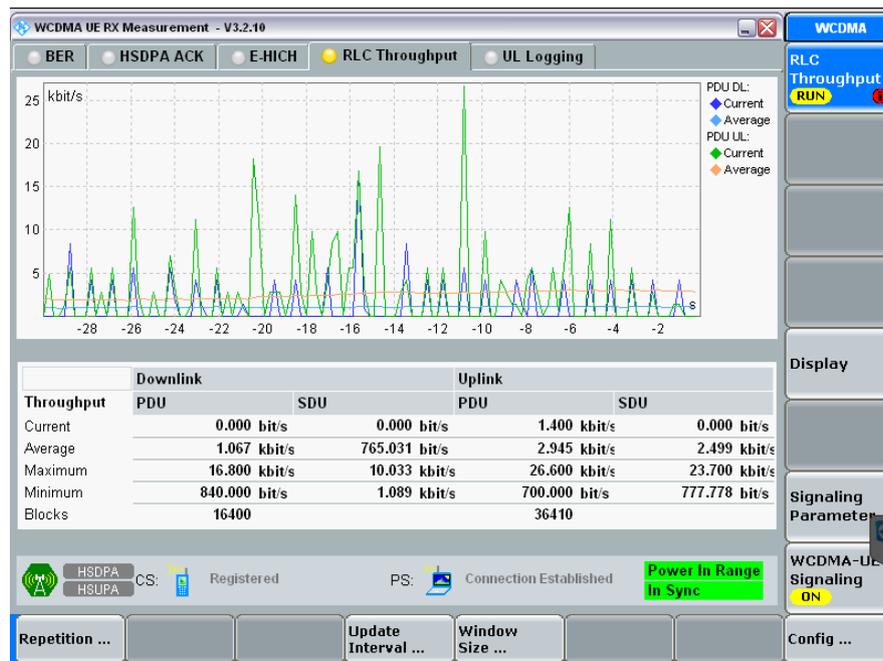


Figura 8-4. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS al final del tramo en el sótano.

Podemos ver una desmejora en la media de la tasa de transferencia, pero realmente en ámbitos globales no se aprecia realmente un cambio drástico, y quizás fuera necesaria una simulación más larga en ambas condiciones. Aun así, UMTS demuestra que podría mantener bastante la velocidad aún con la desventaja de tener menor alcance que GSM por sus propiedades de propagación a una frecuencia más alta.



### En el caso de GSM 1900/900 (Sólo potencia transmitida por CMW500)

En este estudio aplicamos dos frecuencias bastante distanciadas en bandas, y puede que veamos mejores resultados en una que en la otra. En este caso sólo nos permite medir la potencia TX por el CMW500; a continuación tenemos la progresión en el caso de GSM 1900

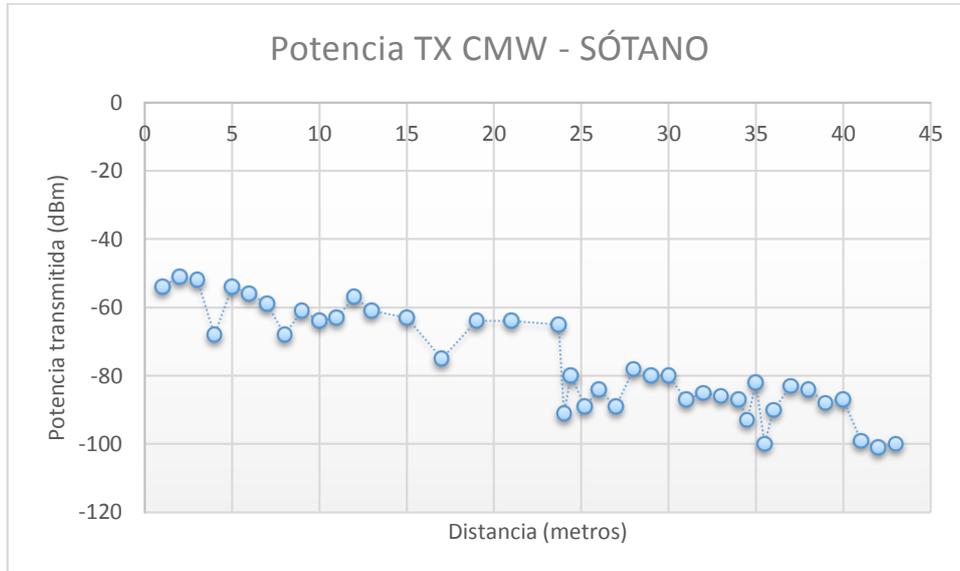


Figura 8-5. Potencia transmitida por el CMW500 en GSM 1900 en el sótano.

Recordemos que el rayo directo se impide a partir del metro 21 de distancia. En esta comparativa vemos que parece encaminado a ser más estable el enlace de 900 MHz, pues no llega a valores tan cercanos a su sensibilidad en distancias finales, teniendo en cuenta también una progresión y descenso de la potencia conforme a la distancia más suave sin demasiados picos.

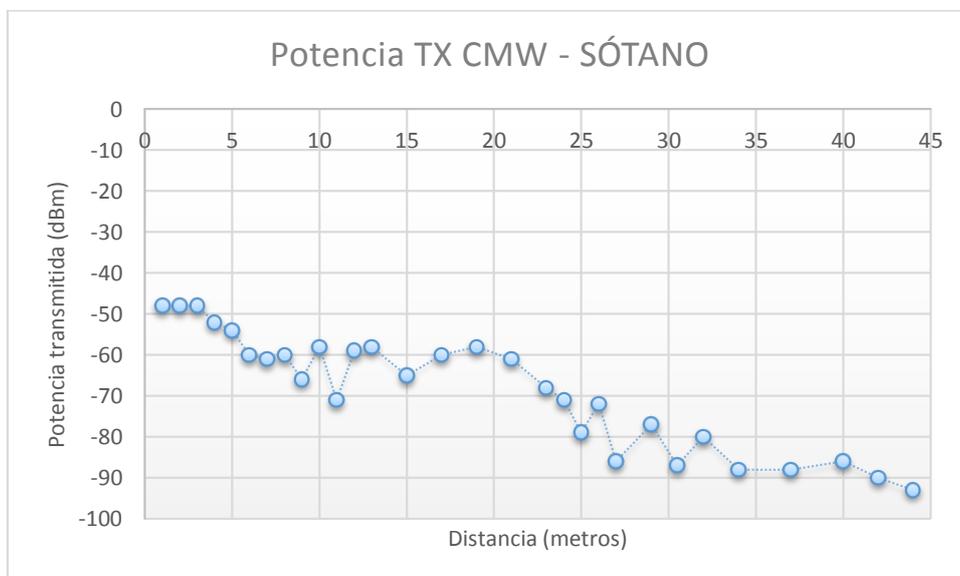


Figura 8-6. Potencia transmitida por el CMW500 en GSM 900 en el sótano.



## Tasas de transferencia en GSM

Observamos en la figura 8.7. un ejemplo de la tasa de transferencia a escasos metros antes de girar la esquina que se sitúa a 21 metros del CMW500, y posteriormente en la segunda figura 8.8. después de avanzar 23 metros tras girar 90°; en este caso al no disponer del mismo analizador para GSM hemos recurrido al historial del Escritorio Movistar para analizar las velocidades de transferencia y poder comparar de forma aproximada:

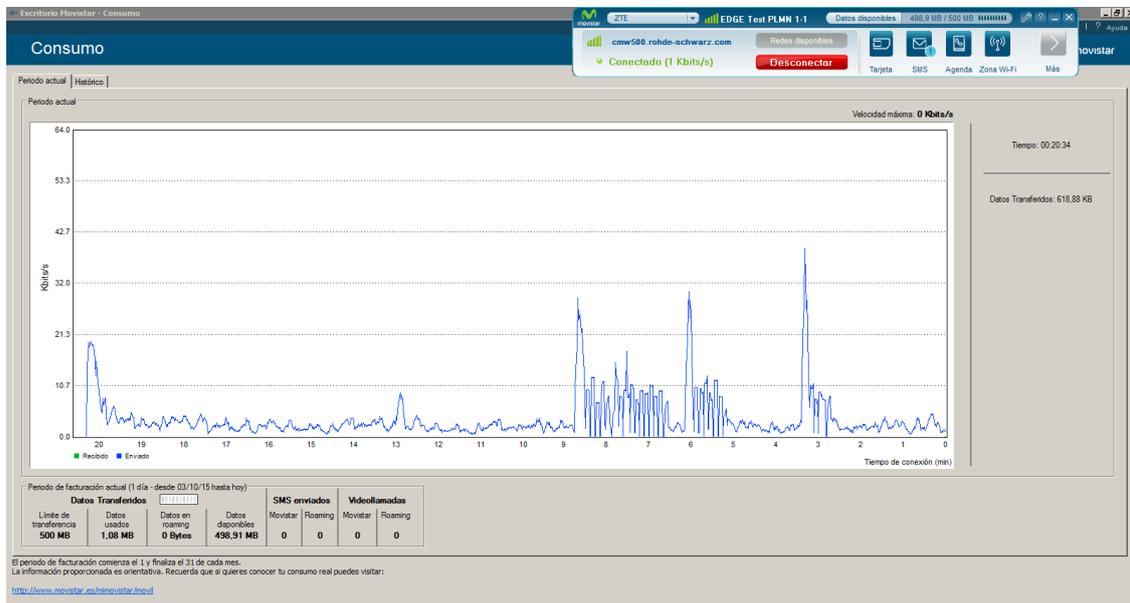


Figura 8-7. Tasas de transferencia de paquetes antes de girar la esquina en GSM.

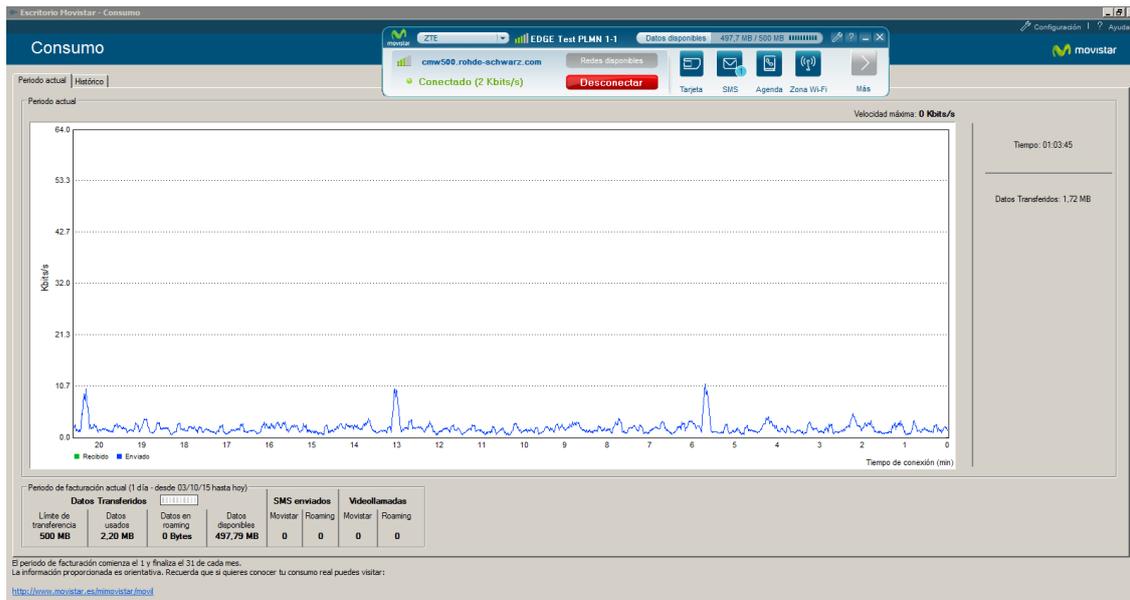


Figura 8-8. Tasas de transferencia de paquetes después de girar la esquina en GSM.

Como podemos ver, se ve de forma muy clara que tras girar la esquina la media de la tasa de transferencia no se ve demasiado afectada, pero los picos ocasionados de forma bastante contundente desaparecen en este segundo caso, sea por ruido, interferencias o reflexiones por tener línea de visión directa en el primer caso.



### 8.1.3. Comparativa de FFT respecto de la distancia.

A continuación se muestra el espectro de frecuencias de la tecnología WCDMA, entre los primeros metros y los últimos para ver su evolución, y como se ve afectada por el ruido al no disponer de rayo directo entre los extremos. En esta comparativa nos ha sido imposible añadir GSM por limitaciones del analizador en esta tecnología.

#### Tecnología WCDMA

En UMTS a 1 metro de distancia del CMW500 tendríamos el siguiente espectro:

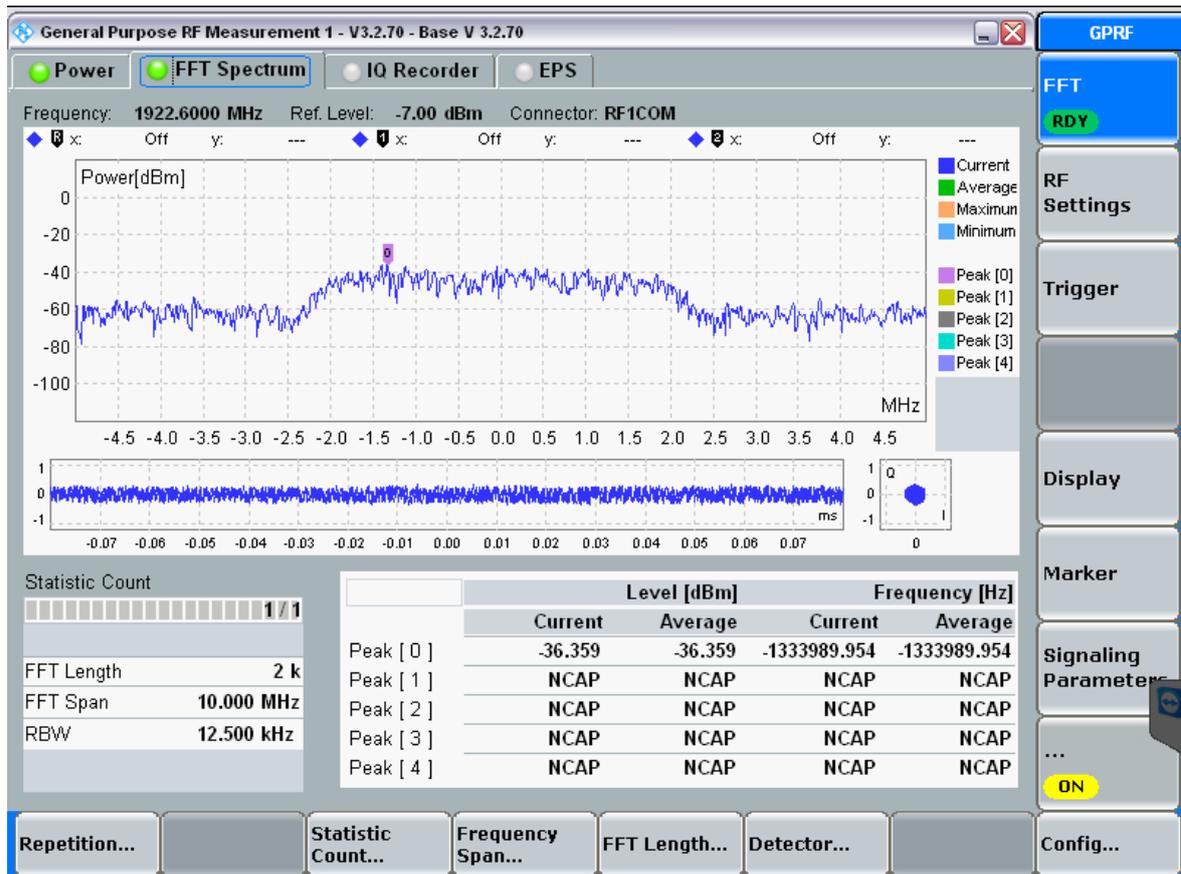


Figura 8-9. Espectro de frecuencias de UMTS a 1 metro de la estación base.

Tras girar la esquina detallada en el plano y recorrer 5 metros más, podemos ver el siguiente espectro bastante desmejorado respecto al anterior, con similar nivel de potencia máxima pero el espectro muy afectado por el ruido, pudiendo provocar interferencias y pérdidas de paquetes:

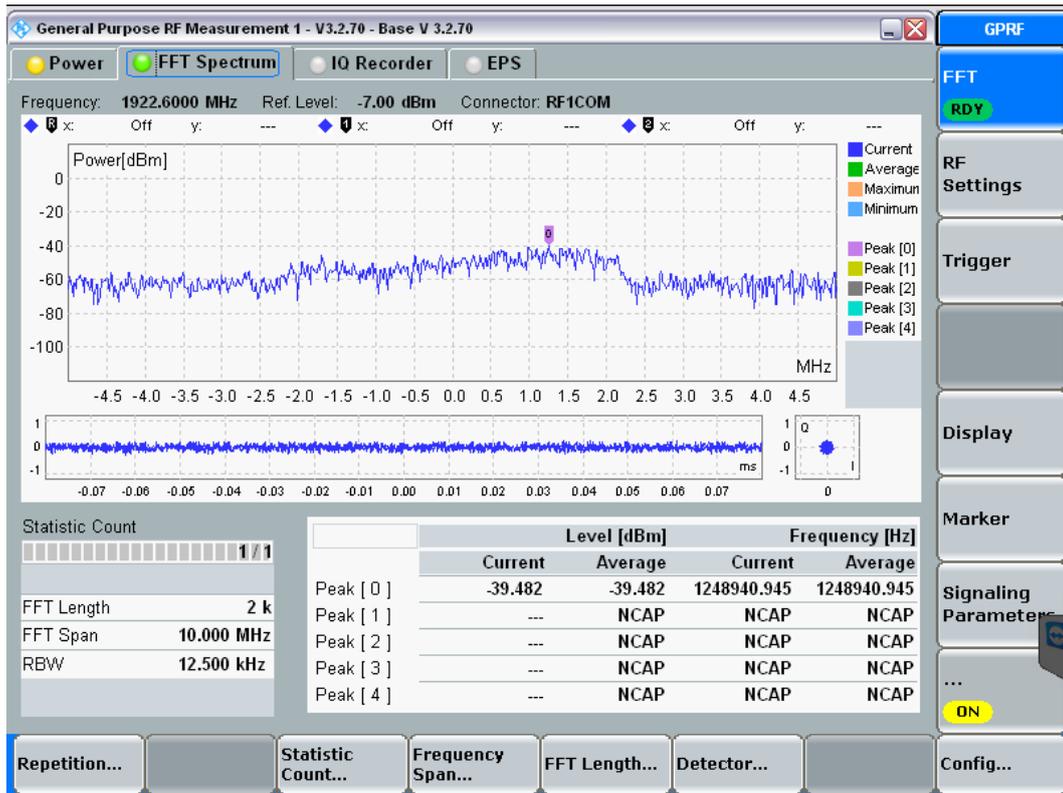


Figura 8-10. Espectro de frecuencias de UMTS tras recorrer 21 metros con rayo directo y girar una esquina de 90° hasta alcanzar otros 5 metros.

## 8.2. Estudio en un entorno abierto con rayo directo

En este entorno nos encontramos en condiciones casi ideales, el patio de la Escuela de Telecomunicaciones nos proporciona un campo muy abierto capaz de comprobar 50 metros de distancia sin problema. Analizaremos la conexión en una situación de línea de visión directa (Line of sight) en los siguientes subapartados.

### 8.1.1. Ubicación y dirección del estudio sobre plano.

El segundo entorno se trata del patio de la ETSIT de la UPCT, aprovechando su gran amplitud y la buena oportunidad de probar en condiciones de largo alcance con rayo directo, podemos ver el recorrido que se ha realizado por medio de la línea discontinua de la siguiente figura:

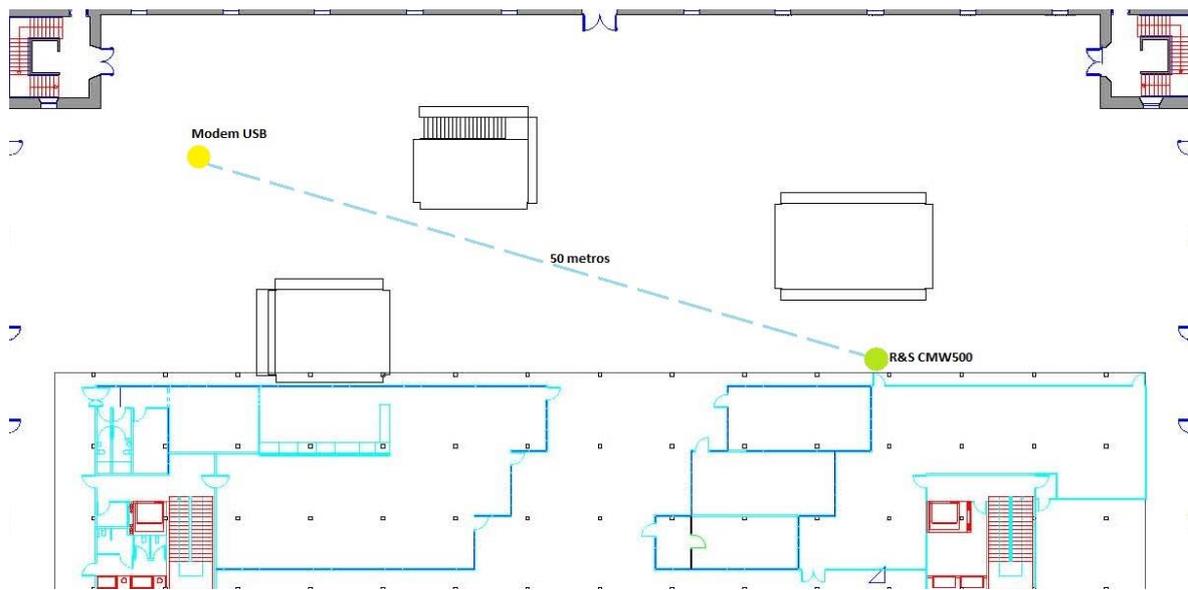


Figura 8-11. Plano del sótano de la ETSIT donde se realizaron las medidas.

Como podemos ver el estudio se basará en un único tramo de 50 metros tomando muestras cada 2-3 metros aproximadamente.



### 8.1.2. Comparativa de potencia y tasa de transferencia respecto de la distancia.

Esta comparativa la realizaremos de igual manera que en el anterior apartado sin rayo directo por los datos ofrecidos por analizador, pero en este caso se estudiará de nuevo el alcance máximo, la potencia transmitida por el CMW500 y la tasa de transferencia de manera aproximada pues hemos tenido que recurrir al analizador de paquetes del CMW500 en el caso de UMTS, y al Escritorio Movistar para ver la velocidad de transferencia en GSM.

#### En el caso de UMTS (Potencia transmitida por ambos enlaces)

En este caso, ahora en campo abierto para su máxima eficiencia vemos que ambas tendencias son más suaves recortando en picos y abundando la progresión lenta. Ambas señales tienen mejores resultados en cuanto a lo comentado respecto al primer caso de estudio del UMTS sin rayo directo.

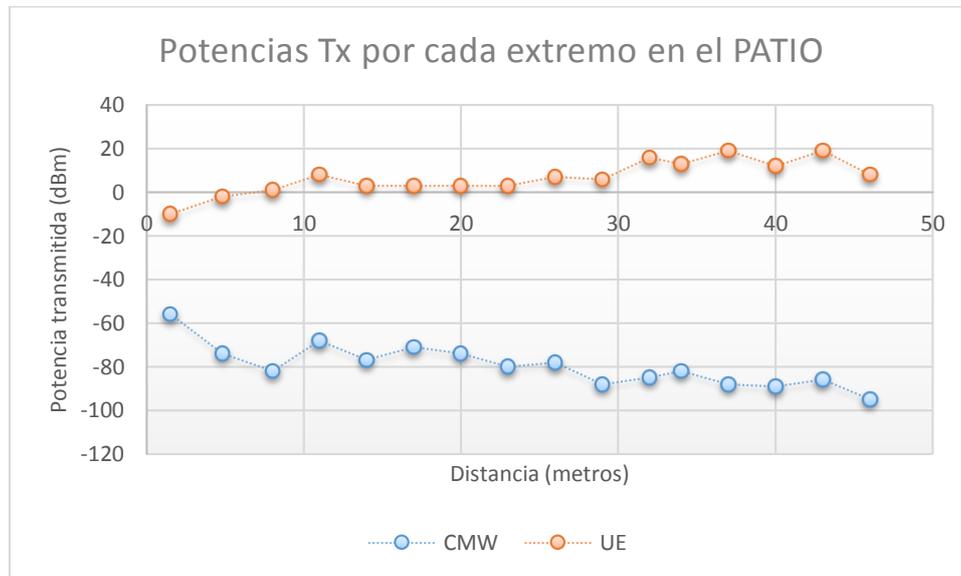


Figura 8-12. Comparativa entre potencias transmitidas por ambos extremos. UMTS en el patio.



## Tasas de transferencia en UMTS

Observamos en la figura 8.13 la tasa de transferencia a escasos metros del CMW500 para comparar con la siguiente figura que representa la tasa de kbit/s tras alejarnos 50 metros de la estación base:

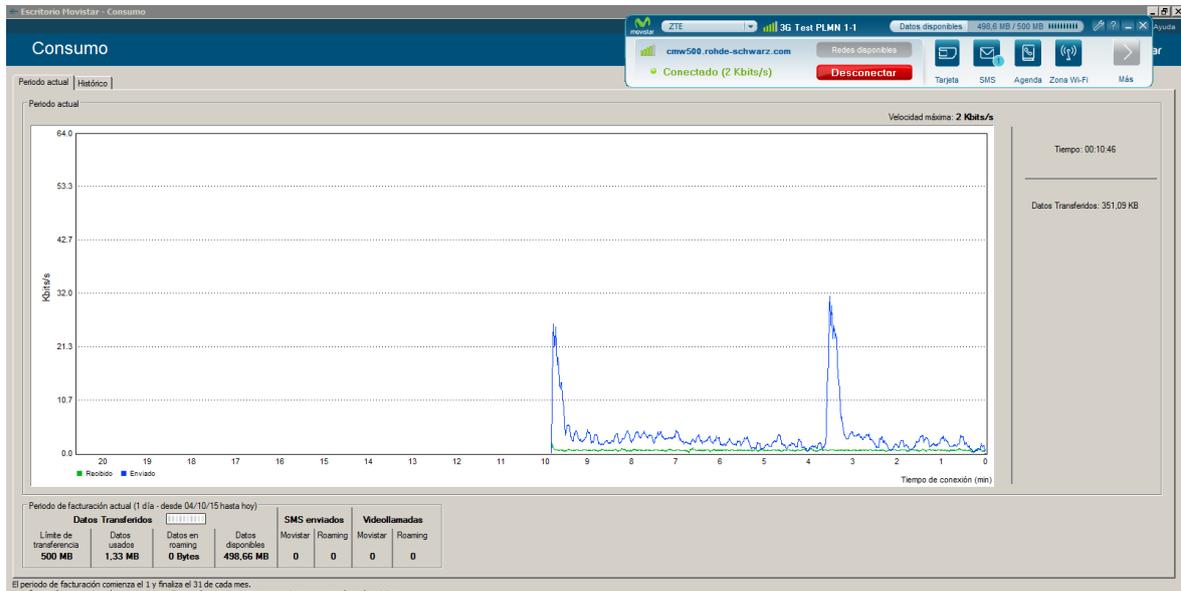


Figura 8-13. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS desde 1 a 14 metros del CMW500 con rayo directo.

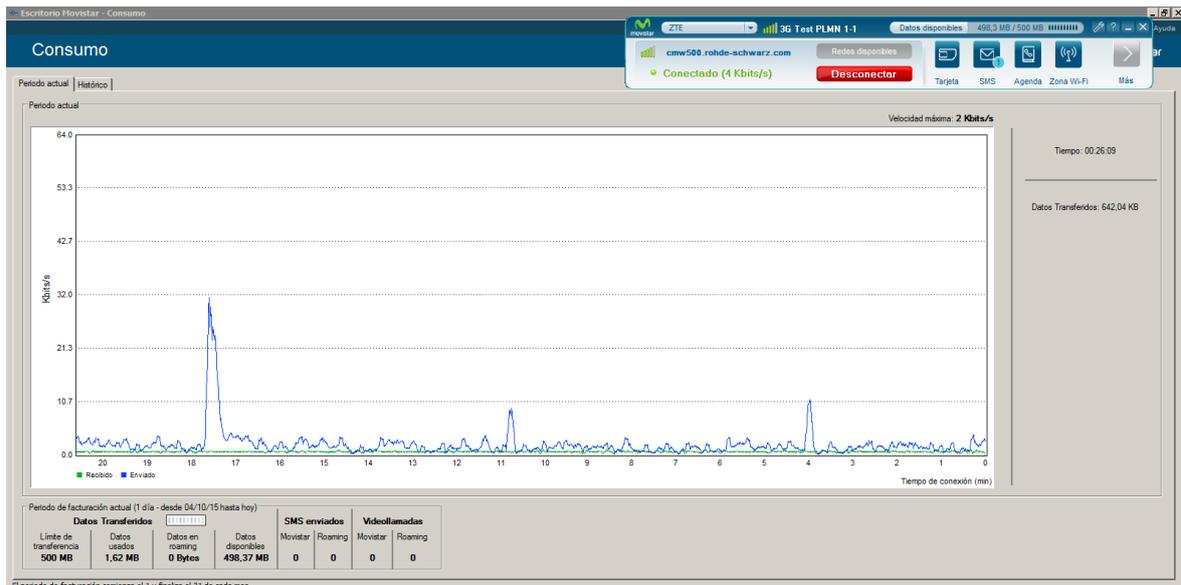


Figura 8-14. Tasas de transferencia de paquetes en UMTS desde 1 a 35 metros del CMW500 con rayo directo.

Esta vez hemos recurrido a representar la tasa mediante el gráfico de Escritorio Movistar porque se muestra un intervalo más grande de tiempo, apreciándose mejor la evolución de la calidad de la señal conforme nos alejamos, ya que podemos ver que los grandes picos desaparecen conforme nos alejamos y se vuelve más continua a una baja velocidad. Usar estos gráficos también nos ayudará a comparar con más facilidad esta tecnología con GSM.



### En el caso de GSM 900/1900 (Sólo potencia transmitida por CMW500)

Tras los resultados de las medidas, observamos en las siguientes cantidades de muestras que son bastante similares en campo abierto, pues la mejor característica que tiene aquí no es caracterizada en su máximo esplendor (gran propagación), por tanto son muy parecidas las tendencias de ambas rectas, aunque GSM en distancias iniciales y finales se muestra con mejor estabilidad de conexión pudiendo desconectar y volver a enlazar perfectamente sin ningún problema, además de GSM900 tener mayor potencia de transmisión a escasos metros del CMW500.

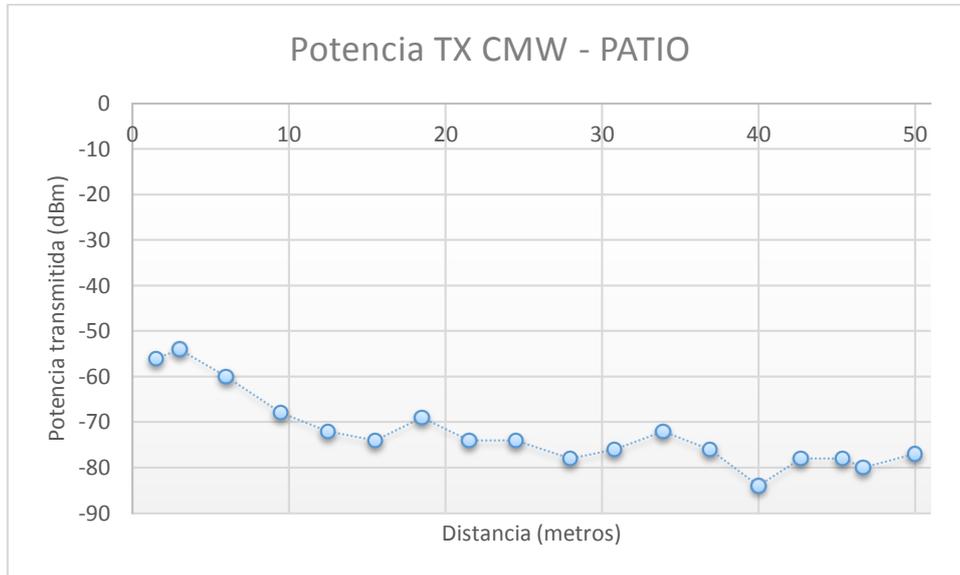


Figura 8-15. Potencia de TX del enlace GSM1900 de bajada en el patio para máxima amplitud y alcance.

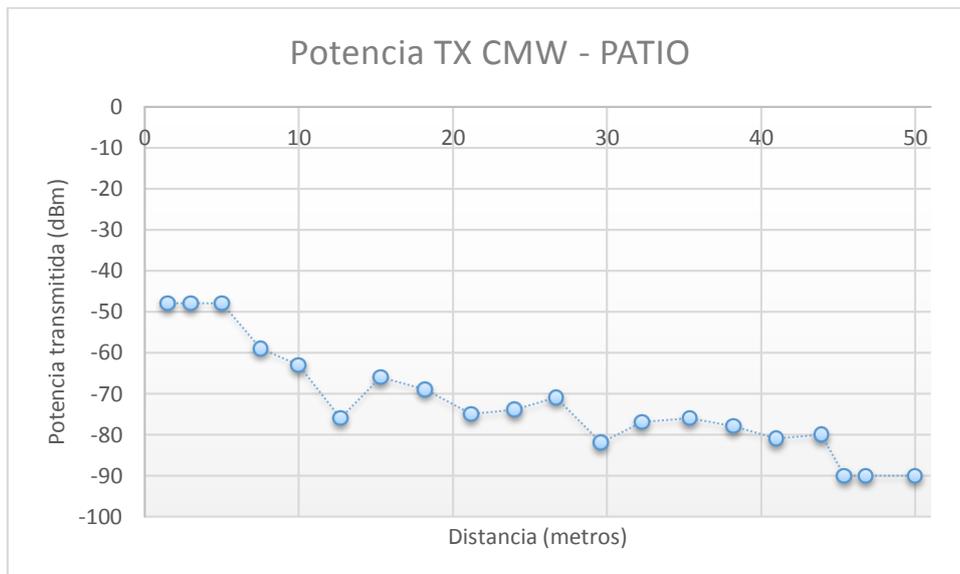


Figura 8-16. Potencia de TX del enlace GSM900 de bajada en el patio para máxima amplitud y alcance.



## Tasas de transferencia en GSM

Observamos en la figura 8.17 la tasa de transferencia monitorizada durante todo el recorrido de los 50 metros en el patio de la ETSIT con rayo directo. En este caso observamos tasas de transferencia muy bajas pero bastante constante y estable, pues tiene picos sin tanta frecuencia como UMTS, esto demuestra el mejor efecto de propagación por espacio libre del que dispone GSM respecto de UMTS, y esto permite una conexión más limpia y estable como hemos observado durante el alejamiento de la estación base.

En este caso podemos decir que se mantuvo la conexión sin problemas tras los 50 metros, incluso permitiendo desconectar y conectar sin ningún impedimento a tal distancia.

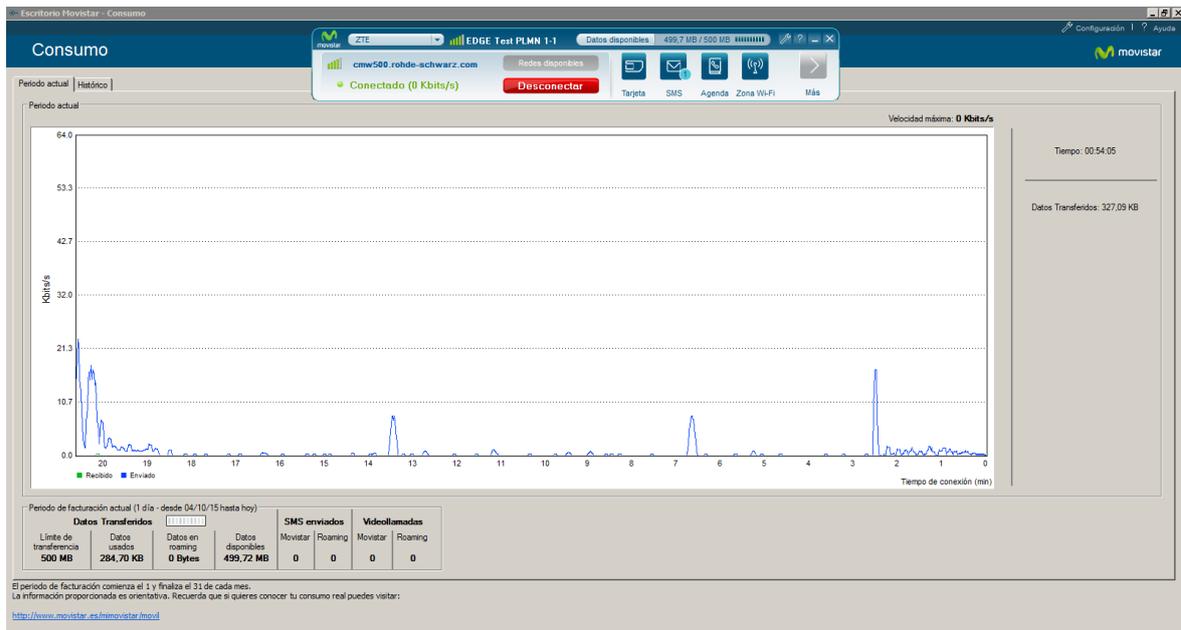


Figura 8-17. Tasas de transferencia de paquetes en GSM desde 1 a 50 metros del CMW500 con rayo directo.

### 8.1.3. Comparativa de FFT respecto de la distancia.

A continuación se muestra el espectro de frecuencias de la tecnología WCDMA, entre los primeros metros y los últimos para ver su evolución, y como se ve afectada por el ruido con la peculiaridad de que en este caso sí tendrá rayo directo. En esta comparativa nos ha sido imposible añadir GSM por limitaciones del analizador en esta tecnología.

#### Tecnología WCDMA

En UMTS a 1.5 metros de distancia del CMW500 tendríamos el siguiente espectro:

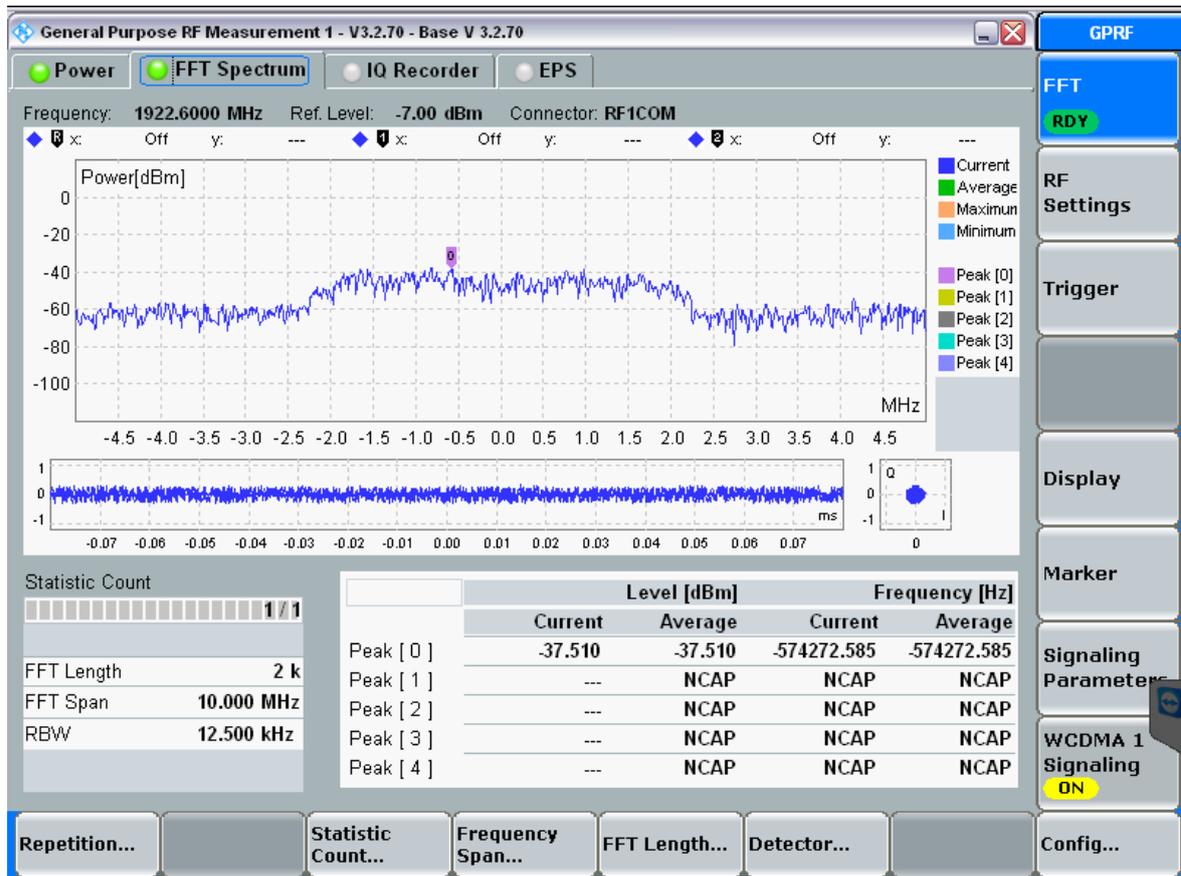


Figura 8-18. Espectro de frecuencias de UMTS a 1.5 metros de la estación base.

Tras avanzar 43 metros el UE perdía estabilidad en el enlace, como podemos observar se desmejora bastante tras recorrer más metros que en el anterior caso pero al tratarse de transmisión con rayo directo parece cumplir mejor con al menos en un extremo del bloque de frecuencias de la portadora, afectado menos por el ruido:

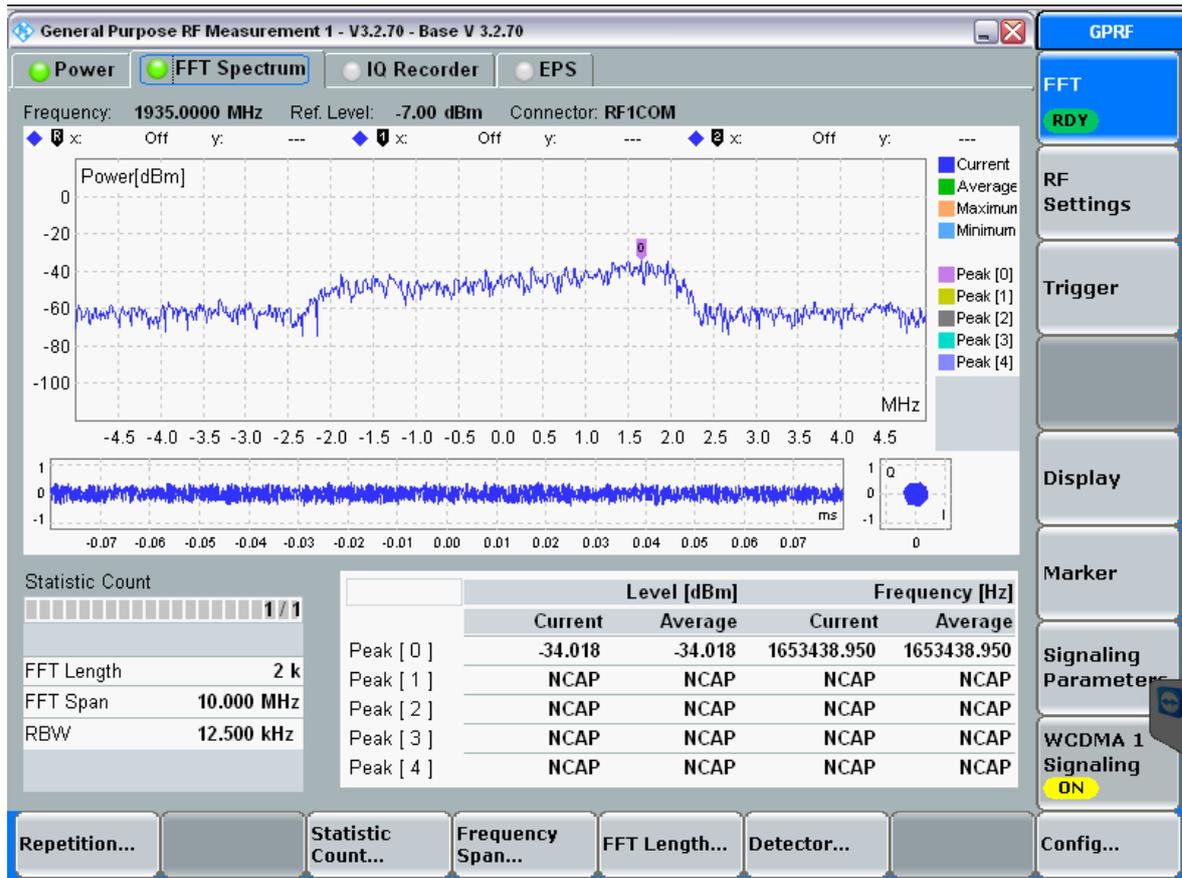


Figura 8-19. Espectro de frecuencias de UMTS tras recorrer 43 metros en situación de línea de visión directa (Line of Sight).



---

## 9. Conclusiones

---

### 9.1. Conclusiones

Definitivamente, si repasamos los objetivos por los cuales se ha realizado el estudio de esta memoria vemos que se ha conseguido lo esperado.

Aunque era bastante de esperar al conocer el comportamiento de ambas tecnologías, confirmamos mediante el estudio de medidas y ajustes para una correcta precisión en ellas, que la mejor tecnología a mi juicio de cara a grandes velocidades a las que iría la moto de competición y las grandes superficies que debería cubrir con una buena característica de propagación por el medio y poca sensibilidad a los obstáculos directos, sería GSM, y más en concreto 900 MHz por la estabilidad que ha demostrado tanto manteniendo el enlace como facilitando la conexión sin muchos problemas.

UMTS podría ser tenido en cuenta en un supuesto de necesitar aumentar la tasa de transferencia, pero realmente perderíamos bastante en cobertura y suponiendo que las tasas vistas en apartados anteriores no difieren mucho las unas de las otras, sería adecuado seguir apostando por GSM, pues UMTS podría tener mejores picos de velocidad, pero a fin de cuentas, la velocidad más constante es la de GSM.

Ante esta difícil aplicación, hemos demostrado que podría comportarse como una estación base en un espacio abierto de un radio de 50 metros, es posible que estas condiciones no sirvan para confirmar a ciencia cierta que podría dar cobertura a un circuito, pero teniendo en cuenta las líneas de futuro, el estudio podría ser extrapolable a unas distancias bastante considerables.

Para conseguir esto, también sería imprescindible algo que por el momento no dispone el CMW500, que es un control automático de ganancia, para que actúe de forma adaptativa en los cambios del enlace.

Acercándonos a otros objetivos específicos de esta memoria, podemos afirmar que se han conseguido comunicaciones inalámbricas robustas como se quería gracias en gran medida al ajuste de la atenuación externa.



## 9.2. Líneas futuras

Acerca de posibles mejoras de cara a próximos proyectos relacionados, o por el hecho de facilitar su aplicación en un sistema de telemetría, consideramos que algunas de las líneas de futuro que podría seguir de forma natural este proyecto serían:

- Posibilidad de rediseñar la entrada y salida del CMW500 aplicando amplificadores junto a las antenas bicónicas para conseguir un alcance robusto con capacidad de dar cobertura a un circuito sin mayores problemas.
- Cerca de esa posibilidad también está la de plantearse usar otro tipo de antena para exteriores con una gran ganancia (dBi).
- Se podría estudiar la viabilidad del uso de la nueva tecnología LTE (con el consiguiente cambio de placa/modem USB que soporte estas frecuencias) y como una planificación de red de este tipo podría afectar a la cobertura de un circuito, si mejorándola, o empeorando lo presente, pues lo que más peso tiene es la distancia recorrida por el rayo directo que la tasa de transferencia en sí.
- Conseguir solucionar la dependencia de la IP fija del laboratorio para poder mover el equipo a los circuitos.
- Barajar la posibilidad de usarlo independientemente de la conexión local (por ejemplo usar un router sin conexión a Internet, que simplemente se encargue de encaminar los datos de las tramas recibidas); pues el CMW no dispone de router interno que gestione la red de esta forma. Este caso podría ser aplicable para no depender de Internet.
- De cara a analizar los límites del enlace en un supuesto de necesitar una mayor tasa de transferencia, se podrían usar inyectores de paquetes desde el PC que actúe de UE junto con el modem USB, para así analizar un flujo de datos mayor para estudiar si las limitaciones son suficientes, en un caso de aumentar la trama de datos, o necesitar enviar otro tipo de información sea video, foto o cualquier dato relevante.



---

## Bibliografía

---

- [1] <http://www.motostudent.com/>
- [2] <http://www.radiocomunicaciones.net/telemetria.html>
- [3] Carden, F., Jedlicka, R. P., Henry, R., Telemetry Systems Engineering, 2002 Artech House.
- [4] <http://ustednoselocree.com/2009/12/09/wording-2/>
- [5] Robinson, W., Improvement in Electric Signaling Apparatus for Railroads, U.S. Patent No.130661, Brooklyn, NY, August 20, 1872.
- [6] <http://www.todotren.com.ar/trenesturisticos/tecono.htm>
- [7] United States National Weather Service, Division of the National Oceanic and Atmosphere Administration, January 3, 2001.
- [8] <http://www.gadgetos.com/noticias/telemetria-formula-1/>
- [9] <http://tic-tac.teleco.uvigo.es/profiles/blogs/la-telemetria-en-la-formula-1>
- [10] <http://www.a2r.com/la-telemetria-de-una-motogp-6413.html>
- [11] Tema 1\_Introduccion a la domotica\_V10\_pdf, Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- [12] <http://robotica.wordpress.com/about/>
- [13] [http://spanish.alibaba.com/product-gs/ecg-telemetry-monitoring-system\\_medical-diagnostic-test-kits-292047954.html](http://spanish.alibaba.com/product-gs/ecg-telemetry-monitoring-system_medical-diagnostic-test-kits-292047954.html)
- [14] <http://www.enfermeriaencardiologia.com/revista/res2904.htm>
- [15] Tourón, A., Radulovich, O., Agüero, M., Fidalgo, I., Krygier, D., Kovalsky, M., Hnilo, A., Diodati, P., "Short pulse solid state laser for telemetry."
- [16] Pascual García, J., Molina García-Pardo, J.M., Juan Llácer, L., Sistemas de Comunicaciones Móviles, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [17] <http://jpgarcia.cl/2008/09/>
- [18] [http://155.210.158.52/docencia\\_it/RedesAccesoCelular/teoria/Tema%202\\_Sistema%20GSM.pdf](http://155.210.158.52/docencia_it/RedesAccesoCelular/teoria/Tema%202_Sistema%20GSM.pdf)
- [19] España Boquera, M. C., Servicios avanzados de telecomunicación, España, 2003.
- [20] <http://cecilia-urbina.blogspot.com.es/2012/02/gsm.html>
- [21] <http://lib.convdocs.org/docs/index-129542.html?page=2>
- [22] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%EDtulo+2+-+LTE.pdf>
- [23] <http://dc439.4shared.com/doc/wgXnxQS2/preview.html>
- [24] <http://seguristar.wordpress.com/prototipo/estado-del-arte/>
- [25] R&S CMW500 Wideband Radio Communication Tester RF production testing, At a glance.
- [26] R&S CMW500 Wideband Radio Communication Tester, CMW GSM UserManual V3-2-10.



- [27] <http://www.microwavejournal.com/articles/15826-cmw500-wideband-radio-communicationtester>
- [28] – “Implementación de un sistema de radiocomunicaciones para la transmisión de la telemetría de una moto de carreras”, María Belén Pérez Muñoz.
- [29] – “Desarrollo de un dispositivo de telemetría basado en la plataforma Arduino y Shield 3G + GPS”, Pedro Celestino López Jiménez.
- [30] – “Desarrollo de un software de telemetría para el control de una moto de carreras”, Pedro José Conesa Sánchez.
- [31] [https://www.rohde-schwarz.com/en/product/cmwz10-productstartpage\\_63493-10816.html](https://www.rohde-schwarz.com/en/product/cmwz10-productstartpage_63493-10816.html)
- [32] Consulta del Registro Público de Concesiones de Telecomunicaciones: [Link](#).
- [33] <http://www.3gmodem.com.hk/ZTE/MF190.html>
- [34] R&S®CMW500 Wideband Radio Communication Tester Specifications
- [35] sim5218 spec\_v1 0\_te
- [36] [http://es.wikibooks.org/wiki/Redes\\_inform%C3%A1ticas/Protocolos\\_TCP\\_y\\_UDP\\_en\\_el\\_nivel\\_de\\_transporte](http://es.wikibooks.org/wiki/Redes_inform%C3%A1ticas/Protocolos_TCP_y_UDP_en_el_nivel_de_transporte)



---

## Anexo A

---

### A.1. Material empleado y justificación

A lo largo de este apartado detallaremos los elementos utilizados en este sistema de comunicación para poder realizar las pruebas de laboratorio y en diferentes entornos, comentando sus características correspondientes.

#### A.1.1. Instrumento de radiocomunicaciones Rohde&Swarch CMW500

Éste es el instrumento seleccionado para este proyecto. Tiene un PC integrado que trabaja con el sistema operativo Windows XP. Contiene un software de aplicación adaptado a cada situación, para una mayor comodidad.

- Novedades [36]
  - Engloba todas las fases de desarrollo, verificación y producción en un sólo equipo.
  - Soporta diversos estándares de comunicaciones radio y tecnologías de divulgación: GSM/(E)GPRS, WCDMA/HSPA, UMTS LTE, TD-SCDMA, CDMA2000® 1xRTT, CDMA2000® 1xEV-DO, Mobile WiMAX™, WLAN, Bluetooth®, DVB-T y GPS .
  - Rango de frecuencias de 6 GHz para tener en cuenta futuros cambios en las comunicaciones inalámbricas y la aparición de nuevos estándares.
  - Ancho de banda de 40 MHz en recepción y 80 MHz en transmisión.
  - Corrección automática de la trayectoria frente a la frecuencia, tiempo o temperatura.
  - Emulación de red RRC en tiempo real y pilas de protocolos.
  - Soporte de datos en el plano de usuario para las comunicaciones punto-a-punto.
  - Mediciones de alta precisión y velocidad optimizada en la producción debido a la captura y evaluación de datos simultánea.

Para obtener mayor información sobre el equipo, se puede acudir a la página:

[http://cdn.rohde-schwarz.com/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/CW500\\_dat-sw\\_en\\_5213-9211-22\\_v1200.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/CW500_dat-sw_en_5213-9211-22_v1200.pdf)



## Especificaciones GSM por el fabricante.

Version 11.00, May 2013

### GSM specifications – mobile station test <sup>8</sup>

#### GSM RF generator

(prerequisite: R&S<sup>®</sup>CMW-B110A/R&S<sup>®</sup>CMW-B110D option)

Frequency range	GSM450 band	460 MHz to 468 MHz
	GSM480 band	488 MHz to 496 MHz
	GSM750 band	747 MHz to 762 MHz
	GSM850 band	889 MHz to 894 MHz
	GSM900 band	921 MHz to 960 MHz
	GSM1800 band	1805 MHz to 1880 MHz
	GSM1900 band	1930 MHz to 1990 MHz

#### GSM GEN (R&S<sup>®</sup>CMW-KG200 option)

Output level range	depending on PAR	see general technical specifications
Output level uncertainty		see general technical specifications
Output level resolution		see general technical specifications

Signal quality		
Phase error	GMSK	< 1°, RMS < 4°, peak
Error vector magnitude (EVM)	8PSK	< 2 %, RMS

#### GSM WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW200 option), GSM EDGE EVO WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW201 option)

Arbitrary waveform files	GMSK, B × T = 0.3, with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 option	GSM_GMSK.WV (PAR = 0 dB), GMSKDIGMOD.WV (PAR = 0 dB)
	8PSK, with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 option	GSM_EDGE.WV (PAR = 3.23 dB), EDGEDIGMOD.WV (PAR = 3.22 dB)
Arbitrary waveform files	16QAM, with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW201 options	EDGE_EVO_16QAM_A.WV (PAR = 4.70 dB)
	32QAM, with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW201 options	EDGE_EVO_32QAM_B.WV (PAR = 5.37 dB)

Output level range	depending on PAR	see general technical specifications
Output level uncertainty	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 option, waveform files used: GMSKDIGMOD.WV or EDGEDIGMOD.WV	see general technical specifications
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW201 options, waveform files used: EDGE_EVO_16QAM_A.WV, EDGE_EVO_32QAM_B.WV	see general technical specifications
Output level resolution		see general technical specifications

Signal quality		
Phase error	GMSK	< 1°, RMS
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 option, waveform file used: GSM_GMSK.WV	< 4°, peak
Error vector magnitude (EVM)	8PSK	< 2 %, RMS
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 option, waveform file used: GSM_EDGE.WV	< 2 %, RMS
	16QAM / 32QAM level A with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW201 options, waveform file used: EDGE_EVO_16QAM_A.WV	< 2 %, RMS
	QPSK / 16QAM / 32QAM level B with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW200 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW201 options, waveform file used: EDGE_EVO_32QAM_B.WV	< 2 %, RMS



## GSM RF analyzer (R&S®CMW-KM200 option) and GSM EDGE EVO A analyzer (R&S®CMW-KM201 option)

Frequency range	GSM450 band	450 MHz to 458 MHz
	GSM480 band	478 MHz to 486 MHz
	GSM750 band	777 MHz to 792 MHz
	GSM850 band	824 MHz to 849 MHz
	GSM900 band	876 MHz to 915 MHz
	GSM1800 band	1710 MHz to 1785 MHz
	GSM1900 band	1850 MHz to 1910 MHz

Trigger		
Trigger sources		BASE: external TRIG A, BASE: external TRIG B, GPRF: BB generator, GSM: free run, GSM: IF power, GSM: acquisition

### Modulation analysis

Level range		-28 dBm to +42 dBm <sup>8</sup>
Analysis mode	with the R&S®CMW-KW200 option	GMSK, 8PSK
	with the R&S®CMW-KW200 and R&S®CMW-KW201 options	GMSK, 8PSK, 16QAM (level A)
Inherent phase error	GMSK	< 0.6°, RMS
		< 2°, peak
Inherent error vector magnitude (inherent EVM)	8PSK, 16QAM (level A)	< 0.8 %, RMS
Frequency measurement uncertainty		< 20 Hz + drift of timebase, see general technical specifications
Inherent I/Q offset		< -50 dB
Filter	GMSK	bandpass, 900 kHz, RRC filter, $\alpha = 0.16$
	8PSK, 16QAM (level A)	windowed raised-cosine filter in line with 3GPP TS 45.005

Burst power measurement		
Level uncertainty	bandpass, 900 kHz, RRC filter, $\alpha = 0.16$	see general technical specifications

### Power versus time measurement

Filter	selectable	Gaussian, 500 kHz or 1 MHz
Dynamic range	<i>filter</i> → 500 kHz, Gaussian, with fixed expected nominal power setting	
	GMSK	> 72 dB, RMS
	8PSK, 16QAM (level A)	> 89 dB, RMS
Expected nominal power setting for full dynamic range	RF1 COM, RF2 COM	-8 dBm to +42 dBm <sup>10</sup>
Relative measurement uncertainty	result > -40 dB	typ. < 0.1 dB
	-60 dB ≤ result ≤ -40 dB	typ. < 0.5 dB

Burst power measurement		
Level range		-50 dBm to +42 dBm <sup>10</sup>
Level uncertainty	<i>filter</i> → 500 kHz or 1 MHz, Gaussian	see general technical specifications

### Spectrum due to modulation measurement

Expected nominal power setting for full dynamic range	RF1 COM, RF2 COM	-8 dBm to +42 dBm <sup>10</sup>
Test method		relative measurement, averaging
Filter		Gaussian, 30 kHz, 5 pole
Measurement	at an offset of ±	100/200/250/400/600/800/1000/1200/ 1400/1600/1800 kHz
Dynamic range	offset ≥ 1200 kHz	
	GMSK	> 74 dB
	8PSK, 16QAM (level A)	> 70 dB

### Spectrum due to switching measurement

Expected nominal power setting for full dynamic range	RF1 COM, RF2 COM	-8 dBm to +42 dBm <sup>10</sup>
Test method		absolute measurement, max. hold
Filter		Gaussian, 30 kHz, 5 pole
Measurement	at an offset of ±	400/600/1200/1800 kHz
Dynamic range	offset ≥ 1200 kHz	
	GMSK	> 72 dB
	8PSK, 16QAM (level A)	> 88 dB



## Especificaciones UMTS por el fabricante.

### WCDMA specifications – mobile station (UE) test <sup>11</sup>

Standard	3GPP FDD
----------	----------

#### WCDMA RF generator

(prerequisite: R&S<sup>®</sup>CMW-B110A/R&S<sup>®</sup>CMW-B110D option)

Frequency range	WCDMA band 1	2112.4 MHz to 2167.6 MHz
	WCDMA band 2	1932.4 MHz to 1987.6 MHz
	WCDMA band 3	1807.4 MHz to 1877.6 MHz
	WCDMA band 4	2112.4 MHz to 2152.6 MHz
	WCDMA band 5	871.4 MHz to 891.6 MHz
	WCDMA band 6	877.4 MHz to 882.6 MHz
	WCDMA band 7	2622.4 MHz to 2687.6 MHz
	WCDMA band 8	927.4 MHz to 957.6 MHz
	WCDMA band 9	1847.4 MHz to 1877.4 MHz
	WCDMA band 10	2112.4 MHz to 2167.6 MHz
	WCDMA band 11	1478.4 MHz to 1498.4 MHz
	WCDMA band 12	730.4 MHz to 743.6 MHz
	WCDMA band 13	748.4 MHz to 753.6 MHz
	WCDMA band 14	760.4 MHz to 765.6 MHz
	WCDMA band S	2182.4 MHz to 2197.6 MHz
	WCDMA band S170	2180 MHz to 2190 MHz
WCDMA band S190	2190 MHz to 2200 MHz	

#### WCDMA GEN (R&S<sup>®</sup>CMW-KG400 option), WCDMA HSPA GEN (R&S<sup>®</sup>CMW-KG401 option)

Output level range	depending on PAR	see general technical specifications
Output level uncertainty		see general technical specifications
Output level resolution		see general technical specifications

Signal quality		
Error vector magnitude (EVM)	composite EVM	< 2 %, RMS

#### WCDMA WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW400 option), WCDMA HSDPA WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW401 option), WCDMA HSUPA WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW402 option), WCDMA HSPA+ WinIQSIM2™ (R&S<sup>®</sup>CMW-KW403 option)

Arbitrary waveform files	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW400 option	TM4CPICH.WV (PAR = 8.34 dB), 3GPPDEFAULT.WV (PAR = 10.65 dB)
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW400 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW401 options	WCDMA_DL_HSDPA.WV (PAR = 10.08 dB)
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW400 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW401 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW402 options	WCDMA_DL_HSUPA.WV (PAR = 10.12 dB)

Output level range	depending on PAR	see general technical specifications
Output level uncertainty	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW400 option, waveform file used: 3GPPDEFAULT.WV	see general technical specifications
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW401 option, waveform file used: WCDMA_DL_HSDPA.WV	see general technical specifications
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW402 option, waveform file used: WCDMA_DL_HSUPA.WV	see general technical specifications
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KW400 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW401 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW402 and R&S <sup>®</sup> CMW-KW403 options	see general technical specifications
Output level resolution		see general technical specifications



Signal quality		
Error vector magnitude (EVM)	composite EVM, with the R&S®CMW-KW400 option, waveform file used: TM4CPICH.WV	< 2 %, RMS
	composite EVM, with the R&S®CMW-KW401 option, waveform file used: WCDMA_DL_HSDPA.WV	< 2 %, RMS
	composite EVM, with the R&S®CMW-KW402 option, waveform file used: WCDMA_DL_HSUPA.WV	< 2 %, RMS
	with the R&S®CMW-KW400 and R&S®CMW-KW401 and R&S®CMW-KW402 and R&S®CMW-KW403 options	< 2 %, RMS

### WCDMA RF analyzer (R&S®CMW-KM400, R&S®CMW-KM401, R&S®CMW-KM403 options)

Frequency range	WCDMA band 1	1922.4 MHz to 1977.6 MHz
	WCDMA band 2	1852.4 MHz to 1907.6 MHz
	WCDMA band 3	1712.4 MHz to 1782.6 MHz
	WCDMA band 4	1712.4 MHz to 1752.6 MHz
	WCDMA band 5	826.4 MHz to 846.6 MHz
	WCDMA band 6	832.4 MHz to 837.6 MHz
	WCDMA band 7	2502.4 MHz to 2567.6 MHz
	WCDMA band 8	882.4 MHz to 912.6 MHz
	WCDMA band 9	1752.4 MHz to 1782.4 MHz
	WCDMA band 10	1712.4 MHz to 1767.6 MHz
	WCDMA band 11	1430.4 MHz to 1450.4 MHz
	WCDMA band 12	700.4 MHz to 713.6 MHz
	WCDMA band 13	779.4 MHz to 784.6 MHz
	WCDMA band 14	790.4 MHz to 795.6 MHz
	WCDMA band S	2002.4 MHz to 2017.6 MHz
	WCDMA band S170	2010 MHz to 2020 MHz
WCDMA band S190	2000 MHz to 2010 MHz	

Statistics		
Statistical count		1 to 1000
Values		current, average, minimum/maximum, standard deviation

Trigger		
Trigger sources		BASE: external TRIG A, BASE: external TRIG B, GPRF: BB generator, WCDMA: free run, WCDMA: free run (fast sync), WCDMA: IF power, WCDMA: DCCH TTI trigger, WCDMA: frame trigger, WCDMA: HS-DPCCH trigger, WCDMA: slot trigger

### Modulation analysis

Filter		3.84 MHz, RRC, $\alpha = 0.22$ , WCDMA filter
Level range		-28 dBm to +42 dBm <sup>12</sup>

<sup>12</sup> The maximum permissible continuous power is +34 dBm due to thermal limits.



<b>Analysis modes</b>	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KM400 option	QPSK, WCDMA
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KM400 and R&S <sup>®</sup> CMW-KM401 options	WCDMA + HSDPA, WCDMA + HSUPA, WCDMA + HSPA
	with the R&S <sup>®</sup> CMW-KM400 and R&S <sup>®</sup> CMW-KM401 and R&S <sup>®</sup> CMW-KM403 options	WCDMA + HSPA+
<b>Measured parameters</b>	numeric results and standard deviation	error vector magnitude (EVM), magnitude error (ME), phase error (PE), frequency error, I/Q origin offset, I/Q imbalance, UE power, power steps, phase discontinuity, CDP, CDE
	graphical	EVM versus time, EVM versus chip, ME versus time, ME versus chip, PE versus time, PE versus chip, FE versus time, UE versus time, PS versus slot, PD versus slot, CDP versus slot, CDE versus slot, CD monitor

<b>Error vector magnitude (EVM)</b>		
Measurement range		up to 25 %, RMS
Inherent EVM		< 2.5 %, RMS
Measurement length		half-slot, 1 slot, multislot (1 to 120)

<b>Frequency error</b>		
Measurement range		±3 kHz
Frequency measurement uncertainty		< 20 Hz + drift of timebase, see general technical specifications

<b>I/Q origin offset</b>		
Inherent I/Q offset	for average ≥ 10 measurements	< -55 dB

<b>I/Q imbalance</b>		
Inherent I/Q imbalance		< -50 dB

### Spectrum measurements

<b>Adjacent channel leakage ratio</b>		
Filter	RMS detector	3.84 MHz, RRC, $\alpha = 0.22$ , WCDMA filter
Dynamic range	first adjacent channel at ±5 MHz	> 54 dB
	second adjacent channel at ±10 MHz	> 57 dB
Expected nominal power setting for full dynamic range	RF1 COM, RF2 COM	-4 dBm to +42 dBm <sup>13</sup>
Uncertainty	for -33 dBc first adjacent channel level	< 0.5 dB
	for -43 dBc second adjacent channel level	< 0.5 dB
Measurement length		1 slot (2560 chip)

### Power meter

<b>UE power measurement</b>		
Filter	RMS detector	bandpass, 6.3 MHz, RRC, $\alpha = 0.22$
Level range		-55 dBm to +42 dBm <sup>13</sup>
Level uncertainty		see general technical specifications
Measurement length		half-slot, 1 slot

<b>Off power measurement</b>		
Filter	RMS detector	3.84 MHz, RRC, $\alpha = 0.22$ , WCDMA filter
Noise floor		-72 dBm
Level uncertainty		see general technical specifications + uncertainty due to noise floor



### A.1.2. Antena (bicónica) SBA 9113

Como antena transmisora/receptora hemos seleccionado el modelo SBA 9113 (figura A.1). El objetivo era encontrar una antena cuyo diagrama de radiación fuese lo más esférico posible para recibir una señal de forma uniforme a lo largo de una dirección, puesto que la moto seguirá una trayectoria variable, dependiendo del circuito donde se realicen las pruebas. Otro rasgo interesante para aplicar este modelo es el amplio rango de frecuencias que abarca, y con el que se cubre todas las bandas definidas para GSM y UMTS.

- Patrón de radiación máximo en la dirección donde se desplaza la moto, por lo que el nulo existente en el corte ortogonal no interferirá en la recepción de la señal.
- Rango de frecuencias: 500 MHz - 3 GHz.
- Ganancia variable en función de la frecuencia.
- Características consideradas durante la prueba:
  - Omnidireccional.
  - Polarización lineal.
  - Opera en transmisión y recepción.
  - Valor máximo de ganancia es 0,43 dBi (a 1800 Mhz) dentro de todas las frecuencias GSM soportadas por la fuente de transmisión.

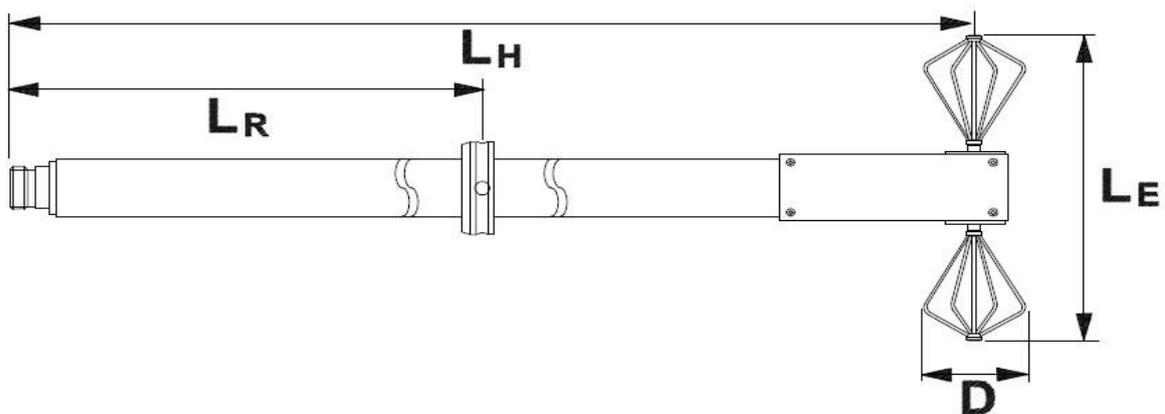


Figura A.1. Antena SBA 9113.

Para saber más sobre la antena bicónica omnidireccional SBA 9113, se puede recurrir a la página:

<http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9113.pdf>



### **A.1.3. Modem USB ZTE MF190 3G CDMA**

Para realizar las pruebas en el laboratorio se necesita simular la acción del dispositivo móvil, y para ello se ha utilizado el USB ZTE MF190 3G CDMA (junto con la tarjeta específica de Rohde & Schwarz descrita en el subapartado anterior). Se ha comprobado que el USB sólo trabaja a 2100MHz respecto a la tecnología 3G. Acorde a las especificaciones de la antena, se ha trabajado a 1900 MHz y 900 MHz para GSM.

Se puede encontrar más información en la página:

<http://www.3gmodem.com.hk/ZTE/MF190.html>

### **A.1.4. Tarjeta SIM Mini-UICC R&S CMW-Z04**

Para que el instrumento R&S CMW500 cuando actúe como estación base pueda detectar al dispositivo bajo prueba que quiera sincronizarse a la red, se ha utilizado en el plano de usuario la tarjeta R&S CMW-Z04. Esta tarjeta es aplicable a tecnologías LTE, UTRAN, GERAN, CDMA2000 e IMS.

### **A.1.5. Cables**

Para conectar el equipo R&S CMW500 con el servidor remoto utilizado para almacenar y visualizar los datos, se ha utilizado un cable ethernet RJ45.



## A.2. Metodologías para la puesta en marcha del instrumento R&S CMW500

A lo largo de este subapartado del anexo lograremos entender de forma básica cómo crear una celda móvil para dar cobertura a nuestro dispositivo bajo prueba, así como también dar la posibilidad de conexión con el servidor gracias al componente DAU.

### A.2.1. Metodología para generar una señal y célula móvil UMTS

#### *Paso 1:*

Se revisa que la antena esté correctamente conectada al conector de RF que vayamos a configurar como puerto de salida (suponiendo que sólo queremos implementar un generador).

#### *Paso 2:*

Abrimos el software de aplicación haciendo *click* sobre el archivo *CMW.exe* para arrancar el programa (en casos comunes el programa se ejecuta automáticamente al encender el equipo).

#### *Paso 3:*

Seleccionamos la opción "Signal Gen" que aparece en pantalla para que el instrumento trabaje como generador. Para ello presionamos la tecla "SIGNAL GEN".

#### *Paso 4:*

Seleccionamos la tecnología sobre la que vamos a desarrollar la comunicación, en este caso UMTS, por tanto hacemos *click* sobre el cuadro correspondiente llamado WCDMA FDD UE (Signaling).

#### *Paso 5:*

Automáticamente después, podremos ver en la barra horizontal que aparece en el inferior de la pantalla que se habrá añadido una nueva entrada con el mismo nombre de la opción que hemos seleccionado en el paso anterior. Hacemos *click* sobre esa entrada y se abrirá una nueva ventana cuyo título va a ser también el nombre de la opción escogida en el paso 4.

#### *Paso 6:*

Ajustamos los parámetros de la red. Los más significativos se muestran en la interfaz gráfica que aparece en pantalla, aunque podemos hacer *click* sobre la entrada "config" para realizar una configuración más completa.

#### *Paso 7:*

Configuramos todos los parámetros de RF que van a interferir sobre la señal (los puertos de entrada y salida del sistema, los parámetros de atenuación externa a la entrada y a la salida del instrumento) haciendo *click* sobre la entrada "Routing" contenida en la barra vertical derecha.

#### *Paso 8:*

Configuramos el componente DAU del instrumento. Para ello aplicamos la metodología del apartado A.2.3.



## A.2.2. Metodología para generar una señal y célula móvil GSM

### *Paso 1:*

Se revisa que la antena esté correctamente conectada al conector de RF que vayamos a configurar como puerto de salida (suponiendo que sólo queremos implementar un generador).

### *Paso 2:*

Abrimos el software de aplicación haciendo *click* sobre el archivo *CMW.exe* para arrancar el programa (en casos comunes el programa se ejecuta automáticamente al encender el equipo).

### *Paso 3:*

Seleccionamos la opción "Signal Gen" que aparece en pantalla para que el instrumento trabaje como generador. Para ello presionamos la tecla "SIGNAL GEN".

### *Paso 4:*

Seleccionamos la tecnología sobre la que vamos a desarrollar la comunicación, en este caso UMTS, por tanto hacemos *click* sobre el cuadro correspondiente llamado GSM (Signaling).

### *Paso 5:*

Automáticamente después, podremos ver en la barra horizontal que aparece en el inferior de la pantalla que se habrá añadido una nueva entrada con el mismo nombre de la opción que hemos seleccionado en el paso anterior. Hacemos *click* sobre esa entrada y se abrirá una nueva ventana cuyo título va a ser también el nombre de la opción escogida en el paso 4.

### *Paso 6:*

Ajustamos los parámetros de la red. Los más significativos se muestran en la interfaz gráfica que aparece en pantalla, aunque podemos hacer *click* sobre la entrada "config" para realizar una configuración más completa.

### *Paso 7:*

Configuramos todos los parámetros de RF que van a interferir sobre la señal (los puertos de entrada y salida del sistema, los parámetros de atenuación externa a la entrada y a la salida del instrumento) haciendo *click* sobre la entrada "Routing" contenida en la barra vertical derecha.

### *Paso 8:*

Configuramos el componente DAU del instrumento. Para ello aplicamos la metodología del apartado A.2.3.



### A.2.3. Metodología para configurar el componente DAU

*Paso 1:*

Configuramos el componente DAU del instrumento. Para ello presionamos la tecla "SETUP" que se encuentra a la izquierda de la pantalla para abrir el diálogo de configuración del sistema.

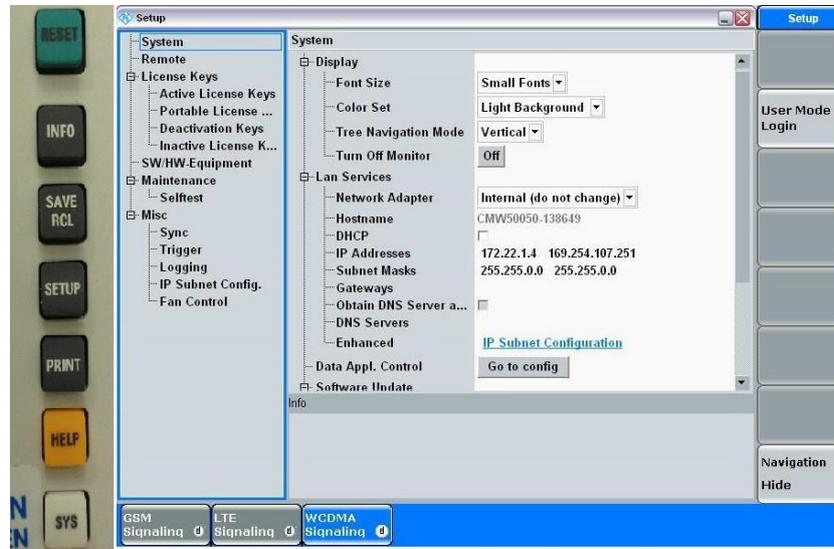


Figura A.2. Diálogo de configuración del sistema.

*Paso 2:*

En esa nueva ventana que se abre, hacemos *click* sobre el apartado "system" y buscamos el subapartado "Data Appl. Control". A continuación, hacemos *click* sobre "Go to config". Entonces se abrirá nuevo cuadro de diálogo llamado "Data Application Control"

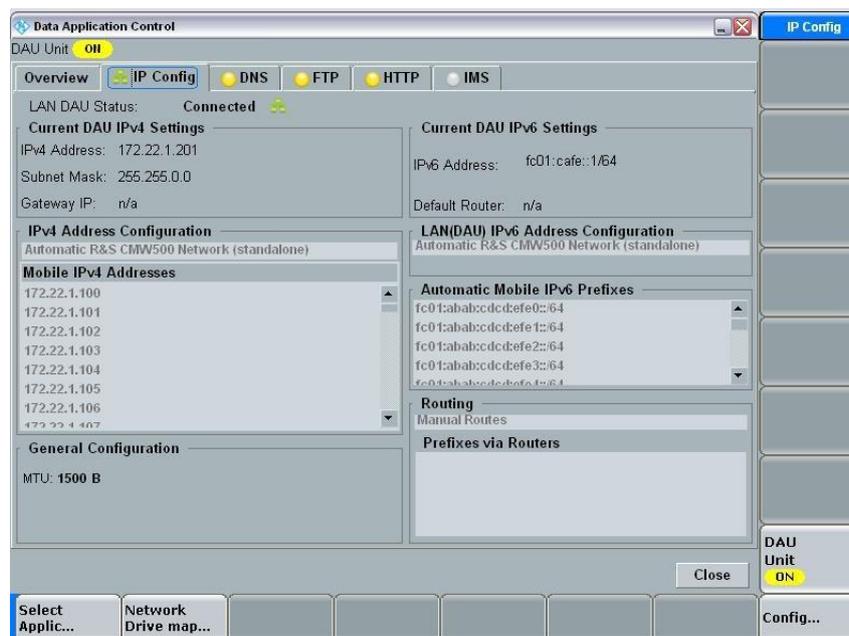


Figura A.3. Diálogo de configuración del componente DAU.



*Paso 3:*

Por último, hacemos *click* en "config" para abrir una nueva ventana llamada "IP Configuration". En "IP Configuration" seleccionamos el modo en que se van a configurar los parámetros de red de la DAU, según el escenario de nuestra aplicación (en el apartado 5.1.4 aparecen todas las posibilidades que podemos contemplar

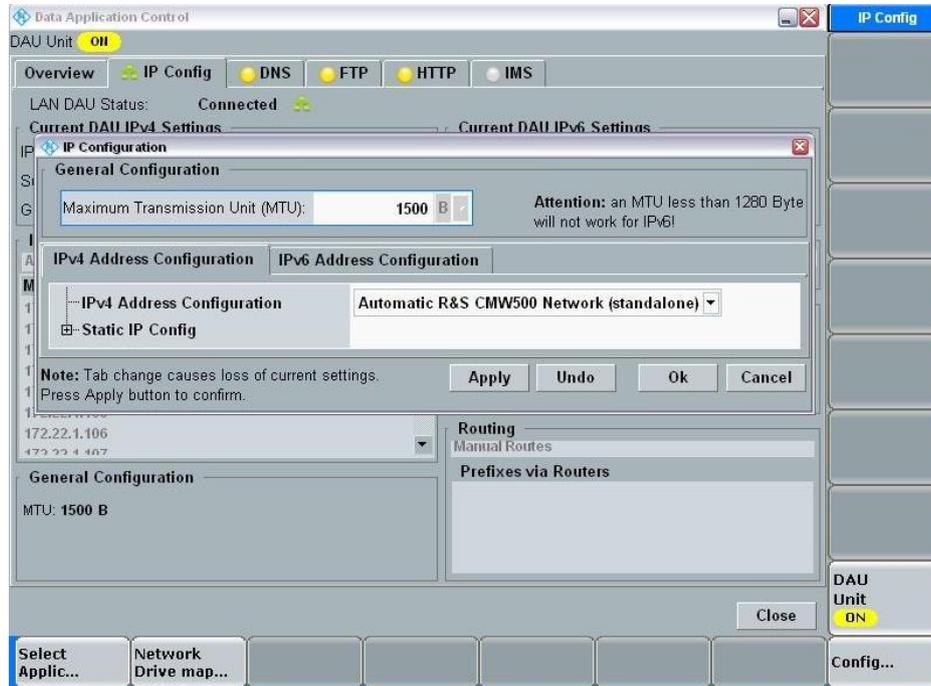


Figura A.4. Diálogo de configuración IP del componente DAU.

*Paso 4:*

Una vez que hemos seleccionado el modo de asignación IP de la DAU, aplicamos los cambios haciendo *click* sobre "Apply" y cerramos el diálogo con un *click* en "Ok". Finalmente, para volver a la interfaz gráfica de la aplicación, hacemos *click* sobre "Close".

*Paso 12:*

El sistema ya está configurado y preparado para realizar la función de una estación base, de manera que vamos a activar la aplicación. Para ello hacemos *click* sobre la entrada de la barra vertical derecha cuyo nombre coincida con el título de la interfaz, y además esté en "OFF". Luego presionamos la tecla "ON/OFF" y veremos que su valor cambia a "ON", indicando que la aplicación está activada, como en los casos anteriores.