

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Recepción de señal LTE mediante técnicas de radio
definida por software**

(Reception of LTE signals using software defined radio
techniques)

Para acceder al Título de

Graduado en

Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Elena Al Khalaf Alvarez

Octubre – 2016



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

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN
CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

Realizado por: Elena Al Khalaf Alvarez

Director del TFG: Jesús María Ibáñez Díaz

Título: “Recepción de señal LTE mediante técnicas de radio definida por software“

Title: “Reception of LTE signals using software defined radio techniques “

Presentado a examen el día: 31 de octubre 2016

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Ignacio Santamaría Caballero

Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús Ibáñez Díaz

Vocal (Apellidos, Nombre): Luis Antonio Vielva Martínez

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

En primer lugar, gracias a mi director de proyecto Jesús Ibáñez por darme la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Grado sobre un tema tan apasionante como las comunicaciones digitales, y por todo el conocimiento adquirido a través de sus clases. También quiero recordar a todos los profesores que me han impartido clase y agradecerles todo su esfuerzo para que a día de hoy pueda finalizar mis estudios con la mejor de las formaciones, en especial a los profesores del grupo GTAS, que además me han permitido utilizar sus instalaciones a lo largo de estos últimos meses.

Con el Trabajo Fin de Grado se cierra una etapa de cuatro años, de los que puedo decir que, hasta ahora, han sido los mejores años de mi vida, y por eso quiero recordar y agradecer a todas las personas que me han acompañado y ayudado en todo momento.

Quiero empezar con una persona que siempre me ha querido como una hija, y que yo he querido y sigo queriendo como una madre. Aunque la vida te haya llevado de nuestro lado hace menos de un año, a ti, tía Mina, te agradezco con toda el alma lo mucho que me has querido y ayudado siempre. Si hay alguien a quien tengo que agradecer algo, esa eres tú, mamá, te lo debo todo, pues te tengo que agradecer hasta mi vocación, pues fuiste tú quien apostó por mí para hacer esta maravillosa carrera, te quiero. A mis hermanas, Alia, Sara y Selma, por si todavía no os lo he dicho suficientes veces, mil gracias por todo el apoyo que me habéis dado y me dais, no podría estar más orgullosa de tener unas hermanas como vosotras, os quiero. Por supuesto agradecer al resto de mi familia, en especial a mi tío, Juanjo, y a mis primos.

Se dice que hay amigos y AMIGOS, vosotros, Mario, Juan, Alba y Pablo sois del segundo grupo; muchas gracias por darme vuestra amistad y haberme ayudado tanto a lo largo de estos cuatro años, y gracias al resto de mis amigos.

Por último, solo me queda agradecer a una persona muy importante, mi padre, que por más que pasen los años, siempre te recordaré y siempre formarás parte de cada meta que consiga, te quiero.

Índice de Contenido

| | |
|--|----|
| Agradecimientos | I |
| 1. Introducción y motivación | 1 |
| 1.1 Objetivo del Trabajo Fin de Grado | 2 |
| 1.2 Estructura de la memoria | 2 |
| 1.3 Acrónimos y nomenclatura | 3 |
| 2. Conceptos teóricos de los sistemas 4G | 6 |
| 2.1 Bandas de frecuencia..... | 6 |
| 2.2 Técnicas de acceso múltiple en LTE..... | 7 |
| 2.2.1 OFDM | 7 |
| 2.2.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente ... | 9 |
| 2.3 Acceso radio en LTE..... | 9 |
| 2.3.1 Estructura en el dominio de la frecuencia | 9 |
| 2.3.2 Estructura en el dominio del tiempo | 10 |
| 2.3.3 Recursos físicos..... | 11 |
| 2.4 Canales, campo de control y señales de sincronización en LTE..... | 13 |
| 2.4.1 Canales Físicos..... | 14 |
| 2.4.2 Canales de Transporte | 18 |
| 2.4.3 Canales Lógicos | 18 |
| 3. Herramienta de trabajo | 20 |
| 3.1 Condicionantes de partida | 20 |
| 3.1.1 USRP B210 | 20 |
| 3.1.2 Matlab | 22 |
| 3.1.3 Frecuencia de muestreo y número de muestras | 22 |
| 3.2 Montaje inicial | 23 |
| 3.3 Montaje final | 24 |
| 4. Desarrollo del trabajo | 27 |
| 4.1 Captura de señal LTE..... | 27 |
| 4.2 Procesado de las señales LTE | 29 |
| 4.3 Interfaz gráfica de usuario en Matlab (GUI) | 33 |
| 5. Resultados | 35 |
| 5.1 Capturas iniciales | 35 |
| 5.2 Capturas recientes: | 41 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 6. | Conclusiones y líneas futuras | 56 |
| 6.1 | Resumen y conclusiones | 56 |
| 6.2 | Líneas futuras del trabajo | 57 |
| 7. | Bibliografía | 58 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Banda 3 de LTE [2] | 6 |
| Figura 2.2 Banda 7 de LTE [2] | 7 |
| Figura 2.3 Espectro de una subportadora y espectro OFDM[3] | 8 |
| Figura 2.4 Multiplexación de usuarios en el DL [3] | 9 |
| Figura 2.5 Estructura LTE en el dominio del tiempo [3] | 11 |
| Figura 2.6 Recurso básico tiempo-frecuencia [3] | 11 |
| Figura 2.7 Planificación en el DL [3] | 12 |
| Figura 2.8 Estructura de la trama en DL (modo FDD) | 14 |
| Figura 2.9 Mapeado de PSS y SSS sobre el símbolo OFDM | 16 |
| Figura 3.1 Arquitectura de la plataforma USRP B210 | 21 |
| Figura 3.2 Estructura Setup de trabajo..... | 24 |
| Figura 3.3 Directorios GTIS [10] | 25 |
| Figura 3.4 Estructura Setup de trabajo definitivo | 26 |
| Figura 4.1 Banda 3 de LTE [2] | 29 |
| Figura 4.3 Interfaz 2 - Captura..... | 33 |
| Figura 4.4 Interfaz 3 - Procesado | 34 |
| Figura 5.1 Captura Movistar - Laboratorio | 37 |
| Figura 5.2 Captura Vodafone - Laboratorio | 38 |
| Figura 5.3 Captura Orange – Laboratorio | 39 |
| Figura 5.4 Captura Yoigo - Laboratorio | 40 |
| Figura 5.5 Captura Movistar - Sardinero | 42 |
| Figura 5.6 Captura Vodafone – Sardinero | 43 |
| Figura 5.7 Captura Orange - Sardinero..... | 44 |
| Figura 5.8 Localización capturas Sardinero..... | 45 |
| Figura 5.9 Captura Vodafone - Nueva Montaña..... | 46 |
| Figura 5.10 Captura Orange - Nueva Montaña..... | 47 |
| Figura 5.11 Localización capturas Nueva Montaña..... | 48 |
| Figura 5.12 Captura Vodafone - Las Llamas..... | 49 |
| Figura 5.13 Captura Orange - Las Llamas..... | 50 |
| Figura 5.14 Captura Vodafone - Paseo Pereda | 51 |
| Figura 5.15 Captura Orange Paseo Pereda | 52 |
| Figura 5.16 Localización capturas Paseo Pereda | 53 |
| Figura 5.17 Captura Vodafone - Estaciones | 54 |
| Figura 5.18 Captura Orange - Estaciones | 55 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Resumen parámetros LTE | 13 |
|--|----|

1. Introducción y motivación

Los sistemas de telefonía y comunicaciones móviles de hoy en día representan la constante evolución de la tecnología, la cual cambia en función de las necesidades de los usuarios, pasando de ser una tecnología cara solo al alcance de unos pocos, a unos sistemas ubicuos al alcance de la mayoría de la población mundial. Pero no solo ha cambiado la tecnología, también ha cambiado la forma en la que las comunidades móviles se desarrollan, pasando de ser una tarea de competencia regional o nacional a ser una tarea cada vez más compleja acometida por las organizaciones multitudinarias que fijan los estándares de telefonía móvil, como es el caso del 3GPP (Third generation Partnership Project) que bajo el marco International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-A) de la ITU ha desarrollado la cuarta generación de redes móviles 4G.

El 3GPP LTE (Long Term Evolution) es la evolución a largo plazo de UMTS con el objetivo de aumentar tasas binarias y reducir tiempos de latencia, pero no es a él, sino al 3GPP LTE-Advanced (la release 10) al que se le concede la designación oficial como tecnología 4G ya que este último cumple con los requisitos establecidos por la ITU para la primera versión del IMT-A que tienen como objetivo garantizar la calidad de servicio y el cumplimiento de los requisitos para la transmisión de servicios de mensajería multimedia, video chat, TV móvil o servicios de voz y datos en cualquier momento y en cualquier lugar, utilizando la alternativa que mejor calidad proporcione a un coste mínimo.

Actualmente siguen funcionando tecnologías anteriores como UMTS y GSM, pero es la tecnología LTE la más utilizada y cada día va en aumento por lo que siguen apareciendo *releases* del 3GPP compatibles con los anteriores, pero tienen que cumplir con las tecnologías fundamentales que soportan las redes 4G:

- Sistemas multiantena (MIMO).
- Sistemas de radio definida por software (SDR).
- Conectividad IPv6.
- Sistemas de acceso ya existentes como OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access).

El Software Defined Radio (SDR), consiste en el reemplazo de componentes físicos usualmente utilizados en comunicaciones inalámbricas por su equivalente en software. Esto ofrece la posibilidad de mantener desarrollos sin la necesidad de hardware específico, facilitando el rediseño, la reparación de errores en el software y la nueva puesta en producción de sistemas, reduciendo conjuntamente los costes de despliegue. [1]

Este estado de actualidad que presentan las redes 4G LTE y su importancia en la vida cotidiana justifican sobradamente un posible Trabajo Fin de Grado en este ámbito; sin embargo, la motivación principal de este trabajo, es la adquisición del conocimiento sobre la aplicación de las técnicas de radio definida por software (SDR) en sistemas de comunicaciones inalámbricas, concepto que era totalmente nuevo para mí. Finalmente se decidió que este Trabajo Fin de Grado (TFG) trate sobre la recepción de señales LTE mediante técnicas de radio definida por software.

1.1 Objetivo del Trabajo Fin de Grado

La realización de este TFG ha sido posible por la disponibilidad de la plataforma de radio definida por software USRP B210, en el Grupo de Tratamiento Avanzado de Señal (GTAS), y, por otro lado, a la existencia de la Toolbox LTE en la herramienta matemática Matlab. De esta forma, los objetivos del trabajo queda resumidos a dos:

- La captura de señal LTE en el enlace descendente (DL), mediante la plataforma SDR USRP B210, con lo que ello conlleva sobre el aprendizaje de la tecnología SDR, y la adecuación y prueba de un setup de trabajo que incluya la plataforma USRP B210, permitiendo así la recepción de señal LTE.
- Procesado de la señal recibida en el DL, mediante el ejemplo “Cell Search, MIB and SIB1 Recovery” disponible en la Toolbox LTE de Matlab, que realiza el proceso llamado *Cell Search* que representa el modo en que los usuarios pueden encontrar la celda en la que van a poder operar dentro de la red, con lo que ello conlleva de estudio de ese proceso y las principales características de LTE para poder entenderlo.

Finalmente, aunque no se considera objetivo principal, el fin del trabajo incluye la programación de una Interfaz, utilizando la funcionalidad Graphic User Interface (GUI) de Matlab, que permite la demostración de los dos procesos resultantes de los dos objetivos principales del TFG.

1.2 Estructura de la memoria

A continuación, se realiza un breve resumen del contenido de cada uno de los capítulos que conforman esta memoria:

- Capítulo 1: Introducción y Motivación.

En el presente capítulo se ha realizado una introducción del tema sobre el que se basa este Trabajo Fin de Grado, estableciendo los objetivos y los puntos de partida de cada uno de ellos. También se hace un resumen de los acrónimos que aparecen en la memoria, y de la nomenclatura que se ha utilizado.

- Capítulo 2: Conceptos teóricos de los sistemas 4G.

En el segundo capítulo se realiza un estudio de los conceptos teóricos más relevantes acerca de los sistemas 4G, necesarios para el buen entendimiento de este trabajo y que a su vez fueron necesarios para el desarrollo del trabajo.

- Capítulo 3: Herramienta utilizada.

El tercer capítulo muestra el diseño del setup de trabajo, así como su funcionamiento, para poder llevar a cabo la captura de señal LTE y su posterior procesado.

- Capítulo 4: Desarrollo del trabajo.

En este capítulo se detalla el trabajo realizado para poder cumplir finalmente con los objetivos propuestos.

- Capítulo 5: Resultados.

Como indica el título, en este capítulo se comentan los resultados obtenidos del trabajo, mostrando una serie de capturas realizadas en varias localizaciones.

- Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras.

Para finalizar el trabajo, se concluye con un capítulo donde se muestran las principales conclusiones al respecto, así como las futuras líneas que puede tener este TFG.

1.3 Acrónimos y nomenclatura

- Acrónimos:

3GPP: The 3rd Generation Partnership Project

(IMT-A): The International Mobile Telecommunications-Advanced Standard

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones

LTE: Long Term Evolution

LTE-Advanced: Long Term Evolution-Advanced

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

MIMO: Multiple-input Multiple-output

SDR: Software Defined Radio

DL: DownLink

UL: UpLink

FDD: Frequency-division duplexing

SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access

OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

IFFT: Inverse fast Fourier transform

FFT: Fast Fourier transform

SFN: System Frame Number

RE: Resource Element

RB: Resource Block

PBCH: Physical Broadcast Channel

PSS: Primary synchronization signal
 SSS: Secondary synchronization signal
 PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel
 MIB: Master Information Block
 SIB1: System Information Block number 1
 PCI: Physical Cell Id
 QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying
 CFI: Control Format Indicator
 DCI: Downlink Control Information
 PDCCH: Physical Downlink Control Channel
 PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
 señales HARQ de ACK o NACK
 USRP B210: Universal Software Radio Peripheral
 ADC: analog-to-digital converter
 UHD: USRP Hardware Driver
 GTIS: GTEC Testbed Interface Software
 GUI: Graphic User Interface
 eNodeB: Evolved Node B
 UE: User Equipment

- Nomenclatura:

TG: Tiempo de Guarda
 CP: Prefijo Cíclico
 N_{FG} : Frecuencias de Guarda
 N_P : Portadoras Piloto
 T_s : Periodo de símbolo
 Δf : Separación entre subportadoras
 N_{FFT} : Tamaño FFT
 $T_{subframe}$: Tiempo de subtrama
 T_{frame} : Tiempo de trama
 T_{slot} : Tiempo de slot
 F_s : Frecuencia de muestreo

NSamples: Número de muestras

F_c : Frecuencia de la portadora o frecuencia central

Gain: Ganancia

2. Conceptos teóricos de los sistemas 4G

Es necesaria la introducción de algunas de las características de los Sistemas 4G, tanto LTE como LTE-Advanced necesarias para comprender el conjunto total del trabajo. Para comenzar se hará una descripción del servicio LTE en España, seguidamente se explicarán las técnicas de acceso múltiple que utiliza LTE, y como se utilizarán dichas técnicas para la planificación de las transmisiones, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, y para finalizar, se describirán los aspectos más relevantes para conocer cómo se transporta la información sobre la interfaz radio de LTE.

Todos los puntos que se van a explicar son específicos para el enlace descendente, centro del estudio del TFG.

2.1 Bandas de frecuencia

En este punto se describirá el estado de actualidad en el que se encuentra el servicio móvil LTE en España, mostrando las bandas operativas y su asignación entre los operadores principales del país, Movistar, Vodafone, Orange y Yoigo para dar cobertura LTE: [2]

- **Banda 20 de LTE (800 MHz):**

La banda de 800MHz (dividendo digital) comenzó su despliegue en 2015 tras la liberación de la banda en abril de ese mismo año. Tiene gran interés 4G por la propagación y penetración en interiores.

- **Banda 3 de LTE (1800 MHz):**

La mayor cobertura 4G en España se da en esta banda. Opera en modo dúplex FDD (frecuencias emparejadas). La asignación de bandas a los distintos operadores se representa en la figura 2.1, en la cual las frecuencias de la izquierda están reservadas para el enlace ascendente (UL) y las equivalentes a la derecha para el enlace descendente (DL).

La tecnología GSM también opera en esta banda, por lo que no todo el ancho de banda asignado a los operadores se utiliza para dar cobertura 4G.

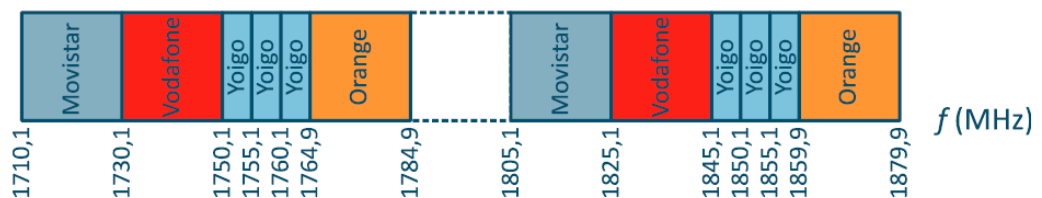


Figura 2.1 Banda 3 de LTE [2]

- **Banda 7 de LTE (2600):**

Después de la banda de 1800MHz, esta banda es la siguiente en proporcionar cobertura 4G.

El bloque Varios/A, que se puede apreciar en la figura 2.2, son concesiones autonómicas a varios operadores.



Figura 2.2 Banda 7 de LTE [2]

- **Banda 32 de LTE (1500 MHz):**

Actualmente en despliegue, y en principio habrá licencias para modos FDD y/o TDD.

2.2 Técnicas de acceso múltiple en LTE

Una de las principales características que poseen los sistemas de última generación, como LTE, es la tecnología que implementan a nivel físico, ya que permite utilizar de forma más eficiente los recursos radio disponibles en comparación a los sistemas previos. LTE utiliza las técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendiente (Downlink) y SC-FDMA en el enlace ascendiente (Uplink), ambas basadas en la técnica de transmisión OFDM.

2.2.1 OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es hoy día una de las tecnologías más utilizadas en capas físicas. OFDM ha tenido gran aceptación en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha y, además de estar presente en LTE aparece en estándares como el IEEE 802.16 o el IEEE 802.11 (popularmente conocido como WiFi). También aparece en estándares de radiodifusión de televisión digital terrestre (DVB-T) entre otros.

La Multiplexación Ortogonal de frecuencia u OFDM, es una modulación multiportadora que como bien indica su nombre, especifica el uso de sub-portadoras ortogonales, sobre un amplio ancho de banda, y donde cada sub-portadora está separada $f_k = f_o + k/T$ (siendo T el periodo del símbolo). [3]

En la figura 2.3 se puede observar el espectro de una única subportadora y el de una modulación OFDM:

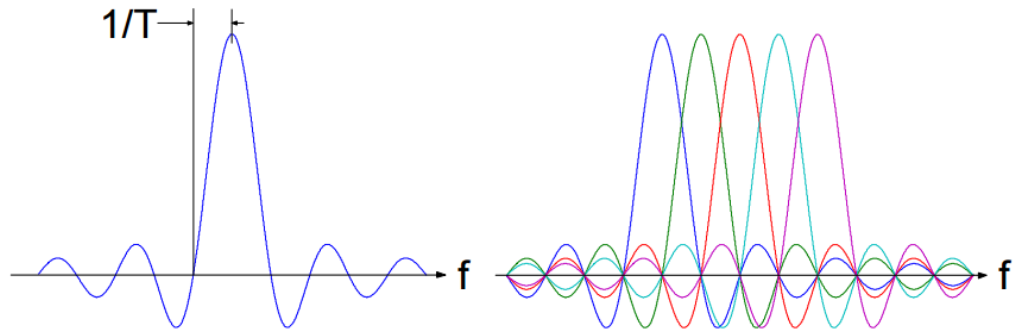


Figura 2.3 Espectro de una subportadora y espectro OFDM[3]

Un símbolo OFDM consiste en la suma de N sub-portadoras moduladas y se implementa mediante la IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa), pero OFDM también conlleva realizar ciertas acciones para cumplir con las prestaciones que ofrece. Estas acciones son las siguientes: [4]

- **Tiempo de Guarda (T_G):**

A cada símbolo OFDM se le añade un tiempo de guarda mayor que el retardo máximo de la señal ($T_G > \tau_{\max}$) para evitar la ISI (Inter-Symbol Interference). Al tiempo de guarda se le añade una extensión cíclica o prefijo cíclico (CP), que consiste en replicar el final de cada símbolo OFDM, con el fin de evitar la pérdida de Ortogonalidad entre las sub-portadoras o ICI (Inter-Carrier Interference).

- **Frecuencias de Guarda (N_{FG}):**

consiste en dejar las portadoras de los extremos del espectro sin modular y así conseguir protección frente a interferencias con el canal adyacente.

- **Portadoras Piloto (N_P):**

necesarias para estima de canal en la frecuencia y en el tiempo en recepción, se suelen seguir estrategias distintas en función de la transmisión dependiendo si es transmisión continua como en el caso de DVB-T o transmisión de tramas como en LTE (más adelante se describirá la estructura de la trama de LTE en DL).

- **Codificación de Canal:**

Sin una potente codificación basada en códigos de bloque, códigos convolucionales y entrelazado, OFDM no podría hacer frente al fading selectivo que sufren algunas subportadoras, lo que se traduce en una alta BER (Bit Error Rate) dominada por la BER de esas subportadoras peores.

2.2.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) es el término utilizado para denotar el uso de OFDM como esquema de multiacceso, de tal forma que en cada intervalo de símbolo OFDM, distintos conjuntos de subportadoras se utilizan para transmitir a diferentes terminales o UE (User Equipment) a diferencia de OFDM convencional donde se asume que todas las sub-portadoras OFDM son transmitidas desde un mismo transmisor a un receptor concreto.

En la figura 2.4 (a) se asigna un bloque de subportadoras consecutivas para transmitir al mismo terminal, sin embargo, también es posible distribuir subportadoras de forma dispersa a cada terminal como se aprecia en la figura 2.4 (b).

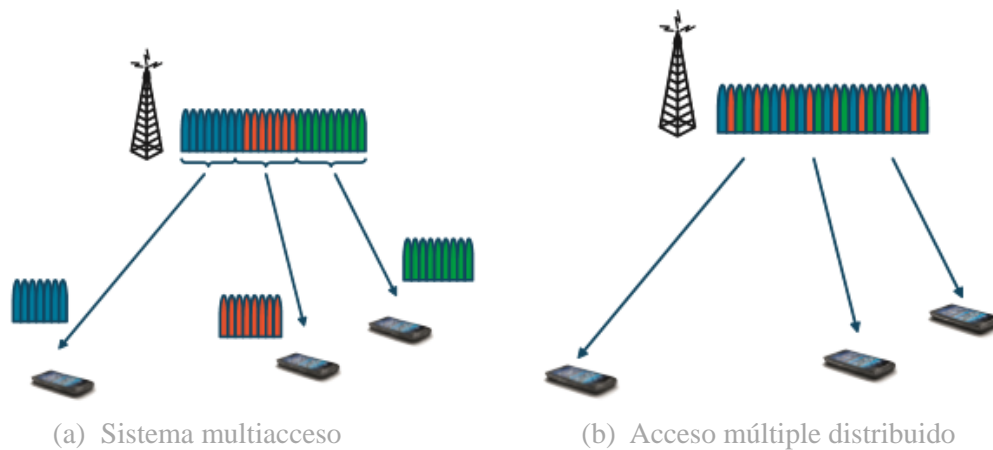


Figura 2.4 Multiplexación de usuarios en el DL [3]

La ventaja del acceso múltiple distribuido es que se incrementa la diversidad en frecuencia, ya que cada transmisión está distribuida sobre un ancho de banda mayor. [3]

2.3 Acceso radio en LTE

A continuación, se explicará cómo se utiliza en LTE, la flexibilidad de OFDM para la planificación o adaptación de las transmisiones en el DL, mostrando la estructura de LTE tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia y como realiza la asignación dinámica de recursos tiempo-frecuencia entre los usuarios.

2.3.1 Estructura en el dominio de la frecuencia

En el dominio de la frecuencia, las especificaciones de capa física permiten portadoras con diferentes anchos de banda, estos pueden variar desde el mínimo ancho de banda posible $W = 1.4\text{MHz}$, que equivale a utilizar 72 subportadoras, hasta el máximo valor $W = 20\text{MHz}$, que equivale a utilizar 1200 subportadoras, aunque a partir de la release 10 se

pueden alcanzar anchos de banda mayores gracias a la técnica de Carrier Aggregation, que permite utilizar de manera conjunta hasta cinco portadoras de diferentes anchos de banda, consiguiendo un ancho de banda en transmisión de hasta 100MHz.

La práctica común para la implantación de un transmisor o un receptor, como se ha especificado anteriormente, es la basada en la FTT, por su implementación de baja complejidad y alta eficiencia, por lo que si una portadora tiene un ancho de banda de $B = 20\text{MHz}$, el tamaño de la FTT tiene que ser $N_{\text{FFT}} = 2048$.

De este modo se define la frecuencia de muestreo $F_s = \Delta_f N_{\text{FFT}}$, donde $\Delta_f = 15\text{KHz}$ es un valor fijo que representa la separación entre las subportadoras, entonces si $N_{\text{FFT}} = 2048$ la frecuencia de muestreo es $F_s = 30.72\text{ MHz}$. [3]

2.3.2 Estructura en el dominio del tiempo

En el dominio del tiempo, las transmisiones LTE están organizadas en tramas de longitud $T_{\text{frame}} = 10\text{ms}$, cada una está dividida en diez subtramas de igual longitud, $T_{\text{subframe}} = 1\text{ms}$, como se puede ver en la figura 2.5.

Cada subtrama está dividida a su vez en dos slots de igual longitud, $T_{\text{slot}} = 0.5\text{ms}$, y cada slot está compuesto por 6 o 7 símbolos OFDM, cada uno de los cuales con su prefijo cíclico (CP), si el prefijo es normal serán 7 símbolos, y si es extendido serán 6 símbolos.

Se toma una referencia temporal para proporcionar una definición temporal consecuente, de esta forma los diferentes intervalos de tiempo definidos arriba son múltiplos de una unidad básica de tiempo $T_s = 1 / (15000 \cdot 2048)$.

La referencia temporal T_s , se basa en el tiempo de FFT de un transmisor o receptor implementado con una FTT de tamaño 2048, por lo que los intervalos temporales de la figura 2.5 se pueden expresar del siguiente modo:

$T_{\text{frame}} = 307200 \cdot T_s$, $T_{\text{subframe}} = 30720 \cdot T_s$, $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s$ para la duración de la trama, la subtrama y el slot respectivamente.

En un nivel superior cada trama es identificada mediante el SFN (System Frame Number). El SFN es utilizado para definir diferentes ciclos de transmisión que tengan un periodo más largo que una trama.

El periodo SFN es de 1024, así que se repite cada 1024 tramas, lo que equivale a casi 10 segundos).[3]

En la siguiente figura (figura 2.5) se muestra la estructura de la trama en DL (FDD):

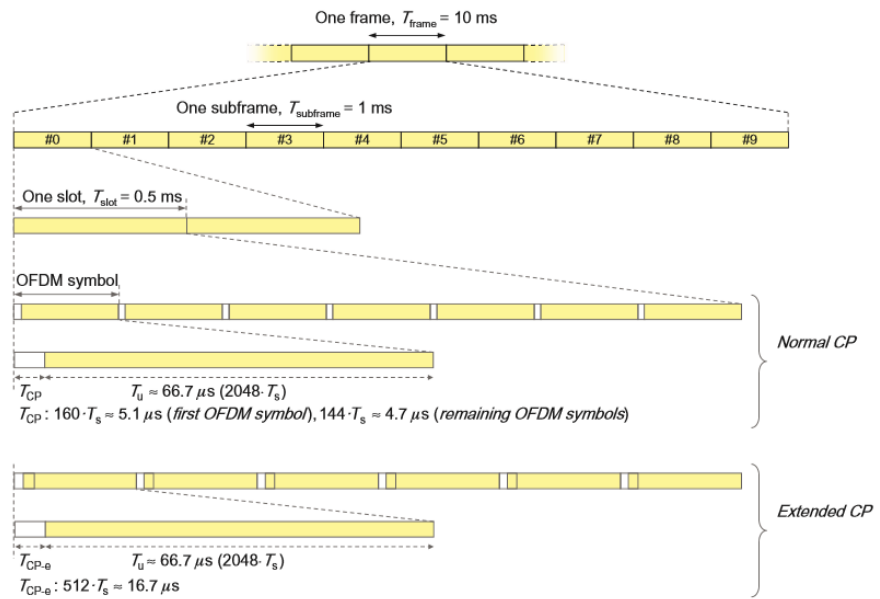


Figura 2.5 Estructura LTE en el dominio del tiempo [3]

2.3.3 Recursos físicos

Es una combinación de asignaciones de tiempo y frecuencia. Un resource element (RE) consiste en una subportadora modulada con M niveles ($M=4, 16, 64$ según sea QPSK, 16 QAM o 64 QAM) en un símbolo OFDM, es el recurso físico más pequeño en LTE. Además, como se puede observar en la figura 2.6, los resource elements se agrupan en resource blocks (RB).

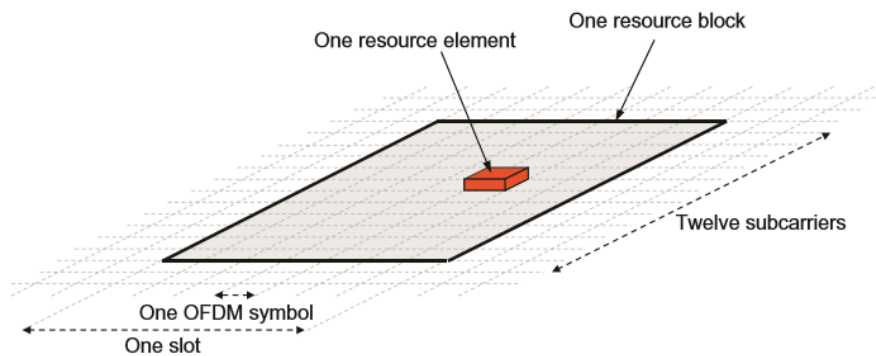


Figura 2.6 Recurso básico tiempo-frecuencia [3]

Cada resource block consiste en doce subportadoras consecutivas sobre un intervalo de 0.5ms (T_{slot}) con un ancho de banda de 180 KHz ($180 \text{ KHz}=12\Delta f$), y en función del prefijo cíclico cambiará el número de RE por cada RB.

- $1\text{RB}=7\cdot 12=84 \text{ RE}$ (CP normal)
- $1\text{RB}=6\cdot 12=72 \text{ RE}$ (CP extendido)

Una de las características básicas de LTE es la asignación dinámica de recursos, de tal forma que un planificador (scheduler) asigna recursos tiempo-frecuencia a los usuarios.

El scheduling está muy relacionado con las características de la interfaz radio LTE. En el dominio del tiempo, es posible explotar la diversidad multiusuario, en la que el Scheduler tiene en cuenta el estado del canal de cada usuario, para poder asignar el canal al usuario con mejor calidad y de este modo se podrían aprovechar mejor los recursos radio. Además, también existe el funcionamiento en el dominio de la frecuencia, en el que se tiene en cuenta los desvanecimientos selectivos de frecuencia, como se puede apreciar en la parte superior de figura 2.7.

Tanto en frecuencia como en el tiempo, el canal es percibido de manera diferente por cada usuario, por tanto, es necesario una buena selección de usuario a transmitir para tener una transmisión eficiente. En la figura 2.7, se puede ver un poco más claro lo que son las estrategias de scheduling y también se puede apreciar que la unidad mínima de planificación es un resource block pair (1ms y 180KHz). [3]

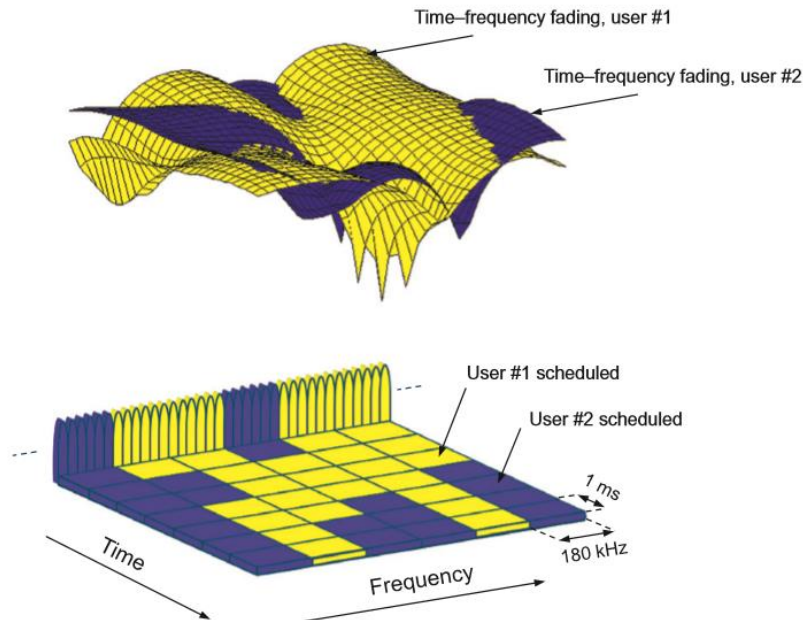


Figura 2.7 Planificación en el DL [3]

La siguiente tabla muestra un resumen de lo hasta ahora contado:

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Ancho de banda nominal (W en MHz) | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Tamaño FFT (N_{FFT}) | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1536 | 2048 |
| Espacio Subportadoras (Δ_f) | 15 KHz | | | | | |
| Tiempo FFT (t) | 66.7 us | | | | | |
| Tiempo de guarda (T_G) | 4.7 us/5.2 us (extended 16.7us) | | | | | |
| Eficiencia Ancho de banda en DL | 77.1% | 90% | 90% | 90% | 90% | 90% |
| Ancho de banda ocupado en transmisión (B en MHz) | 1.08 | 2.7 | 4.5 | 9 | 13.5 | 18 |
| Número de RB (UL o DL) | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Número de subportadoras | 72 | 180 | 300 | 600 | 900 | 1200 |
| Frecuencia de muestreo (Fs en Mmuestras/s) | 1.92 | 3.84 | 7.68 | 15.36 | 23.04 | 30.72 |

Tabla 2.1 Resumen parámetros LTE

2.4 Canales, campo de control y señales de sincronización en LTE

Antes de que un terminal pueda acceder a una red LTE primero debe encontrar y conseguir sincronizarse a una celda de la red, y posteriormente recibir y decodificar la información necesaria para comunicarse y operar correctamente dentro de la celda. A ese primer paso se le llama *Cell search* y consiste en la sincronización a nivel de símbolo con una celda, adquisición del tiempo de trama de la celda o lo que es lo mismo, determinar el momento en el que comienza una trama en el DL y por último conocer la identidad de capa física de la celda (PCI).

Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar ese proceso y se explicará detalladamente más adelante, pero para entenderlo correctamente, primero hay que conocer cómo se transporta la información sobre la interfaz radio de LTE, en este caso la información relativa al campo de control y la de sincronización. Para ello se utilizan “canales” que se dividen en tres categorías, canales físicos, canales de transporte y canales lógicos, los cuales van a ser explicados en este capítulo, especialmente los canales físicos pues son los que mayor contribución ofrecen al proceso de *Cell search*.

En la figura 2.8 se muestra la estructura de una trama FDD en DL en la que se detallan los campos de control, señales de referencia y señales de sincronización que posteriormente se van a explicar:

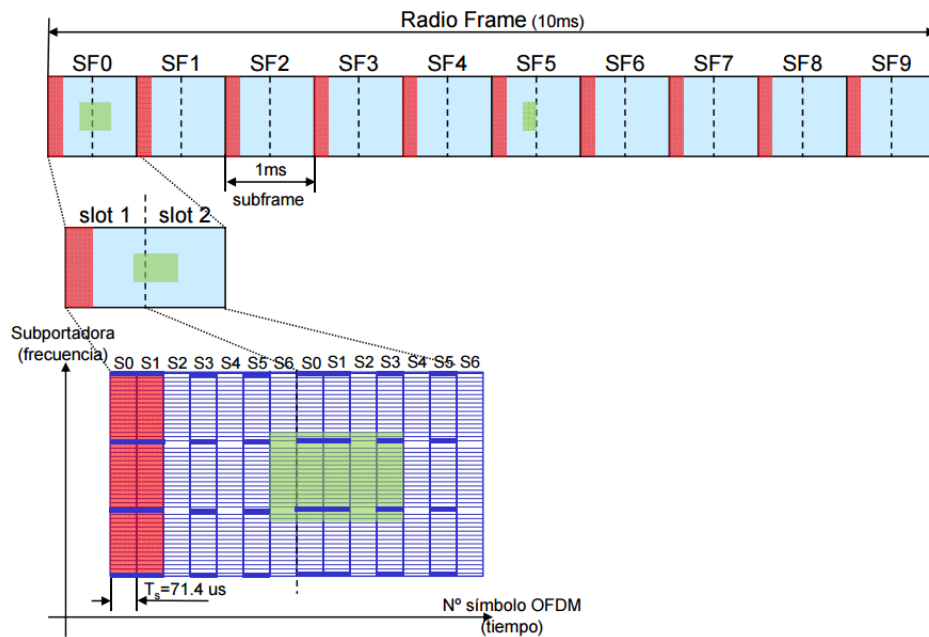


Figura 2.8 Estructura de la trama en DL (modo FDD)

2.4.1 Canales Físicos

Los canales físicos son los canales encargados de la transmisión de los datos de usuario y los mensajes de control. Varían entre los enlaces ascendente (UL) y descendente (DL), ya que operan de manera diferente, solo se explicarán los canales del DL, pues el trabajo se centra en el estudio de las señales recibidas en el DL. Como se ha comentado al principio de este punto, los canales físicos son los que mayor relevancia tienen para el buen entendimiento del trabajo por lo que a continuación se hace un resumen de las principales funciones de cada uno de los cinco canales físicos:

- **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH):**

El PCFICH indica el tamaño del campo de control en términos de número de símbolos OFDM (regiones sombreadas en rojo en la figura 2.8). La correcta decodificación de la información del PCFICH es esencial, pues si se decodifica erróneamente, el terminal (UE) no podrá saber cómo procesar el resto de canales de control, y tampoco sabrá donde comienza el campo de datos en cada subtrama.

El PCFICH está formado por dos bits de información que corresponden a los tres posibles tamaños de la región de control de 1, 2 o 3 símbolos, los dos bits están codificados, modulados con modulación QPSK y se mapean sobre 16 RE del primer símbolo OFDM de cada subtrama (se mapea sobre el primer símbolo OFDM porque el campo de control es desconocido hasta que el PCFICH es decodificado). [4]

- **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH):**

Como implica su nombre, este canal se utiliza para indicar el estado del Hybrid ARQ, es decir las señales HARQ de ACK o NACK para indicar la correcta recepción de un bloque de transporte.

Se mapea sobre el primer símbolo OFDM del campo de control (regiones sombreadas en rojo de la figura 2.8) y 3 grupos de RE, los tres grupos están separados aproximadamente un tercio del ancho de banda nominal correspondiente a la transmisión. [4]

- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):**

El objetivo principal de este canal físico es transportar la información sobre la programación (scheduling), lo hace con un mensaje conocido como Downlink Control Information (DCI) que incluye la siguiente información para un UE en particular o un grupo de UE:

- La programación de los recursos para el DL.
- Instrucciones sobre el control de potencia en el UL.
- Concesión de recursos para el UL.
- Indicaciones sobre la información del sistema.

El formato DCI puede tener varios tipos en función de su tamaño y uso, estos pueden incluir: tipo 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 2, 2A, 2B.

El PDCCH al igual que el PCFICH y el PHICH se encuentra en la región de control (regiones sombreadas en rojo de la figura 2.8) pero su mapeo sobre los RE está controlado por una estructura llamada Control -Channel Elements (CCE) conformada por 36 RE y el número utilizado de CCEs varía en función del tamaño del mensaje DCI y de las condiciones del canal que sufre durante la transmisión (se utilizarán más CCEs en malas condiciones del canal). [4]

- **Physical Broadcast Channel (PBCH):**

Como se dijo al principio del capítulo, lo primero que hace un usuario para poder acceder a la red es realizar el proceso llamado *Cell search*, y para poder realizarlo, en la señal recibida en el DL se transmiten dos señales especiales, la señal de sincronización primaria (PSS) y la señal de sincronización secundaria (SSS), la posición de estas señales en la trama es distinta dependiendo si la celda opera en modo FDD o TDD, a continuación en la figura 2.9 se muestra la posición de las dos señales de sincronización en el modo FDD, donde se puede observar que la señal PSS se transmite en el último símbolo del primer time slot de la subtrama 0 y 5, mientras que la señal SSS se transmite justo en el símbolo anterior al último del mismo time slot, es decir la señal SSS va justo antes que la señal PSS. (las regiones sombreadas en verde en el time slot 1 de las subtramas 0 y 5 de la figura 2.8).

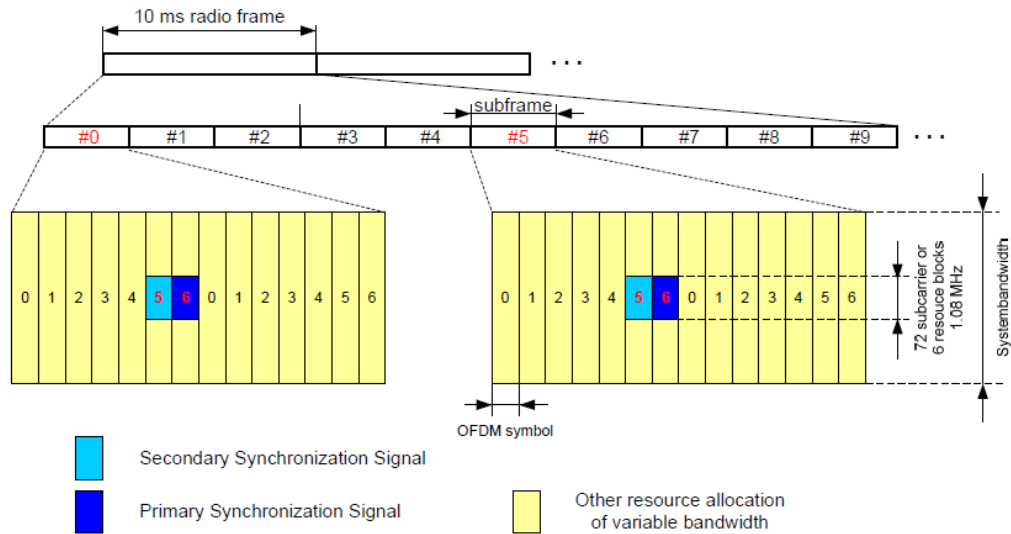


Figura 2.9 Mapeado de PSS y SSS sobre el símbolo OFDM en la trama de DL (modo FDD)

Se resalta que el hecho de la diferencia de la posición de estas dos señales entre el modo TDD y FDD es lo que permite a un terminal identificar el modo de operación de la celda.

Para una misma celda, las dos señales PSS que lleva una trama son idénticas y pueden tomar un valor de tres posibles (0, 1 o 2) y este valor con el que se identifica la señal PSS se le denota como Physical Layer Identity ($N_{ID}^{(2)}$). Una vez que el usuario ha detectado e identificado la señal PSS de una celda, tiene acceso a la siguiente información:

- Identificación de 5ms del tiempo de trama de una celda, lo que le permite saber también la posición de la señal SSS por su posición relativa a la señal PSS.
- Determinar el valor del parámetro Physical Layer Identity ($N_{ID}^{(2)}$).

Las señales SSS, a diferencia que las señales PSS no son iguales por lo que cada una puede ser identificada con un valor entre 0 y 167, este valor con el que se identifica tanto la señal SSS1 y la señal SSS2, se le denota como Physical Layer Cell Identity Group Number ($N_{ID}^{(1)}$). Una vez que el usuario ha identificado una de las señales SSS de una celda, tiene acceso a la siguiente información:

- Detección del momento en el que comienza la trama en el DL. Cabe destacar que el valor de las señales SSS1 y SSS2 son diferentes, para permitir al usuario detectar con la recepción de una sola de las dos señales, el momento en el que comienza la trama en el DL.
- Determinar el valor del Physical Layer Cell Identity Group Number ($N_{ID}^{(1)}$).

Con los valores ($N_{ID}^{(2)}$) y ($N_{ID}^{(1)}$) se determina la identidad física de la celda (PCI) que se calcula del siguiente modo: $N_{ID}^{(CELL)} = 3 N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}$. [6]

Una vez conocido el valor del PCI, el UE también puede localizar las señales de referencia que en función del PCI que tenga la celda se distribuyen de una manera o de otra (subportadoras sombreadas en azul en la figura 2.8).

Con la información obtenida de las señales PSS y SSS, el terminal se sincroniza con la celda y tiene conocimiento del momento en el que comienza la trama que transmite esa celda en concreto. Conseguido esto el siguiente paso que debe realizar el terminal para acabar el proceso de *Cell search*, es conseguir la información que emite la celda sobre el sistema, y es información que está emitiéndose repetidamente desde la red, para que una vez la tenga el terminal pueda tener acceso a ella y operar correctamente en la celda con la que se ha sincronizado.

En LTE, la información del sistema está transportada por dos mecanismos diferentes sobre dos canales de transporte diferentes, que son los siguientes:

- Master Block Information (MIB): representa la parte estática de la información del sistema.
- System Information Blocks (SIBs): representa la parte dinámica de la información del sistema.

Solo el MIB es transportado por el PBCH, está mapeado sobre las 72 subportadoras centrales o lo que es lo mismo los 6 RB centrales independientemente del ancho de banda, y se repite cada 40ms. (la región sombreada en verde en el time slot 2 de las subtramas 0 de la figura 2.8).

La información que transporta el MIB es la siguiente:

- Ancho de banda del sistema.
- Configuración del canal PHICH.
- Programación (scheduling) de los SIBs.

La parte dinámica de la información del sistema (SIBs) será explicada en el siguiente punto.

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):**

LTE define varios SIBs en función del tipo de información que portan, hay 16 tipos de SIBs, los de menor orden contienen información más relevante por lo que se repiten con mayor frecuencia.

Aquí solo se explicará el SIB1, éste es transportado por el PDSCH, y se emite en la subtrama 5 cada 80ms.

La información que transporta el SIB1 es la siguiente:

- La información sobre si el usuario puede o no acceder a la red.
- La programación (scheduling) del resto de SIBs.

2.4.2 Canales de Transporte

Los canales de transporte son los encargados de transportar la información desde la capa física hasta la capa MAC (Media Access Control), y varían entre los enlaces ascendente (UL) y descendente (DL), ya que cada uno opera de una manera diferente, aunque como en los canales físicos, solo se estudiarán los canales en DL. De los cuatro canales de transporte en el DL que se muestran a continuación solo los canales BCH y DL-SCH son relevantes para este trabajo:

- **Broadcast Channel (BCH):**

La información que contiene el canal físico PBCH (MIB) es transportada por el canal BCH.

- **Downlink Shared Channel (DL-SCH):**

La información que contiene el canal físico PDSCH (SIBs) es transportada por el canal DL-SCH.

- **Paging Channel (PCH):**

Este canal se utiliza para proporcionar comunicación al canal lógico PCCH.

- **Multicast Channel (MCH):**

Este canal se utiliza para transportar la información del canal lógico MCCH.

2.4.3 Canales Lógicos

Los canales lógicos están divididos en canales de control y canales de tráfico, siendo los primeros los más relevantes para este trabajo, aunque de los cinco canales lógicos de control que se muestran a continuación, solo uno de ellos, el BCCH interesa realmente de cara a este trabajo. Los canales de control son:

- **Broadcast Control Channel (BCCH):**

El eNodeB o lo que es lo mismo la red, utiliza este canal lógico para emitir la información del sistema (MIB y SIBs) de forma repetida, y por tanto la información que contiene es transportada por el canal BCH en caso del MIB, y por el canal DL-SCH en caso de los SIBs.

- **Paging Control Channel (PCCH):**

Este canal de control se utiliza para clasificar la información cuando se está buscando una unidad en la red.

- **Common Control Channel (CCCH):**

Este canal se utiliza para permitir el Access Random Information como por ejemplo el establecimiento de una conexión.

- **Multicast Control Channel (MCCH):**

Este canal se utiliza para la información requerida en una recepción multicast.

- **Dedicated Control Channel (DCCH):**

Este canal se utiliza para portar información de control específica de usuario, como las acciones de control de potencia.

3. Herramienta de trabajo

En este capítulo se explica en detalle la herramienta utilizada para el TFG, para ello es necesario conocer los puntos de partida para la realización del montaje. Se mostrarán dos montajes debido a que el primero no dió los resultados esperados, pero esos errores fueron el motivo que llevó a conseguir el buen resultado del segundo.

3.1 Condicionantes de partida

Para capturar la señal LTE se tenía que disponer de un montaje que nos permitiese realizar dicha tarea. Este montaje debía incluir la USRP B210 y Matlab, y por otro lado tenía que capturar a la frecuencia de muestreo $F_s = 30.72 \text{ Mmuestras/s}$. De esta manera, La USRP B210, Matlab y la frecuencia de muestreo se convierten en condicionantes de partida para realizar el montaje, por lo que se van analizar cada uno de ellos a continuación:

3.1.1 USRP B210

La B210 es una plataforma de radio definida por software (SDR) de la familia USRP fabricada por Ettus. [7]

La USRP está conformada por tres elementos principales, el transceiver AD9361 (bloque RFIC en la figura 3.1), la FPGA Spartan6 XC6SLX150 y el puerto USB 3.0 (bloque FPGA y conector USB 3.0 en figura 3.1 respectivamente).

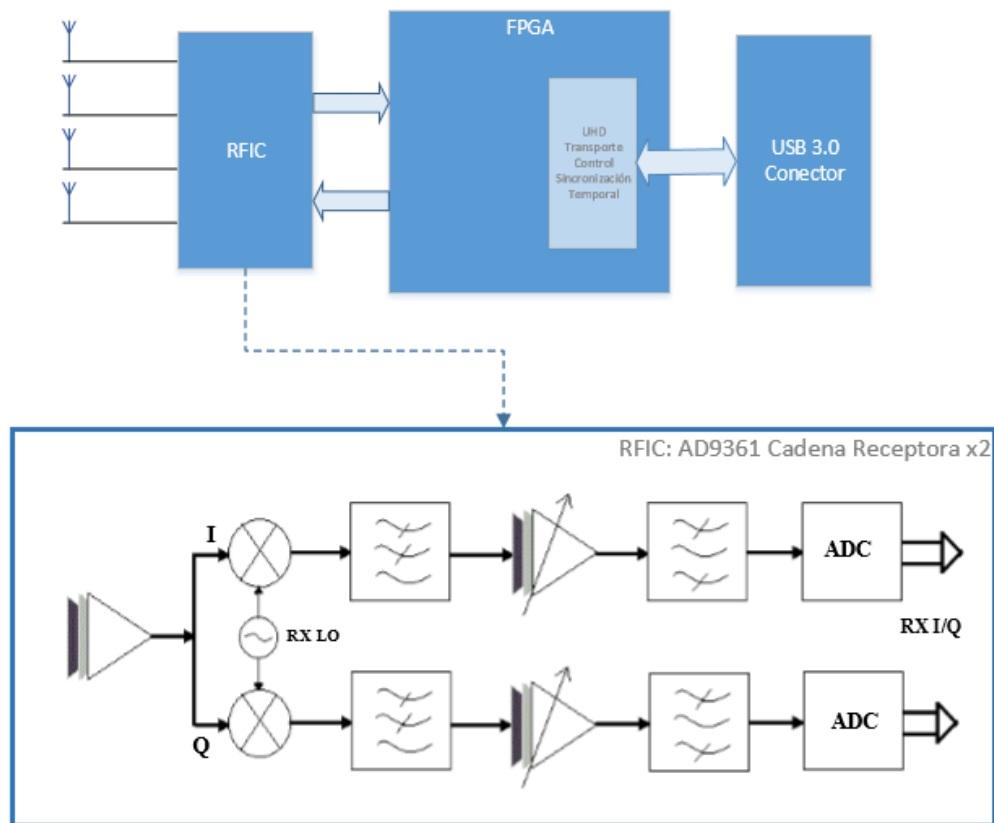


Figura 3.1 Arquitectura de la plataforma USRP B210

A continuación, se analiza cada elemento detalladamente:

- **Transceiver AD9361:**

El transceiver de Analog Devices conforma la parte RF de la USRP B210, cubre un amplio ancho de banda desde 70 MHz hasta 6 GHz y tiene la capacidad de configuración para un amplio rango de aplicaciones, como por ejemplo LTE.

Contiene dos canales independientes que permiten la recepción de señales de diferentes fuentes, permitiendo así la aplicación de técnicas MIMO. [8]

La parte encargada de recepción contiene todos los bloques necesarios para recibir señales RF, bajarlas en frecuencia y convertirlas en señales digitales, pues integra en un solo chip todos los componentes necesarios para realizarlo (RFIC: AD9361 cadena receptora en figura 3.1):

- En la parte RF, amplificadores de bajo ruido LNAs al comienzo de la cadena, oscilador local, un mezclador y un filtro paso bajo por cada rama, I (fase) y Q (cuadratura) para bajar en frecuencia (Banda Base).
- En la parte Banda Base, por cada rama I y Q hay una serie de amplificadores de ganancia variable (VGA) para el control automático de ganancia, y unos filtros banda base para eliminar posibles espurios.
- Mediante los ADCs que están conectados a la salida de los filtros paso banda, ya pasamos la señal Banda Base analógica a señal digital.

Una vez que la señal es digital ya está lista para ser procesada por la FPGA en un siguiente paso.

- **Spartan6 XC6SLX150 FPGA:**

La FPGA de Xilinx se encarga de controlar el transceiver AD9361 y del procesamiento de señal en tiempo real, pues es capaz de realizar el diezmado o interpolación de las señales recibidas o transmitidas por un factor configurable, R. [9]

Además, ofrece un equilibrio óptimo de bajo coste, bajo consumo y rendimiento, y la arquitectura interna está compuesta principalmente por los siguientes elementos funcionales:

- Logic cells: 147.443
- Memory: 4.824 Kb
- DSP Slices: 180 DSP
- Maximum I/O: 576

- **Puerto USB 3.0:**

Es la vía de transmisión de datos de la USRP, más concretamente de la FPGA con el PC. La alimentación de la USRP también se efectúa a través de la conexión USB 3.0. [7]

3.1.2 Matlab

El programa Matlab representa una parte fundamental para el trabajo, es la herramienta con la que se analiza la señal, utilizando el script proporcionado por Mathworks “Cell Search, MIB and SIB1 Recovery” incluido en la toolbox LTE de Matlab. Además, el hecho de que la USRP se pueda utilizar mediante System Objects de Matlab, y que sea un entorno totalmente conocido lo convierte en la opción más lógica para realizar el trabajo.

3.1.3 Frecuencia de muestreo y número de muestras

Actualmente en la ciudad de Santander, no se han aplicado las técnicas de Carrier Aggregation (introducida a partir de la Release 10), por lo que el máximo ancho de banda que se puede alcanzar es de 20MHz, y según los cálculos realizados para la tabla 2.1, para ese ancho de banda nominal, la frecuencia de muestreo $F_s = 30.72 \text{ Mmuestras/s}$. La captura de señal LTE se tiene que realizar a esa frecuencia de muestreo porque a priori no sabemos que ancho de banda para la transmisión ofrece el operador, por lo que se debe trabajar con el valor máximo de F_s , así cubrimos todos los posibles anchos de banda que se puedan utilizar para la transmisión. Otra razón importante es que las máximas prestaciones de la USRP B210 ($61.44 \text{ Mmuestras/s}$) se consiguen para una frecuencia de muestreo $F_s = 30.72 \text{ Mmuestras/s}$. [7]

Con respecto al número de muestras, el mínimo número a capturar es 2500000 Muestras, ya que como se comentaba en el punto 2.4, para asegurar la captura de un bloque

MIB y un bloque SIB1, se necesita un mínimo de 40ms y 80ms respectivamente, así que se fija el número de muestras al mínimo valor para conseguir 80ms de señal que nos garantice la captura de los dos bloques, que son un total de 2500000 aproximadamente.

Con estos tres puntos analizados, se procede a describir los dos montajes que se llevaron a cabo para la realización del trabajo.

3.2 Montaje inicial

Al comienzo del trabajo, se optó por utilizar el montaje formado a partir de los siguientes bloques:

- USRP B210
- USRP Support Package (integra en Matlab el driver UHD de Ettus con la ayuda de Communications System Toolbox).
- Matlab para Windows
- Manejo basado en System Objects de Matlab

De este modo y como se puede ver en la figura 3.2, mediante el System Objects de Matlab, La USRP B210 podría capturar señal LTE, y convertir la señal recibida en una señal digital y tras ser procesadas en la FPGA, las muestras pasarían a Matlab a través del puerto USB 3.0, todo esto bajo control del driver UHD (su función se explicará más adelante), una vez en Matlab se podrían procesar las muestras de la señal recibida con el ejemplo de Mathworks.

Con este montaje no fue posible realizar la captura de la señal LTE ya que no se podían alcanzar las máximas prestaciones de la USRP B210 (61.44Mmuestras/s), y tras analizar la situación se llega a la conclusión de que el problema se debe a una cuestión de rendimiento, debida a todas las partes del montaje:

- Puerto USB. Puede ser USB2.0 o USB3.0.
- Driver que depende del S.O.
- El propio sistema operativo, que puede estar más o menos cargado con procesos/servicios y ser más o menos eficiente.
- La aplicación (Matlab) y su relación con el S.O. y el driver.
- El hardware del equipo, en particular el procesador y la memoria (y el puerto USB).

Se puede decir que solo se podrían alcanzar las máximas prestaciones de la USRP B210 (61.44 Mmuestras/s) de forma sostenida y fiable si todos los elementos anteriores fueran capaces de manejarlo, y eso en windows desde Matlab usando system objects no es posible.

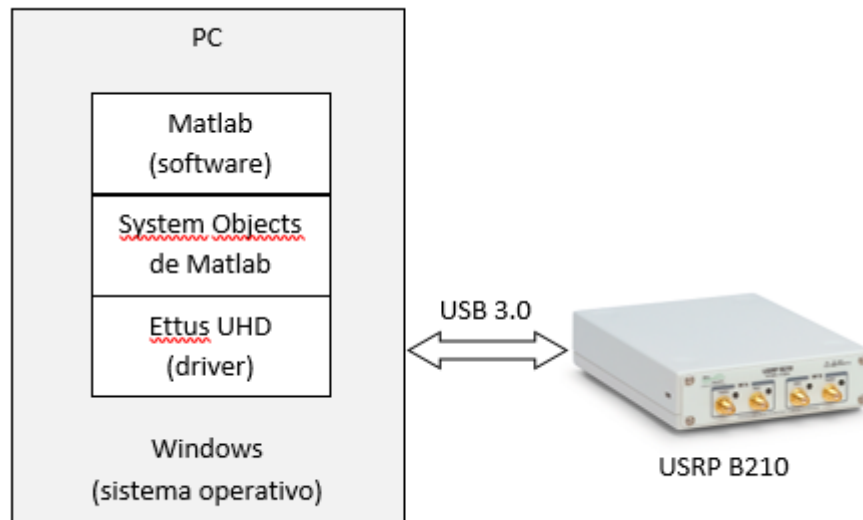


Figura 3.2 Estructura Setup de trabajo

3.3 Montaje final

Debido a los problemas del montaje original, se buscó una alternativa diferente al planteamiento original, encontrando finalmente un montaje adecuado.

En el desarrollo del nuevo montaje, ha influido la disposición de un software desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC). Este software, como el resto de bloques que conforman el sistema, se analiza detalladamente a continuación:

- B210.
- Matlab para Ubuntu:

El sistema operativo es Ubuntu 14.04 LTS y por tanto se necesita instalar una versión Unix de Matlab, en este caso la versión R2015b, ya que para el desarrollo del trabajo se necesita mínimo esa versión, pues es la que contiene las últimas actualizaciones de la Toolbox LTE necesarias para utilizar el script proporcionado por Mathworks.

- GTIS:

El software desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC), el GTEC Testbed Interface Software (GTIS) es el nexo de unión entre el código de Matlab y el UHD (Driver de Ettus) y con el cual se lleva a cabo la captura de tramos de señal suficientemente largos para poder analizar una trama LTE de manera eficiente y rápida. [10]

Ventajas de GTIS:

- Ofrece comunicación directa con la USRP B210.
- Se utiliza para inicializar o modificar la configuración, leer las muestras que se van a transmitir desde el disco (en este caso SSD) o guardar las muestras adquiridas en él.

- Desarrollado en C++ con las funciones wrappers de Matlab.

Una vez instalado, se puede tener acceso a los siguientes directorios que contienen todo lo necesario para correr GTIS e interactuar con él a través de Matlab:

```
testbed@ubuntu:~/gtisbuild/gtismain$ tree -L 2
.
├── bin
│   ├── convert_gtis_file_to_usrp_format
│   ├── gpsdo_test
│   ├── gtis_rx
│   └── gtis_tx
├── examples
│   └── wimax
├── gtisenv.sh
├── matlab
│   ├── GTIS_init.m
│   ├── netcommands
│   ├── pnet
│   ├── usrp
│   ├── usrpfileformat
│   └── utils
├── temp
│   ├── rxsignals
│   └── txsignals
└── 12 directories, 6 files
testbed@ubuntu:~/gtisbuild/gtismain$
```

Figura 3.3 Directorios GTIS [10]

El directorio “bin” contiene los ejecutables de GTIS, los más importantes son `gtis_tx` y `gtis_rx`, que gestionan las peticiones para el transmisor y el receptor respectivamente.

El directorio `gtisenv.sh` define las variables de entorno necesarias para el código Matlab.

El directorio Matlab contiene todos los scripts y funciones de Matlab necesarias para interactuar con GTIS desde Matlab.

El directorio `temp` es usado para guardar temporalmente los archivos que contienen las señales a transmitir o las señales adquiridas en recepción.

- **UHD:**

USRP Hardware Driver (UHD) se integra en Matlab mediante USRP Support Package.

UHD es una librería de espacio de usuario que puede ser ejecutada en un procesador de propósito general (GPP), y que controla y se comunica con todos los dispositivos USRP como es el caso de nuestra USRP B210.

La plataforma B210 transmite y recibe señales RF, y el UHD le proporciona el control necesario para transportar las muestras desde y hasta ella, aparte de controlar varios parámetros como la frecuencia de muestreo, la frecuencia central, la ganancia, etc. [11]

Entonces, en este caso y apoyándonos en la figura 3.2, mediante el software de GTIS, La USRP B210 podría capturar señal LTE, y convertir la señal recibida en una señal digital y tras ser procesadas en la FPGA, las muestras pasarían a Matlab a través del puerto USB 3.0, todo esto bajo control del driver UHD, y una vez en Matlab se podrían procesar las muestras de la señal recibida con el ejemplo de Mathworks.

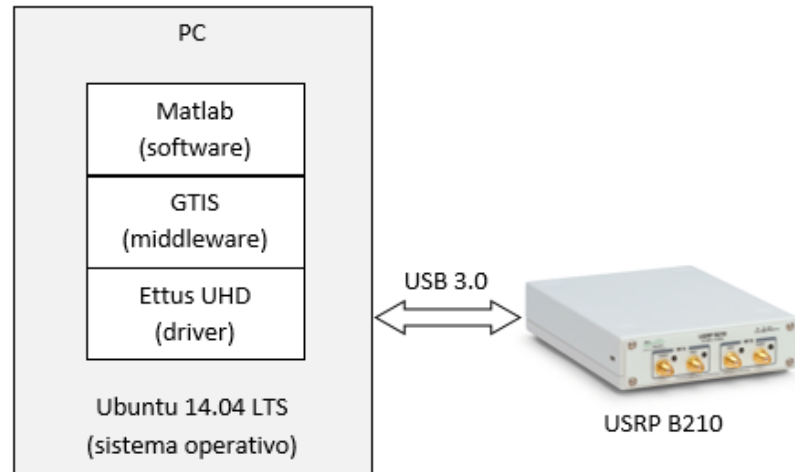


Figura 3.4 Estructura Setup de trabajo definitivo

4. Desarrollo del trabajo

Una vez definida la herramienta de trabajo, en este capítulo se describirán las dos partes de este, por una parte, está el código para capturar señal LTE utilizando la USRP B210 y por otra está el código para procesar la señal capturada utilizando la toolbox LTE de Matlab.

También se mostrará el diseño de una GUI de Matlab (Graphic User Interface) que reúne las dos partes del trabajo con el objetivo de facilitar la interacción del usuario con el código de Matlab.

4.1 Captura de señal LTE

El código dedicado a esta parte es el más importante ya que es el que permite capturar las señales LTE a tiempo real y así después poder procesarlas, y por tanto ha sido la parte que ha trazado la línea de este TFG, convirtiendo la captura de señal como objetivo principal del trabajo.

La captura de señal LTE se fijó como objetivo ya que representa la parte de radio definida por software o SDR, que es una de las cuatro tecnologías fundamentales que caracteriza una red 4G.

Al ser la parte dedicada a la tecnología SDR, es aquí donde se utiliza la plataforma USRP B210.

Como se explicaba en el capítulo anterior, el primer setup de trabajo planteado utilizaba USRP Support package para integrar en Matlab el driver UHD de Ettus (Figura 3.1) por lo que el primer código implementado para capturar estaba basado en System Objects de Matlab. Era la opción más lógica para empezar ya que permitía utilizar la USRP desde un entorno conocido como Matlab, pero a la hora de intentar capturar no funcionaba y tras varias pruebas e intentos se llegó a la conclusión de que con el sistema operativo windows (utilizado en este primer setup) desde Matlab usando System Objects no se podían alcanzar las máximas prestaciones de la USRP B210 (61.44 Mmuestras/s) de forma sostenida y fiable.

Una vez conocida la causa del mal funcionamiento del código se opta por rediseñar el setup de trabajo y gracias al software GTIS (punto 3.3) desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC), se pudo prescindir del USRP Support Package, ya que el software GTIS funcionando en el sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS permite la unión entre el código de Matlab y el UHD (Driver de Ettus) consiguiendo así una mayor eficiencia.

Como Matlab sigue siendo el entorno de trabajo con el nuevo setup (figura 3.2) se preparó un nuevo código siguiendo las instrucciones para inicializar GTIS y así poder interactuar con la USRP B210 desde Matlab y, efectivamente, los problemas habían quedado resueltos ya que con este código ya se pudo capturar señal LTE y a continuación se explican los puntos más importantes de este código.

Básicamente en este código se definen parámetros de recepción de la USRP, algunos parámetros son más estáticos pues ya se indica en cierta medida los valores que tienen que tomar como por ejemplo indicar cuantas antenas se van a utilizar en recepción, sin embargo, hay cuatro parámetros que son más dinámicos ya que dependen de lo que se vaya a capturar. Los cuatro parámetros y el valor que se les asigna en este caso para poder capturar señales LTE en DL correctamente son la frecuencia de muestreo, el número de muestras a capturar, la frecuencia central y la ganancia:

- **Frecuencia de muestreo (F_s):**

Apoyándose en la tabla resumen (tabla 4.1) se puede apreciar que el mayor ancho de banda nominal es de 20 MHz, sabiendo que la frecuencia de muestreo se define como $F_s = \Delta_f N_{FFT} = 15000 N_{FFT}$ entonces $F_s = 30.72$ Mmuestras/s ($N_{FFT} = 2048$ para $W = 20$ MHz).

En el trabajo se captura a la frecuencia de muestreo $F_s = 30.72$ Mmuestras/s, en consecuencia, la frecuencia del conversor analógico digital $F_{ADC} = R \cdot F_s = 61.44$ Mmuestras/s (R es el factor de diezmado en la USRP B210 y es igual a 2), el valor de $F_{ADC} = 61.44$ Mmuestras/s coincide justamente con el máximo valor que puede alcanzar la USRP B210, lo que significa que aparte de estar alcanzando las máximas prestaciones de la USRP B210, este valor también nos indica que esta plataforma SDR, en cierta medida está pensada para funcionar en los sistemas 4G (en este caso tecnología LTE y LTE-Advanced).

- **Número de muestras (NSamples):**

Una de las funciones que se va a estudiar y que se detallará más adelante es el MIB (Master Information Block). El MIB corresponde a un bloque de transporte BCH. El BCH Transmission Time Interval (TTI), o el tiempo necesario para transmitir un único bloque de transporte, es 40 ms o 4 tramas. El BCH se transmite en 4 partes, cada parte mapeada en la primera subtrama (subtrama 0) de una trama y es posible que cada transmisión sea decodificable independientemente, dependiendo de las condiciones de la señal. Para asegurarse de que la subtrama 0 se recibe, la captura debería tener una longitud de por lo menos 11 tramas, para tener en cuenta la posibilidad de que la captura empiece durante la subtrama 0. Si hay malas condiciones de señal, las 4 partes de la TTI podrían ser necesarias, en cuyo caso la captura debería tener una longitud de al menos 41 subtramas. Una situación similar se aplica al SIB1; se transmite en la subtrama 5 de cada trama par, con 4 Redundancy Versions (RVs) diferentes siendo transmitidas consecutivamente, resultando un periodo global de 80ms o 8 tramas. Por lo tanto, se necesitan 21 subtramas de captura para asegurar recepción de un único RV de SIB1 (en la subtrama 5 de una trama par), pero hasta 81 subtramas capturadas son necesarias si las condiciones de la señal son tales que todos los RV necesitan ser combinados.

Por lo tanto, según lo explicado en el párrafo anterior se tienen que capturar 81 subtramas mínimo, es decir un trozo de señal de duración 81 ms (recordar que una subtrama dura 1 ms) y sabiendo que la frecuencia de muestreo a la que se captura la señal es $F_s = 30.72$ Mmuestras/s, entonces el mínimo número de muestras tiene que ser $NSamples \geq 2488320$ Muestras ($NSamples = F_s \cdot T$).

- **Frecuencia de la portadora o frecuencia central (F_c):**

Para este parámetro de entrada se puede utilizar cualquiera de las bandas reservadas para LTE, pero para el trabajo solo se ha utilizado la Banda 3 de LTE (1800 MHz) y en las frecuencias reservadas para el DL que son las de la derecha como se aprecia en la siguiente imagen:

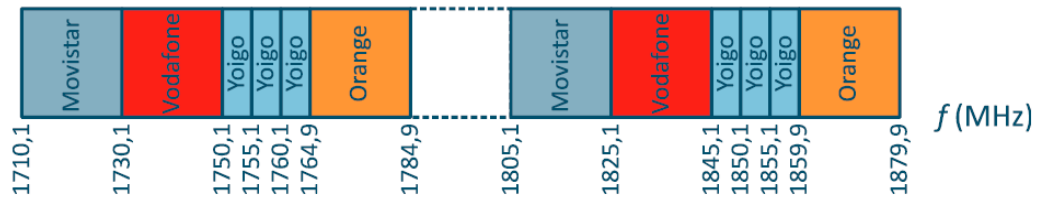


Figura 4.1 Banda 3 de LTE [2]

Se ha elegido esta banda ya que es la de mayor cobertura 4G en España, y además opera en modo dúplex FDD (frecuencias emparejadas).

Se puede apreciar en la figura 4.1 que la banda está ocupada por los cuatro operadores principales cuyas frecuencias centrales F_c son las siguientes:

- Movistar: $F_c = 1815.1$ MHz.
- Vodafone: $F_c = 1835.1$ MHz.
- Yoigo: $F_c = 1852.6$ MHz.
- Orange: $F_c = 1869.9$ MHz. (antes 1872.4 MHz).

- **Ganancia (Gain):**

Este parámetro de entrada es bastante variable pues se fija un valor de ganancia en función del nivel de señal que se aprecie durante la captura. En algunas capturas se puede tener un nivel muy bajo de señal, por lo que lo ideal sería fijar un valor alto de ganancia, sin embargo, si el nivel de señal es bueno y la ganancia fijada es demasiado alta se pueden saturar los amplificadores (LNAs y VGAs) y los ADCs. La Ganancia se introduce en dB y lo más común es que su valor se sitúe entre (20-60) dB.

4.2 Procesado de las señales LTE

El ejemplo “Cell Search, MIB and SIB1 Recovery” de Mathworks que proporciona la Toolbox LTE de Matlab fue el punto de partida de este trabajo fin de grado (TFG), ya que proporcionaba las funciones necesarias para poder procesar las señales LTE del enlace descendente que se pudieran capturar utilizando la USRP B210, por lo que entender estas funciones, toda la información que proporcionan acerca de la señal LTE y como adecuarlo al trabajo ha sido el otro objetivo del TFG.

Este ejemplo de Mathworks muestra cómo la LTE System Toolbox puede ser usada para sincronizar, demodular y decodificar completamente una señal LTE en vivo. Antes de que el User Equipment (UE) pueda comunicarse con la red, debe realizar la búsqueda de las celdas y procedimientos de selección y obtener información inicial del sistema. Esto implica adquirir una sincronización a nivel de slot y de trama, encontrando la identidad de

la celda y decodificando el Master Information Block (MIB) y los System Information Blocks (SIBs). Este ejemplo demuestra este proceso y decodifica el MIB y el SIB1, el primero de los System Information Blocks. Para decodificar MIB y SIB1, se requiere un receptor exhaustivo, capaz de demodular y decodificar la mayoría de los canales y señales del downlink. [12]

- **Introducción:**

Como se explicó en el punto 2.4, el hecho de decodificar los bloques MIB y SIB1, permite al usuario acceder a la información más esencial del sistema:

- Ancho de banda del sistema.
- System Frame Number (SFN).
- La configuración del canal PHICH.
- La programación de otra información del sistema.

Y con los distintos bloques del ejemplo, se puede decodificar tanto el MIB, como el SIB1 como se describe a continuación:

- **Carga y procesamiento de Formas de Onda I/Q:**

Este ejemplo nos proporciona la opción de utilizar una señal LTE que puede ser generada usando la LTE System Toolbox, y representaría una señal capturada en condiciones ideales. También proporciona la posibilidad de usar una captura de una única antena I/Q de un eNodeB con dos antenas transmisoras (recordar que el trabajo se centra en el enlace descendente por tanto las señales que se estudian son emitidas desde un eNodeB que representa el Hardware que se conecta a la red móvil para comunicarse con los usuarios-en este caso les denotamos como UE- es decir es el equivalente a una estación base BTS de una red GSM).

Disponer de las dos capturas mencionadas en el párrafo anterior fue esencial para poder estudiar a priori la forma de la señal LTE y todas las funciones del ejemplo de Mathworks. En concreto la captura ejemplo (no la generada por Matlab) se realizaba a una frecuencia de muestreo de 15.36Mmuestras/s, lo cual era suficiente para muestrear correctamente todos los anchos de banda de eNodeB hasta 10MHz: 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz. Pero la frecuencia de muestreo utilizada para las capturas realizadas en el trabajo ha sido de 30.72Mmuestras/s (detallado en el punto 4.1.), por lo cual se puede muestrear anchos de banda de hasta 20MHz (el máximo ancho de banda en LTE sin la opción de Carrier Aggregation introducida a partir de la Release 10 con la que se pueden alcanzar anchos de banda de hasta 100MHz).

Las capturas realizadas se guardan en un archivo y este se sustituye por el archivo “eNodeBOutput.mat” que es el archivo con la captura ejemplo.

Volviendo al estudio del ejemplo, antes de decodificar el MIB, el UE no conoce el ancho de banda completo de la señal. Las señales de sincronización primarias y secundarias (PSS y SSS) y el PBCH (que contiene el MIB) se encuentran en las 72 subportadoras centrales (6 bloques de recursos) del ancho de banda del sistema, permitiendo al UE demodular inicialmente esta región central. Por lo tanto, el ancho de banda se establece inicialmente a 6 bloques de recursos. La forma de onda I/Q necesita ser remuestreada en consecuencia.

La velocidad de muestreo para la búsqueda de celdas inicial se establece usando la función *lteOFDMInfo* configurado para 6 bloques de recursos. “enb.CyclicPrefix” se establece temporalmente en la llamada a *lteOFDMInfo* para suprimir un aviso de valor por defecto (no afecta a la velocidad de muestreo).

- **Búsqueda de celdas, Longitud del Prefijo Cíclico y Detección de Modo Dúplex:**

En este bloque se llama a la función *lteCellSearch* para obtener la identidad de celda y el desplazamiento temporal “offset” para la primera cabecera de trama. La búsqueda de celda se repite para cada combinación de longitud de prefijo cíclico y modo dúplex y la combinación con la correlación más fuerte permite que estos parámetros sean identificados. Se realiza un gráfico con la correlación entre la señal recibida y la señales PSS/SSS para la identidad de celda detectada.

- **Estimación y corrección del desplazamiento de frecuencia:**

Antes de la demodulación OFDM, cualquier desplazamiento de la frecuencia significativo debe ser eliminado. El desplazamiento de frecuencia en la forma de onda I/Q se estima y corrige usando las funciones *lteFrequencyOffset* y *lteFrequencyCorrect*. El desplazamiento de frecuencia se estima mediante la correlación con el prefijo cíclico y por lo tanto puede estimar desplazamientos hasta +/- la mitad del espaciado entre subportadoras, es decir, +/- 7.5KHz.

- **Demodulación OFDM y Estimación de Canal:**

La forma de onda I/Q OFDM tras bajar la frecuencia de muestreo se demodula para producir una malla de recursos “rgrid”. Esto se usa para realizar estimación de canal. “hest” es la estimación del canal, “nest” es la estimación del ruido para ecualización MMSE (Minimum Mean Square Error) y “cec” es la configuración del estimador del canal.

Para la estimación del canal este ejemplo asume 4 señales de referencia específicas a las celdas. Esto significa que el canal estima para cada antenna receptora de todos los posibles puertos de señal de referencia específicos para cada celda que estén disponibles. El número real de puertos de señal de referencia específicos a la celda no se conoce todavía. La estimación del canal solo se realiza en la primera subtrama, es decir, usando los primeros L símbolos OFDM en “rxgrid”.

- **Demodulación PBCH, Decodificación BCH y Análisis de MIB:**

Se decodifica el MIB, así como el número de puertos de señal de referencia específicos para la celda que se transmiten como una máscara en el CRC BCH. La función *ltePBCHDecode* establece un tiempo de trama módulo 4 y lo devuelve en el parámetro [nfmód4]. También devuelve los bits de MIB en el vector “mib” y el verdadero número de puertos de señal de referencia específicos para la celda que es asignado en “enb.CellRefP”

a la salida de esta llamada a la función. Si el número de puertos de señal de referencia específicos para la celda se decodifica como “enb.CellRefP = 0”, esto indica un error al decodificar el BCH. La función *lteMIB* se usa para analizar el vector “mib” y añadir los campos relevantes a la estructura de configuración “enb”. Tras la decodificación del MIB, el ancho de banda detectado se guarda en “enb.NDLRB”.

- **Demodulación OFDM en Ancho de Banda Total:**

Conocido el ancho de banda de la señal, se remuestrea a la velocidad de muestreo nominal usada por la LTE System Toolbox para ese ancho de banda.

La estimación y corrección de desplazamiento de frecuencia se realiza en la señal remuestreada. También se realizan sincronización temporal y demodulación OFDM.

- **Decodificado de SIB1:**

En este bloque se realiza la decodificación del SIB1. Los pasos para la decodificación se realizan en un bucle para cada ocurrencia de una subtrama portando el SIB1 en la señal recibida. La señal de referencia SIB1 se transmite en la subtrama 5 de cada trama par (detallado en punto 4.1.), así que la señal de entrada se comprueba primero para establecer que al menos una ocurrencia de SIB1 está presente. Para cada subtrama SIB1, la respuesta de la magnitud de la estimación del canal se dibuja, así como la constelación del PDCCH recibida.

Una vez analizado el mensaje de DCI, éste proporciona la configuración del PDSCH que lleva el SIB1, se demodula el PDSCH y se decodifican por tanto los bits de DL-SCH que proporcionan los bits del SIB1

4.3 Interfaz gráfica de usuario en Matlab (GUI)

Se ha programado una aplicación mediante la Graphic User Interface de Matlab (GUI) para juntar los códigos de los puntos 4.1. y 4.2. y además facilitar la interacción del usuario con el programa.

Consta de dos interfaces encadenadas de la siguiente manera:

- **Interfaz de captura:**

Sirve para ejecutar el código de captura que se explica en el punto 4.1., se pueden introducir los parámetros por teclado y por consiguiente ejecutar la captura dando además la opción de guardar la captura para su posterior procesado en la siguiente etapa. La figura 4.3 muestra la interfaz Captura:

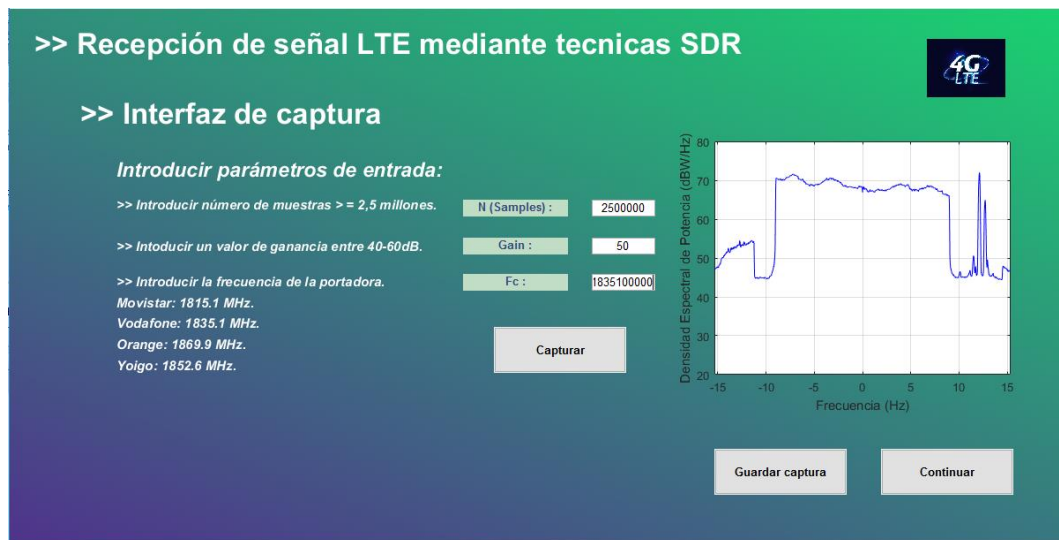


Figura 4.2 Interfaz 2 - Captura

- **Interfaz de Procesado:**

Con esta Interfaz se puede procesar la señal LTE capturada en la etapa anterior, por lo que sirve para ejecutar el código explicado en el punto 4.2., al usuario también se le da la opción de procesar un ejemplo en condiciones ideales a modo de ayuda. La figura 4.4 muestra una captura de la interfaz Procesado:



Figura 4.3 Interfaz 3 - Procesado

5. Resultados

En este capítulo de resultados se presentan varias capturas tomadas en diferentes localizaciones de la ciudad de Santander. En cada una de las localizaciones se han tomado capturas a la frecuencia central de tres de los cuatro operadores principales del país (Movistar, Vodafone, Orange y Yoigo), pero únicamente en las frecuencias de la banda 3 de LTE (Figura 2.1).

El ejemplo de Mathworks utiliza varias funciones disponibles en la toolbox LTE de Matlab, algunas más sencillas como la función *SpectrumAnalyzer* que dibuja el espectro de la señal y otras más complejas como *lteDLChannelEstimate* que realiza la estimación de canal, los parámetros que devuelven se pueden representar en una figura interactiva, cuya función *hSIB1RecoveryExamplePlots* también está disponible en la toolbox, por lo que se han aprovechado para mostrar los primeros resultados que se adquieren tras la decodificación a ciegas, *blind decoding*, que realiza un UE a una señal LTE en DL para poder acceder a la red móvil.

Las figuras que pueden ser representadas para cada captura son las siguientes:

- Parte real y parte imaginaria de la señal recibida.
- Densidad espectral de potencia de la señal recibida.
- Espectro de la señal recibida (con la función de la toolbox LTE).
- Correlación de las señales de sincronización PSS y SSS.
- Constelación del canal físico de control en DL PDCCH (recordar que el DCI se transmite sobre este canal).
- Módulo de la estima de la respuesta frecuencial del canal (para las subportadoras que portan el SIB1).

Las primeras capturas que se muestran a continuación, fueron de las primeras en realizarse tras conseguir que funcionara el montaje de trabajo, sin embargo, el resto de capturas se realizaron tras finalizar el estudio total del trabajo con el fin de comparar el comportamiento de las señales en diferentes entornos.

5.1 Capturas iniciales

Estas pruebas fueron las primeras en realizarse cuando se dispuso del montaje adecuado para capturar. Se realizaron en el laboratorio del Grupo de Tratamiento Avanzado de Señal (GTAS), y para obtener la mejor cobertura posible, era necesario situarse cerca de la ventana, pues únicamente se disponía de un nivel alto de señal cuando la antena de la USRP estaba más cerca de la ventana.

Se realizaron varias capturas para probar en las bandas de los distintos operadores (Movistar, Orange, Vodafone y Yoigo), que se reparten la banda 3 de LTE, y al principio el espectro de las señales no estaba centrado, lo que indicaba que no se estaba utilizando la frecuencia de la portadora como frecuencia central, por lo que una vez calculado el valor de la portadora, se volvía a capturar.

A continuación, se va a mostrar una captura por cada uno de los operadores antes mencionados, pero primero se repasarán los parámetros de entrada que se utilizaron para cada una de las capturas mostradas.

- Captura Movistar:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - $F_C = 1815.1$ MHz.
 - $F_s = 30.72$ Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

La figura 5.1 (a) representa el espectro de la señal recibida y en ella podemos ver que el ancho de banda ocupado de la señal en transmisión, es $B=18$ MHz por lo que el ancho de banda nominal es $W=20$ MHz, es decir que Movistar en esta frecuencia utiliza todo el ancho de banda que permite LTE (las técnicas de carrier aggregation todavía no están disponibles en Santander actualmente [2]).

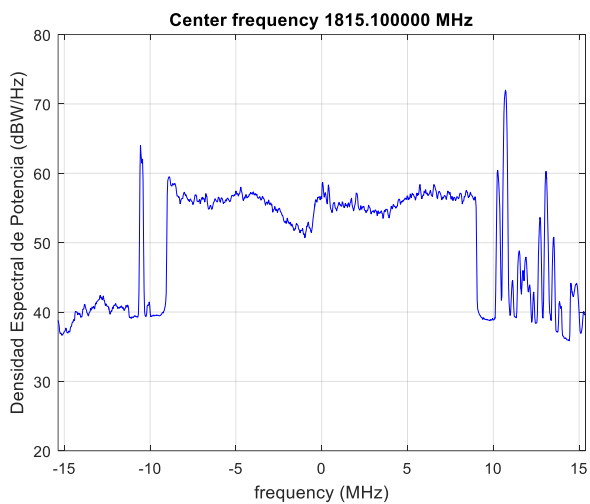
La figura 5.1 (b), también se muestra el espectro de la señal recibida, pero lo que hace es dibujar el mínimo, el máximo y la densidad espectral de potencia para una realización, esta figura puede ser interesante para apreciar los espectros que hay fuera de banda, como es el caso de esta misma figura, donde se aprecia el espectro de una señal GSM entorno a la frecuencia de 10 MHz.

En la imagen 5.1(c) se pueden apreciar los picos de correlación de las señales de sincronización con la señal recibida para la identidad de celda detectada, y que tal y como se explicaba en el punto 4.2, la identidad de celda se conseguía con la correlación de los tres posibles valores que puede tomar la identidad de capa física con el valor de correlación más alto, resultante de la combinación de prefijo cíclico y modo dúplex.

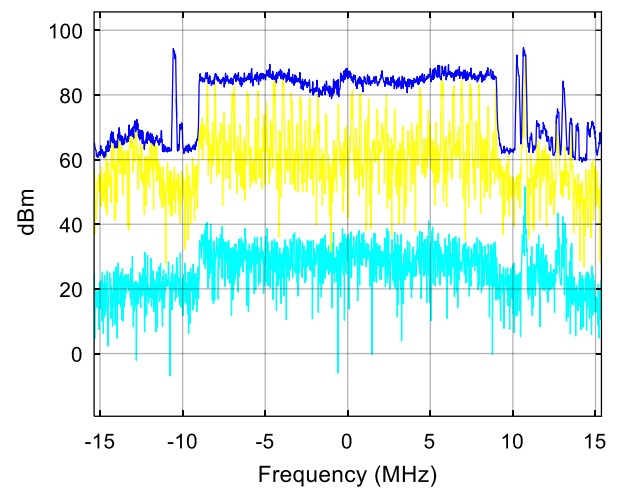
En la figura 5.1 (d) se representa la constelación PDCCH (siempre QPSK por definición del Standard [1]) no es tan mala y se puede distinguir los valores que pueden tomar los símbolos QPSK.

En la figura 5.1 (e) se muestra una gráfica en tres dimensiones, que representa el módulo de la estima de la respuesta frecuencial del canal en lineal, con respecto a los símbolos OFDM y a las subportadoras, estas últimas se puede apreciar que son 1200, que tiene lógica ya que para un ancho nominal $W=20$ MHz, el número total de subportadoras es 1200. Respecto a los símbolos OFDM, son 14 símbolos de una subtrama, lo que significa que el prefijo cíclico utilizado para las tramas es de tipo 'Normal'.

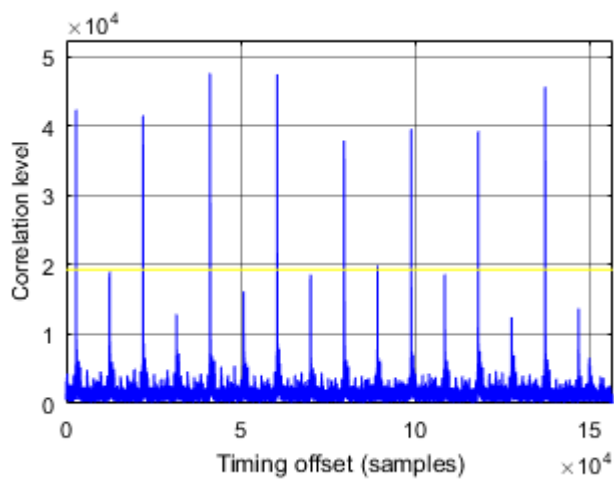
En la figura 5.1 (f) se representa la respuesta frecuencial del canal en dB, de esta forma se puede ver que no todas las subportadoras están sufriendo el mismo canal (la subportadora número 500 aproximadamente está experimentando un fading profundo). La nube que hay en el centro de la constelación PDCCH puede llamar la atención, pero simplemente se trata de las subportadoras que no están moduladas ya que para control solo se modula un número concreto de ellas (las que portan el SIB1 por ejemplo). [4]



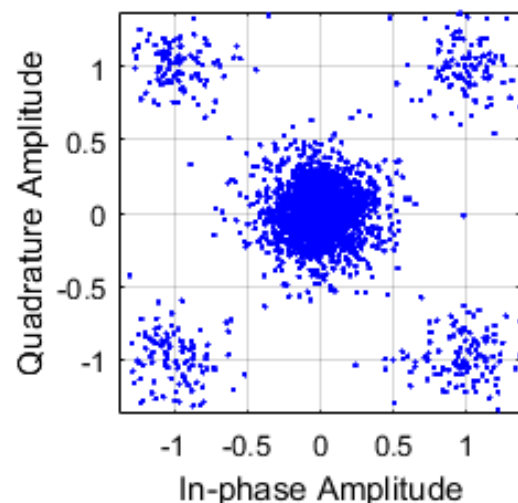
(a) DEP



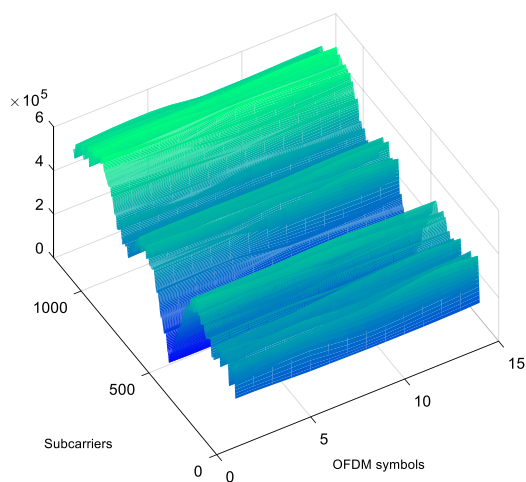
(b) Spectrum Analyzer



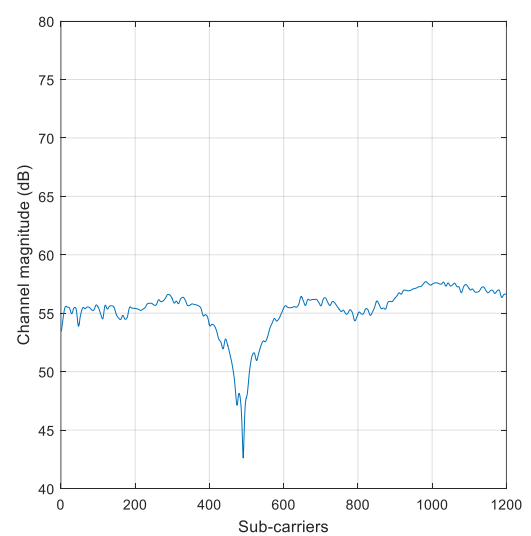
(c) Correlación PSS y SSS



(d) Constelación PDCCH



(e) Estimación de canal

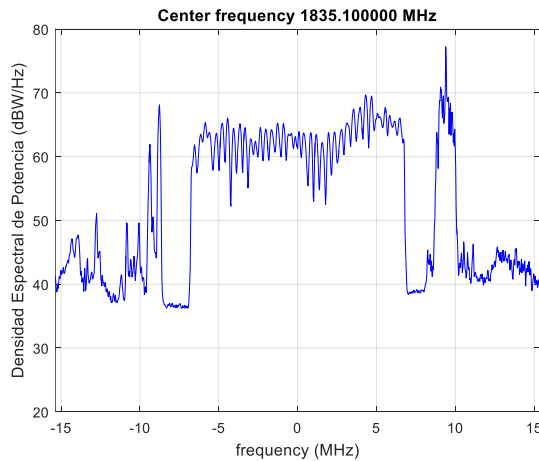


(f) Respuesta en frecuencia del canal

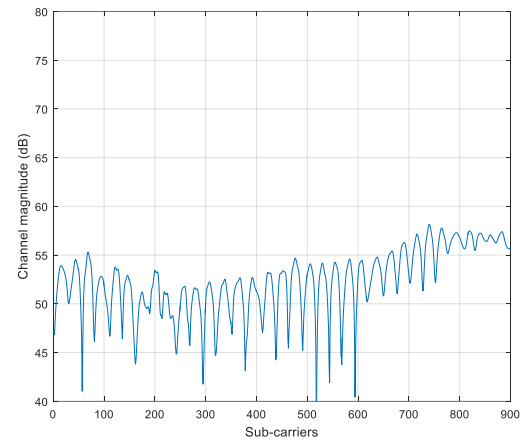
Figura 5.1 Captura Movistar - Laboratorio

Para las siguientes capturas, solo se mostrarán la densidad espectral de potencia, la respuesta en frecuencia del canal y la constelación PDCCH.

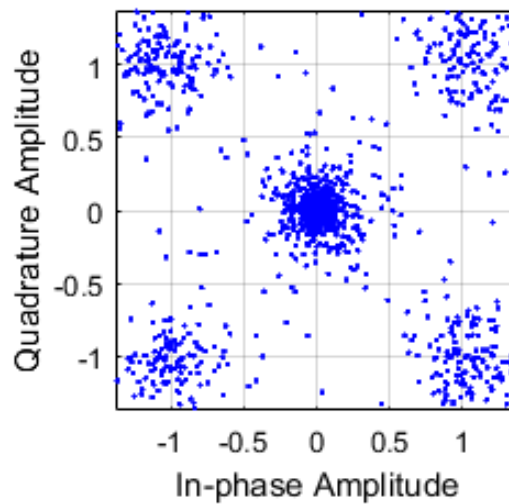
- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - $F_C = 1835.1$ MHz.
 - $F_S = 30.72$ Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.



(a) DEP



(b) Respuesta frecuencial del canal

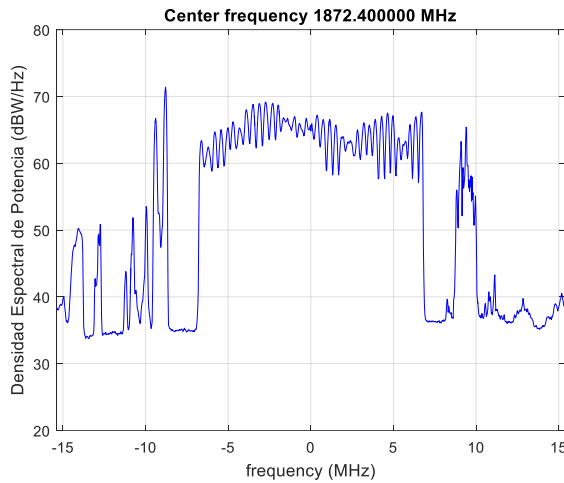


(c) Constelación PDCCH

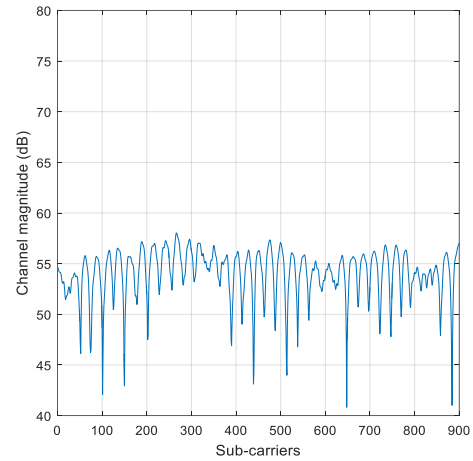
Figura 5.2 Captura Vodafone - Laboratorio

La diferencia que se aprecia en esta captura comparándola con la de Movistar es que el ancho de banda nominal es $W=15$ MHz, y el canal es selectivo en frecuencia.

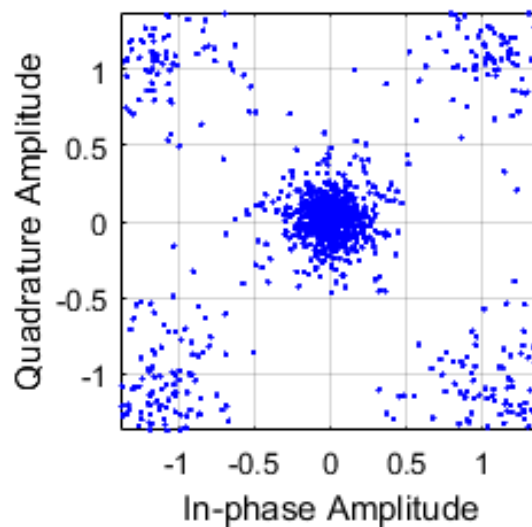
- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - $F_C = 1872.4$ MHz.
 - $F_S = 30.72$ Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.



(a) DEP



(b) Respuesta frecuencial del canal



(c) Constelación PDCCH

Figura 5.3 Captura Orange – Laboratorio

Orange al igual que Vodafone ofrece un ancho de banda nominal $W=15$ MHz, y el canal es selectivo en frecuencia también.

- Captura Yoigo:
 - NSamples: >2500.000 muestras.
 - $F_C = 1852.6$ MHz.
 - $F_S = 30.72$ Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

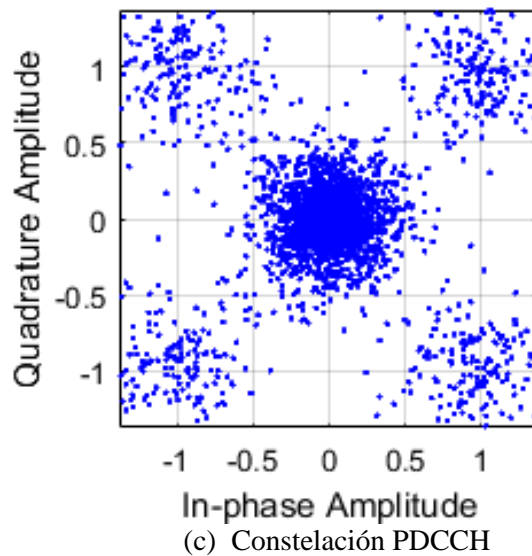
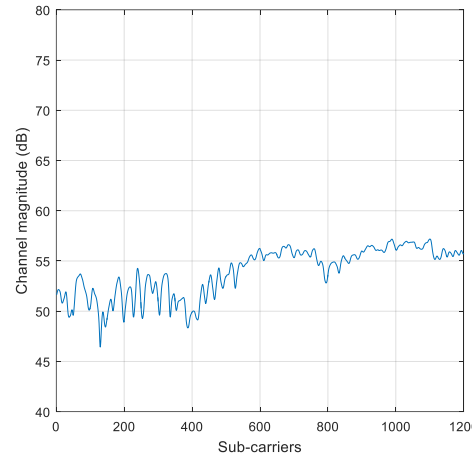
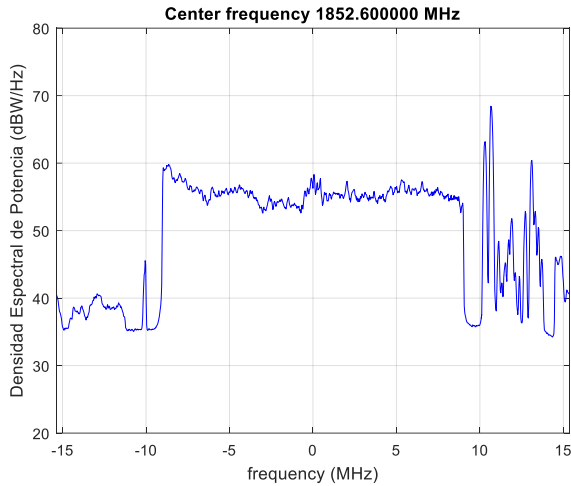


Figura 5.4 Captura Yoigo - Laboratorio

El operador Yoigo por lo que se puede observar en el espectro de la señal recibida, opera con el máximo ancho de banda nominal $W=20$ MHz, al igual que Movistar. Y en este caso, se puede apreciar una diferencia de 5dB, entre el canal que sufren las subportadoras del principio frente al canal que sufren las del final.

5.2 Capturas recientes:

Estas capturas se realizaron en diferentes localizaciones de la ciudad de Santander con la idea de observar los posibles cambios que podían experimentar las señales dependiendo del lugar en el que se realizaran.

Las primeras capturas que se muestran están tomadas en el Sardinero, hay tres capturas realizadas a la frecuencia en la que opera Vodafone: $F_C = 1825.1\text{e}6 + 10\text{e}6 = 1835 \text{ MHz}$ pero solo una de ellas será mostrada. En la imagen 5.6 (a) se observa que Vodafone ha aumentado el ancho de banda de operación y pasa de un ancho de banda nominal $W=15\text{MHz}$ como se observaba en la figura 5.2 (a) a un ancho de banda nominal $W=20\text{MHz}$.

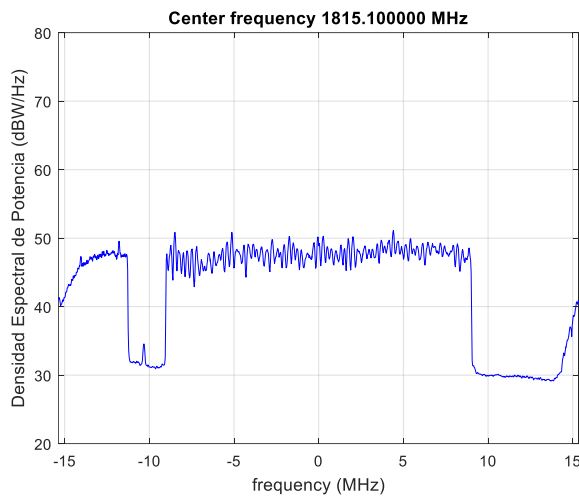
Otra observación de las capturas de Vodafone en el Sardinero . es que la calidad de la señal es extremadamente buena .

La figura 5.7 (a) son capturas realizadas en el Sardinero, pero a la frecuencia en la que opera Orange. Lo más llamativo de estas capturas es que en la figura 5.7 la frecuencia central a la que se captura es la misma que cuando se capturó inicialmente en la universidad $F_C = 1859.9\text{e}6 + 12.5\text{e}6 = 1872.4 \text{ MHz}$, sin embargo, en el mismo día que se realizaron las capturas en el Sardinero, se pudo observar en una de las capturas que el espectro se había desplazado, Y parecía que en ese preciso momento se había cambiado la frecuencia central de Orange, y como se verá más adelante, en el resto de capturas realizadas a la frecuencia de Orange, permanece la frecuencia nueva.

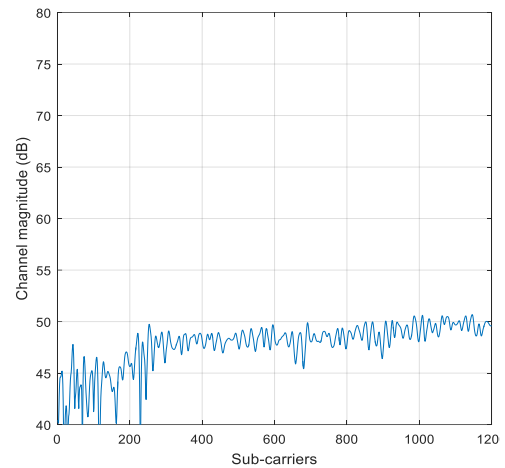
Sardinero:

Captura Movistar:

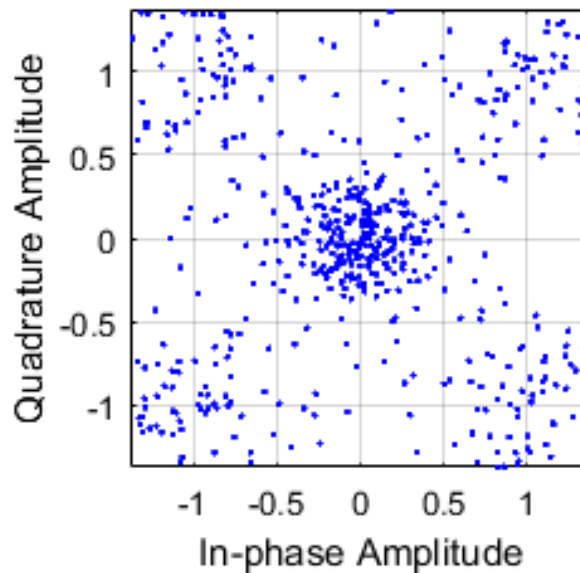
- NSamples: >2500000 muestras.
- $F_C = 1815.1$ MHz.
- $F_S = 30.72$ Mmuestras/s.
- Gain = 50 dB.



(a) DEP



(b) Respuesta frecuencial del canal



(c) Constelación PDCCH

Figura 5.5 Captura Movistar - Sardinero

En la figura 5.5 (b) se observa que las subportadoras cercanas a cero experimentan un fading profundo.

- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - $F_C = 1835.1$ MHz.
 - $F_S = 30.72$ Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

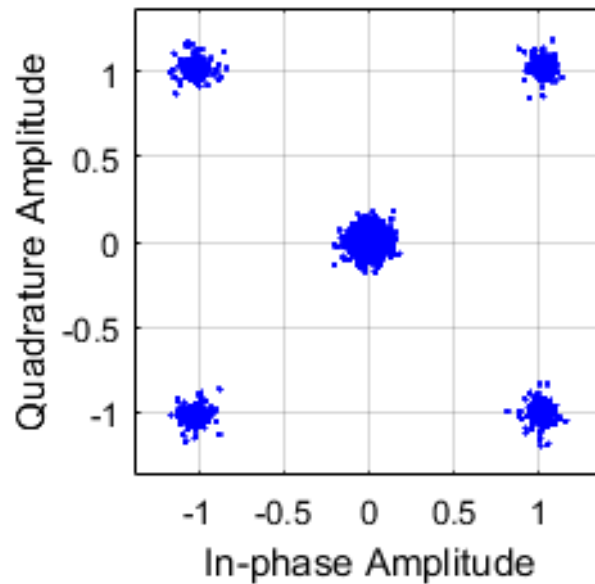
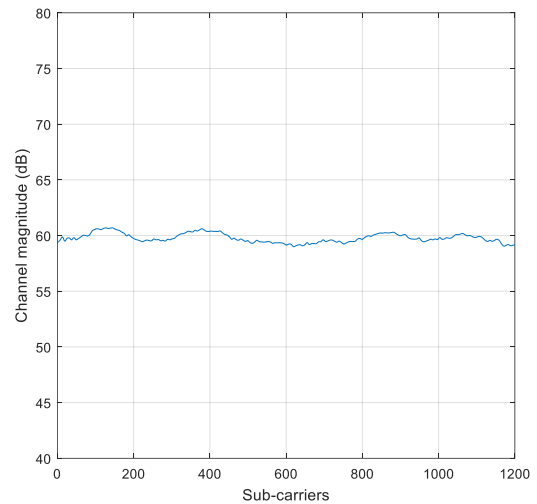
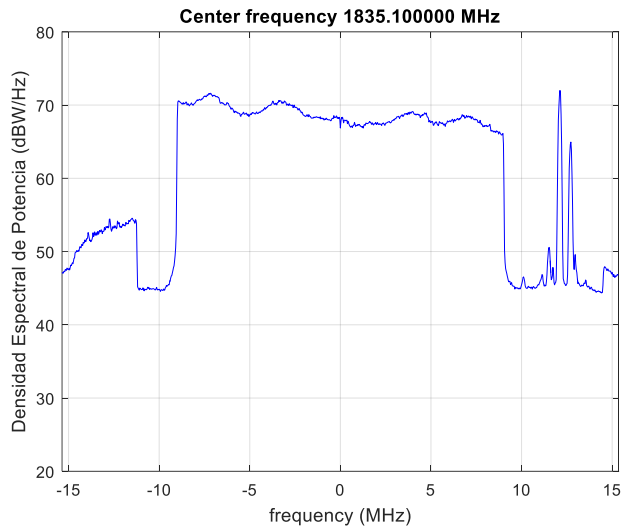


Figura 5.6 Captura Vodafone – Sardinero

Se puede apreciar el alto nivel señal, tanto en la figura 5.6 (a) así como en las figuras (b) y (c), pues en la primera la relación señal a ruido es de casi 20 dB, en la segunda el canal es casi plano y en la tercera la constelación es bastante buena.

Esto se puede deber a que la señal fue capturada en la playa del Sardinero, enfrente del parque de Mesones, en un entorno totalmente abierto, y tras la búsqueda de los eNodeB cercanos a esa zona, utilizando una herramienta del Ministerio de Industria, Energía y Turismo[13], se encontró con que la estación base de Vodafone operativa en la banda 3 (1825.1-1845.1) estaba a pocos metros de donde se realizó la captura (figura 5.8).

- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1872.4 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

En esta prueba pasa exactamente como con Vodafone en el Sardinero.

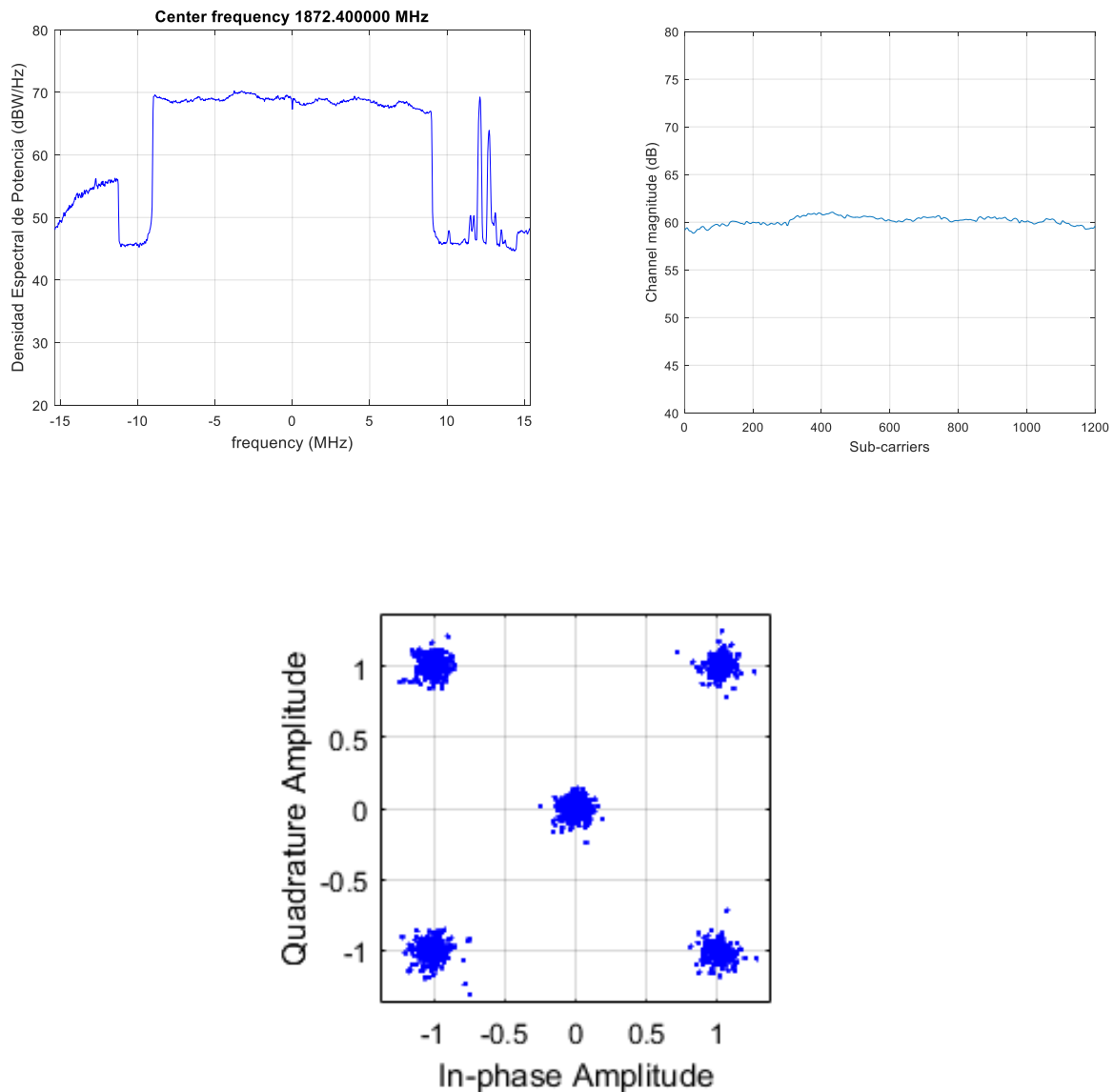


Figura 5.7 Captura Orange - Sardinero

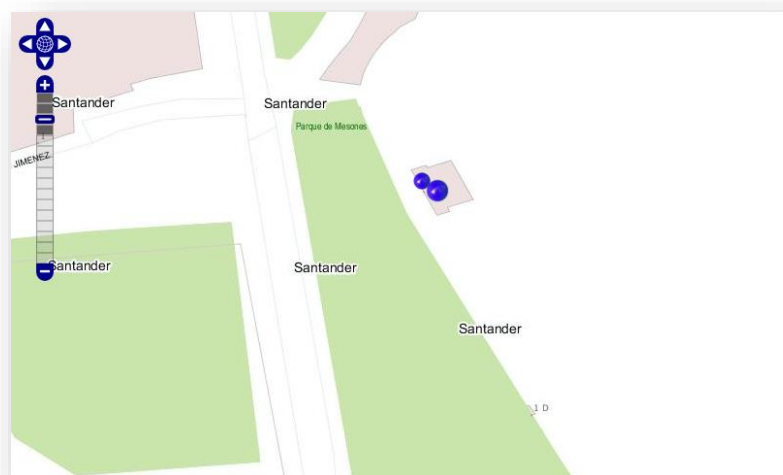


Figura 5.8 Localización capturas Sardinero

A continuación se muestran las capturas realizadas en Nueva Montaña, también al aire libre:

- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1835.1 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

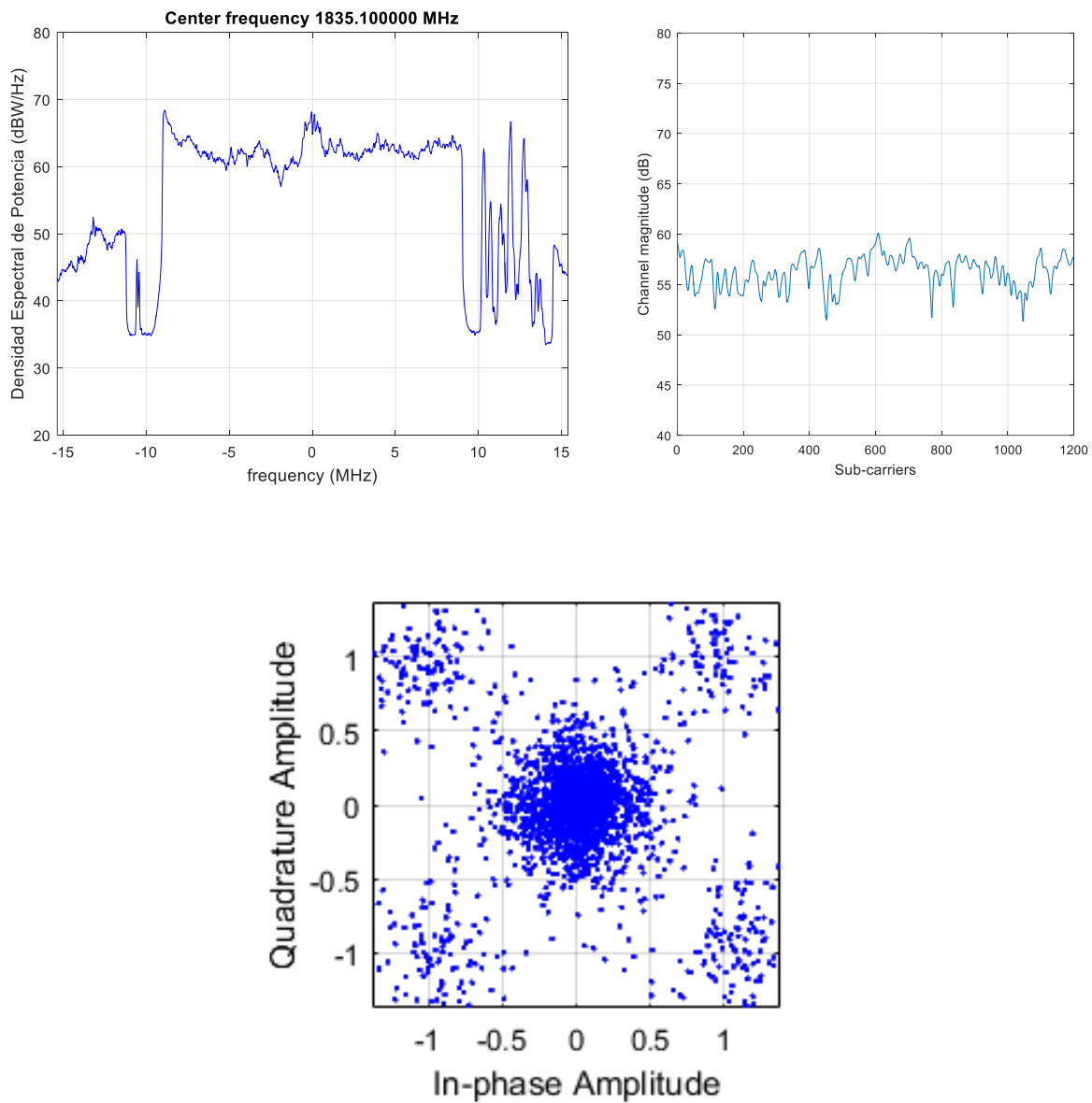


Figura 5.9 Captura Vodafone - Nueva Montaña

- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1869.9 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

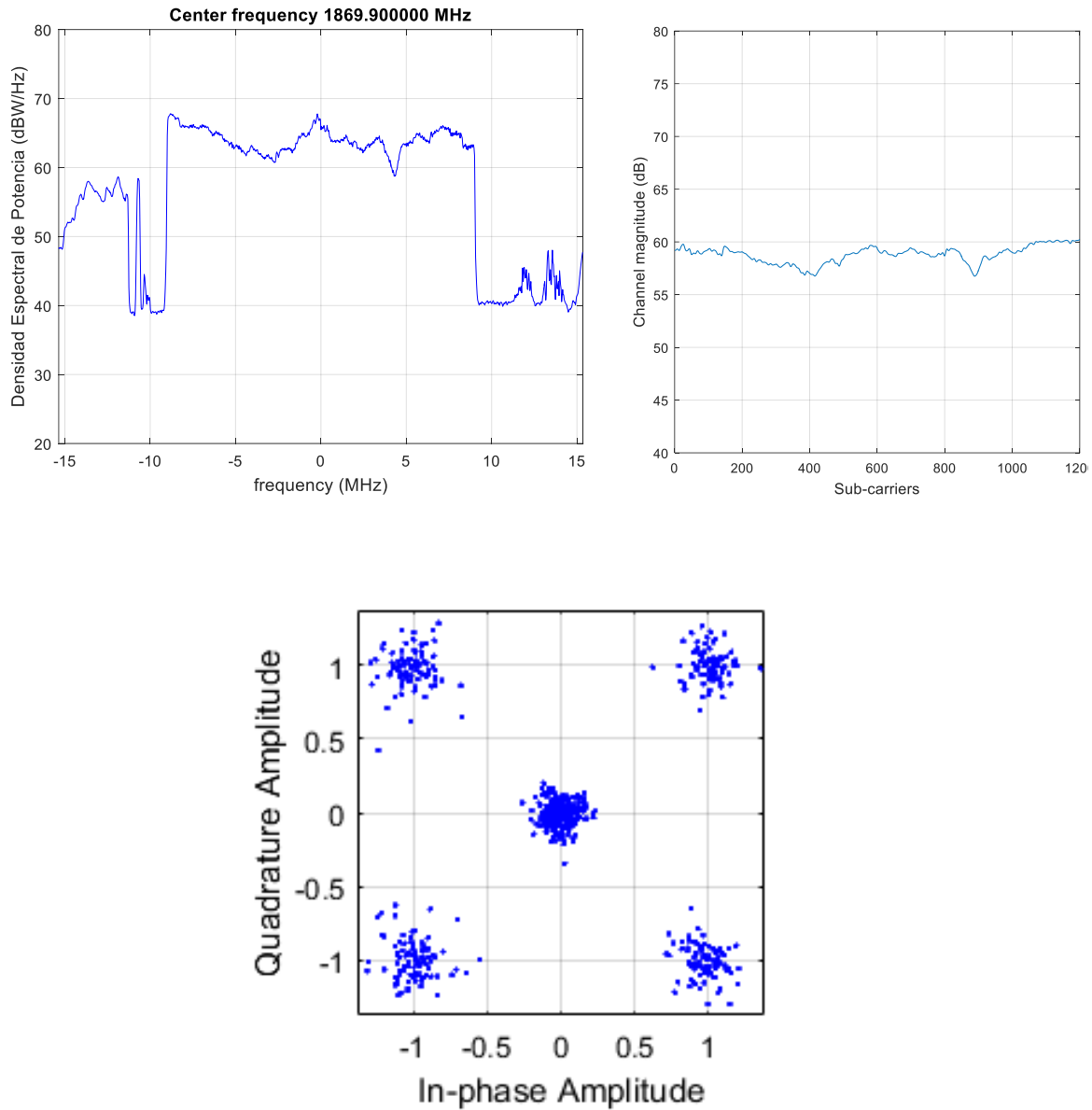


Figura 5.10 Captura Orange - Nueva Montaña

Ambas señales presentan un alto nivel de SNR, y el canal, especialmente el de Orange es bastante plano.

La señal se capturó en la calle Hermanos Calerón cerca de Nueva Montaña, y al igual que se hizo con la localización de los eNodeB disponibles en la zona, y se puede apreciar que hay varios eNodeB cerca de la zona de captura.

Vodafone tiene los siguientes bandas operativas:

- 1825.10 - 1845.10.
- 1905.00 - 1910.00; 2140.00 - 2155.00

Y Orange tiene las siguientes bandas operativas en esta zona:

- 1900.00 - 1905.00; 2125.00 - 2140.0
- Dos antenas para la banda 1859.90 - 1879.90



Figura 5.11 Localización capturas Nueva Montaña

Las Llamas:

- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1835.1 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

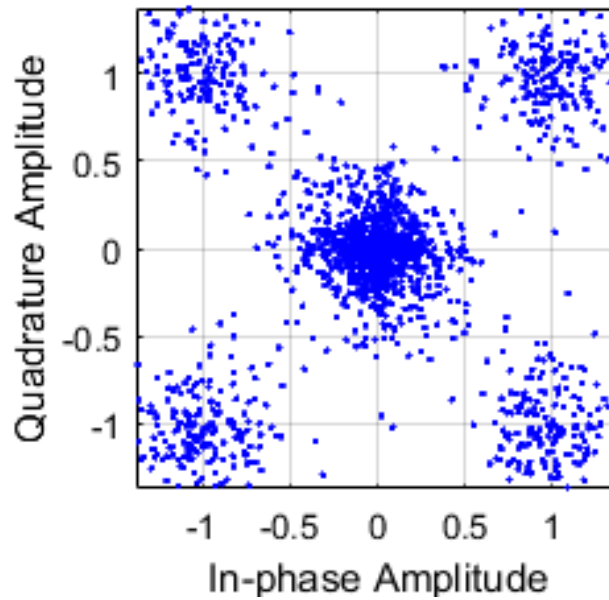
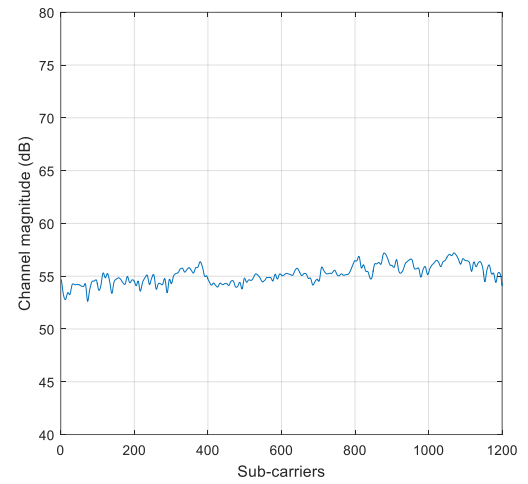
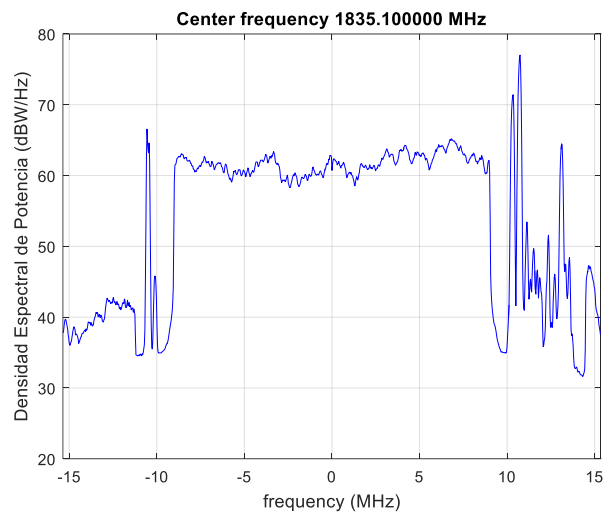


Figura 5.12 Captura Vodafone - Las Llamas

- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1869.9 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

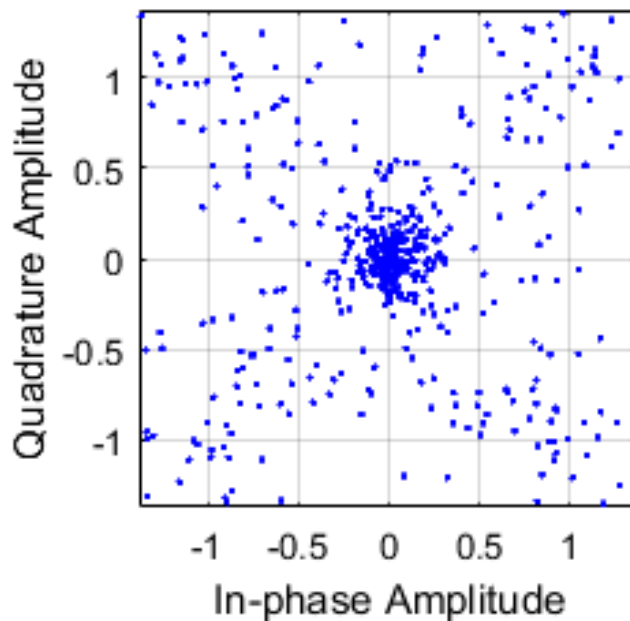
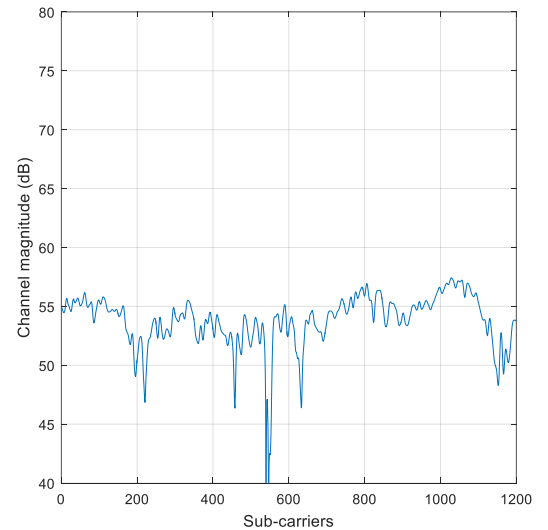
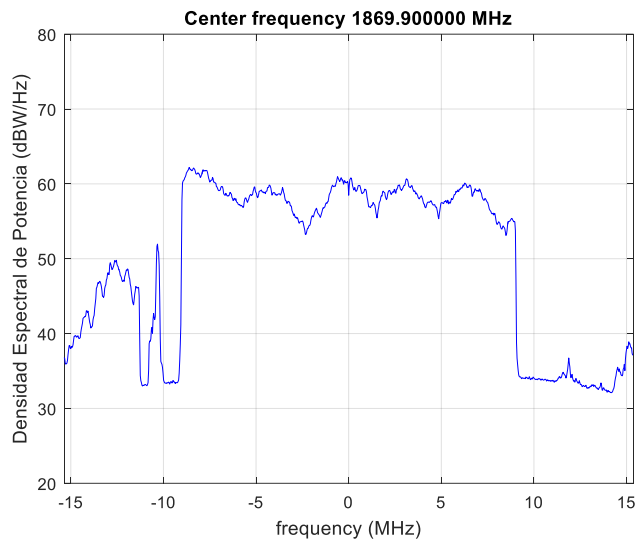


Figura 5.13 Captura Orange - Las Llamas

La captura se realizó en el parque de las Llamas, cerca del edificio de la Escuela Técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación (ETSIIT). Y con la herramienta de localización de eNodeB, se ha podido observar que no hay ningún eNodeB en la zona del parque.

Se puede observar que la señal de Vodafone es mucho mejor que la Orange, aunque en la captura de Orange, se puede observar que algunas subpotadoras sufren un fading profundo de modo que ha perjudicado a la señal recibida.

Paseo Pereda:

- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1835.1 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

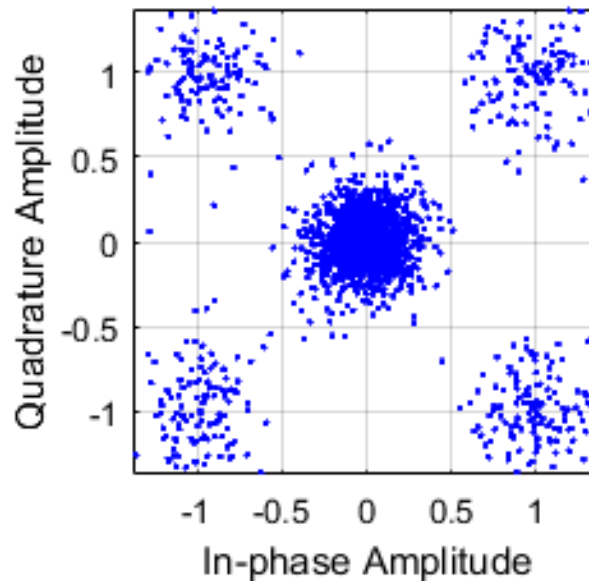
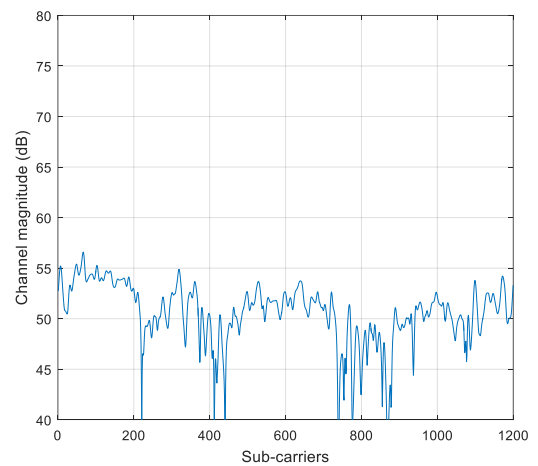
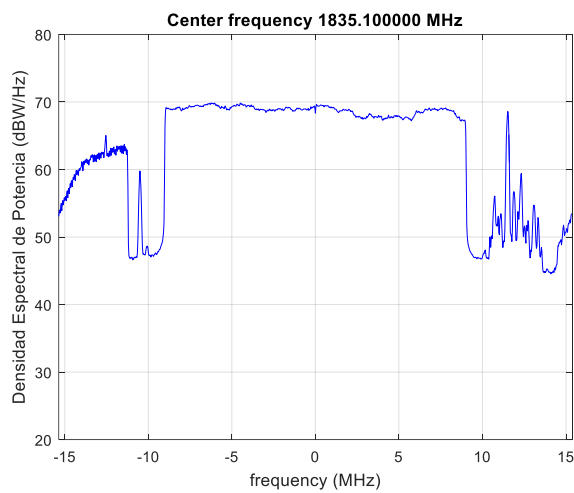


Figura 5.14 Captura Vodafone - Paseo Pereda

- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1869.9 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

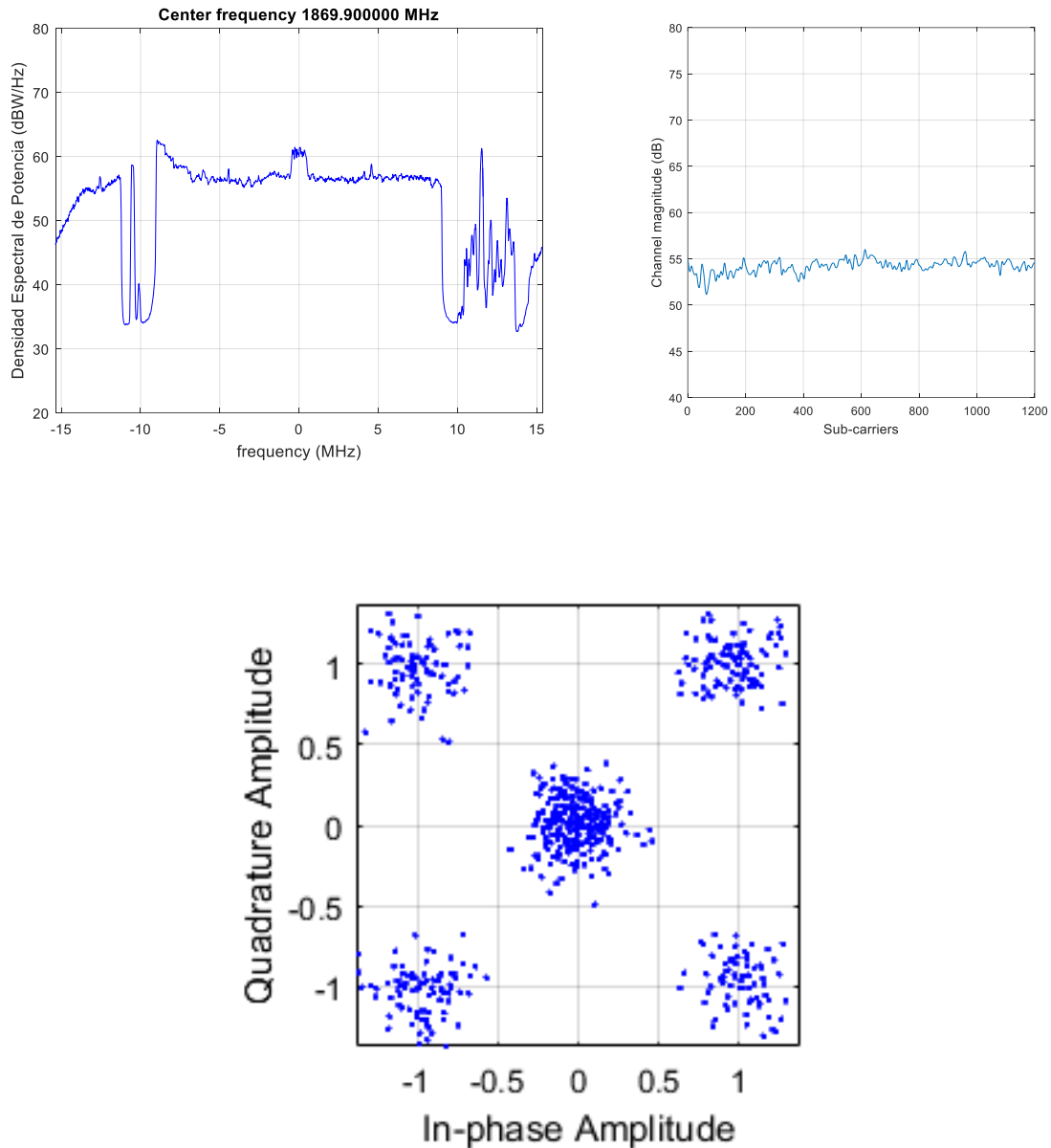


Figura 5.15 Captura Orange Paseo Pereda

La señal se captuó en el Paseo Pereda, enfrente del paseo marítimo, en pleno centro de la ciudad de Santander, en general la cobertura de Orange y Vodafone era bastante buena

y revisando la herramienta de búsqueda, se puede observar que hay dos eNode B muy cerca (de hecho uno de Vodafone y otro de Orange).

Banda de Orange operativa en paseo Pereda:

- 1859.90 - 1879.90

Banda de Vodafone operativa en paseo Pereda:

- 1825.10 - 1845.10

Lo que demuestra que la banda 3 de LTE es la más utilizada para dar cobertura a los usuarios.



Figura 5.16 Localización capturas Paseo Pereda

Las Estaciones:

- Captura Vodafone:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1835.1 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

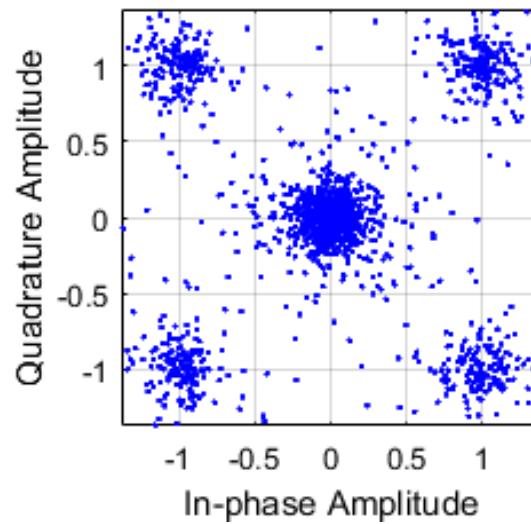
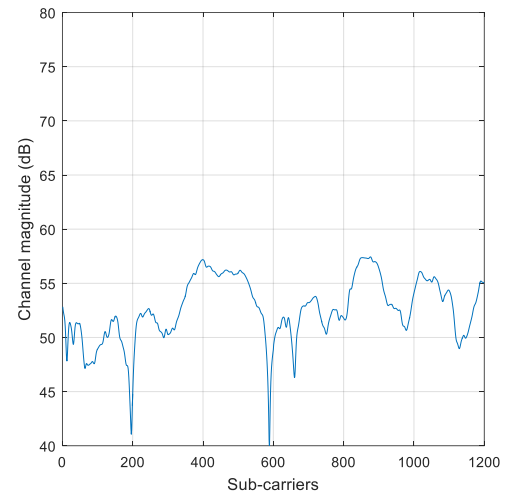
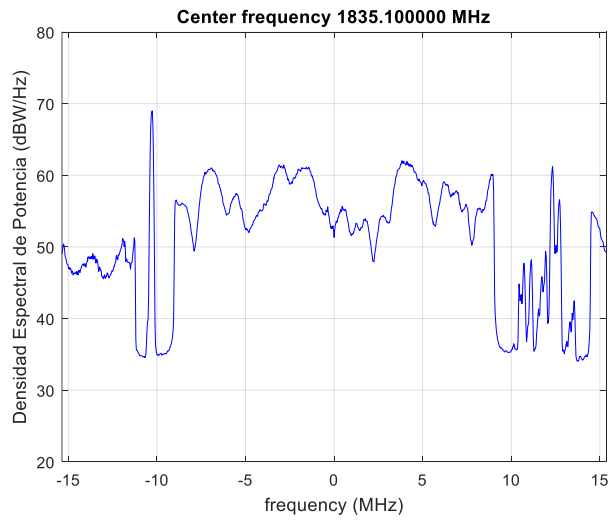


Figura 5.17 Captura Vodafone - Estaciones

- Captura Orange:
 - NSamples: >2500000 muestras.
 - FC = 1869.9 MHz.
 - FS = 30.72 Mmuestras/s.
 - Gain = 50 dB.

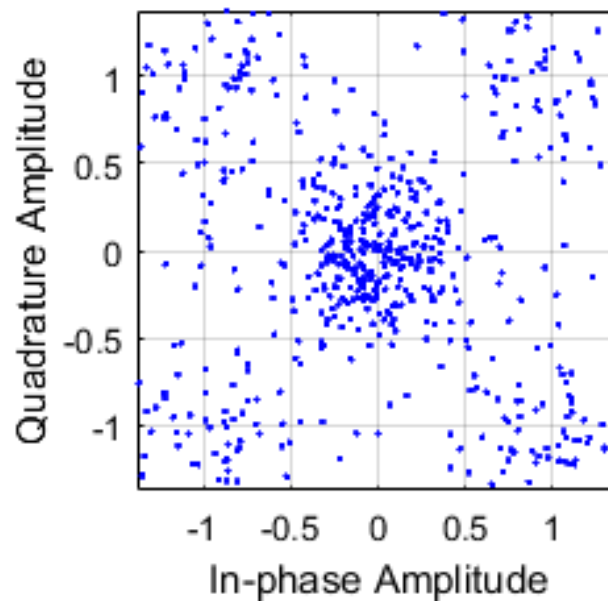
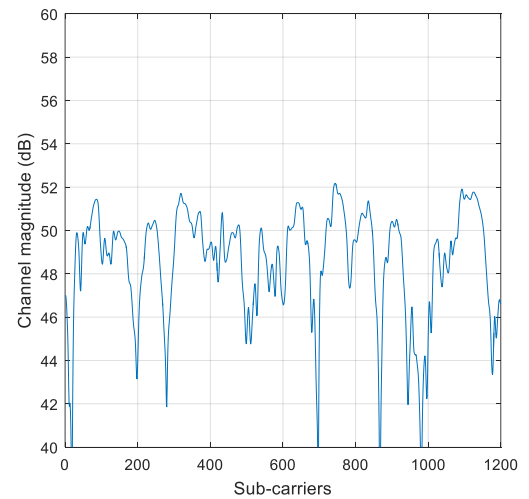
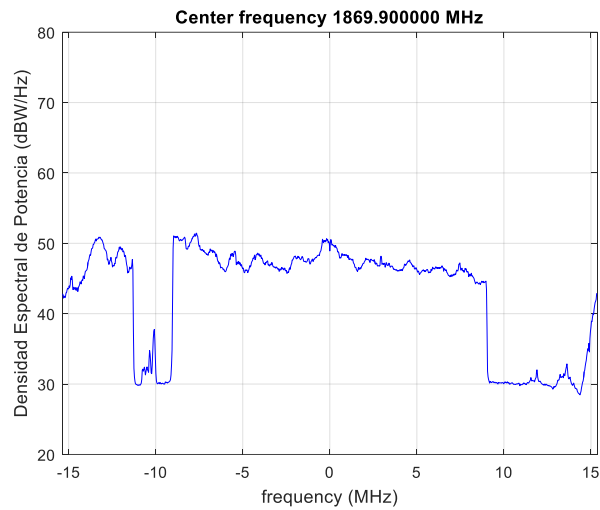


Figura 5.18 Captura Orange - Estaciones

En las estaciones, se puede decir que no había buena cobertura para ninguno de los dos operadores con los que se hizo la prueba.

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1 Resumen y conclusiones

Mediante este trabajo se ha querido demostrar que es posible la captura de señal LTE en tiempo real utilizando técnicas de radio definida por software, a través de la plataforma USRP B210 sobre el entorno de Matlab.

A lo largo del trabajo se han realizado dos montajes para la captura de señal LTE. El montaje inicial era el resultado de la primera idea que se tuvo para realizarlo. En este montaje, una vez que quedaba el driver UHD integrado en Matlab en el sistema operativo Windows, mediante USRP Support Package, su manejo estaría basado en System Objects de Matlab. Una vez modificadas las propiedades de recepción de la USRP y tras varias pruebas y modificaciones, se comprobó que este montaje no era válido para la recepción de señal LTE debido a problemas relacionados con el rendimiento. A raíz de este inconveniente sucedido con el primer montaje, se opta por realizar otro, que permitiese seguir teniendo a Matlab como entorno de trabajo, pero con la eficiencia necesaria para poder capturar señal LTE, y tal y como se ha detallado en el capítulo tercero de la memoria. Esto se consigue utilizando un software desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC), funcionando en el sistema operativo Ubuntu.

De la primera fase del trabajo se concluye haber encontrado un montaje adecuado para la captura de señal LTE en tiempo real y su correcto funcionamiento a través de varias pruebas realizadas en el laboratorio del Grupo de Tratamiento Avanzado de Señal (GTAS), resaltando el hecho de haber conseguido alcanzar el primer objetivo impuesto para el TFG.

En la siguiente fase del trabajo se ha realizado un estudio más detallado de las características de LTE, pues si para la fase anterior era suficiente con conocer las características más básicas de LTE adquiridas durante la carrera, para ésta se necesitaba ir más allá en el estudio. Esto se debe a que en esta fase se empieza a utilizar el ejemplo de Mathworks “Cell Search, MIB and SIB1 Recovery” para el procesamiento de las señales capturadas y eso requería el buen entendimiento del código y de la información que éste devolvía. A esta fase hay que añadir que para el funcionamiento del código se necesitaban las versiones más nuevas del programa Matlab, y eso ralentizó varias veces el progreso del trabajo.

De esta fase del trabajo se concluye que, tras analizar las señales adquiridas en la fase anterior con éxito, se tenía ya el conocimiento sobre el proceso *Cell Search* que realizan los usuarios de red LTE para acceder a ésta, y por tanto el cumplimiento con el segundo objetivo del TFG. No obstante, aún quedaba realizar capturas de señal LTE en entornos diferentes, para poder observar la diferencia de estas mediante los resultados, y establecer las posibles líneas futuras que se podrían realizar a partir de este proyecto para seguir obteniendo más información.

Con las capturas de señal LTE realizadas en diferentes localizaciones de la ciudad de Santander, se puede concluir que para señales con duración de 80ms, lo que se traduce en más de 2 millones de muestras capturadas, el canal era invariante pues apenas sufría cambios con el tiempo, pero si presentaba selectividad en frecuencia. Con respecto a la

densidad espectral de potencia, en la mayoría de casos se podía observar perfectamente el espectro de una señal OFDM. Cabe destacar que para la banda 3 de LTE, que es donde se tomaban las capturas, se conocían las diferentes bandas de los operadores, pero no la portadora y a través del espectro se podía encontrar el valor de ésta. Otro aspecto observado sobre el espectro de la señal era el ancho de banda utilizado en transmisión por las diferentes portadoras y el aumento del ancho de banda observado en las portadoras de Orange y Vodafone comparando las primeras capturas de prueba y las realizadas al final, lo que demuestra que las redes 4G están en pleno despliegue, incluyéndose mejoras a diario. Se observó que en ciertas capturas se podía observar una alta calidad de señal y se pudo ver más tarde que se debía a tener el eNodeB en la misma zona, por lo que, si en el futuro se realizan pruebas para obtener información más compleja, es recomendable capturar en entornos abiertos y cerca de los eNodeBs, para asegurar una buena SNR.

6.2 Líneas futuras del trabajo

El estudio de los sistemas LTE está lejos de estar acabado, ya que simplemente para que el usuario pueda conectarse a la red, faltan otros procesos posteriores al proceso *Cell Search* y algunos de esos procesos que se podrían realizar inmediatamente a partir de este serían:

- Intentar capturar señales LTE en el enlace descendente (DL) en otra de las bandas, y observar las posibles diferencias que pudiesen aparecer.
- Completar el proceso *Cell Search*, lo que se traduce en decodificar los restantes System Information Blocks (SIBs), pues una vez que está decodificado el SIB1, ya se tiene información sobre la programación del resto de bloques. Esto conllevaría acceder a información más específica del sistema, por ejemplo, el SIB16, que contiene información relativa a GPS, lo cual permitiría conocer la localización de la estación base. Resaltar que, al igual que en el caso de este proyecto, hay ejemplos en Mathworks que ayudan a conseguirlo, pero también llevaría un gran estudio teórico acerca del proceso.
- Otra línea futura sería estudiar las señales en el enlace ascendente, pues se tiene el montaje para capturar y las bandas reservadas para el UL, en este caso se tendría que realizar el estudio teórico sobre la estructura de la trama en el UL entre otros temas.

7. Bibliografía

- [1] The 3rd Generation partnership Project: <http://www.3gpp.org>
- [2] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Registro público de Concesiones de Telecomunicaciones: <http://www.minetur.gob.es>
- [3] R. Van Nee, R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Academic Press, 2nd Ed., 2014.
- [5] A. Ghosh, R. Ratasuk, Essentials of LTE and LTE-A, Cambridge University Press, 2011.
- [6] Mathworks Synchronization Signals (PSS and SSS): <https://es.mathworks.com/help/lte/ug/synchronization-signals-pss-and-sss.html>
- [7] USRP B210 SDR Kit: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>
- [8] Analog Devices AD9361: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/wideband-transceivers-ic/ad9361.html>
- [9] Xilinx FPGA Spartan-6 family: <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html#productTable>
- [10] Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC), "GTEC Wireless Testbed Installation Guide".
- [11] Ettus UHD driver: <https://kb.ettus.com/UHD#Introduction>
- [12] Mathworks Matlab Examples, "Cell Search, MIB and SIB1 Recovery": https://www.mathworks.com/examples/lte-system/mw/lte_product-SIB1RecoveryExample-cell-search-mib-and-sib1-recovery
- [13] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do>