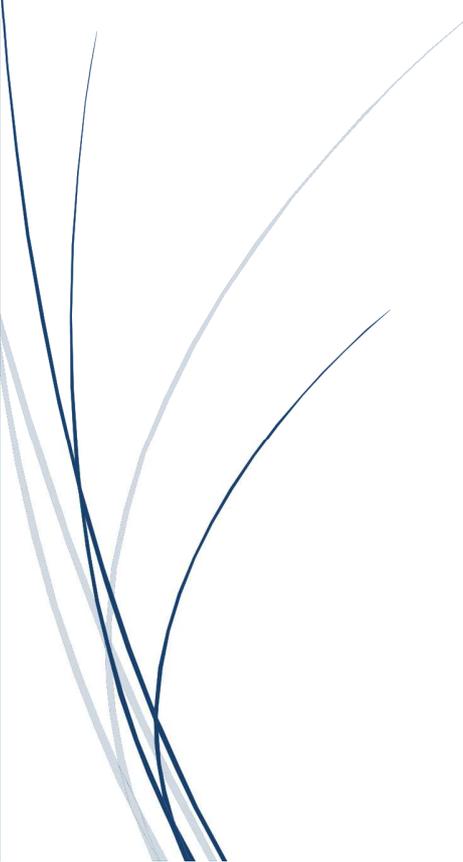


A thick dark blue vertical bar runs down the left side of the page. A blue arrow-shaped graphic points to the right from the bar, containing the date.

12/19/2019

# Implementación de red LTE con Software-Defined Radio

Proyecto Final de Ingeniería en Telecomunicaciones

Several thin, light blue curved lines originate from the bottom left and sweep upwards and to the right, creating a sense of movement or signal paths.

Codon, Maryana Noely  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN

# Contenido

1	Introducción .....	3
1.1	Objetivo.....	3
1.2	Motivación .....	3
1.3	Alcance .....	4
2	Estado del Arte .....	5
2.1	Contexto de las redes móviles LTE .....	5
2.2	Equipos SDR comerciales .....	9
3	SDR y LTE: Análisis y características .....	11
3.1	SDR .....	11
3.1.1	Arquitectura.....	12
3.1.2	Características de hardware y software .....	13
3.2	Long Term Evolution .....	17
3.2.1	Arquitectura.....	18
3.2.1.1	Servidores .....	20
3.2.1.2	Interfaces .....	21
3.2.2	Características.....	22
3.2.2.1	Modulación .....	22
3.2.2.2	Bandas de frecuencia.....	24
3.2.2.3	Trama .....	25
3.2.2.4	Protocolos .....	29
3.2.2.5	Canales.....	31
3.2.2.6	Proceso de registro .....	38
3.2.2.7	Scheduler .....	38
3.2.2.8	Agregado de portadoras (Carrier Aggregation) .....	39
3.2.2.9	MIMO .....	40
3.2.2.10	Nodos de retransmisión (Relay Nodes).....	42
3.2.2.11	QoS.....	43
4	Implementación .....	44
4.1	Materiales .....	44
4.2	Desarrollo y configuración .....	49
4.3	Ejecución .....	54
5	Resultados y Conclusiones .....	58
5.1	Mediciones y Resultados.....	58
5.1.1	Pruebas de velocidad.....	58

5.1.2	Mediciones de alcance.....	60
5.2	Conclusiones .....	63
5.3	Proceso de cierre .....	63
5.4	Proyecciones futuras / Escalabilidad.....	64
6	Anexos .....	65
6.1	Anexo I – Bandas LTE.....	65
6.2	Anexo II – Archivos de configuración de srsLTE .....	68
6.2.1	Archivo de configuración enb.conf.....	68
6.2.2	Archivo de configuración epc.conf: .....	71
6.2.3	Archivo de configuración user_db.csv .....	73
6.3	Anexo III – Mediciones .....	74
6.4	Anexo IV – Planificación del proyecto.....	75
7	Bibliografía .....	81

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 OBJETIVO

En la realización de este trabajo se buscó implementar una red inalámbrica LTE (Long Term Evolution)<sup>1</sup>, la más utilizada hoy en día para comunicaciones móviles (concepto que se mostrará más adelante), por medio de la utilización de tecnología SDR (Software-Defined Radio)<sup>2</sup>, es decir Radio Definida por Software.

La tecnología SDR se compone de un hardware de radio-frecuencia, comúnmente caracterizado por un periférico capaz de recibir un gran espectro de frecuencias y convertir cualquier señal analógica, recibida dentro de ese espectro, a información digital que luego es enviada a un software encargado de realizar el procesamiento de la señal digital de entrada y salida que, tradicionalmente, se realiza en forma física por medio de diferentes elementos, como ser filtros, mezcladores, ecualizadores, etc.

El software utilizado en este proyecto es de código abierto, lo cual hace modificable la aplicación propiamente dicha, en caso de que quiera adaptarse a cualquier uso (estandarizado o no), y al mismo tiempo evitando el uso de licencias.

La idea principal es verificar la funcionalidad de la configuración, probar la performance a través de diferentes mediciones y poder compararla con la red LTE actual provista por las empresas privadas que hoy día, brindan el servicio de telefonía móvil.

**Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de una red LTE sobre una arquitectura SDR y comparar dicha red con otra comercial, en particular la correspondiente a la compañía Movistar<sup>3</sup>.**

## 1.2 MOTIVACIÓN

La tecnología de software-defined radio (SDR) se encuentra en constante crecimiento desde la década de los 90 y debido a los desarrollos de dispositivos de mayor capacidad que permiten acelerar el procesamiento de datos en tiempo real, el procesamiento digital de las señales es el camino a seguir en las comunicaciones. Es por eso que resulta necesaria la investigación de distintas técnicas de comunicación, cada vez más actuales, para colaborar en los avances y mejoras continuas de SDR.

Debido a esto, la Universidad Nacional de Gral. San Martín, adquirió equipos de hardware necesarios para comenzar investigaciones en el tema. En primer lugar, se realizaron pruebas con sistemas de comunicación simples como radios FM y AM sobre hardware de menor capacidad, utilizando software multipropósito como GNU Radio (que se menciona más adelante en este documento) para comenzar a comprender y ejercitar sobre la forma en que esta tecnología trabaja y así sumergirnos en el mundo de SDR

En una segunda instancia se adquirieron periféricos de mayor calidad para poder comenzar con la puesta en marcha de sistemas más complejos, uno de los cuales son las comunicaciones móviles, que requieren mayor capacidad técnica y entendimiento de la arquitectura en la cual se desarrollan.

Este trabajo es el siguiente avance de un proyecto anterior de investigación, desarrollado en la Universidad, en donde se implementó una red de telefonía celular de segunda generación con el mismo hardware. En el presente trabajo, el objetivo es avanzar hacia tecnologías de comunicación más recientes con el objetivo de verificar la capacidad del hardware SDR adquirido, sus alcances y limitaciones, así como también posibles soluciones alternativas a problemas encontrados.

### 1.3 ALCANCE

Este proyecto se dispone a implementar una red LTE a través de una arquitectura SDR y realizar una comparación del servicio provisto con una red comercial, específicamente la provista por la compañía Movistar-Tuenti<sup>4</sup>.

Se realizarán pruebas de Alcance, para la cual se seleccionará una antena movistar dentro del barrio Villa del Parque, donde hay edificios bajos, para representar un entorno de ciudad pequeña. Se realizarán mediciones de potencia de señal en función a la distancia a través de una aplicación celular que permite leer el valor obtenido por el Equipo Móvil con una tarjeta USIM de Tuenti. Luego la misma prueba se realizará con el modelo planteado en este proyecto para comparar resultados.

Además, se realizarán mediciones de velocidad de DL y UL sobre la red implementada en este proyecto y la red Tuenti-Movistar utilizando la misma aplicación de cálculo de velocidad y servidor de destino.

Así mismo, con motivo de dar un servicio completo, se instalará una central VoIP para proveer el servicio de llamadas de voz y comprobar la calidad de la misma.

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 CONTEXTO DE LAS REDES MÓVILES LTE

El acceso a la información ha evolucionado hasta el punto de volverse de vital importancia para la sociedad moderna. Los desarrollos tecnológicos de la década de los 80, en especial a partir de la evolución de Internet, desencadenaron en la sociedad una necesidad exponencialmente creciente de estar conectados con la información de cualquier parte del mundo y de manera instantánea. Con los avances en términos comunicaciones inalámbricas, satelitales y móviles, el acceso a la información hoy en día se encuentra literalmente al alcance de la mano en todo momento. Es por esto que a medida que evoluciona la tecnología y se dan nuevos usos a estos sistemas de comunicación (como por ejemplo Internet of Things, IoT), también evoluciona la demanda de alcanzar velocidades de navegación cada vez mayores, minimizando la latencia.

Un ejemplo claro de esta demanda es lo que impulso en 2008 el desarrollo de un estándar de red de telefonía móvil de 4ta Generación, definida en IMT-Advanced (por sus siglas en ingles International Mobile Telecommunications - Advanced)<sup>5</sup>, una rama de la organización ITU (International Telecommunication Union)<sup>6</sup>. La ITU es un organismo de las Naciones Unidas especializado en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), su tarea principal es crear estándares globales de comunicación. En este estándar se establecen únicamente un conjunto de requisitos que debe cumplir una red móvil para ser considerada de 4ta generación.

En ese entonces la arquitectura vigente utilizada era UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)<sup>7</sup> que proporcionaba una red de 3ra Generación, pero no lograba alcanzar los niveles de velocidad y latencia necesarios para evolucionar a una red 4G. Por esto, la organización 3GPP (3rd Generation Partnership Project)<sup>8</sup> estandarizó una nueva arquitectura llamada LTE (Long Term Evolution) que, en 2010, la ITU definió como la primera tecnología capaz de cumplir los requisitos para ser considerada 4G.

La red 4G LTE es la más estable y utilizada mundialmente en la actualidad. Ha logrado mejoras sustanciales en términos de velocidad y alcance para cumplir con las demandas de los usuarios. El despliegue de la red se realizó por etapas, ya que requería un cambio rotundo en la arquitectura interna. Ahora voz, texto y datos son transmitidos en forma digital a través de paquetes IP, a diferencia de las redes predecesoras 2G y 3G en la que la voz aún se transmitía en forma analógica, por conmutación de circuitos.

En Argentina el comienzo del despliegue de la red se inició en 2014, cuando se llamó a Concurso Público para la adjudicación del espectro de frecuencias asignado a la red 4G. En esta instancia se definieron las obligaciones que los proveedores del servicio debían cumplir para despliegue de la red. Una de ellas fue presentar mensualmente información del estado de la infraestructura para constatar que se cumplan los objetivos fijados. En la actualidad, toda esta información es recibida y procesada por el ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones de Argentina)<sup>9</sup> que publica los informes trimestralmente.

Una forma de observar cómo fue evolucionando este despliegue es a partir de la cantidad de radiobases, es decir, de antenas y equipos transmisores y receptores que proporcionan el servicio de radiofrecuencia en un área determinada llamada celda. En el siguiente grafico obtenido del último informe trimestral del ente<sup>10</sup>, se puede ver cómo fue creciendo el número de instalaciones de radiobases por año y mes en el país desde 2014 a la actualidad.

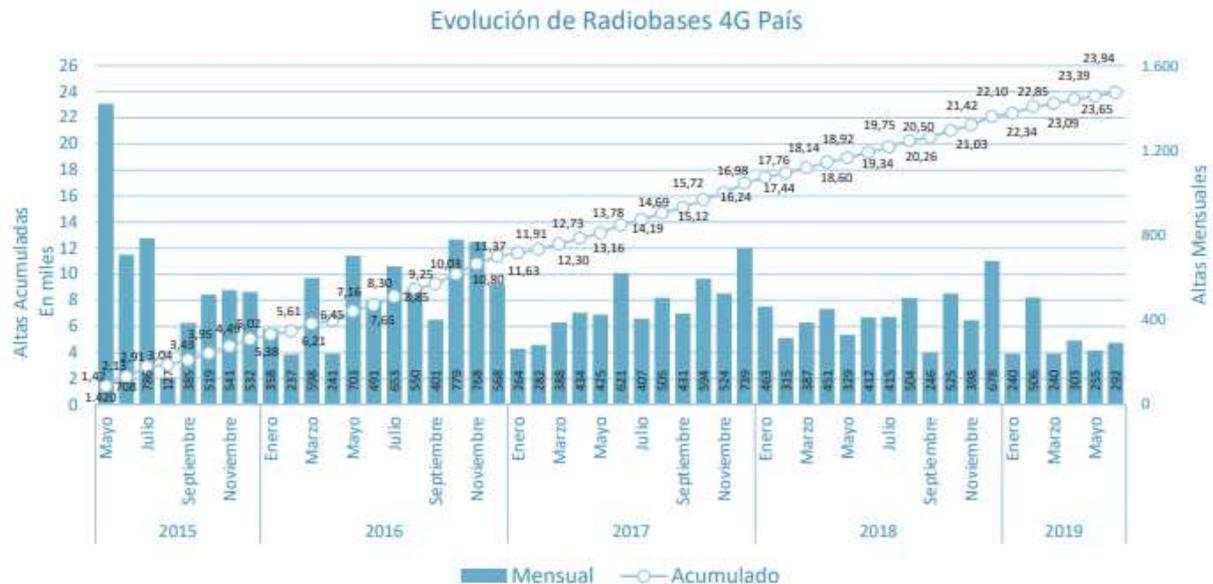


Figura 2.1. Evolución de Radiobases 4G desde 2014 a 2019.  
Fuente: Indicadores de Mercado - Segundo Trimestre 2019 - Capítulo 08 - ENACOM

Actualmente el país cuenta con 23.938 Radiobases 4G instaladas en todo el país, solo en 2019 se instalaron 1.836, aunque no están distribuidas uniformemente debido a la demografía de cada provincia. Como se puede observar en la Figura 2.2, por ejemplo, Buenos Aires es la provincia con mayor cantidad de radiobases instaladas ya que es la provincia con mayor porcentaje de habitantes. Le siguen Córdoba y Santa Fe. De la demanda de servicio también dependerá la velocidad con la que se implementen las radiobases.

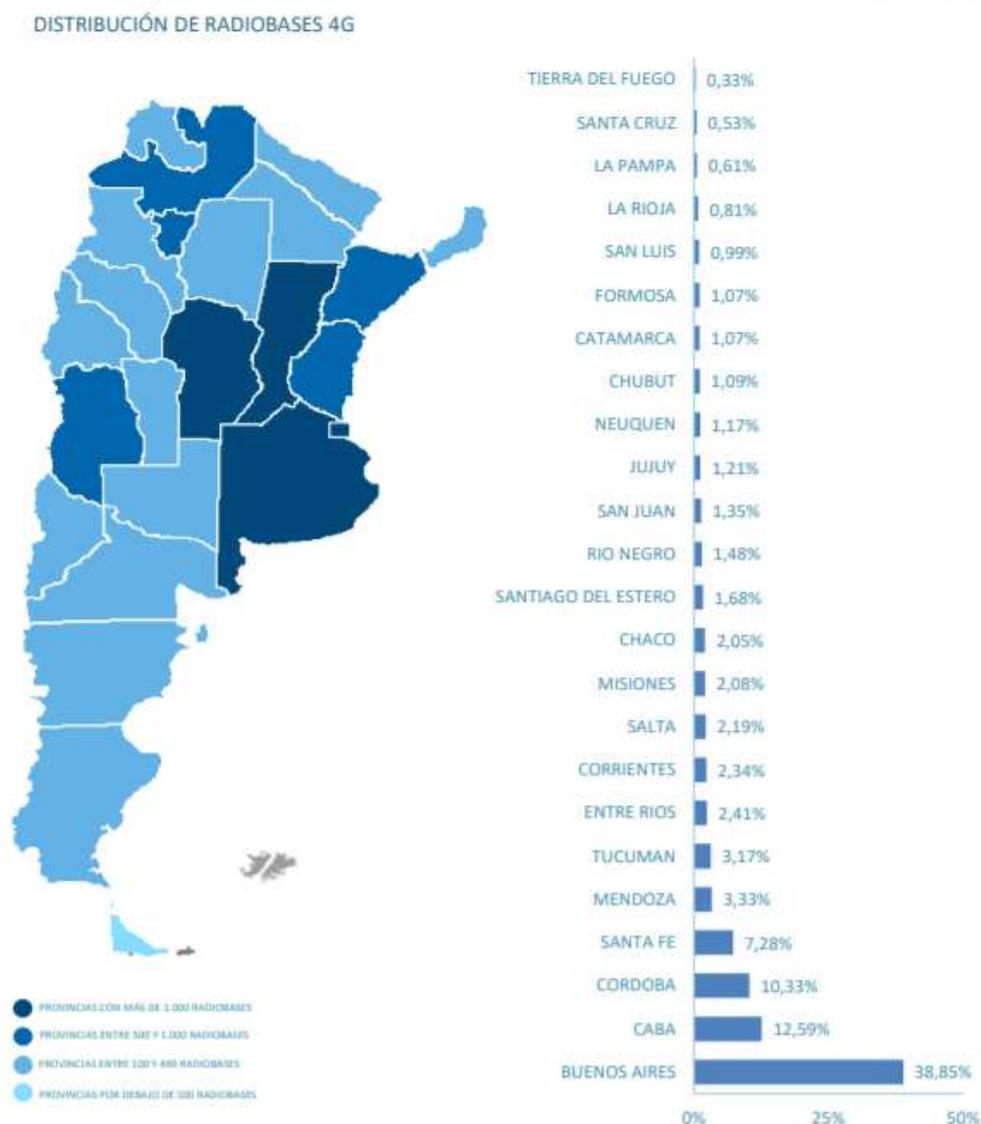


Figura 2.2. Distribución de Radiobases 4G en Argentina según la provincia.  
Fuente: Indicadores de Mercado - Segundo Trimestre 2019 - Capítulo 08 - ENACOM

A pesar de la evolución mantenida que tuvo el despliegue de la red, al día de la fecha aún hay departamentos enteros que aún no cuentan con servicio de red 4G como se puede ver en la Figura 2.3. La provincia que se observa con mayores retrasos es la de Chubut con poco más del 50% del territorio con servicio 4G, seguidas por San Luis y Neuquén.

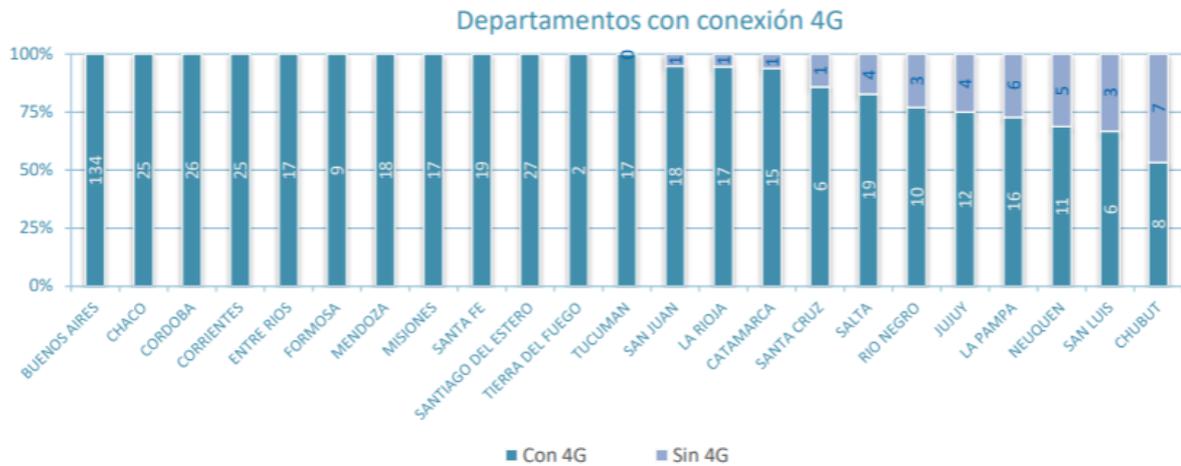


Figura 2.3. Departamentos con y sin conexión 4G  
 Fuente: Indicadores de Mercado - Segundo Trimestre 2019 - Capítulo 08 - ENACOM

Para conceptualizar los datos sobre la demanda del servicio, en este informe se indica que en el país hay 57,6 millones de accesos, es decir líneas en servicio, y la penetración de las comunicaciones móviles es de 128,91 accesos cada 100 habitantes. Se concluye, entonces, que hay aproximadamente 1,3 dispositivos móviles por cada habitante. Vale destacar también que las comunicaciones móviles generan 100.068 millones de pesos anuales, lo que representa el 43% de los ingresos por servicios de comunicación (sumando los ingresos por telefonía, TV e internet fija, móvil y satelital) del país.



Figura 2.4. Ingresos anuales generados por los servicios de comunicación.  
 Fuente: Indicadores de Mercado - Segundo Trimestre 2019 - Capítulo 01 - ENACOM

## 2.2 EQUIPOS SDR COMERCIALES

Sobre el concepto de SDR, debemos hacer una diferenciación entre el software propiamente dicho, que es el que se encarga del procesamiento de la señal, y el hardware periférico que se encarga de transmitir y recibir la señal. Para poder elegir adecuadamente el software y periférico adecuados, se debe realizar previamente un análisis de las opciones disponibles en el mercado, en la actualidad, dependiendo del uso que se le quiera dar.

La característica principal de los hardware SDR es el espectro de frecuencias que abarca. Cuanto mayor sea el ancho de banda que abarque, mayor será la complejidad de los circuitos internos y, por lo tanto, el precio. Teniendo en cuenta esto podemos calificarlos según su calidad.

Partiendo de los dispositivos de menor complejidad (y por lo tanto más accesibles) podemos encontrar en primer lugar el RTL-SDR<sup>11</sup> que permite recibir frecuencias de entre 500 kHz hasta 1,75 GHz y se puede conseguir por menos de 25 dólares. Tanto el RTL SDR como el Airspy o el SDRplay, que son de baja gama, solo permiten recibir las señales, pero no transmitir. Algunas implementaciones que se pueden realizar con estos dispositivos son: Recepción de FM y AM, detección de posicionamiento de aeronaves al captar los mensajes de radar ADSB, entre otros.

En periféricos de gama media podemos encontrar el HackRF One<sup>12</sup> creado por Michael Ossmann, fundador de Great Scott Gadgets. Su espectro de frecuencias va desde 1 MHz a 6 GHz y agrega la posibilidad de transmisión de datos. Es el más usado por los hobbistas ya que tiene una buena relación precio-calidad (su valor ronda los 400 dólares) y además el diseño del circuito y el firmware es de código abierto, por lo cual se pueden hacer diferentes modificaciones, como ser, reprogramar los botones para agregar funciones, cambiar el valor de los amplificadores internos, entre otros. Así mismo, en su sitio web, Ossmann tiene una gran variedad de tutoriales, tanto para los recién iniciados como para expertos en trabajos más avanzados. La estructura wiki<sup>13</sup> que ofrece es muy completa y la comunidad en github es activa.

En referencia a dispositivos de más alto nivel, podemos encontrar el LimeSDR y la serie USRP de Ettus. Estos dispositivos están orientados al despliegue de tecnologías de red inalámbricas más complejas como redes de comunicación móviles, redes de sensores para IoT o difusión de radio y televisión, entre otras.

LimeSDR<sup>14</sup> es de código abierto. Trabaja en un espectro de frecuencias entre 100 KHz a 3.8 GHz, y soporta señales de hasta 61,44 MHz de ancho de banda. La potencia de trabajo va desde 0 a 10 dBm y su valor es de aproximadamente 450 dólares.

Por otra parte, se encuentra la serie de periféricos SDR, USRP (Universal Software Radio Peripheral)<sup>15</sup> desarrollados por Ettus Research. El caso del dispositivo modelo B210 por ejemplo, soporta un espectro de frecuencias de entre 70 MHz hasta 6 GHz, funcionamiento full dúplex y MIMO (2 Tx y 2 Rx) con hasta 56 MHz de ancho de banda en tiempo real (61,44MS/s en cuadratura). Su precio oficial es de 1259 dólares a la fecha de esta publicación.

En relación a los softwares disponibles, la elección del mismo dependerá de la implementación ya que el software mencionado tiene la tarea de realizar el procesamiento de las señales. Existen softwares de

propósito general, el más comúnmente utilizado es el GNU Radio<sup>16</sup> debido a su versatilidad y facilidad de uso.

GNU Radio es un kit de herramientas de desarrollo de software gratuito y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar radios a través de software. Se puede usar con los dispositivos de hardware de radio frecuencia externo, anteriormente mencionados, para crear radios definidas por software. También se puede utilizar sin hardware en un entorno de simulación. Es altamente recomendado para aquellos que recién se inician ya que, en primera instancia, no requiere conocimientos previos de programación gracias a su entorno gráfico de fácil comprensión. Para desarrollos más complejos se torna necesario tener conocimientos en Python<sup>17</sup> que permitirá el desarrollo de bloques de procesamiento de señal ya que la plataforma está desarrollada en ese lenguaje.

Específicamente para redes LTE podemos mencionar las tres soluciones de software de código abierto más actuales y estables: OpenLTE, srsLTE y OpenAirInterface.

OpenLTE<sup>18</sup> es un desarrollado de código abierto inicialmente creado por Ben Wojtowicz. La primera versión se publicó el 31 de diciembre de 2011 y la última versión oficial 0.20.5 fue lanzada el 30 de Julio de 2017. A pesar de esto, en Github<sup>19</sup> se pueden encontrar versiones más recientes provistas por otros colaboradores. Este trabajo se basó en el desarrollo de un eNodeB, encargado de la gestión de recursos de radio y las decisiones de transferencia que veremos más adelante. También en un EPC (Evolved Packet Core) simplificado, que se encarga del manejo de los paquetes IP.

La solución srsLTE<sup>20</sup> de código abierto desarrollada por Software Radio System<sup>21</sup>, una organización irlandesa fundada en 2012 que se especializa en el desarrollo de software de alta performance para sistemas inalámbricos. Esta desarrollado en lenguaje C<sup>22</sup> y utiliza parte de los códigos de OpenLTE. Este paquete de soluciones cuenta con un software eNodeB, un EPC y una solución UE (User Equipment), que cumple la función de actuar como una unidad celular desde una computadora. Al estar así modularizado, srsLTE permite implementar una red híbrida, utilizando alguna o varias soluciones de otros desarrolladores de UE, eNodeB o EPC externa ya que cumple los estándares LTE Release 15 de 3GPP.

Por último, la solución OpenAirInterface<sup>23</sup> fue creada por OpenAirInterface TM Software Alliance (OSA), una organización francesa sin fines de lucro fundada por EURECOM<sup>24</sup> en 2014. Actualmente proporciona una implementación compatible con el estándar LTE Release 10 de 3GPP, para UE, eNodeB y EPC en computadoras con sistemas operativos basados en Linux.

## 3 SDR Y LTE: ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS

---

### 3.1 SDR

El término “Software Radio” fue utilizado por primera vez por Joseph Mitola III en “Software Radios Survey, Critical Evaluation and Future Directions”<sup>25</sup> publicado en 1992, para señalar el cambio de sistemas de radio dominados por el diseño del hardware a sistemas donde la mayor parte de la funcionalidad se define en el software.

No existe una definición unificada y reconocida globalmente de Software Defined Radio (SDR) sino que hay interpretaciones ligeramente diferentes según cada autor y varias terminologías como, por ejemplo, Software Based Radio, Reconfigurable Radio, Flexible Architecture Radio. El denominador común de todas estas definiciones se basa en la flexibilidad de las ondas de radio para ser cambiadas por medio de software sin necesidad de adaptar la plataforma SDR (la combinación entre el hardware y el ambiente donde la aplicación está corriendo).

Una forma más general de definir SDR, tomada de los cursos de Michael Ossmann, es “el uso de procesamiento digital de una señal para implementar funciones de Radio”.<sup>26</sup> Y continua, “con SDR se pueden crear transmisores o receptores para casi cualquier tipo de señal en un software aprovechando únicamente un equipo de hardware y una computadora de uso general”. El objetivo principal es poder comunicarse utilizando cualquier frecuencia, ancho de banda, modulación y velocidad de transferencia de datos con simplemente cargar el programa apropiado.

El software de SDR tiene definidas gran parte de las ondas que se utilizan normalmente en la práctica, esto le da mayor flexibilidad ya que solo necesitará ciertos parámetros del sistema utilizado para poder realizar las modificaciones necesarias a la onda, acelerando el procesamiento.

Como indica Tore Ulversøy en su trabajo “Software Defined Radio: Challenges and Opportunities”<sup>27</sup>, la evolución de SDR estuvo ligada en gran parte al desarrollo de algunas tecnologías, en primer lugar, a los conversores AD (Analógico-Digital) y DA (Digital- Analógico) y los procesadores de señales digitales (DSPs-Digital Signal Processors), los procesadores de propósito general (GPPs – General Purpose Processors) y a las matrices de puertas programables (FPGAs – Field-Programmable Gate Array). Otra fuerza impulsora fue la demanda de soluciones de comunicación de radio más flexibles y configurables, especialmente desde el sector militar, que fueron financiados por los gobiernos de Estados Unidos y Europa.

Debido a la rápida evolución de los estándares de comunicación, el sector comercial también adquirió interés en el desarrollo de SDR, ya que esta herramienta les permite bajar los costos y facilitar la implementación de las actualizaciones de las soluciones provistas, evitando tener que cambiar las estaciones base por completo. En este mismo sentido es beneficioso para aplicaciones espaciales, permitiendo realizar actualizaciones del equipo de comunicaciones satelitales simultáneamente con los avances en los algoritmos y los estándares de comunicación durante la vida útil de los satélites.

Al mismo tiempo esta tecnología habilita un rango mayor de posibilidades facilitando la implementación de las existentes y las nuevas aplicaciones de radio, en particular el desarrollo de Radios Cognitivas, las cuales son unidades adaptativas que aprenden del contexto, como por ejemplo una unidad SDR que

modifique su software según las condiciones de ruido e interferencia para mantener un adecuado nivel de BER (bit error rate).

### 3.1.1 Arquitectura

En general, los sistemas de comunicación digital consisten en una secuencia de operaciones responsables de tomar un tipo de información, como la voz humana, música o videos, y transmitirla por aire hasta un receptor que la procese y decodifique para construir una versión de la información original.

Si la información original es analógica (como audio), necesita ser digitalizada por medio de técnicas de muestreo para obtener una representación binaria de la misma. Una vez en formato binario, el transmisor procesa digitalmente esta información y la convierte en una forma de onda sinusoidal electromagnética que se define de forma única por sus características físicas, como su amplitud, frecuencia portadora y fase. Del otro lado, el receptor está programado para interceptar la señal y reconocer estos parámetros físicos de la forma de onda modulada que fue transmitida junto con el potencial ruido y distorsión del canal para finalmente devolver la señal en su correcta representación binaria.

En el libro “Software-Defined Radio for Engineers”<sup>28</sup> se explica en términos generales las tareas que realizan los SDR al momento de transmitir y recibir información, como se detalla a continuación. La figura siguiente muestra el diagrama en bloques del transmisor y receptor de un sistema de comunicación digital.

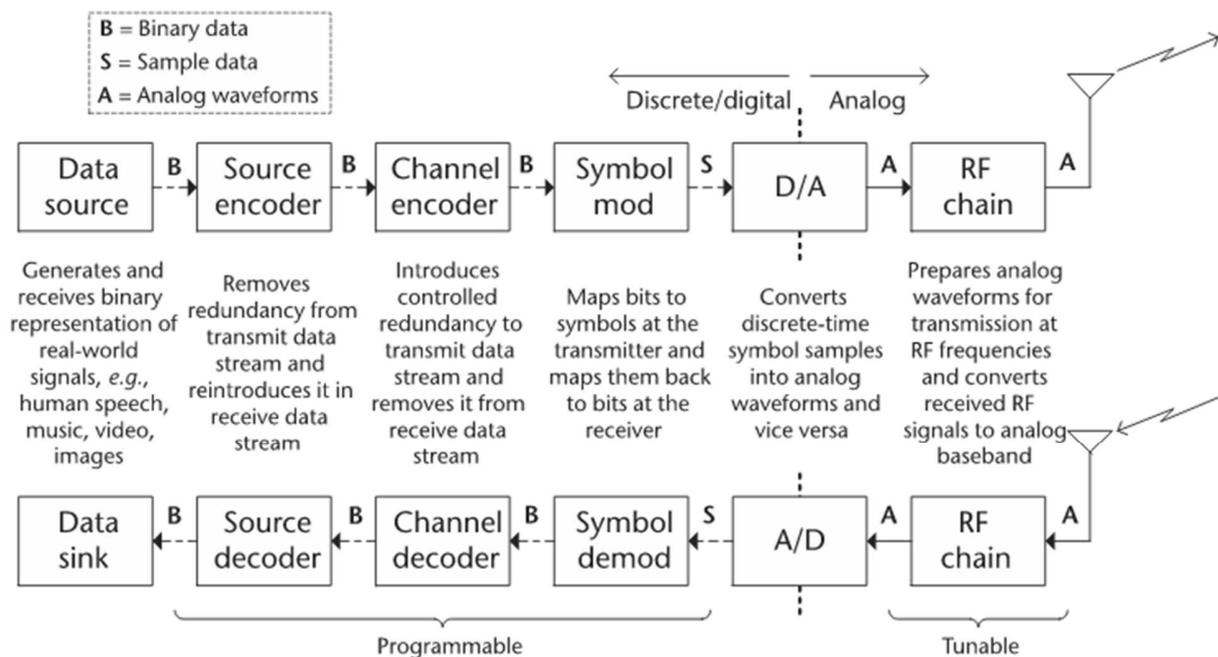


Figura 3.1. Diagrama en bloques de un sistema de comunicación digital.  
Fuente: “Software-Defined Radio for Engineers”<sup>26</sup>

A la izquierda de la Figura 3.1 se pueden observar los bloques DATA SOURCE y DATA SINK a la entrada del transmisor y la salida del receptor. Estos son bloques digitales de generador y sumidero de datos respectivamente y representan el origen y el destino de la información digital que se quiere comunicar entre el transmisor y receptor.

En el transmisor, una vez obtenida la representación binaria de la información introducida, la primera tarea será eliminar todos los patrones binarios redundantes (como los silencios en audio) y repetidos, con el objeto de aumentar la eficiencia de la transmisión. Esto se logra a través del bloque SOURCE ENCODER. Luego, el bloque CHANNEL ENCODER agrega una cantidad de redundancia controlada a la cadena de información para protegerla de posibles errores que se introducen durante la transmisión a través de un canal ruidoso. El siguiente paso es convertir la información binaria (B=Bit) en parámetros únicos de la forma de onda electromagnética, como su amplitud, frecuencia portadora y fase, esto se logra por medio de un proceso de mapeo llamado modulación, representado por el bloque SYMBOL MOD (S=Symbol). Finalmente, las muestras discretas generadas por el bloque de modulación se vuelven a muestrear y se convierten en una forma de onda analógica de banda base por medio de un convertidor digital a analógico (DAC) (A=Analogic) para luego ser procesadas por la interfaz RF del sistema que traslada la onda a una frecuencia portadora y la envía a través de la antena.

Del lado receptor vemos que se realizan las mismas operaciones de manera inversa. En primer lugar, la señal analógica es interceptada y trasladada en frecuencia a la banda base por medio de la interfaz RF, para luego ser muestreada y procesada por el convertidor analógico a digital (ADC). La señal discreta es enviada al bloque SYMBOL DEMOD para ser demodulada, esto es, convertir los parámetros físicos de las ondas recibidas en su representación binaria. Una vez obtenida la información binaria, se envía al bloque CHANNEL DECODER para eliminar la redundancia controlada introducida y por último a través del bloque SOURCE DECODER se re-introduce la redundancia eliminada por repetición, para obtener la representación binaria de la información original.

### 3.1.2 Características de hardware y software

Debido a la necesidad creciente de la industria de optimizar las plataformas SDR en velocidad de procesamiento, flexibilidad y reducción de tamaño, peso y potencia (SWaP) el sistema utilizado en transmisores y receptores tradicionales, llamado superheterodino, debió evolucionar para cumplir con la demanda.

Si bien los componentes han seguido una tendencia de reducción de SWaP y mejorado la capacidad, como los dispositivos de microondas y RF que han mejorado su rendimiento al tiempo que disminuyen el consumo de energía, los ADC y los DAC que han aumentado la frecuencia de muestreo, la linealidad y el número de bits efectivo (ENOB – Effective Number of Bits) o la capacidad de procesamiento en FPGA y DSP que ha seguido la ley de Moore y se ha incrementado con el tiempo, permitiendo algoritmos más eficientes, corrección digital y una mayor integración, el sistema superheterodino llegó a su techo debido a que filtros de alto rendimiento siguen siendo físicamente grandes y, con frecuencia, son diseñados personalmente, lo que aumenta el costo del sistema. Además, los filtros IF (filtros de frecuencia intermedia) establecen el ancho de banda del canal analógico, lo que dificulta la creación de un diseño común de plataforma, capaz de ser reutilizado en una amplia gama de sistemas. Para tecnologías compactas, la mayoría de las líneas de fabricación no fabricarán filtros de altura menor a

0,65 mm o 0,8 mm, lo que significa que hay un límite en cuanto a cuán físicamente pequeño puede llegar a ser un dispositivo complejo con muchos requisitos de entrada y salida.

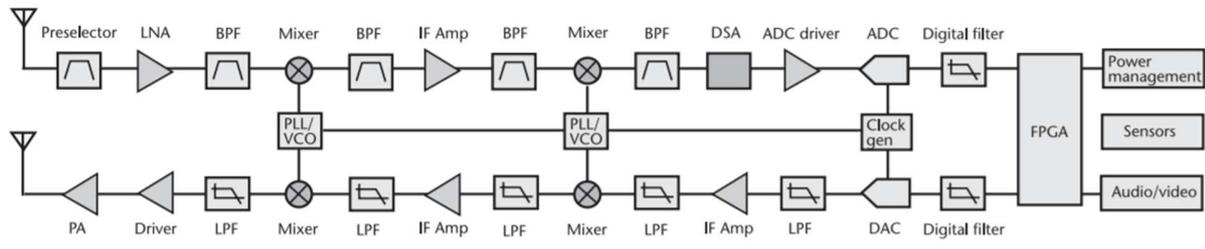


Figura. 3.2. Diagrama en bloque de un receptor y transmisor superheterodino multi-etapa  
Fuente: "Software-Defined Radio for Engineers"

Es por esto que, en las plataformas SDR actuales, se puede observar la implementación de una arquitectura ZeroIF (también ZIF) para los transmisores y receptores, en reemplazo del sistema superheterodino clásico.

Como se muestra en la Figura 3.3, un receptor ZIF utiliza una única etapa de mezcla de frecuencia con el oscilador local (LO) configurado directamente a la banda de frecuencia de interés, traduciendo la señal recibida a banda base en señales de fase (I) y cuadratura (Q). El PLL (Phase-locked loop) realiza el proceso de detección de la frecuencia del oscilador necesaria para que al hacer el mezclado las señales resultantes estén en banda base.

Esta arquitectura alivia los estrictos requisitos de filtrado del superheterodino, ya que todo el filtrado analógico se realiza en la banda base, donde los filtros son mucho más fáciles de diseñar y menos costosos que los filtros RF/IF personalizados.

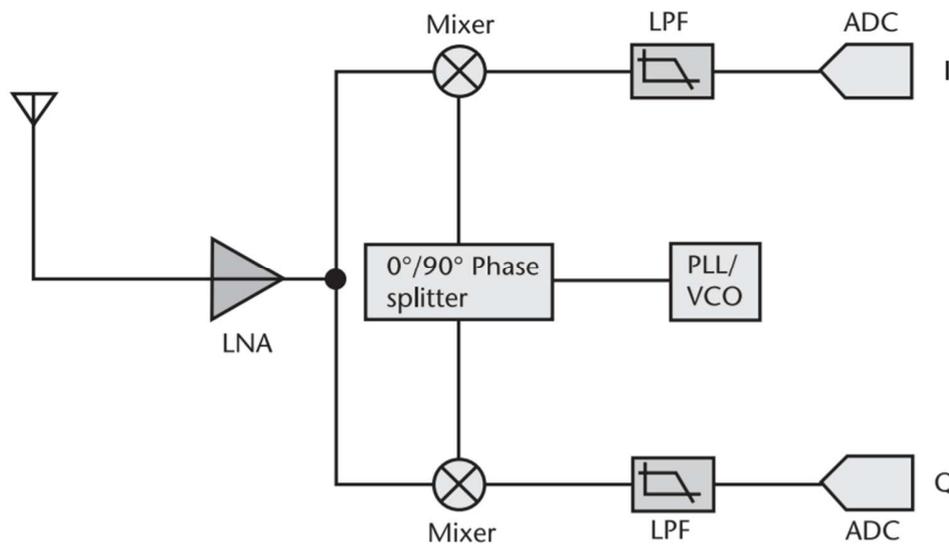


Figura. 3.3. Diagrama en bloque de arquitectura ZIF de un receptor.  
Fuente: : "Software-Defined Radio for Engineers"

La implementación de esta arquitectura reduce considerablemente la cantidad de componentes utilizados y la complejidad del circuito, al mismo tiempo que, al dividir la señal en dos, I y Q, los conversores AD/DA operan a la mitad de la frecuencia de muestreo que, en el sistema anterior, ahorrando gran cantidad de energía.

De todas maneras, existen limitaciones físicas en los componentes de hardware utilizados, como, por ejemplo, que los convertidores AD reales carecen del rango dinámico para captar señales de radio sub-microvolt o de potencia en los nanowatts. Por lo tanto, se suele agregar un amplificador de bajo ruido (LNA) antes del proceso de conversión, pero a su vez este dispositivo introduce sus propios problemas. Por ejemplo, si hay señales no deseadas, estas también son amplificadas y compiten con las señales deseadas dentro del rango dinámico del amplificador, lo que puede introducir distorsión en las señales deseadas, o hasta bloquearlas completamente. La solución estándar es colocar filtros de paso de banda entre la antena y el amplificador, pero estos reducen la flexibilidad de la radio. Los dispositivos comerciales a menudo tienen dos o tres filtros de canal analógico con diferentes anchos de banda que se conectan o desconectan automáticamente.

El caso particular de la solución USRP de Ettus, que es el que se utilizará en este proyecto, implementa un Digital Up-Conversion (DUC) y un Digital Down-Conversion (DDC) que son procesadores de señales digitales (DSP) incluidos ya en la FPGA<sup>29</sup> que realizan un ajuste fino de la frecuencia, lo que permite trabajar con frecuencias sub-Hz, mitigar el problema de los conversores digitales de los sistemas ZIF y sincronizar rápidamente dentro del ancho de banda disponible.

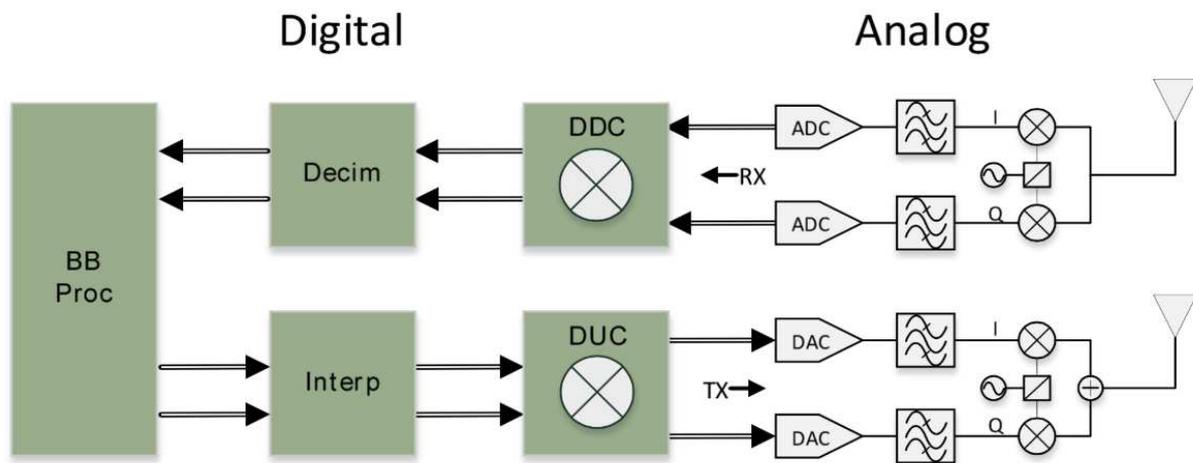


Figura 3.4. Diagrama simplificado de la arquitectura USRP de Ettus  
Fuente: "UHD" en Ettus Knowledge Base<sup>27</sup>

Otro de los problemas comunes dentro de la arquitectura ZIF es el desbalance IQ, que se produce debido a que cada señal procesada tiene dos rutas posibles de transmisión y dos de recepción. Una ruta es la fase o "I" y la otra es la cuadratura "Q", también conocida como real e imaginaria. Debido a las ligeras diferencias producidas por las variaciones en los componentes, la temperatura y otros factores, las rutas de señal I y Q están sujetas a diferentes condiciones, alterando así la señal original que existía en la captura inicial. Cuando se altera la fase o la amplitud de I o Q, los resultados aparecen como señales que no están realmente presentes en la señal original.

Para mitigar algunos de estos efectos no deseados en el dominio digital, el driver de la solución de Ettus llamado UHD (USRP Hardware Driver) contiene bloques de funciones dentro de FPGA para compensar las deficiencias de IQ; estos bloques se pueden observar en la Figura 3.5 con el nombre IQC. A través de ellos el usuario puede personalizar los parámetros en función de la medición empírica o permitir que el UHD realice un análisis automático y proporcione parámetros basados en un algoritmo de corrección IQ incorporado.

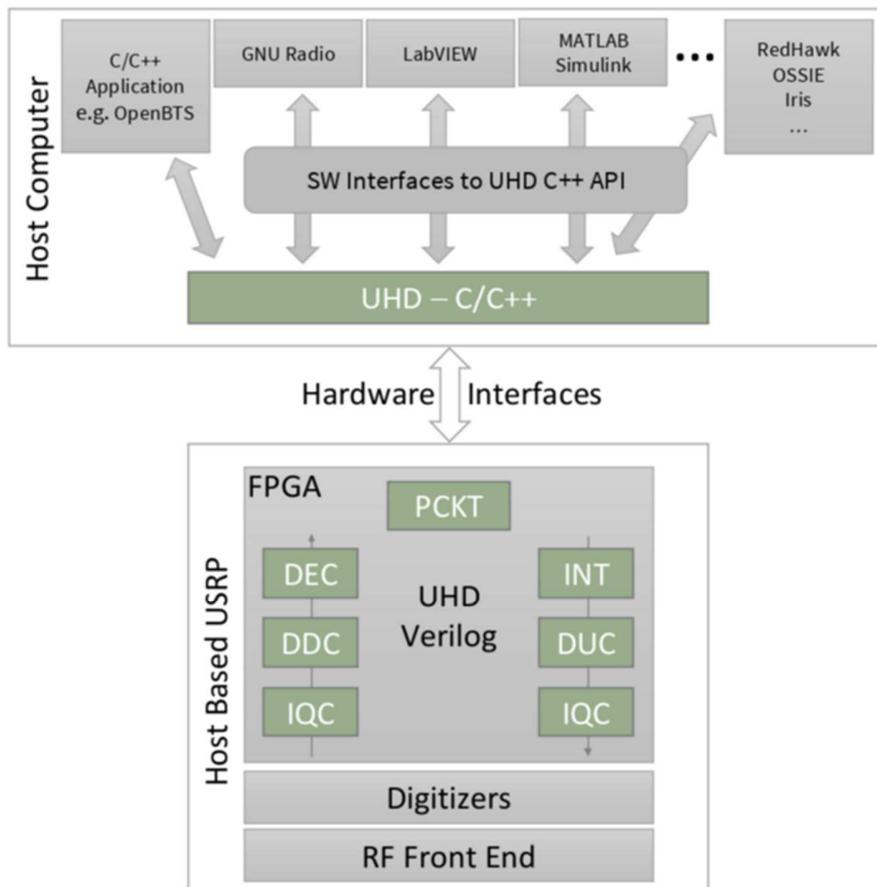


Figura 3.5. Diagrama simplificado de UHD de Ettus  
Fuente: "UHD" en Ettus Knowledge Base

Por último, dentro de la FPGA, el UHD incluye dos bloques DEC e INT, que son los de "decimation" o proceso de reducción de la frecuencia de muestreo e interpolación, que constituye el proceso inverso por el cual se aumenta el tamaño del muestreo. Estos permiten realizar traducciones de frecuencia de muestreo en el caso de que el usuario necesite muestrear con una frecuencia mayor a la que trabaja la computadora en tiempo real.

## 3.2 LONG TERM EVOLUTION

El estudio de la arquitectura LTE, también llamada EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) por considerarse una evolución de la utilizada en ese entonces por la red de 3ra Generación, comenzó en 2005 cuando fue publicada la Release 7 3GPP TR 125.913<sup>30</sup>.

Cabe aclarar que para el desarrollo de esta evolución se dividió el trabajo por objetivos y se fueron lanzando Releases. Una Release de una versión completa de software que se hace pública, es decir, se distribuye junto con su documentación y materiales de soporte, más que una versión.

En este estudio se definió como motivación “desarrollar un marco para la evolución o migración de los sistemas 3GPP hacia un sistema optimizado basado en conmutación de paquetes, con mayores tasas de bit, menores latencias y capaz de soportar múltiples tecnologías de acceso radio”, así también se definieron los objetivos a alcanzar. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

- Aumento significativo de las tasas de datos pico (100 Mbps en enlace descendente / 50 Mbps en enlace ascendente).
- Aumento de las tasas de bits en el borde de las celdas.
- Eficiencia espectral mejorada, (esto es, 2-4 x Release-6).
- Reducción de latencia (menor de 10 ms).
- Ancho de banda escalable para una mayor flexibilidad en las asignaciones de frecuencia.
- Reducción de gastos operativos y de capital, incluida la red de retorno.
- Sistema y complejidad de los terminales razonables, costo y consumo de energía.
- Soporte para inter-funcionamiento con sistemas 3G existentes y sistemas no-3GPP especificados.
- Soporte eficiente de los diversos tipos de servicios, especialmente del dominio PS (Packet switched). Por ejemplo, Voz sobre IP, Presencia, entre otros.
- Optimización para baja velocidad móvil pero compatible con alta velocidad móvil (hasta 500 km/h).

Aunque el término "Evolved UTRA" implica una mejora gradual del sistema UMTS de 3ra generación existente, finalmente se convirtió en una tecnología de acceso de radio diferente. Las principales diferencias son<sup>31</sup>:

- mientras que UMTS comenzó con un enfoque de conmutación de circuitos para la transmisión de datos, que luego se mejoraron cada vez más a través de canales compartidos y la tecnología HSPA (High Speed Packet Access) en dirección a un sistema de conmutación de paquetes, LTE es concebido como un sistema de conmutación de paquetes puro.
- mientras UMTS usaba CDMA, LTE usa OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal) en el enlace descendente (eNodeB => UE) y SC-FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única) en el enlace ascendente (UE => eNodeB)
- mientras que UMTS usaba un ancho de banda de canal de 5 MHz, LTE permite seis anchos de banda de canal diferentes: 1,4 / 3 / 5 / 10 / 15 / 20MHz.
- mientras que UMTS tiene un RNC (Radio Network Controller) entre NodeB y la red central, las funcionalidades de esta entidad de red se dividen entre eNodeB y la red central. En LTE no existe RNC ya que la arquitectura de radio es plana y, por lo tanto, más simple.

A pesar de eso existen similitudes a tener en cuenta. UMTS, así como LTE, utilizan una trama de 10 ms, ambos tienen modos FDD y TDD (Frequency Division Duplexing and Time Division Duplexing) y LTE admite la interoperabilidad total con UMTS y GSM (GERAN/EDGE, las redes de acceso de la 2da generación)<sup>32</sup>.

En cada Release no se pueden hacer modificaciones en los parámetros preexistentes, sino que solo se puede adicionar nuevas tecnologías o características, siempre y cuando sigan siendo compatibles con lo anterior.

La Release 10, llamado LTE-Advanced<sup>33</sup>, se enfocó en incrementar la capacidad, su objetivo principal era aumentar la tasa de bits de manera rentable, cumpliendo los requisitos de IMT-Advanced<sup>34</sup> de la ITU para ser considerada una arquitectura de 4ta generación:

Los puntos a estudiar fueron:

- Incremento de velocidad pico de transmisión de datos (Down Link-DL 3 Gbps, Up Link- UP 1.5 Gbps)
- Mayor eficiencia espectral, desde un máximo de 16 bps/Hz en Release 8 a 30 bps/Hz en Release 10.
- Mayor número de suscriptores activos simultáneamente.
- Rendimiento mejorado en los bordes de la celda, por ejemplo, con la implementación de MIMO 2x2 para Downlink, alcanzando velocidades de al menos 2,40 bps/Hz/celda.

Las principales nuevas funcionalidades introducidas en LTE-Advanced fueron la adición de portadora (Carrier Addition - CA), el uso mejorado de técnicas de múltiples antenas (MIMO) y la compatibilidad con los nodos de retransmisión (Relay Node - RN).

### 3.2.1 Arquitectura

La arquitectura básica de una red LTE se llama EPS (Evolved Packet System) y se caracteriza por ser enteramente basada en paquetes IP, a diferencia de las tecnologías antecesoras. Tanto los servicios en tiempo real (como llamadas de voz) como los servicios de comunicación de datos son transportados utilizando el protocolo IP. Una dirección IP es asignada al dispositivo móvil (UE – User Equipment) cuando se enciende y luego, se libera cuando se apaga. Esta arquitectura se divide, a su vez, en dos subredes EUTRAN y EPC, como se observa a continuación, en la Figura 3.6.

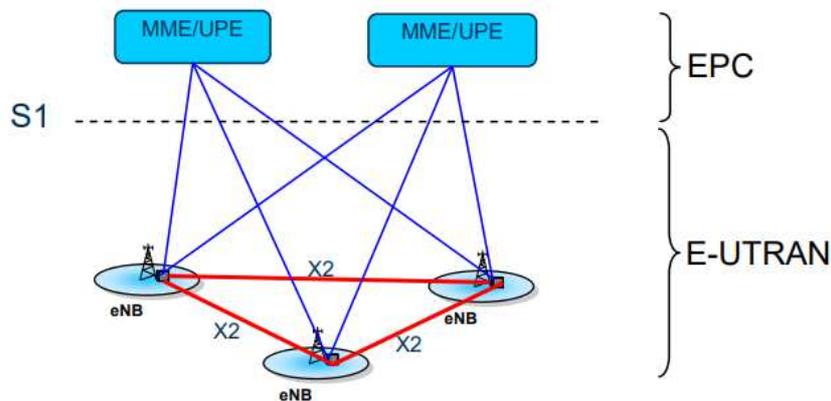


Figura 3.6. Diagrama simplificado de red LTE  
Fuente: "UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)"<sup>35</sup> – Publicado por 3GPP

EUTRAN, o también llamada Evolved UTRAN, proviene de la tecnología 3G, donde UTRAN significa Universal Terrestrial Radio Access Network. Es la capa de radio acceso que conecta los usuarios con la red central llamada EPC (Evolved Packet Core)<sup>36</sup>.

Esta red de acceso es simplemente una red de estaciones base, Evolved NodeB o NodeB Evolucionado (eNB), que genera una arquitectura plana, es decir, que no hay un controlador inteligente centralizado. Los eNB normalmente están interconectados a través de las interfaces X2 y hacia la red central por las interfaces S1. La razón de distribuir la "inteligencia" entre las estaciones base en LTE se debe a la necesidad de acelerar el establecimiento de la conexión y reducir el tiempo requerido de transferencia entre estaciones base, comúnmente llamado handover. Para un usuario final, el tiempo de establecimiento de la conexión para una sesión de datos en tiempo real es crucial en muchos casos, por ejemplo, en los juegos online. El tiempo de handover es esencial para los servicios en tiempo real donde los usuarios finales tienden a finalizar las llamadas si la transferencia demora demasiado.

Los eNB, por lo tanto, son estaciones base complejas que manejan las comunicaciones de radio con múltiples UE en cada celda y llevan a cabo la gestión de recursos de radio y las decisiones de transferencia. Sus funciones son: Control de portador de radio (quién tiene asignado el recurso), control de admisión de radio (quien debe recibir recursos), control de movilidad de la conexión (en caso de handover) y asignación dinámica de recursos ("scheduling", concepto que desarrollaremos más adelante).

Los UE se compone de un módulo de identidad de suscriptor (USIM – UMTS Subscriber Identity Module) y la terminal móvil propiamente dicha (ME - Mobile Equipment). La USIM es la que se encarga de identificar al usuario en la red y es independiente del ME. Esta independencia facilita que el usuario pueda cambiar de equipo sin cambiar su identidad de red. El ME, por otro lado, tiene principalmente dos funciones, las propias de la comunicación con la red celular a través de sus antenas y las funciones adicionales que le permiten al usuario acceder a los servicios que la red ofrece, por medio de un sistema operativo y sus aplicaciones.

El EPC (Evolved Packet Core) es un entorno para proporcionar voz y datos convergentes en una red LTE. Al momento de diseñar la evolución de la red 3G, se decidió que el protocolo a utilizar sería el IP, por lo

cual, el EPC ya no tendría un dominio de conmutación de circuitos. Además, con la implementación de una arquitectura plana, se logró manejar la carga útil (es decir, el tráfico de datos) de una manera más eficiente desde una perspectiva de rendimiento y costos. Para lograrlo se trabajó en el diseño de una red que tuviera pocos nodos y evitara la conversión de protocolos durante la transmisión.

Otra de las características destacables del diseño de la red EPC, es que desde el inicio se buscó un modelo que diferencie el plano de control y el plano de datos como se observa en las arquitecturas de Software-Defined Network<sup>37</sup>.

El Plano de Control (o Control Plane) es el "cerebro" de la red, se encarga del manejo de paquetes relacionados con la administración y configuración del sistema, la señalización, las decisiones de hacia dónde se enviará el tráfico, la negociación con otros servidores, la autenticación, el establecimiento de la llamada, entre otros.

En cambio, el Plano de Datos (también llamado Data Plane o User Data Plane) es el encargado del envío y recepción de los paquetes que contienen la información que los usuarios intercambian. En resumen, el plano de Datos se encarga de *qué* se envía y el plano de Control del *cómo*.

Este modelo permite, no solamente un mejor manejo de la información transmitida, más organizado, sino que también, con esta división funcional, los operadores pueden dimensionar y adaptar su red fácilmente, logrando una escalabilidad independiente.

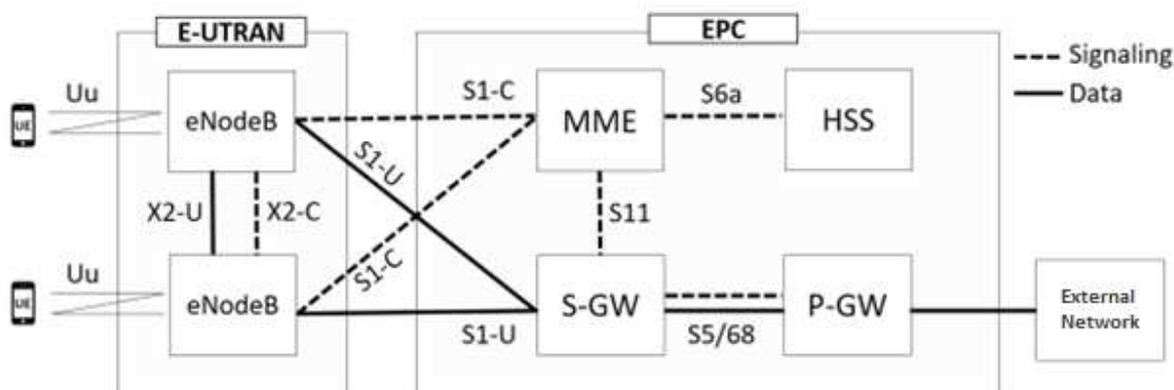


Figura 3.7. Diagrama de arquitectura EPS

En la Figura 3.7 se muestra una arquitectura del EPS cuando equipos de usuario UE están conectados al EPC a través de la red E-UTRAN. Se observa que el EPC se compone de cuatro elementos de red: la puerta de enlace de servicio, o S-GW (Serving Gateway), la puerta de enlace PDN, o P-GW (PDN Gateway), el MME y el HSS. La EPC está conectado a las redes externas que incluyen, por ejemplo, el subsistema de red multimedia sobre IP (IP-Multimedia Subsystem o Core IMS)<sup>38</sup> por el cual se encauzan las llamadas de voz sobre IP, la red global de Internet, el servidor PCRF (Policy and Charging Rules Function) el cual realiza la tarificación, entre otros.

### 3.2.1.1 Servidores

La entidad de administración de movilidad, o **MME** (de Mobility Management Entity) trabaja en el plano de Control gestionando el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. A cada UE registrado se le asigna

un nodo MME según la ubicación geográfica, criterios de balance de carga y otros parámetros. Las funciones de esta entidad son: Autenticación y autorización del acceso, gestión de los servicios portadores EPS o EPS Bearer Service que se encarga de la señalización, gestión de movilidad de los usuarios en modo idle (las terminales que no tienen establecida una conexión de control) y, por último, la señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas.

El servidor **HSS** (Home Subscriber Server) es una base de datos que contiene toda la información relacionada con el usuario y la suscripción. Interviene en la gestión de movilidad, la autenticación del usuario, la autorización de acceso y el establecimiento de la llamada y la sesión. Se trata del reemplazo del HLR (Home Location Register) y el AuC (Authentication Center) proveniente de la tecnología predecesora UMTS.

Los gateways **S-GW** y **P-GW** (Serving Gateway y PDN Gateway) trabajan en el plano de Datos. En conjunto, manejan el tráfico de paquetes de datos IP entre el UE y la red externa.

Específicamente el S-GW es el punto de conexión entre la red de radio acceso, E-UTRAN, y la red central, también llamada red core, EPC. Como su nombre lo indica, este Gateway brinda servicios de enrutamiento al UE para administrar los paquetes IP de entrada y salida. Es el punto de anclaje para la movilidad intra-LTE (es decir, en caso de handover entre eNBs), así como también entre LTE y otros accesos 3GPP y además está lógicamente conectado al P-GW.

En el caso del P-GW, es el punto de conexión entre la red EPC y las redes IP externas, también llamadas PDN (Packet Data Network o Red de paquete de datos, siglas que proviene de la implementación de la red UMTS). Este gateway gestiona paquetes IP desde y hacia las redes PDN. Así mismo, también se encarga de tareas como la asignación de IP o algunas políticas de control y tarificación.

En las especificaciones de 3GPP se indica que estos servers deben ser independientes, pero en la práctica puede que estén combinados.

### 3.2.1.2 Interfaces

Los servidores antes mencionados, que se muestran en la Figura 3.7, se conectan entre sí mediante diferentes interfaces. Las principales son:

- Interface Uu (de radio/aire entre el eNB y el UE)
- Interface S1 (entre E-UTRAN y EPC)
- Interface X2 (entre eNBs)
- Interface S5 (entre S-GW y P-GW)
- Interface S6a (entre MME y HSS)
- Interface S11 (entre el MME y el S-GW)

**Interface de radio Uu:** Es la interface de aire, especificada por la 3GPP como interface LTE-Uu que establece la comunicación del eNB con el UE, enviando mensajes tanto del plano de control como de datos. En el plano de control se maneja señalización por medio de mensajes de RRC (Radio Resource Control). En el plano de usuario, la interface facilita la comunicación directa del móvil UE hasta el EPC.

**Interface S1:** El eNB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-C o S1-MME para el plano de control y S1-U

para el plano de datos, también llamado plano de usuario. Mediante la interfaz S1-C se establece la conexión entre la red de acceso y el MME, a través de la cual se intercambian únicamente los paquetes de control (líneas discontinuas en la Figura 3.7). Los mensajes de señalización se basan en S1 Application Protocol (S1AP)<sup>39</sup>, para la gestión de movilidad. Este protocolo a la vez lleva transparentemente información no relacionada al E-UTRAN, entre el UE y el MME, llamada Non-Access Stratum, NAS. En el plano de datos, la interfaz S1-U conecta la red de acceso con el S-GW a través del uso de un túnel con el GPRS Tunnelling Protocol (GTP). El protocolo GTP-U<sup>40</sup> encapsula los paquetes IP y los transporta a través del túnel GTP llevando los datos del usuario. (línea continua en la Figura 3.7).

**Interface X2:** Es la interface entre los eNBs, utilizada durante un handover inter-nodos. El plano de control trabaja con el protocolo X2 Application Protocol (X2AP)<sup>41</sup>, y transmite señalización de handover y de administración de recursos de radio (RRM- Radio Resource Management). En el plano de usuario, se crea un túnel GTP a través de la X2, por medio del protocolo GTP-U, para comunicar los datos de usuario entre el eNB origen y el eNB destino.

**Interface S5:** Transmite los paquetes de información de los entre el S-GW y el P-GW por medio de un túnel GTP. Ciertas soluciones de elementos de red, integran en un solo elemento las entidades de S-GW y P-GW en un único nodo SAE-GW, en cuyo caso esta interface se convierte en una interface interna.

**Interface S6a:** Comunica la base de datos de suscriptores HSS con el MME. La interfaz utiliza el protocolo Diameter<sup>42</sup> para transferencia de datos de suscripción y autenticación de usuarios. El HSS adicionalmente registra la ubicación del usuario a nivel de área de tracking (seguimiento).

**Interface S11:** Utilizada para comunicación de plano de control vía túnel GTP entre el S-GW y el MME durante un proceso de handover inter-nodos coordinar la transferencia de los canales portadores de datos (Bearer Channels o B-Channels<sup>43</sup>), y durante actualización del área de tracking. Utiliza el protocolo de aplicación GTP-C<sup>44</sup>.

Existen otras interfaces como la Gn y S12, que comunican el EPC de una red LTE con una red 2G/3G, como por ejemplo durante un inter-system handover. Por otro lado, la interface Gi, permite la comunicación del EPC a través del P-GW hacia una red de datos. La interface Gi soporta DHCP<sup>45</sup> y Radius<sup>46</sup> en el plano de control, y en el plano de usuario provee funcionalidades de enrutamiento de paquetes y forwarding (reenvío).

## 3.2.2 Características

### 3.2.2.1 Modulación

Para lograr una alta eficiencia espectral de radio y permitir una planificación eficiente tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia, 3GPP eligió un enfoque de múltiples portadoras para acceso. Para el enlace descendente se seleccionó OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal), y para el enlace ascendente SC-FDMA (Portador único - Acceso múltiple por división de frecuencia) también conocido como DFT (Transformación discreta de Fourier)

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una tecnología multiportadora que subdivide el ancho de banda disponible en una multitud de subportadoras de banda estrecha mutuamente ortogonales **que** transmiten los datos en flujos paralelos. Cada subportadora se modula utilizando

niveles variables de modulación en cuadratura, por lo tanto, cada símbolo OFDM es una combinación lineal de las señales instantáneas en cada una de las subportadoras en el canal.

Hay dos aspectos notables de OFDM. Primero, cada símbolo OFDM está precedido por un prefijo cíclico (CP), que se usa para eliminar efectivamente el ISI (Interferencia Inter-Símbolo). En segundo lugar, el espacio entre las subportadoras es muy estrecho, esto permite hacer un uso eficiente del ancho de banda disponible, sin embargo, prácticamente no hay interferencia entre las subportadoras adyacentes (Interferencia entre portadoras o ICI) debido a que son ortogonales.

La solución OFDM conduce a una alta relación de potencia pico a promedio (PAPR - Peak-to-Average Power Ratio) que requiere amplificadores de potencia caros con altos requisitos de linealidad, lo que aumenta el consumo de energía para el emisor. Esto no es un problema en el eNB, pero llevaría a teléfonos muy caros. Por lo tanto, se seleccionó una solución diferente para la UL. Como se ilustra en la Figura 3.8, la solución SC-FDMA genera una señal con características de portadora única, por lo tanto, con un PAPR bajo.

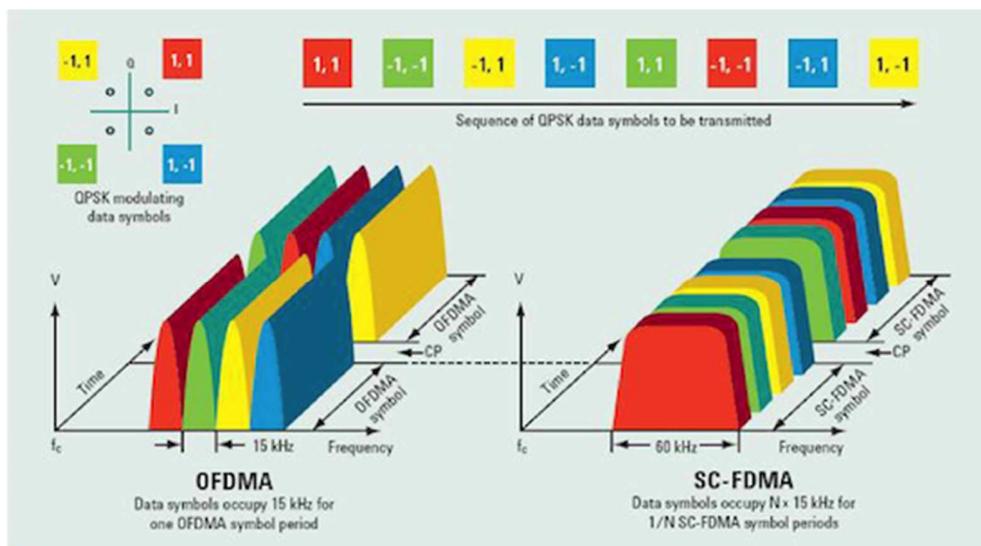


Figura 3.8. Gráfico de portadoras OFDMA y SC-FDMA.

La señal OFDM utilizada en LTE comprende un máximo de 2048 subportadoras diferentes que tienen una separación de 15 kHz. Si bien es obligatorio que los equipos móviles tengan la capacidad de recibir todas las 2048 subportadoras, no todas necesitan ser transmitidas por la estación base, que solo debe ser capaz de soportar la transmisión de 72 subportadoras. De esta manera, todos los equipos móviles podrán hablar con cualquier estación base.

Dentro de la señal OFDM es posible elegir entre tres tipos de modulación en cuadratura para la señal LTE:

- QPSK (= 4QAM), 2 bits por símbolo
- 16QAM, 4 bits por símbolo
- 64QAM, 6 bits por símbolo
- 256QAM, 8 bits por símbolo

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es ampliamente demandada para la transmisión de datos, ya que permite mejores niveles de eficiencia espectral que otras formas de modulación. QAM utiliza dos portadoras en la misma frecuencia desfasadas 90° que están moduladas por dos flujos de datos: I (Inphase) y Q (Quadrature).

El formato exacto de modulación LTE se elige según las condiciones prevalecientes. Las formas más bajas de modulación (QPSK) no requieren una relación señal/ruido tan grande, pero no pueden enviar los datos tan rápido. Solo cuando hay una relación señal/ruido suficiente se puede utilizar el formato de modulación de orden superior.

En la siguiente tabla se puede observar las velocidades que se alcanzan según capa tipo de modulación y también la mejor que produce el sistema MIMO que veremos más adelante

Modulation coding		1.4 MHz	3.0 MHz	5.0 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK 1/2	Single stream	0.7	2.1	3.5	7.0	10.6	14.1
16QAM 1/2	Single stream	1.4	4.1	7.0	14.1	21.2	28.3
16QAM 3/4	Single stream	2.2	6.2	10.5	21.1	31.8	42.4
64QAM 3/4	Single stream	3.3	9.3	15.7	31.7	47.7	63.6
64QAM 4/4	Single stream	4.3	12.4	21.0	42.3	63.6	84.9
64QAM 3/4	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

Modulation coding		1.4 MHz	3.0 MHz	5.0 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK 1/2	Single stream	0.7	2.0	3.5	7.1	10.8	14.3
16QAM 1/2	Single stream	1.4	4.0	6.9	14.1	21.6	28.5
16QAM 3/4	Single stream	2.2	6.0	10.4	21.2	32.4	42.8
16QAM 1/1	Single stream	2.9	8.1	13.8	28.2	43.2	57.0
64QAM 3/4	Single stream	3.2	9.1	15.6	31.8	48.6	64.2
64QAM 1/1	Single stream	4.3	12.1	20.7	42.3	64.8	85.5
64QAM 1/1	V-MIMO (cell)	8.6	24.2	41.5	84.7	129.6	171.1

Figura 3.9 - Velocidad pico de DL (sup.) y UL (inf.) según la modulación

Para permitir un posible despliegue en todo el mundo, soportando tantos requisitos regulatorios como sea posible, LTE se desarrolló para una serie de bandas de frecuencia, bandas operativas E-UTRA, que actualmente van desde 700 MHz hasta 2.7GHz. Los anchos de banda disponibles también son flexibles a partir de 1,4 MHz hasta 20 MHz. LTE está desarrollado para admitir tanto la tecnología de Duplexación por División de Tiempo (TDD) como la de Duplexación por División de Frecuencia (FDD). En la Release 8 hay 15 bandas especificadas para FDD y ocho bandas para TDD. En Release 9 se agregaron cuatro bandas para FDD.

### 3.2.2.2 Bandas de frecuencia

Hay una gran cantidad de asignaciones o espectro de radio que se ha reservado para el uso de LTE en modo FDD. Las bandas de frecuencia LTE FDD están emparejadas para permitir la transmisión simultánea en dos frecuencias. Las bandas, además, tienen una separación suficiente para permitir que las señales transmitidas no perjudiquen indebidamente el rendimiento del receptor. Si las señales están demasiado cerca, entonces la sensibilidad del receptor puede verse alterada.

La gran cantidad de bandas y frecuencias LTE se han asignado en muchas áreas del espectro radioeléctrico. Estas bandas y frecuencias tienen diferentes atributos y algunas tienen restricciones para su funcionamiento. No ha sido posible que todas las asignaciones de banda LTE sean iguales en todo el mundo debido a las diferentes posiciones reguladoras en diferentes países. No ha sido posible obtener asignaciones globales. En algunos casos, las bandas parecen superponerse, esto se debe a los diferentes niveles de disponibilidad en todo el mundo. Esto significa que el roaming con LTE puede tener algunas limitaciones, ya que no todos los teléfonos o UE podrán acceder a las mismas frecuencias.

En LTE, la frecuencia portadora en el enlace ascendente y el enlace descendente está designada por el valor EARFCN, que oscila entre 0-65535. EARFCN significa E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number. En otras palabras, el uso del valor EARFCN se debe a que puede identificar de forma exclusiva la banda LTE y la frecuencia de la portadora. Por ejemplo, la Band 1 y Band 4 pueden tener la misma frecuencia de recepción 2110-2170 MHz, pero su EARFCN es diferente. Además, el EARFCN es independiente del ancho de banda del canal. En el anexo 1 se encuentra la tabla con todas las bandas LTE a partir de la Rel 16 (Sept 2019)

La relación entre EARFCN y su frecuencia portadora de UL/DL está dada por la ecuación a continuación:

$$F_{DL} = F_{DL\_low} + 0.1(N_{DL} - N_{Offs-DL}) \quad \text{para Downlink}$$

$$F_{UL} = F_{UL\_low} + 0.1(N_{UL} - N_{Offs-UL}) \quad \text{para Uplink}$$

dónde,

$N_{DL}$  = enlace descendente EARFCN

$N_{UL}$  = enlace ascendente EARFCN

$N_{Offs-DL}$  = desplazamiento (offset) utilizado para calcular el enlace descendente EARFCN

$N_{Offs-UL}$  = desplazamiento utilizado para calcular el enlace ascendente EARFCN

**Ejemplo:** banda 3 FDD, Earfcn DL = 1575

$$F_{DL} = F_{DL\_low} + 0.1(N_{DL} - N_{Offs-DL})$$

$$F_{DL} = 1805 + 0.1(1575 - 1200) = 1842.5 \text{ MHz}$$

$$N_{DL} = N_{Offs-DL} + 10(F_{DL} - F_{DL\_low})$$

$$N_{DL} = 1200 + 10(1842.5 - 1805) = 1575$$

### 3.2.2.3 Trama

Hay dos dimensiones a considerar en la señalización LTE, cada una con su propia unidad básica. En el eje horizontal, la representación de una señal inalámbrica LTE se realiza por tiempo. En el eje vertical, se representa por frecuencia. Ambas dimensiones se combinan para dar la ubicación exacta de la señal LTE que transporta los bits de información.

La unidad principal de LTE utilizada en el eje horizontal o temporal es una trama. El sistema LTE se estructura siguiendo dos tipos de patrones de trama, de tipo 1 y de tipo 2. A continuación se explicarán

las tramas de tipo 1 que utiliza el modo de Duplexación por División de Frecuencia (FDD), el más utilizado por esta arquitectura.

La trama tipo 1 está representada por 10 ms de longitud. Cada trama se divide en 10 subtramas de 1ms, que a su vez se divide en 2 intervalos de tiempo llamados “time slot” de 0.5 ms como se observa en la Figura 3.10.

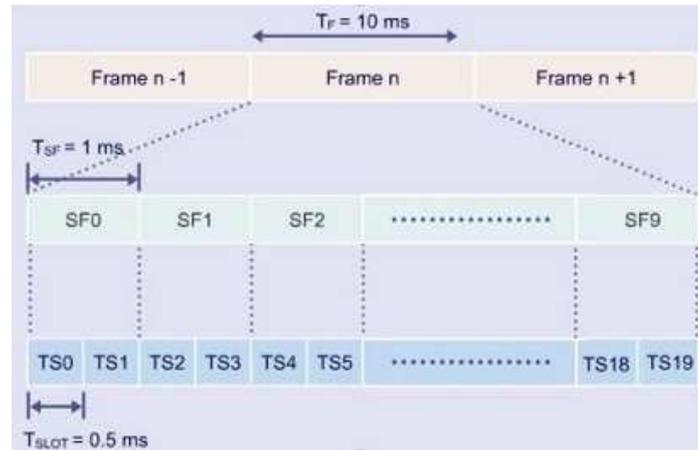


Figura 3.10 – Diagrama de la trama LTE Tipo 1

Cada uno de estos time slot tiene seis (o siete según ciertos criterios) símbolos OFDM de  $66,7 \mu\text{s}$  de longitud. Estos símbolos constituyen la unidad más básica de la trama.

La trama de tipo 2 utiliza en el modo de Duplexación por División de Tiempo (TDD), un tipo de comunicación bidireccional en el que una trama de 10 ms se divide en dos medias tramas de 5 ms. Sin embargo, el modo FDD es el mecanismo más ampliamente implementado en la tecnología celular desde los tiempos de GSM, y la estructura de trama utilizada en la mayoría de los textos LTE.

En el eje vertical o de frecuencia, la representación de la señal LTE se realiza mediante subportadoras, de 15 kHz de altura. Los eNBs asignan recursos o bits a los UE en términos de Bloques de Recursos, (RB - Resource Blocks). Estos RB son la representación real de los recursos utilizados en la señal LTE, que transportan los bits de información. Los eNBs asignan RB a los UE en función de su propio algoritmo de demanda y escasez. Un RB está compuesto por 12 subportadoras en frecuencia y por seis símbolos OFDM en el tiempo. La unidad más pequeña, llamada Elemento de Recurso (RE - Resource Element), se compone de una subportadora por un símbolo OFDM y representan el Símbolo de Modulación, que transporta de uno a seis bits de datos dependiendo del esquema de modulación utilizado. Por ejemplo, un esquema de modulación QPSK significaría que se transfieren 2 bits de datos en un RE.

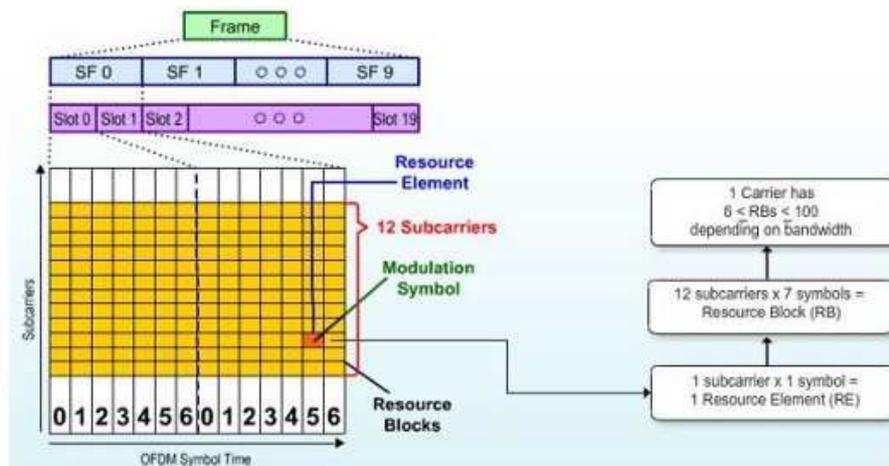


Figura 3.11 – Diagrama del Resource Block y Resource Element.

Dado a que el ancho de banda es de 10 MHz, se obtienen 667 subportadoras de 15kHz cada una. Sin embargo, en LTE la cantidad de subportadoras utilizables es menor debido a que (según la Release 8) 33 de ellas son utilizadas en el comienzo y otras 33 en el final de la trama como subportadoras de guarda para proteger del ruido y la distorsión. A su vez, otra de las subportadoras actúa como un punto central, llamada subportadora DC (Direct Current Subcarrier), la cual se envía vacía, es decir, sin información. Esta última es muy importante en los sistemas OFDM, ya que los nuevos UE que intentan conectarse al sistema LTE por primera vez usan la subportadora DC para ubicar el centro de una banda de frecuencia LTE. Por lo tanto, quedan 600 subportadoras utilizables para la transmisión de datos. Como fue mencionado anteriormente, un RB consta de 12 portadoras, por lo cual se obtienen 50 RBs disponibles para asignar por cada 10MHz de frecuencia.

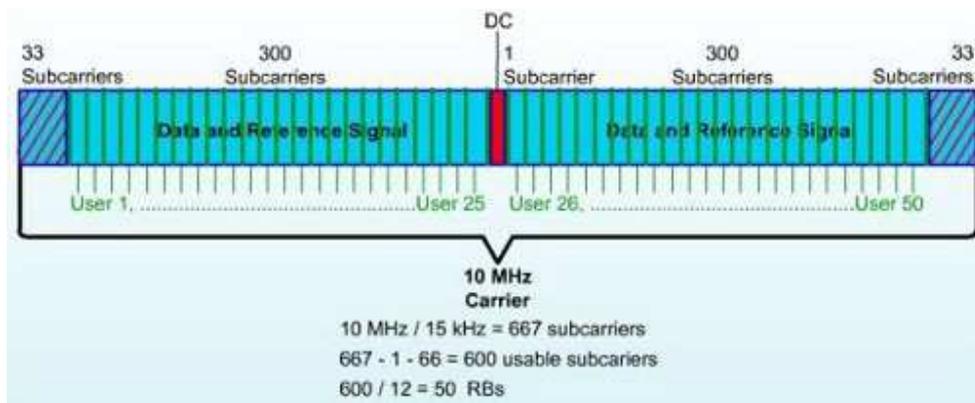


Figura 3.12 – Portadoras dentro de 10MHz.

La Tabla 3.1 resume algunos de los parámetros de la capa física principal para LTE en modo FDD.

Ancho de Banda del Canal (MHz)	1,25	2,5	5	10	15	20
Duración de Trama (ms)	10					
Duración de Subtrama (ms)	1					
Espaciado de Subportadora (kHz)	15					
Frecuencia de Muestreo (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Tamaño de FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Ocupación de Subportadoras (incluida la DC)	76	151	301	601	901	1201
Guarda de Subportadoras	52	105	211	423	635	847
Numero de Bloques de Recursos (RB)	6	12	25	50	75	100
Ocupación de Ancho de Banda del Canal (MHz)	1,140	2,265	4,515	9,015	13,515	18,015
Eficiencia de Ancho de Banda de DL	77,10%	90%	90%	90%	90%	90%
Símbolos OFDM por Subtrama	7/6 (short/long CP)					
Longitud de CP (Short CP) (μs)	5,2 (first symbol) / 4,69 (six following symbols)					
Longitud de CP (Long CP) (μs)	16,67					

Tabla 3.1 – Parámetros de la capa física.

Además de la reserva de subportadoras para el establecimiento correcto de la comunicación, en LTE se suma la utilización de "Señales de referencia" y "Señales de sincronización". Estas señales son algo exclusivo de la capa física y no están alineadas con otros canales o capas superiores.

1. **Señales de referencia:** son utilizadas por el UE para determinar la información del nivel de potencia del canal de enlace descendente (DL). El UE utiliza esta información de nivel de potencia como una "referencia" para tomar mediciones, lo que ayuda a determinar las condiciones del canal, el escenario de transferencia e incluso la selección de celdas. Existen diferentes tipos de señales de referencia cuya ubicación en el eje de frecuencia/tiempo se basa en los puertos de antena utilizados para la transmisión de estas señales. A continuación, se muestra una señal de referencia de enlace descendente, donde el elemento de recurso se asigna en el primer y antepenúltimo símbolo OFDM.

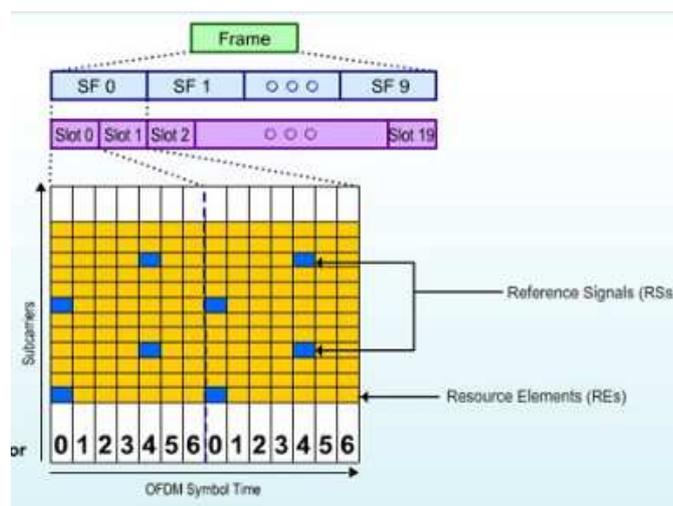


Figura 3.13 - Señales de referencia en la trama de enlace descendente.

2. **Señales de sincronización:** son utilizadas por UE para sincronizar a nivel de time slot y de trama con la red LTE, la primera vez que se conecta un UE. Las señales de sincronización son independientes del ancho de banda, y el UE comienza a sintonizar señales de sincronización desde la frecuencia más pequeña de 1.4 MHz. Además, para cada señal tienen una posición fija, ocupando el time slot 0 y 10 alrededor del intervalo central (determinado por la subportadora DC) de la trama LTE. Hay dos tipos de señal de sincronización: la sincronización primaria, señal que ocupa el último símbolo OFDM y señal de sincronización secundaria que ocupa el anteúltimo símbolo OFDM. En total, se asignan 6 RB o 72 subportadoras que se centran en la subportadora DC. Sin embargo, solo se utilizan 62 subportadoras. Una señal de sincronización es la primera señal que adquiere UE, y es utilizada por UE para determinar la cuadrícula de frecuencia/tiempo del eNB y la Identidad de la Celda Física (PCI – Physical Cell Identity). A continuación, se muestra un diagrama de una señal de sincronización:

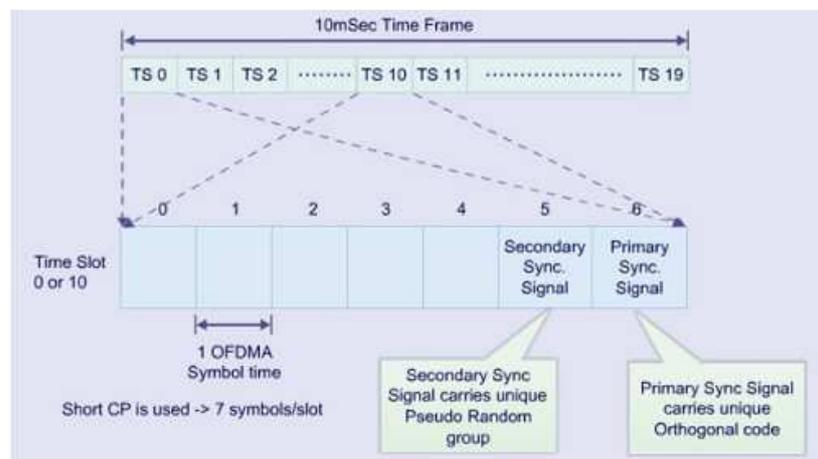


Figura 3.14 - Señales de Sincronización.

### 3.2.2.4 Protocolos

Un stack (o pila) de protocolos es un conjunto de protocolos estandarizados que permiten la comunicación de los dispositivos realizando negociaciones según sus diferentes capas. Estas capas (o Layers) pueden estar basadas en el modelo OSI<sup>47</sup>, el modelo TCP/IP<sup>48</sup> u otros, el cual establece las bases para que dos dispositivos distintos se “entiendan” y puedan establecer la comunicación.

Los stack de protocolos que permiten la comunicación LTE se dividen según su función. Se encuentra el stack de protocolos relacionado al plano de control, que se encarga de la comunicación de señalización entre el UE y el MME, y el stack relacionado con el plano de datos por medio del cual se comunican el EU y los gateways (S-GW y P-GW).

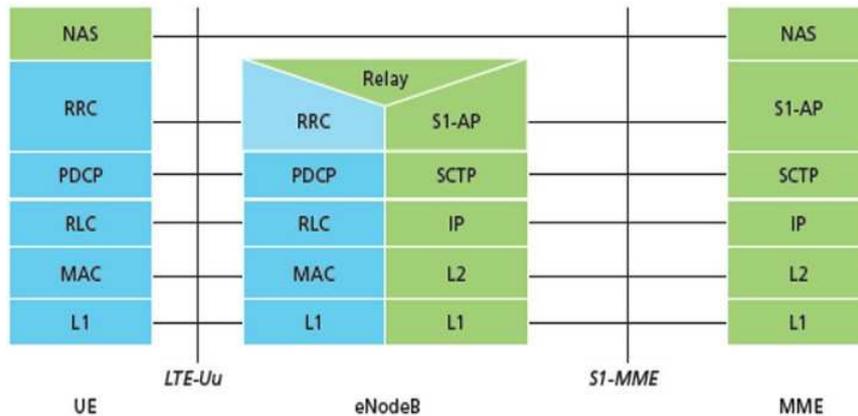


Figura 3.15. Stack de protocolos del Plano de Control  
Fuente: "LTE for Layman (Part 2) - Scaling the LTE" Autor: Aayush Shrut<sup>49</sup>

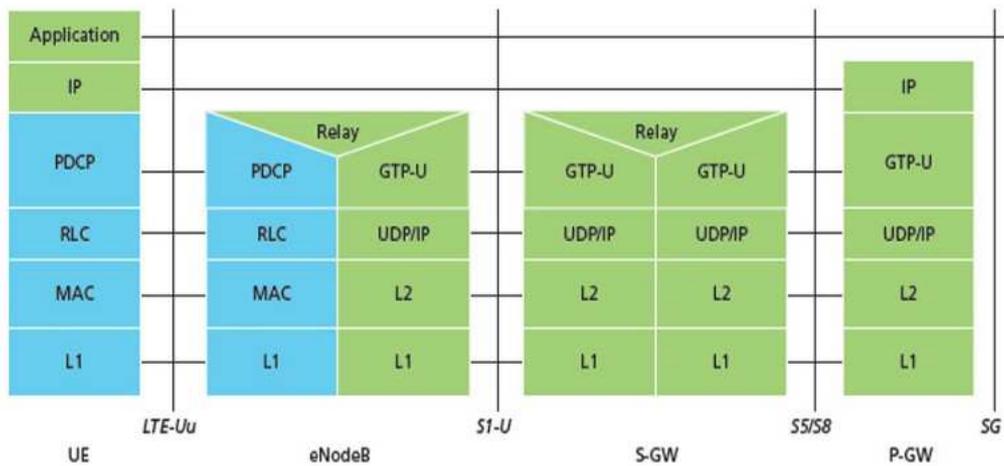


Figura 3.16 Stack de protocolos del Plano de Datos  
Fuente: "LTE for Layman (Part 2) - Scaling the LTE" Autor: Aayush Shrut<sup>47</sup>

El área celeste de las figuras está relacionada con los protocolos de acceso (Access Stratum Protocol)<sup>50</sup>, que proporcionan la habilidad, infraestructura y accesibilidad al UE para adquirir las capacidades y servicios de la red. Por su parte, el área verde se trata de los protocolos de no-acceso (No-access Stratum protocol o NAS)<sup>51</sup>, los que se encargan del tráfico de mensajes entre el UE y los componentes de la red central, S-GW, P-GW y MME. Algunos de los protocolos mencionados son únicamente para LTE, otros en cambio, como GTP-U, SCTP<sup>52</sup> y UDP/IP<sup>53</sup> son protocolos globales. A continuación, se muestran algunos de los protocolos relacionados específicamente con la comunicación LTE:

1. **L1**: Se encarga del manejo de la capa física. Es responsable del control de potencia, medición de la interfaz de aire y búsqueda inicial de redes LTE disponibles.
2. **Medium Access Control (MAC)**: Mapea los canales lógicos de transporte. Es el vínculo en la capa de transporte con la capa física. Tiene corrección de errores (HARQ<sup>54</sup>), manejo de prioridad entre los UE y priorización de canales

3. **Radio Link Control (RLC):** Responsable de transferir a las capas más altas los PDU (Protocol Data Unit, o Unidad de Dato de Protocolo). Debe reordenarlos si no llega en secuencia y concatenarlos en el caso que sean fragmentados. Tiene corrección de errores (ARQ<sup>55</sup>).
4. **Packet Data Convergence Control (PDCP):** Comprime la cabecera IP, mantiene la transferencia de información con números de secuencia PDCP. Cifra la información y trabaja con los protocolos de control para verificar la integridad de la información.
5. **Radio Resource Control (RRC):** Esta capa es exclusiva del plano de control y es responsable de la señalización. Incluye funciones de difusión (o broadcasting) de la información del sistema, paginación y establecimiento, mantenimiento y liberación de las conexiones de radio a través de la asignación de portadoras para establecer conexiones constantes entre los diferentes nodos. El RRC es una parte importante en la red LTE ya que cada UE deberá establecer una conexión con el RRC antes del envío de cualquier dato.
6. **NAS:** Son los protocolos de no-acceso. Esta capa es la responsable del mantenimiento de una conexión IP con el UE en movimiento, así como también, del aviso de establecimiento de llamadas, el manejo para handover, y el establecimiento de sesiones de datos.
7. **Relay:** Un Relay de LTE-Advanced es una estación base de baja potencia equivalente a un repetidor avanzado, o un mini eNB que brinda servicios a los UE que se encuentran en el borde de la celda, donde la señal llega con poca intensidad. La capa Relay realizan algunas tareas de eNB como la decodificación básica de datos y permite la conexión del UE con el eNB para tener una funcionalidad completa.

### 3.2.2.5 Canales

El sistema LTE utiliza tres tipos de canales diferentes, cada uno usado principalmente para segregar el procesamiento de información. Los tres tipos de canales son:

**Canal lógico:** Se utiliza para la comunicación entre las de capas RLC y MAC. Denota "*qué tipo*" de información se transporta, como "mensaje de difusión" o "mensaje de señal de control", etc.

**Canal de transporte:** se utiliza para la comunicación entre las capas MAC y L1 (física). Denota información de "*cómo se transporta*", como las opciones de codificación, mecanismo de corrección de errores, esquema de modulación, etc.

**Canal físico:** Se utiliza para la comunicación entre L1 y la interfaz aérea. Denota "*dónde está*" la información transportada, la ubicación exacta de los bits en una señal LTE.

Los canales se relacionan entre sí de acuerdo a como se muestra en la Figura 3.17 y Figura 3.18, según la dirección del enlace ascendente y descendente

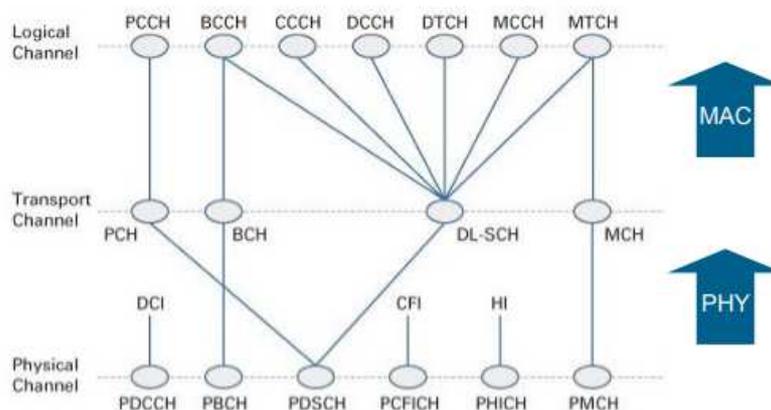


Figura 3.17 – Relación de canales Downlink.  
Fuente: "LTE for Layman (Part 2) - Scaling the LTE" Autor: Aayush Shrut<sup>47</sup>

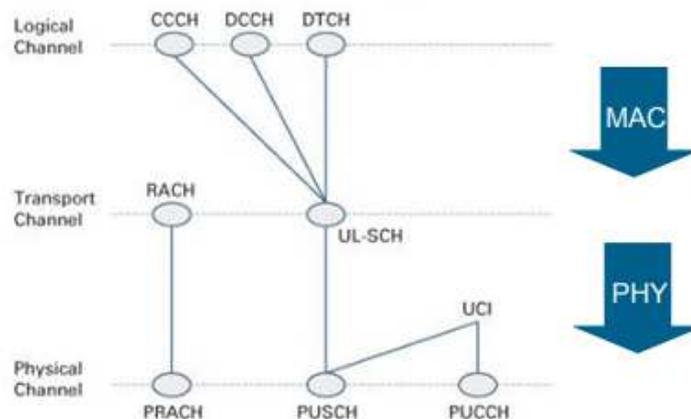


Figura 3.18 - Relación de canales Uplink.  
Fuente: "LTE for Layman (Part 2) - Scaling the LTE" Autor: Aayush Shrut<sup>47</sup>

### 3.2.2.5.1 Canales físicos

Dentro de los canales físicos se distinguen los de DL y los de UL y a su vez, cada uno se puede distinguir en los que realizan transporte del Plano de Datos, que envía los paquetes de datos de y para los UE, y los del Plano de Control, encargados del manejo de información interna de la red<sup>56</sup>.

Canales físicos DL del plano de datos:

- **Physical Broadcast Channel (PBCH)**

Este canal difunde un número limitado de parámetros esenciales para el acceso inicial de la celda, como el ancho de banda de DL, la estructura del Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH) y los ocho bits más significativos del número de trama del sistema. Estos parámetros se llevan en lo que se llama un Master Information Block (MIB) que tiene 14 bits de longitud. El PBCH está diseñado para ser detectable sin conocimiento previo del ancho de banda del sistema y para ser accesible en el borde de la celda. El MIB se codifica a una velocidad de

codificación muy baja y se asigna a las 72 subportadoras centrales (6 RB) de la estructura OFDM. La transmisión PBCH se extiende por cuatro tramas de 10 ms (sobre la subtrama n° 0) para abarcar un período de 40 ms. Cada subtrama es autodecodificable, lo que reduce la latencia y el agotamiento de la batería del UE en caso de buena calidad de señal, de lo contrario, el UE debe realizar un proceso de soft-combine de múltiples transmisiones hasta decodificar el PBCH. El PBCH se transmite utilizando el Código de Bloque de Frecuencia Espacial (SFBC - Space Frequency Block Code), que es una forma de diversidad de transmisión, en caso de antenas múltiples, lo que permite una mayor cobertura.

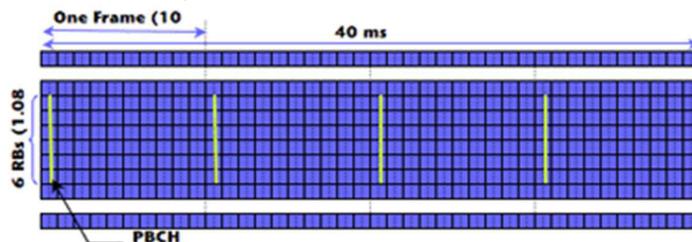


Figura 3.19 – Estructura de PBCH  
Fuente: "LTE Physical Layer Overview - Part III"<sup>54</sup>

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

Es el canal principal de transmisión de datos que se asigna a los usuarios de forma dinámica y oportunista, transporta el DL-SCH y el PCH. El transporte de datos se realiza en los Bloques de Transporte (TB) que se pasan de la capa MAC a la capa física una vez por Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI) que es 1 ms, para cumplir con los requisitos de baja latencia.

Los datos se asignan a capas espaciales de acuerdo con el tipo de técnica de antena múltiple y luego se asignan a un símbolo de modulación que puede ser QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

Los recursos físicos se asignan en base a dos bloques de recursos para un TTI (1 ms) denominado "par de bloques de recursos", que corresponde a 12 subportadoras (180 kHz) para 14 símbolos OFDM (modo CP normal).

El PDSCH también se utiliza para transmitir información de difusión no transmitida en el PBCH que incluye Bloques de Información del Sistema (SIB) y mensajes de paging (búsqueda).

Su tamaño está determinado por el indicador DCI del canal de control.

- **Physical Multicast Channel (PMCH)**

Este canal define la estructura de la capa física para transportar servicios de Multimedia Broadcast and Multicast Services (MBMS), que fue agregado en la Release 9. El PMCH se transmite en subtramas específicas dedicadas donde el PDSCH no se transmite.

Canales físicos DL del plano de control:

El control ocupa los primeros 1, 2 o 3 símbolos OFDM en una subtrama que se extiende por todo el ancho de banda del sistema como se muestra a continuación. En los sistemas de banda estrecha (menos de 10 RB), los símbolos de control se pueden aumentar para incluir el cuarto símbolo OFDM.

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

Transporta la asignación de recursos para los UE, es decir, indica dónde se están transportando los PCH y DL-SCH e información relativa al Hybrid ARQ. Esta información está contenida en un mensaje de Información de Control de Enlace Descendente (DCI – Downlink Control Information). Se pueden transmitir múltiples PDCCH en la misma subtrama utilizando Elementos de Canal de Control (CCE – Control Channel Elements), cada uno de los cuales es un conjunto de cuatro Elementos de Recurso (RE) conocidos como Grupos de Elementos de Recursos (REG – Resource Element Groups).

Los PDCCH utilizan modulación QPSK, en donde se asignan cuatro símbolos QPSK a cada REG. Además, se pueden usar 1, 2, 4 u 8 CCE para un UE dependiendo de las condiciones del canal para garantizar una robustez suficiente.

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

Este canal transporta el Indicador de Control de Trama (CFI – Control Frame Indicator) que incluye el número de símbolos OFDM utilizados para la transmisión del canal PDCCH de control en cada subtrama (generalmente 1, 2 o 3). Un CFI de 32 bits de longitud ocupa 16 Elementos de Recursos en el primer símbolo OFDM de cada trama DL, utilizando modulación QPSK.

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

Lleva el HARQ mensajes ACK/NAK que indica al UE si el eNB recibió correctamente los datos del usuario del UL transportados en el PUSCH. La modulación BPSK se utiliza con un factor de repetición de 3 para mayor robustez.

Canales físicos UL del plano de datos:

- **Physical uplink shared channel (PUSCH)**

Este canal transporta datos del usuario (UL-SCH) a través de un canal codificado. Es compatible con la modulación QPSK y 16QAM y opcionalmente 64QAM.

Los bits de información se codifican primero, antes de ser adaptados por un proceso de coincidencia de velocidad para lograr una velocidad de código final adecuada. Luego, los símbolos de datos contiguos se mapean a símbolos SC-FDMA contiguos en el dominio del tiempo, antes de asignarse a las subportadoras. Después de este proceso de entrelazado, los bits son mezclados para luego continuar con la asignación de modulación, DFT-spreading, asignación de subportadoras y modulación OFDM. La codificación del canal es similar a la del enlace descendente.

El intervalo de scheduling o planificación del enlace ascendente es de 1 ms, similar al enlace descendente. Sin embargo, es posible 'agrupar' 4 TTI para mejorar el rendimiento en el borde de la celda y reducir la sobrecarga del protocolo de capa superior. En este caso, una unidad PDU de capa MAC está segmentada para su transmisión a través de múltiples TTI. En el dominio de la frecuencia, las transmisiones se asignan en base a múltiples bloques de recursos de 180 kHz. Los recursos de enlace ascendente correspondientes al mismo conjunto de subportadoras se asignan a las dos ranuras (o time slots) de una subtrama. Sin embargo, el salto de frecuencia entre ranuras es una opción mediante la cual se utilizan diferentes subportadoras para la segunda ranura, lo que da como resultado una ganancia de diversidad de frecuencia y una

interferencia promedio, siempre que se usen diferentes secuencias de salto en las celdas vecinas.

El PUSCH, además de llevar los datos del usuario, transporta cualquier información de control necesaria para decodificar la información, como los indicadores de formato de transporte y los parámetros MIMO. Los datos de control se multiplexan con datos de información antes de la difusión de DFT. (DFT Spreading)

Su tamaño está determinado por el indicador UCI del canal de transporte.

Canales físicos UL del plano de control:

- **Physical uplink control channel (PUCCH)**

La señalización de control contiene datos del enlace ascendente, independientemente de los datos de tráfico. Incluyen mensajes ACK/NACK de HARQ en respuesta a la transmisión DL, indicadores de calidad de canal (CQI), feedback de MIMO (Indicador de Rango, RI; Indicador de Matriz de Precodificación, PMI) y solicitudes de planificación (SR - Scheduling Request) para transmisión de UL. Este canal transmite en una región de frecuencia en el borde del ancho de banda del sistema como se muestra en la Figura 3.20. Consiste en un RB por transmisión en un extremo del ancho de banda del sistema, seguido de un RB en el siguiente time slot en el extremo opuesto del espectro del canal, haciendo uso de la diversidad de frecuencia con una ganancia estimada de 2 dB. Una Región de Control PUCCH abarca dos RB.

La siguiente tabla (Tabla 3.2) muestra el número típico de regiones PUCCH para diferentes anchos de banda del sistema. BPSK o QPSK se utilizan para la modulación de la información PUCCH. La estructura PUCCH se muestra en la Figura 3.20

Ancho de banda del sistema (MHz)	1,25	2,5	5	10	15	20
PUCCH Control Regions	1	2	4	8	12	16
Numero de Resource Blocks	2	4	8	16	24	32

Tabla 3.2 – Numero de regiones PUCCH según el ancho de banda del sistema

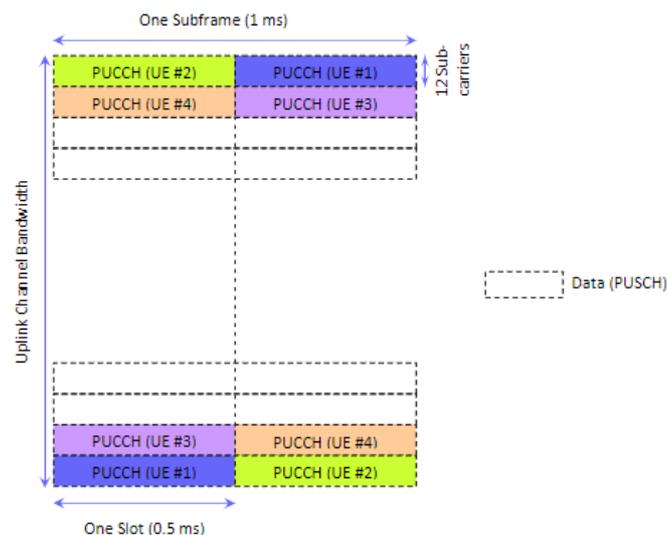


Figura 3.20 – Estructura PUCCH  
Fuente: "LTE Physical Layer Overview - Part III"<sup>54</sup>

- **Physical random access channel (PRACH):**

Este canal lleva el preámbulo de acceso aleatorio que un UE envía para acceder a la red en modo no sincronizado y se utiliza para permitir que el UE sincronice la temporización con el eNB. Como tanto la ubicación como la identidad del UE son desconocidas para la red central LTE, PRACH es el único canal que puede ser utilizado por el UE para el acceso no sincronizado a la red. Se compone de 72 subportadoras en el dominio de frecuencia (6 Bloque de Recursos, 1.08 MHz). LTE FDD define cuatro formatos diferentes de preámbulo de acceso aleatorio (RA) con diferente preámbulo y duración del prefijo cíclico para acomodar diferentes tamaños de celda.

A continuación, se muestra (en la Figura 3.21) un diagrama de los canales críticos de enlace ascendente y descendente, en cuanto a cómo se asignan en la matriz de frecuencia/tiempo:

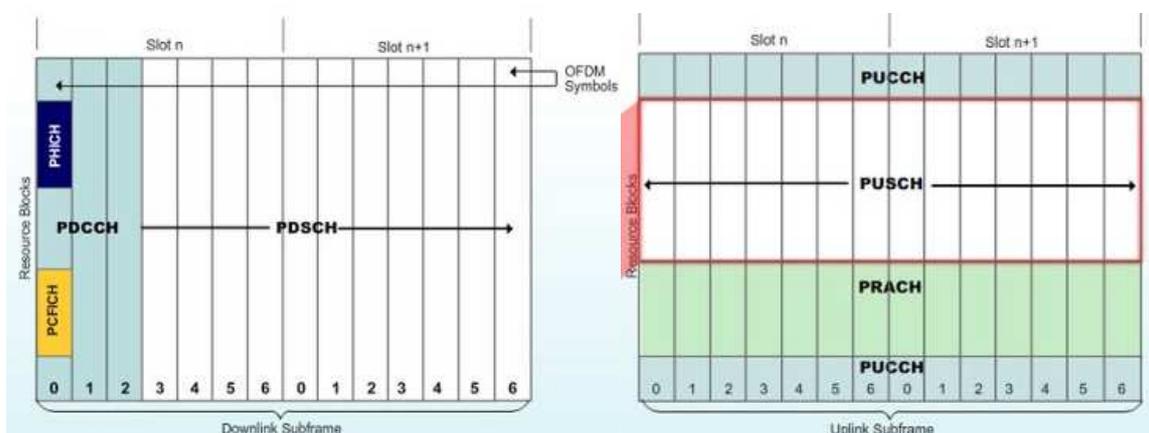


Figura 3.21 – Diagrama de canales críticos de Downlink (izq.) y Uplink (der.)

### 3.2.2.5.2 Canales de transporte

Los canales de transporte se encuentran en los bloques de transporte en la parte inferior de la MAC. Representan los servicios de transferencia de datos ofrecidos por el bloque físico y se definen por la forma en que se transporta la información, las diferentes modulaciones de la capa física y la forma en que se codifican.

Los canales de transporte utilizan diferentes modulaciones y codificaciones. Los canales de paginación y difusión deben recibirse en todas partes de la celda, por lo que deben usar una modulación robusta. El DL-SCH puede ser optimizado por el UE.

Canales de transporte de DL:

- **Paging Channel (PCH)**  
Transporta los mensajes de paging hacia el UE que le indican si tiene algún mensaje o llamada entrante cuando está en modo idle (inactivo).
- **Broadcast Channel (BCH)**  
Transporta los mensajes de difusión.

- **Downlink Shared Channel (DL-SCH)**  
Es el canal principal que transporta los datos del enlace descendente, es decir, contiene la información que el usuario recibe.
- **Multicast Channel (MCH)**  
Transporta los mensajes de multidifusión

Canales de transporte de UL:

- **Uplink Shared Channel (UL-SCH)**  
Es el canal principal que transporta los datos del enlace ascendente, es decir, contiene la información que el usuario envía.
- **Random Access Channel (RACH)**  
Utilizado para el acceso aleatorio en el momento en que un UE nuevo quiere acceder a la red.

3.2.2.5.3 Canales Lógicos:

Los canales lógicos se encuentran en la parte superior de la capa MAC y son los que permiten el paso de la información de la interfaz de radio a la capa RLC. Los tipos de canales lógicos incluyen canales de control (para datos de plano de control) y canales de tráfico (para datos de plano de usuario).

Canales del plano de control:

- **Broadcast Control Channel (BCCH)**  
Canal de DL dedicado a transmitir información de control del sistema.
- **Paging Control Channel (PCCH)**  
Canal de DL que transfiere información de paginación. Este canal se utiliza para buscar un UE cuando la red no conoce en que celda se encuentra.
- **Common Control Channel (CCCH)**  
Canal de UL para transmitir información de control entre los UE y la red. Este canal es utilizado por los UE que no tienen conexión RRC con la red, por ejemplo, cuando se quiere iniciar la conexión.
- **Dedicated Control Channel (DCCH)**  
Canal bidireccional de punto a punto que transmite información de control dedicada entre un UE y la red. Usado por UE que tienen una conexión RRC para, por ejemplo, para acciones de control que incluyen control de potencia, handover, entre otros.
- **Multicast Control Channel (MCCH)**  
Este canal se utiliza para transmitir información de multidifusión.

Canales del plano de datos:

- **Dedicated Traffic Channel (DTCH)**  
Es un canal punto a punto, dedicado a un UE, para la transferencia de información del usuario. Un DTCH puede existir tanto en el UL como en el DL.
- **Multicast Traffic Channel (MTCH)**  
Canal de DL que se utiliza para la transmisión de información de multidifusión.

### 3.2.2.6 *Proceso de registro*

A modo de ejemplo se detalla a continuación el paso a paso del camino lógico de comunicación al momento en que un UE quiere registrarse en una red LTE:

1. El UE se enciende por primera vez, momento en el cual adquiere la señal de sincronización utilizando la subportadora DC (centro de cualquier banda de frecuencia).
2. A partir de las señales de sincronización, el UE obtiene la identidad física de la celda (PCI).
3. Luego adquiere el ancho de banda usando MIB emitido en PBCH, nuevamente usando la ayuda de la subportadora DC.
4. De la PCI y el ancho de banda adquirido anteriormente, deriva la ubicación de PHICH.
5. Al leer el canal PHICH, el UE conoce los símbolos OFDM para PDCCH que contienen información de ubicación de control almacenada en DCI.
6. Al leer los DCI, el UE adquiere la ubicación de los SIB críticos almacenados en PDSCH.
7. A partir de la información recopilada después de leer los SIB, el UE está listo para realizar la conexión inicial utilizando el canal PRACH.
8. Después de establecer una conexión, UE transfiere sus datos usando el canal PUSCH y los recibe en el canal PDSCH.

### 3.2.2.7 *Scheduler*

Al ser LTE una solución que divide claramente la red de radio acceso y la red central, el proceso de Scheduling, o planificación, solo involucra al UE y el eNB correspondiente. En este proceso el eNB decide a qué UE dar recursos y cuántos recursos se les debe dar para enviar o recibir datos. Este se realiza por subtrama, es decir, sobre la capa de protocolo MAC, con lo cual el tiempo que demora es de 1ms. A diferencia de la red UMTS en la cual el Scheduling lo realizaba el controlador, esto baja considerablemente los tiempos de asignación de recursos.

El Scheduler o Planificador es un componente clave para lograr la utilización rápida, ajustada y eficiente del espectro radial. El intervalo de tiempo de transmisión (TTI) se de 1 ms. Durante cada TTI, el Scheduler eNB deberá:

- **Considerar el entorno físico de radio por UE.** Los UE informan la calidad de radio percibida en una entrada al Scheduler para decidir qué esquema de modulación y codificación utilizar. La solución se basa en la adaptación rápida a las variaciones de canal, empleando HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request o solicitud de repetición automática híbrida) con Soft Combining (una técnica de corrección de errores) y adaptación de velocidad.
- **Priorizar los requisitos de QoS entre los UE.** LTE admite servicios sensibles al retraso en tiempo real, así como servicios de comunicación de datos que requieren altas tasas de pico de datos.
- **Informar a los UE de los recursos de radio asignados.** El eNB asigna los recursos al UE tanto para el enlace descendente (DL) como para el enlace ascendente (UL). Por cada UE asignado a un TTI, los datos del usuario se transportarán en un bloque de transporte (TB). Para el caso de DL, puede haber un máximo de dos TB generados por TTI y por UE si se utiliza una multiplexación espacial. El TB se envía a través de un canal de transporte. En LTE, el número de canales disminuye en comparación con UMTS. Para el plano de usuario, solo hay un canal de

transporte compartido en cada dirección. El TB enviado en el canal, por lo tanto, puede contener bits de varios servicios, multiplexados juntos.

### 3.2.2.8 Agregado de portadoras (Carrier Aggregation)

Según se explica en la web oficial de 3GPP, con LTE-Advanced<sup>31</sup> surgieron nuevas configuraciones que buscan la eficiencia del espectro, disminución de latencia y principalmente el aumento de las velocidades de transmisión. Uno de ellos es el método de agregado de portadoras.

La forma más directa de aumentar la capacidad es agregar más ancho de banda. Dado que es importante mantener la compatibilidad con versiones anteriores de los UE Release 8 y Release 9, el aumento del ancho de banda en LTE-Advanced se proporcionó mediante el agregado de portadoras R8 / R9 (según la release) y se puede usar tanto para FDD como para TDD.

Cada portadora agregada se conoce como portadora de componentes. La portadora de componentes puede tener un ancho de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz y se puede agregar un máximo de cinco portadoras de componentes. Por lo tanto, el ancho de banda máximo es de 100 MHz. El número de portadoras agregadas puede ser diferente en DL y UL. Sin embargo, el número de portadoras de componentes UL siempre debe ser menor que el de DL. Las portadoras de componentes individuales también pueden tener diferentes anchos de banda, como se muestran a continuación en la Figura 3.22.

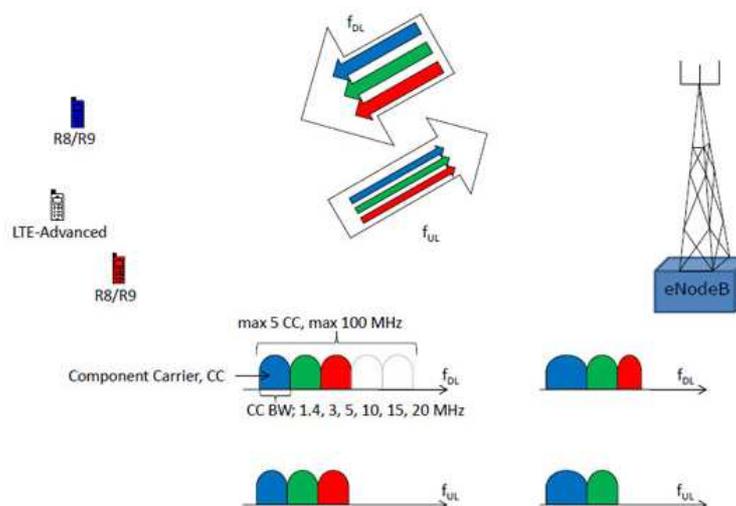


Figura 3.22 – Agregado de portadoras de diferente ancho de banda.  
Fuente: LTE-Advanced – Sitio oficial 3GPP<sup>31</sup>

Por razones prácticas, las diferentes configuraciones de agregado de portadora (especificadas, por ejemplo, por combinaciones de la banda operativa E-UTRA y el número de portadoras de componentes) se introducen en pasos. En Release 10 hay dos portadoras de componentes en el DL y solo uno en la UL (por lo tanto, no hay agregado en el UL). Por otra parte, en Release 11 hay dos portadoras de componentes de DL y una o dos portadoras de componentes en el UL.

La forma más fácil de organizar el agregado es usar portadoras de componentes contiguas dentro de la misma banda de frecuencia operativa (como se define para LTE). Esto puede no ser siempre posible, debido a los escenarios de asignación de frecuencia. Para una asignación no contigua, podría ser

intrabanda, es decir, las portadoras componentes pertenecen a la misma banda de frecuencia operativa, pero están separadas por un intervalo de frecuencia, o podría ser entre bandas, en cuyo caso las portadoras componentes pertenecen a diferentes bandas de frecuencia de funcionamiento. A continuación, se observan los diferentes casos en la Figura 3.23

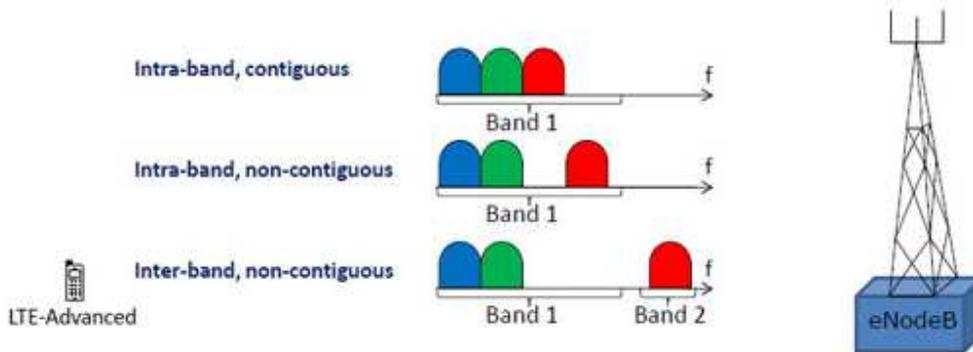


Figura 3.23 – Agregado de portadoras contigua, interbanda e intrabanda.  
Fuente: LTE-Advanced – Sitio oficial 3GPP<sup>31</sup>

### 3.2.2.9 MIMO

Uno de los objetivos propuestos en LTE-Advanced fue aumentar el rendimiento en los bordes de la celda al menos 2,40 bps/Hz/celda, para lograrlo se trabajó en mejorar la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) ya utilizada.

Esta tecnología se refiere al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia, por un mismo medio que es el aire, separadas sólo mediante el uso de diferentes señales de referencia. Esto se consigue utilizando diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida). Esta tecnología aprovecha la propagación multicamino para incrementar el throughput (es decir, tasa de transferencia efectiva), la eficiencia espectral, el alcance y la fiabilidad del sistema de comunicaciones. Esta técnica de aprovechamiento de multicaminos es también llamada Multiplexación Espacial.

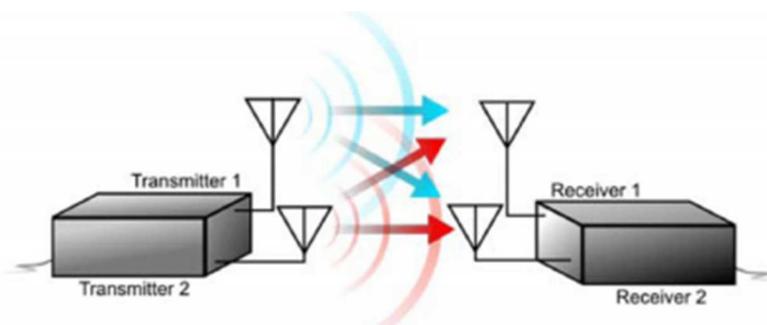


Figura 3.24 – Diagrama de tecnología MIMO 2x2.

Un cambio importante en LTE-Advanced es la introducción de 8x8 MIMO en DL y 4x4 en UL donde los números indican la cantidad de antenas receptoras y transmisoras.

Para poder ajustar el tipo de esquema de transmisión de múltiples antenas, de acuerdo con la arquitectura existente, se definieron varios modos de transmisión (TM) diferentes. El UE, a través de la señalización de RRC, será informado sobre el modo de transmisión a utilizar. En DL hay nueve modos de transmisión diferentes, donde se introdujeron TM1 al 7 en la Release 8, TM8 en la Release 9 y TM9 en la Release 10. En UL hay TM1 y TM2, donde TM1, el valor predeterminado, se introdujo en la Release 8 y TM2 se introdujo en la Release 10. Los diferentes modos de transmisión difieren en:

- Número de layers (o capas).
- Puertos de antena utilizados.
- Tipo de señal de referencia, que pueden ser Cell-specific Reference Signal (CRS, es decir, señal de referencia específica de la celda) o Demodulation Reference Signal (DM-RS, es decir, señal de referencia de demodulación), introducida en la Release 10.
- Tipo de precodificación.

Mediante la introducción de TM9 (DL), MIMO 8x8 es compatible para DL, y mediante la introducción de TM2 (UL) se habilita el uso de MIMO 4x4 para UL. Naturalmente, también se requiere que el UE lo admita. En la Release 10 se introducen tres nuevas categorías de UE, categorías 6, 7 y 8, donde la categoría 8 de UE admite el número máximo de portadoras de componente (visto en la sección anterior) y multiplexación espacial 8x8.

En las técnicas de multi-antenas, la precodificación se utiliza para mapear los símbolos de modulación en las diferentes antenas. El tipo de precodificación depende de la técnica de multi-antena elegida, del número de layers y de puertos de antena utilizados. El objetivo de la precodificación es lograr la mejor recepción de datos posible en el receptor.

La señal se verá influenciada por de varios tipos de fading (desvanecimiento de la señal), que también puede verse como algún tipo de codificación causada por el canal de radio. Para manejar esto, las señales de referencia conocidas se transmitirán junto con los datos y el receptor las usará para demodular la señal recibida.

En la Release 8, la señal de referencia se agrega a la señal de datos después de la precodificación, una CRS por antena. A partir de la CRS recibida, el UE estima cómo el canal de radio influyó en la señal. Utilizando esto junto con el conocimiento sobre la precodificación basada en el libro de códigos utilizado, el UE puede demodular la señal recibida y regenerar la información enviada.

En la Release 10, las DM-RS se agregan a las diferentes secuencias de datos antes de la precodificación. El conocimiento sobre la señal de referencia proporcionará información sobre la influencia combinada del canal de radio y la precodificación, el receptor no requiere conocimiento previo sobre el precodificador, este caso se conoce como precodificación no basada en un libro de códigos.

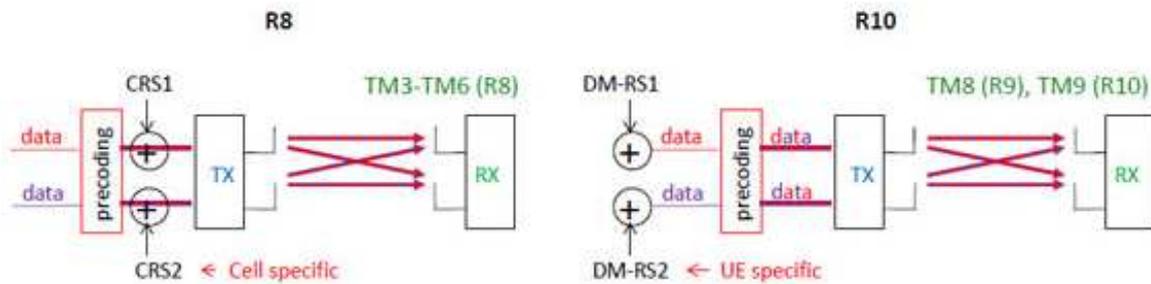


Figura 3.25 – Diagrama de tipos de señales de referencia.  
 Izq: Señal CRS agregada luego de la precodificación – Der: Señal DM-RS agregada antes de la precodificación.  
 Fuente: LTE-Advanced – Sitio oficial 3GPP<sup>31</sup>

### 3.2.2.10 Nodos de retransmisión (Relay Nodes)

En LTE-Advanced, la posibilidad de una planificación eficiente y heterogénea de la red, es decir, una combinación de celdas grandes y pequeñas, se incrementa mediante la introducción de nodos de retransmisión (RN). Como se menciona en la sección Protocolos, los RN son estaciones base de baja potencia que proporcionarán una cobertura y capacidad mejoradas en los bordes de las celdas y áreas hot-spot (donde hay gran densidad de usuarios), así como también pueden ser utilizados para interconectar áreas remotas donde no llega la fibra óptica.

El RN está conectado al DeNB (Donor eNB, o eNB donante) a través de una interfaz de radio “Un”, que es una modificación de la interfaz aérea E-UTRAN “Uu”. Por lo tanto, en la celda donante, los recursos de radio se comparten entre los UE servidos directamente por el DeNB y los RN. Cuando las interfaces Uu y Un usan diferentes frecuencias, el nodo de retransmisión se denomina RN Tipo 1a, para RN Tipo 1, las interfaces Uu y Un utilizan las mismas frecuencias. En el último caso, existe un alto riesgo de auto-interferencia en el RN, al recibir en Uu y transmitir en Un al mismo tiempo (o viceversa). Esto se puede evitar compartiendo el tiempo entre transmisión Uu y Un, o teniendo diferentes ubicaciones del transmisor y el receptor. El RN admite en gran medida las mismas funcionalidades que el eNB; sin embargo, el DeNB es responsable de la selección de MME.

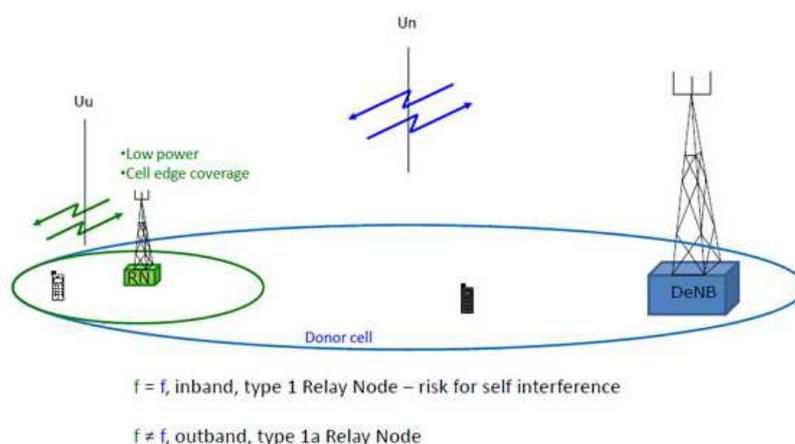


Figura 3.26 – Diagrama de conexión entre RN y DeNB e interfaces.  
 Fuente: LTE-Advanced – Sitio oficial 3GPP<sup>31</sup>

### 3.2.2.11 QoS

Varias aplicaciones corren comúnmente en los UE al mismo tiempo, cada una con un requerimiento de calidad de Servicio diferente. Varias portadoras se establecen para los distintos requerimientos, esto es soportado por el Evolved Packet System. En general las portadoras pueden ser clasificadas en dos categorías dependiendo de su calidad de servicio.

- **Minimum guaranteed bit rate (GBR) bearers:** son utilizados para VoIP. Estos tienen asociados un valor GBR con el cual asegura que recursos dedicados para la transmisión sean puestos a su disposición.
- **Non-GBR bearers:** aquellas que no aseguran ningún bit rate. Puede ser usado para web, sftp, p2p, etc. No tiene portadoras dedicadas.

QCI	RESOURCE TYPE	PRIORITY	PACKET DELAY BUDGET (MS)	PACKET ERROR LOSS RATE	EXAMPLE SERVICES
1	GBR	2	100	10 <sup>-2</sup>	Conversational voice
2	GBR	4	150	10 <sup>-3</sup>	Conversational video (live streaming)
3	GBR	5	300	10 <sup>-6</sup>	Non-conversational video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10 <sup>-3</sup>	Real-time gaming
5	Non-GBR	1	100	10 <sup>-6</sup>	IMS signaling
6	Non-GBR	7	100	10 <sup>-3</sup>	Voice, video (live streaming), interactive gaming
7	Non-GBR	6	300	10 <sup>-6</sup>	Video (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10 <sup>-6</sup>	TCP-based (for example, WWW, e-mail), chat, FTP, p2p file sharing, progressive video and others
9	Non-GBR	9	300	10 <sup>-6</sup>	

Tabla 3.3 – Tabla de ejemplos de QoS

## 4 IMPLEMENTACIÓN

### 4.1 MATERIALES

Para la realización de este proyecto se partió de un periférico SDR modelo USRP B210 fabricado por la empresa Ettus Research, especialista en desarrollo de plataformas SDR. Se eligió este equipo luego de realizar una investigación de mercado, en la cual se compararon diferentes opciones y se concluyó que este modelo cumplía con los requisitos del sistema a implementar. A continuación se enuncian las características principales del mismo que se obtuvieron de la hoja de datos<sup>57</sup>:

- Dispositivo USRP de dos canales totalmente integrado con cobertura continua de RF de 70 MHz a 6 GHz.
- Funcionamiento full duplex, 2x2 MIMO (esto es, 2 antenas transmisoras y 2 receptoras) con hasta 56 MHz de ancho de banda en tiempo real (61,44 MS/s en cuadratura) para 1x1 y de hasta 30,72 MHz para 2x2.
- Interfaz USB 3.0 SuperSpeed.
- Chip FPGA reconfigurable Spartan 6 XC6SLX150 FPGA.
- Driver USRP Hardware Driver (UHD) que soporta el uso del software srsLTE y GNURadio a utilizar.

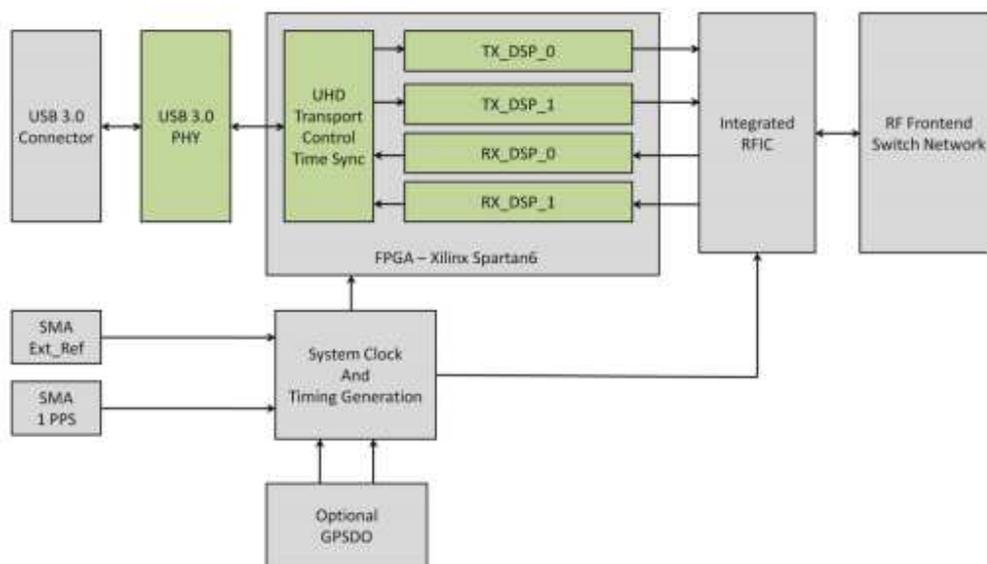


Figura 4.1 - Esquema de arquitectura interna del SDR B210

Como se observa en la figura 4.1, la conexión hacia la PC se realiza a través del USB 3.0. Esta interfaz envía y recibe la información a través del driver UHD. Este, a su vez, divide la información a transmitir en 2 colas de transmisión y agrupa la información de recepción para permitir la implementación de 2x2 MIMO, todo lo cual es realizado sobre un procesador FPGA. Así mismo consta de una entrada de clock que puede ser nativa, utilizando el clock integrado en la placa, o externa, ya sea a través de la inserción de una señal de referencia o con la adhesión de un dispositivo GPSDO (GPS disciplined oscillator)<sup>58</sup>. Estos últimos se utilizan para lograr señales de clock más precisas durante aplicaciones con requisitos de

sincronización estrictos o una alineación de tiempo global dentro de 50 ns. En este caso, con el clock nativo no se observaron pérdidas de sincronismo durante las pruebas.

Este periférico lleva 2 antenas, una para la transmisión y otra de recepción que permitirán un uso básico, con la posibilidad de agregar 2 más para realizar 2x2 MIMO. Estas antenas son de goma estilo pato con un conector SubMiniature versión A (SMA), similar a una típica antena de enrutador Wifi doméstico y tienen 5 dBi de ganancia.

A su vez, como se observa en la Figura 4.2, el dispositivo está conectado por puerto USB 3.0 a una PC de escritorio con las siguientes características de hardware que garantizan el correcto funcionamiento del software SDR:

- Procesador Intel(R) Core(TM) i3-4160 CPU @ 3.60GHz
- Memoria RAM DIMM DDR3 Synchronous 1600 MHz (0.6 ns) 4GB
- Disco Western Digital WD Blue Hard Drive 1TB
- Motherboard ASUSTeK COMPUTER INC. B85M-G R2.0
- USB 3.0 de 300MBps



Figura 4.2 - Configuración establecida para este proyecto.

La PC lleva instalado un sistema operativo Linux distribución Ubuntu 16.04<sup>59</sup> sin entorno gráfico, con motivo de optimizar la performance del hardware.

Dentro del mismo fue instalado el driver UHD para la comunicación con la USRP y el software srsLTE que brinda el servicio de LTE. Se decidió utilizar esta distribución de software debido a que, por un lado, su código está basado en OpenLTE, aprovechando parte de sus funciones de seguridad y de análisis de mensajes NAS<sup>60</sup>, pero con una interfaz y configuraciones más amigables con el usuario. Además, se

prefirió utilizar este software antes que OpenAirInterface porque srsLTE no tiene interfaz gráfica, lo que permite entender mejor el diseño del software a utilizar, así como también, mejorar en la performance.

El software srsLTE consta con 3 módulos srsUE, srsENB y srsEPC. Solo 2 de los módulos fueron utilizados en esta ocasión, srsENB y srsEPC, ya que para las pruebas de este proyecto se utilizaron dispositivos móviles físicos, por lo tanto, no fue necesaria la solución por software.

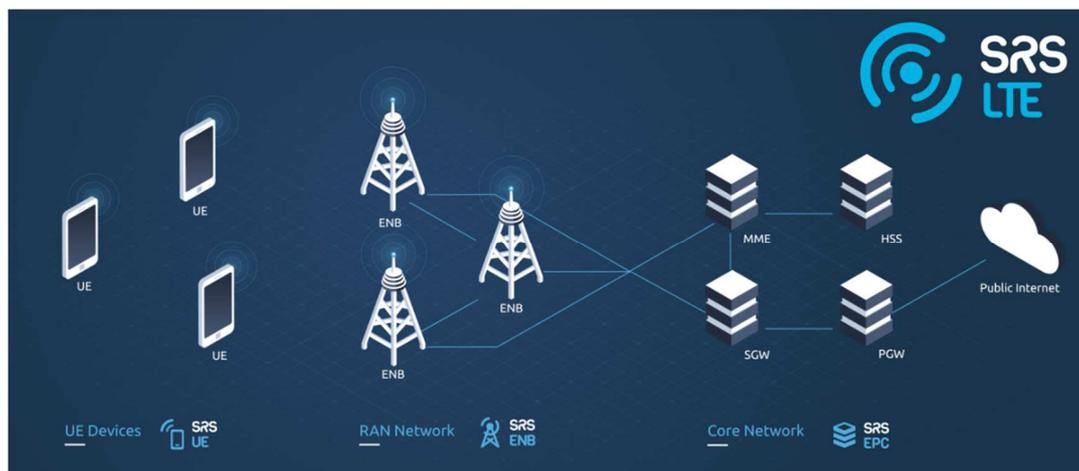


Figura 4.3 – Arquitectura de la solución srsLTE  
Fuente: “srsLTE Documentation”<sup>61</sup>

El srsENB es el equivalente al eNodeB de la solución LTE definida por 3GPP, es quien se encarga del establecimiento de la comunicación radioeléctrica entre el UE y la red central EPC, llevando la gestión de los recursos de radio. En él se puede definir, por ejemplo, la frecuencia de trabajo, la ganancia de transmisión y recepción, entre otras cosas que veremos más adelante.

Por otro lado, el srsEPC es el equivalente a la red central LTE, que administra los paquetes IP desde y hacia el UE. Esta solución está compuesta por un HSS, un MME, y los SGW y PGW.

En su archivo de configuración se pueden modificar los parámetros que describen a la red, como ser, el Mobile Country Code (MCC) y el Mobile Network Code (MNC)<sup>62</sup>, así como también el servidor DNS que utilizará, la dirección IP del MME, entre otros.

Cada país y empresa tiene asignado un valor MNC y MCC que la identifica, por ejemplo, en Argentina el MCC es 722 y el MNC puede ser<sup>63</sup>:

- 310, 320 o 330 para Claro/ CTI/AMX
- 010 para Compañía De Radiocomunicaciones Móviles SA
- 070 para Movistar/Telefónica
- 020 para Nextel
- 340 y 341 para Telecom Personal S.A.

Para poder probar la configuración se utilizaron 2 Equipos Móviles liberados y habilitados para conexiones 4G. Los modelos utilizados son:

- LG G6, Modelo H870; Categoría LTE-A; Fabricado en Febrero de 2017; Bandas LTE soportadas: LTE B2, B4, B5, B7, B8, B28<sup>64</sup>.

- Xiaomi MI9 SE, Versión Global; Categoría LTE-A; Fabricado en Abril de 2019; Bandas FDD LTE soportadas: B1/2/3/4/5/7/8/20/28<sup>65</sup>

Vale aclarar que cualquier celular habilitado para trabajar en bandas LTE hubiera servido a este proyecto ya que el acceso a la red va a depender de la tarjeta SIM utilizada.

Para poder permitir el acceso a la red fueron compradas tarjetas USIM en blanco y una grabadora de tarjetas genérica que se observan en la Figura 4.3. A través de ellas se pudo grabar la información necesaria para habilitar al UE el acceso a esta red. Las USIM se encuentran en diferentes factores de forma (FF).

- 1FF, son del tamaño de una tarjeta de crédito.
- 2FF, son las USIM regulares, tienen un tamaño de 15x25 mm.
- 3FF, también llamadas micro-SIM, son de 12x15 mm
- 4FF, llamadas nano-SIM, 8,8x12,3 mm. Son las más utilizadas en la actualidad.

En este proyecto se adquirieron tarjetas 1FF con troquel para ser adaptadas a cualquiera de los tamaños antes mencionados. El 1FF se utilizó para grabar los datos en la tarjeta, luego, para agregarla al equipo se utilizó el formato nano-sim en ambos casos.



Figura 4.4 – Conexión y configuración de grabadora de tarjetas

Para grabar las tarjetas se utilizó el programa GRSIMWrite 3.10, el cual permite la configuración de las variables que el sistema utiliza de manera accesible. Debido a que este programa solo funciona en Sistemas Operativos Windows, el procedimiento se realizó en una laptop personal. Los parámetros configurados fueron<sup>66</sup>:

- IMSI (International Mobile Subscriber Identity): es un número de 15 dígitos que se utiliza para identificar la USIM en la red celular. Este fue estandarizado por ITU y se compone de MCC+MNC+MSIN, por ejemplo 7223401234567890. (MSIN - Mobile Subscriber Identifier).

- KI (Subscriber Authentication Key): es una clave secreta de 128 bit que se utiliza para cifrar el OPc.
- OP (Operator Code): Es el código del operador, por lo cual, es igual para las tarjetas USIM pertenecientes al mismo.
- OPc (Derived operator code): es la clave definitiva que se genera a partir de OP y KEY (clave secreta) utilizando el algoritmo ("RijndaelEncrypt") que es específico de SIM. Si alguien consigue el OPc, podrá falsificar solo una SIM, no todas las SIM.
- ICCID (Integrated Circuit Card Identifier): número de hasta 22 dígitos que identifica de forma exclusiva la tarjeta SIM. Consiste en:
  - Número de identificación del emisor (IIN): hasta 7 dígitos con MII+MCC+MNC, donde MII (Major Industry Identifier) es el código que define el tipo de industria, en este caso usaremos "89" que identifica a las telecomunicaciones. La lista de IIN validos es publicada por ITU<sup>67</sup>.
  - MSIN: Identificador de cuenta individual de longitud variable.
  - Checksum: Suma de verificación, es decir, código de verificación del algoritmo Luhn de un dígito.
- PLMN (Public Land Mobile Network): Es un numero de 5 dígitos compuesto por MCC+MNC que identifica la red celular.
- Algoritmo: Puede ser Milenage (mayormente utilizado en producción) o XOR (utilizado para testeos)

Para la salida a internet se utilizó la conexión por cable RJ45 provista por la Universidad en el laboratorio que alcanza velocidades pico de hasta 100 MBps simétricos, es decir, tanto de DL como de UL.

Finalmente, debido a que, tanto el software srsLTE utilizado como los demás softwares evaluados no constan de una interfaz para brindar el servicio de VoIP a día de la fecha, y con motivo de brindar una solución completa, se procedió a la instalación de una central PBX, para agregar la funcionalidad de llamas de voz. Se evaluaron diferentes softwares como Asterisk<sup>68</sup>, FreePBX<sup>69</sup> e Issabel<sup>70</sup> y finalmente, se optó por esta última plataforma debido a su buen funcionamiento y agradable entorno de configuración.

Issabel es un software de código abierto que unifica las comunicaciones en una sola plataforma, integrando PBX, correo y tareas de colaboración, así como también un servidor de base de datos. Su desarrollo está basado en Asterisk y corre sobre la distribución CentOS<sup>71</sup> de Linux, por este motivo y por problemas de performance tuvo que ser instalado en una Máquina Virtual (VM) dentro de la misma red del laboratorio.

## 4.2 DESARROLLO Y CONFIGURACIÓN

Para comenzar con la implementación del proyecto se partió por la preparación del entorno en el cual se instaló luego el software. En la computadora con sistema operativo Linux distribución Ubuntu 16.04 se comenzó por la actualización del gestor Advanced Packaging Tool (APT)<sup>72</sup> que se encarga de la descarga e instalación de paquetes pre-compilados. Antes de empezar cualquier trabajo es recomendable actualizar el listado de paquetes disponibles y la actualización de los ya existentes. Para esto se ejecutaron los siguientes comandos:

```
sudo apt-get update = actualiza la lista de paquetes disponibles y sus versiones, pero no instala ni actualiza ningún paquete.
```

```
sudo apt-get upgrade = instala versiones más nuevas de los paquetes ya instalados en el sistema.
```

A continuación, se instalaron las dependencias que el software srsLTE necesita para el correcto funcionamiento, estas son:

- cmake
- libfftw
- PolarSSL/mbedtls
- Boost
- lksctp
- libconfig

Para esto se ejecutó el siguiente comando que descarga e instala los paquetes pre-compilados por medio de APT:

```
sudo apt-get install cmake libfftw3-dev libmbedtls-dev libboost-program-options-dev libconfig++-dev libsctp-dev
```

De la misma manera, se instalaron el driver UHD y sus librerías, para permitir la comunicación de la PC con la placa USRP, a través de la siguiente instrucción:

```
sudo apt-get install libuhd-dev libuhd003 uhd-host
```

Finalmente se procedió con la instalación del software srsLTE, siguiendo los pasos recomendados en el Github provisto por Software Radio Systems<sup>58</sup>. Para este software, al día de la fecha, no existe una versión pre-compilada distribuida a través de APT, por lo cual fue necesaria la descarga del código fuente desde el Git oficial, luego la pre-compilación y la compilación manual por medio de cmake y make, y se ejecutó también un make test que realiza una prueba de funcionamiento completa del software para verificar problemas de compatibilidad y dependencias. Este procedimiento se realizó por terminal ejecutando los siguientes comandos estándar de Ubuntu en el home del usuario (~):

```
git clone https://github.com/srsLTE/srsLTE.git
cd srsLTE
mkdir build
cd build
cmake ../
make
make test
```

Luego para terminar con la instalación del mismo:

```
sudo make install
srslte_install_configs.sh user
```

Esta última instrucción realiza una copia de los archivos de configuración predeterminados al directorio de inicio del usuario (~/.config/srslte).

Las aplicaciones srsENB y srsEPC incluyen archivos de configuración de ejemplo que deben copiarse (manualmente o utilizando el script provisto) y modificarse para cumplir con los requerimientos del sistema. Por defecto, todas las aplicaciones buscarán los archivos de configuración en el directorio home del usuario (~/.config/srslte) excepto que se especifique una dirección alternativa de donde tomarlos al momento de ejecutarlas.

Todas las aplicaciones debieron ser ejecutadas con privilegios de administrador para habilitar las prioridades de subprocesos en tiempo real y permitir la creación de interfaces de red virtuales.

srsENB y srsEPC pueden instalarse y ejecutarse en el mismo o distintos servidores. Para este proyecto se optó por instalar ambas aplicaciones en el mismo servidor para mejorar la comunicación entre las mismas evitando agregar delay de conexión.

Luego, se comenzó con la etapa de configuración de la red LTE editando los archivos `enb.conf`<sup>73</sup> y `epc.conf`<sup>74</sup> ubicados en el directorio de configuración antes mencionado. El primero contiene los parámetros físicos de la red de enlace, el segundo contiene los parámetros principales de la red central. Los archivos de configuración completos se pueden encontrar en el Anexo II, sin embargo, a continuación, se mencionan las configuraciones principales que se realizaron:

Para configurar el `enb.conf` fue necesario decidir, en primera instancia, la frecuencia de trabajo de DL y UL. Se seleccionó la banda 7 debido a que es una de las que asignadas para LTE en argentina y, por lo tanto, una de las aptas para los dispositivos de prueba utilizados. Además, en el análisis de redes LTE vecinas que se realizó en el laboratorio, se pudo observar que la banda 4 era la más utilizada, en cambio la banda 7 estaba libre, lo que evitaría problemas de interferencia.

El valor de Earfcn de DL para la Banda 7 comprende un rango que va de entre 2750 a 3449, se configuró el valor `dl_earfcn = 3400`, el cual fija las frecuencias de DL en 2685 MHz y la de UL en 2565 MHz.

En este archivo también podremos configurar otros valores importantes como:

- `tx_gain = 80 dB` → la ganancia de transmisión,
- `rx_gain = 40 dB` → la ganancia de recepción, opcional
- `MCC = 001` y `MNC = 01` → Se utiliza esa codificación para identificar entornos de prueba,
- `mme_addr = 127.0.1.100` → IP del servidor MME.
- `n_prb = 50` → Numero de Resource Blocks utilizados
- `sib_config = sib.conf` → Indica cuál es y dónde se encuentra el archivo de configuración de los mensajes "System information block"
- `rr_config = rr.conf` → Indica cuál es y dónde se encuentra el archivo de configuración de los recursos de radio.
- `drb_config = drb.conf` → Indica cuál es y dónde se encuentra el archivo de configuración de "Dedicated Radio Bearer"

- filename = /tmp/enb.pcap → Indica donde se guarda la información de captura de paquetes.
- filename = /tmp/enb.log → Indica donde se guardan los logs del sistema.

En la configuración de epc.conf se definieron, entre otros, los siguiente parámetros principales:

- apn = srsapn → Nombre del Access Point
- dns\_addr = 10.1.70.2 → Se configuró el servidor DNS de la universidad para el correcto funcionamiento en el laboratorio
- encryption\_algo = EEA0 → Algoritmo con el cual se encripta la capa NAS
- integrity\_algo = EIA1 → Algoritmo con el cual se protege la integridad de la capa NAS
- db\_file = ./user\_db.csv → Ubicación del archivo de base de datos de los UE habilitados para esta red.
- sgi\_if\_addr = 172.16.0.1 → Interfaz de comunicación SGW con UE, el SGW asignará IPs dinámicamente del rango 172.16.0.0/24 a los UE conectados.
- filename = /tmp/epc.pcap → Indica donde se guarda la información de captura de paquetes.
- filename = /tmp/epc.log → Indica donde se guardan los logs del sistema.

Para agregar la información de cada UE al archivo user\_db.csv se debió realizar el grabado de las tarjetas SIM en blanco adquiridas. Para esto se utilizó el software GRSIMWrite 3.10 que lee y graba las tarjetas por medio de una lectora Gemalto y configura los valores a través de una interfaz gráfica como se observa en la Figura 4.5

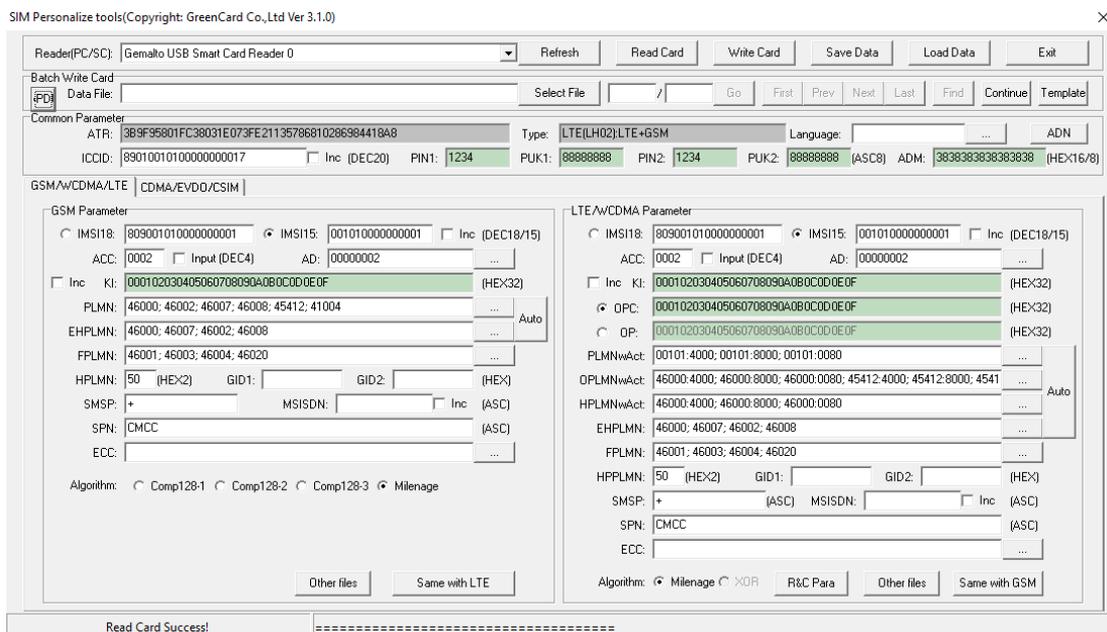


Figura 4.5 – Software para grabación de tarjetas SIM

En este mismo software se configuraron únicamente los parámetros mencionados en la sección 4.1. Como ejemplo tomaremos el de la imagen, los valores editados fueron:

ICCID= 89010010100000000017  
 IMSI15= 001010000000001  
 Ki= 000102030405060708090A0B0C0D0E0F  
 OPc= 000102030405060708090A0B0C0D0E0F  
 Algoritmo= Milenage

Una vez configuradas las tarjetas, los parámetros fueron agregados al archivo de base de datos de extensión CSV, con el formato indicado por srsLTE que es:

**"Name,Auth,IMSI,Key,OP\_Type,OP,AMF,SN,QCI,IP\_alloc"**

- **Name:** Nombre para identificar al UE, que será ignorado por HSS
- **Auth:** Algoritmo de autenticación usado por el UE – Puede ser XOR (xor) o MILENAGE (mil).
- **IMSI:** Valor del IMSI del UE. MCC+MNC+ID
- **Key:** Clave del UE, desde donde se obtendrán el resto de las claves. Formato hexadecimal (128 bits)
- **OP\_Type:** Tipo de código del operador, OP u OPc.
- **OP/OPc:** Código del Operador / Código del Operador Cifrado. Formato hexadecimal
- **AMF:** "Authentication management field" es decir, campo de gestión de autenticación. Formato hexadecimal. (16 bits)
- **SN:** Secuencia de números del UE utilizada para refrescar la autenticación. (48 bits)
- **QCI:** Identificador de clase QoS para la portadora por defecto del UE.
- **IP\_alloc:** Tipo de asignación de IP del SPGW. Puede ser 'dynamic' si la IP es asignada por el SPGW o con un valor de IPv4 estático, por ejemplo: '172.16.0.2'.

Los parámetros AMF y SN son utilizados exclusivamente para el cálculo del algoritmo milenage de autenticación, junto con el valor de Ki, OPc y una secuencia Random generada por el dispositivo móvil, según se observa en el diagrama de la Figura 4.6. Para este proyecto se utilizaron valores de AMF=9001 y una SN=00000000ce2. En las comunicaciones LTE tradicionales el valor de SN va a ser modificado luego de cada autenticación, en pruebas de laboratorio se fija a un valor por conveniencia.

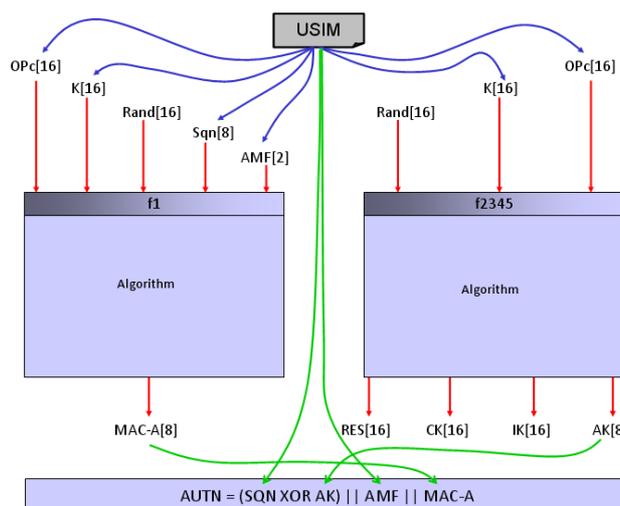


Figura 4.6 – Diagrama de algoritmo Milenage  
Fuente: LTE Quick Reference - Authentication<sup>75</sup>

Finalmente se realizó la instalación y configuración de Issabel en una VM con sistema operativo CentOS, siguiendo los requerimientos de su web oficial. Una vez finalizada la instalación, se accedió a la interfaz gráfica de configuración a través de su IP y por el puerto 443 (HTTPS), <https://10.1.100.150>

En la Figura 4.7 que se encuentra a continuación, se puede observar la pantalla de gestión y configuración de la PBK.

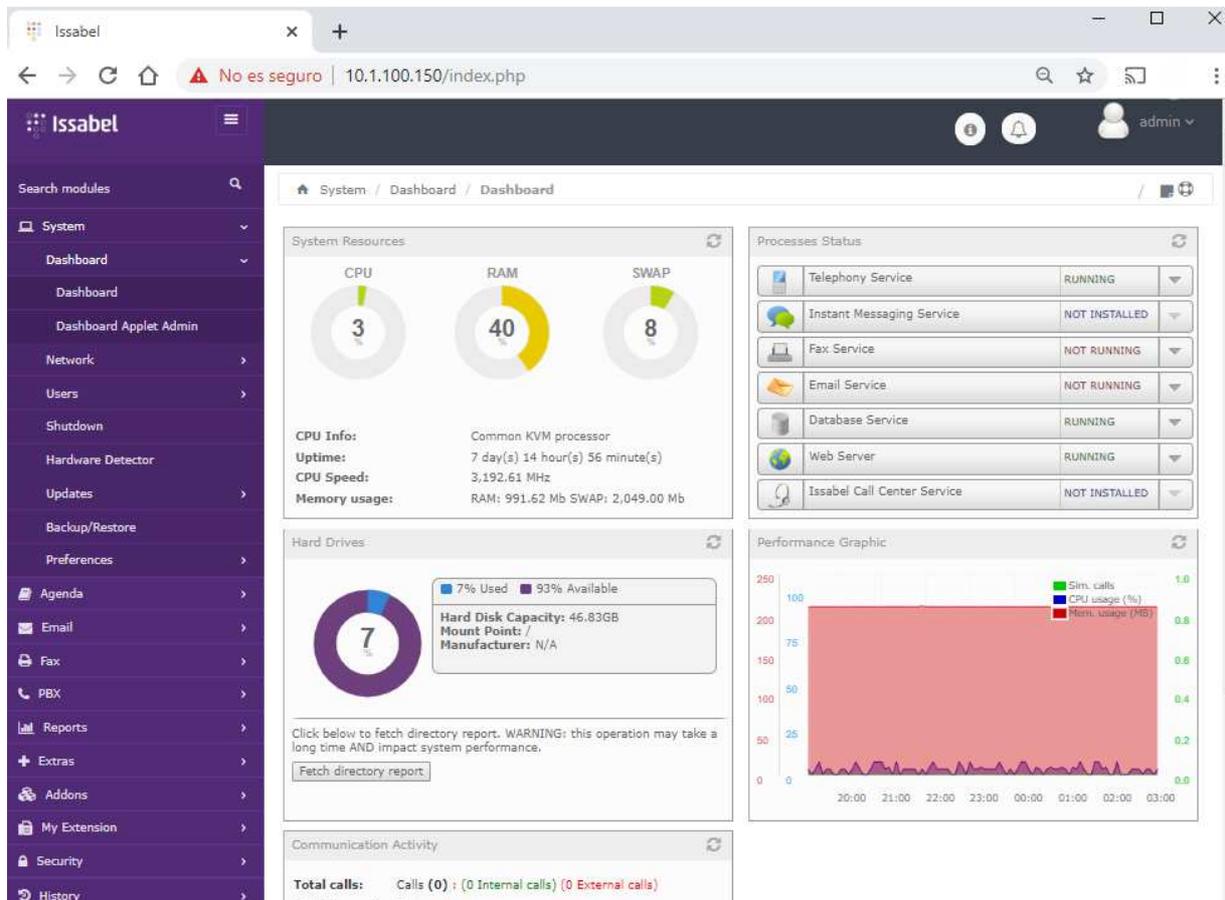


Figura 4.7 – Interfaz gráfica de usuario de Issabel PBX

En la sección System -> Network -> Network Parameters se configuró el Gateway que va a utilizar para conectarse a la red y el DNS interno. Luego en la sección PBX -> PBX Configuration se definieron los internos que van a ser configurados en cada dispositivo móvil.

Para finalizar se descargó en cada dispositivo móvil un software popular y gratuito llamado Zoiper<sup>76</sup> que permite realizar llamadas VoIP. En él fue necesario configurar el número de extensión, la IP del servidor PBX, el usuario y la contraseña configurados para esa extensión y el nombre de la cuenta.

Debido a que internamente la red LTE generada por srsLTE asigna un rango diferente de IPs (172.16.0.0/24), durante las pruebas de llamadas VoIP se descubrió que el tráfico de voz llegaba hacia la central pero luego, la central misma, no reconocía hacia donde enviar el tráfico. Para resolver esto fue necesario publicar una ruta estática de la 172.16.0.0/24 en el router más cercano, indicando que el

tráfico hacia esa subnet debía ser enviado al servidor que contiene el srsLTE. Con esta entrada en la tabla de ruteo se logró solucionar el inconveniente.

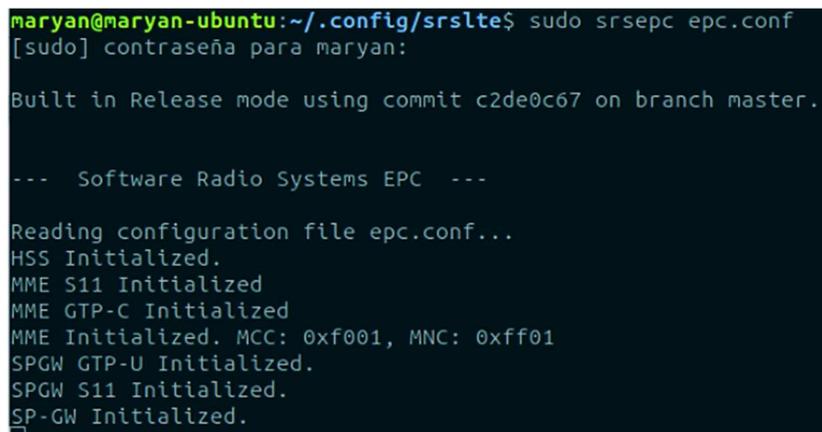
### 4.3 EJECUCIÓN

Una vez finalizadas las configuraciones iniciales se realiza la ejecución de las aplicaciones para la prueba de funcionamiento. En primera instancia se debe ejecutar el EPC, para luego, en otra terminal, iniciar el ENB.

Ubicado en la terminal 1, se utiliza el siguiente comando para ejecutar el EPC:

```
cd .config/srsLTE/  
sudo srsepc epc.conf
```

En este momento se observa que el programa se ejecuta, utilizando el archivo de ejecución con los parámetros pre-configurados y luego se mantendrá aguardando a recibir información del ENB:



```
maryan@maryan-ubuntu:~/config/srslte$ sudo srsepc epc.conf  
[sudo] contraseña para maryan:  
  
Built in Release mode using commit c2de0c67 on branch master.  
  
--- Software Radio Systems EPC ---  
  
Reading configuration file epc.conf...  
HSS Initialized.  
MME S11 Initialized  
MME GTP-C Initialized  
MME Initialized. MCC: 0xf001, MNC: 0xff01  
SPGW GTP-U Initialized.  
SPGW S11 Initialized.  
SP-GW Initialized.
```

Figura 4.8 – Ejecución de srsepc (sin iniciar el srsenb)

En los mensajes se indica que los servidores MME, HSS y SPGW inicializaron normalmente y cuáles son los parámetros MCC y MNC de la red del proyecto.

En una segunda terminal, se realiza la ejecución de la aplicación srsENB que levantará los recursos de la red de radiofrecuencia. El comando utilizado es:

```
cd .config/srsLTE/  
sudo srsenb enb.conf
```

Como se observa en la Figura 4.9 al ejecutar este comando el software intenta leer el archivo de configuración, luego verifica si la USRP está conectada y si la detecta comienza a cargar la imagen FPGA provista por el driver UHD. Al finalizar, verifica si tiene conectado un generador de tiempo externo como el GPSDO, continúa realizando una serie de tests de CODECs y conectividad, identifica cual es la señal de clock que se está usando y finalmente comienza a levantar la señal de radiofrecuencia estipulada en el archivo de configuración. En este caso se utilizó una frecuencia de DownLink centrada en 2685 MHz, una de UpLink de 2565 MHz correspondientes al EARFCN 3400 configurado anteriormente. También se indica que trabaja a una frecuencia de muestreo de 11,52 MHz.

```
maryan@maryan-ubuntu:~/config/srslte$ sudo srsenb enb.conf
[sudo] contraseña para maryan:
linux; GNU C++ version 7.3.0; Boost_106501; UHD_003.010.003.000-0-unknown

Built in Release mode using commit c2de0c67 on branch master.

--- Software Radio Systems LTE eNodeB ---

Reading configuration file enb.conf...
Opening 1 RF devices with 1 RF channels...
-- Loading firmware image: /usr/share/uhd/images/usrp_b200_fw.hex...
Opening USRP with args: type=b200,master_clock_rate=23.04e6
-- Detected Device: B210
-- Loading FPGA image: /usr/share/uhd/images/usrp_b210_fpga.bin... done
-- Operating over USB 3.
-- Detecting internal GPSDO... No GPSDO found
-- Initialize CODEC control...
-- Initialize Radio control...
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Asking for clock rate 23.040000 MHz...
-- Actually got clock rate 23.040000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
Setting frequency: DL=2685.0 Mhz, UL=2565.0 MHz
Setting Sampling frequency 11.52 MHz

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
```

Figura 4.9 – Ejecución de srsenb

Con estos pasos finaliza la iniciación del srsENB, mientras que en la terminal del srsEPC se pueden observar los mensajes que indican que el ENB fue reconocido y habilitado para trabajar con la red central, como se observa en la Figura 4.10.

```
maryan@maryan-ubuntu:~/config/srslte$ sudo srsepc epc.conf
[sudo] contraseña para maryan:

Built in Release mode using commit c2de0c67 on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

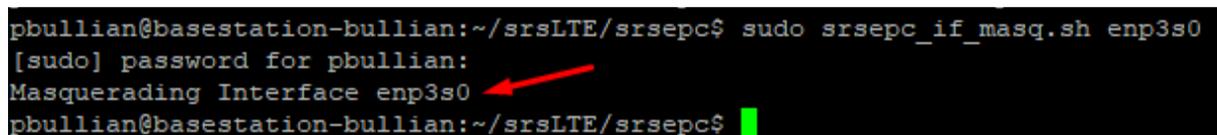
Reading configuration file epc.conf...
HSS Initialized.
MME S11 Initialized
MME GTP-C Initialized
MME Initialized. MCC: 0xf001, MNC: 0xff01
SPGW GTP-U Initialized.
SPGW S11 Initialized.
SP-GW Initialized.
Received S1 Setup Request.
S1 Setup Request - eNB Name: srsenb01, eNB id: 0x19b
S1 Setup Request - MCC:001, MNC:01, PLMN: 61712
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0
S1 Setup Request - Paging DRX 2
Sending S1 Setup Response
```

Figura 4.10 Conexión de EPC e ENB

Una vez iniciados los dos softwares el dispositivo móvil estará listo para buscar y realizar el proceso de registración en la red, pero no podrá aun navegar debido a que el programa necesita que se especifique la interfaz de conexión a internet. Para esto existe un script provisto por la aplicación que se encuentra en `~/srsLTE/srsEPC/`. En primer lugar, debemos identificar el nombre de la interfaz conectada a la red que provee internet, utilizando el comando `ip address`.

Luego se debe dirigir al directorio donde se encuentra el script y, una vez allí, ejecutaremos con permisos root, el script

```
sudo srsepc_if_masq.sh enp3s0
```



```
pbullian@basestation-bullian:~/srsLTE/srsepc$ sudo srsepc_if_masq.sh enp3s0
[sudo] password for pbullian:
Masquerading Interface enp3s0
pbullian@basestation-bullian:~/srsLTE/srsepc$
```

Figura 4.11 – Enmascarado de interfaz de salida a Internet.

A partir de este momento se enciende el UE con la una de las sim programadas y se realiza una búsqueda manual de redes móviles disponibles para verificar que se detecte. Este paso no es obligatorio ya que los equipos móviles están generalmente configurados de manera de conectarse a la red más cercana disponible. En la imagen a continuación se observa la red generada llamada “UNSAM LTE 4G”

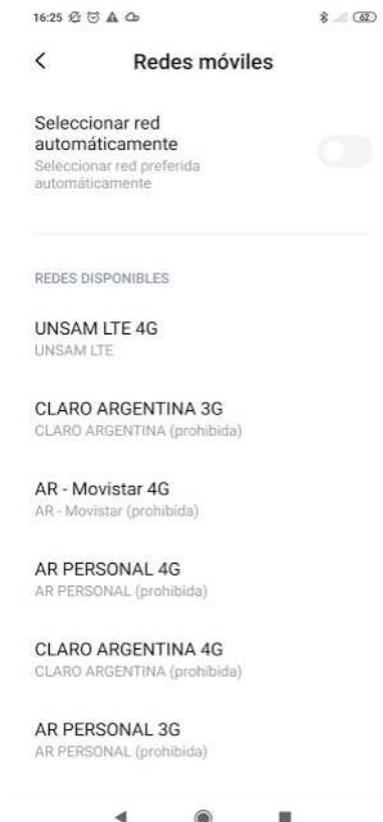


Figura 4.12 – Redes celulares detectadas por el UE

En las terminales, Figura 4.13, se ven los mensajes de registraci3n de un UE con IMSI: 00101000000002 a la red. A la derecha se encuentra la terminal del srsENB en donde se observa la recepci3n del mensaje RACH emitida por el UE para sincronizarse con la red. A la izquierda se encuentra la terminal del srsEPC donde se verifican todos los pasos que realizan antes de completar la conexi3n a la red, como, por ejemplo, la autenticaci3n, inicio de sesi3n, asignaci3n de IP, creaci3n de t3nel con el SPGW y asignaci3n de portadora.

```

UL NAS: Authentication Failure
Authentication Failure -- Synchronization Failure
Downlink NAS: Sent Authentication Request
UL NAS: Received Authentication Response
Authentication Response -- IMSI 001010000000002
UE Authentication Accepted.
Generating KeNB with UL NAS COUNT: 0
Downlink NAS: Sending NAS Security Mode Command.
UL NAS: Received Security Mode Complete
Security Mode Command Complete -- IMSI: 001010000000002
Getting subscription information -- QCI 7
Sending Create Session Request.
Creating Session Response -- IMSI: 1010000000002
Creating Session Response -- MME control TEID: 1
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_CREATE_SESSION_R
SPGW: Allocated Ctrl TEID 1
SPGW: Allocate UE IP 172.16.0.2
Received Create Session Response
Create Session Response -- SPGW control TEID 1
Create Session Response -- SPGW S1-U Address: 127.0.1.100
SPGW Allocated IP 172.16.0.2 to IMSI 001010000000002
Adding attach accept to Initial Context Setup Request
Initial Context Setup Request -- eNB UE S1AP Id 1, MME UE S1AP I
Initial Context Setup Request -- E-RAB id 5
Initial Context Setup Request -- S1-U TEID 0x1. IP 127.0.1.100
Initial Context Setup Request -- S1-U TEID 0x1. IP 127.0.1.100
Initial Context Setup Request -- QCI 7
Received Initial Context Setup Response
E-RAB Context Setup. E-RAB id 5
E-RAB Context -- eNB TEID 0x460003; eNB GTP-U Address 127.0.1.1
UL NAS: Received Attach Complete
Unpacked Attached Complete Message. IMSI 1010000000002
Unpacked Activate Default EPS Bearer message. EPS Bearer id 5
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_MODIFY_BEARER_R
Sending EMM Information

maryan@maryan-ubuntu:~$ cd .config/srslte/
maryan@maryan-ubuntu:~/.config/srslte$ sudo srsenb enb.conf
[sudo] contrase1a para maryan:
linux; GNU C++ version 7.3.0; Boost_106501; UHD_003.010.003.000-0-unknown
Built in Release mode using commit c2de0c67 on branch master.
--- Software Radio Systems LTE eNodeB ---
Reading configuration file enb.conf...
Opening 1 RF devices with 1 RF channels...
-- Loading firmware image: /usr/share/uhd/images/usrp_b200_fw.hex...
Opening USRP with args: type=b200,master_clock_rate=23.04e6
-- Detected Device: B210
-- Loading FPGA image: /usr/share/uhd/images/usrp_b210_fpga.bin... done
-- Operating over USB 3.
-- Detecting internal GPSDO... No GPSDO found
-- Initialize CODEC control...
-- Initialize Radio control...
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Asking for clock rate 23.040000 MHz...
-- Actually got clock rate 23.040000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
Setting frequency: DL=2685.0 Mhz, UL=2565.0 MHz
Setting Sampling Frequency 11.52 MHz
=== eNodeB started ===
Type <t> to view trace
RACH: tti=4171, preamble=28, offset=1, temp_crnti=0x46
User 0x46 connected

```

Figura 4.13 – Registraci3n de UE

## 5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez finalizadas las configuraciones se realizaron las pruebas del funcionamiento de la arquitectura planteada, las mediciones y el alcance. Con las mediciones se buscó cumplir el objetivo de comparar la red generada por medio de la configuración SDR, con la red LTE comercial utilizada hoy en día, específicamente se comparó con la red provista por la empresa Movistar.

### 5.1 MEDICIONES Y RESULTADOS

En primer lugar, se utilizó un analizador de espectro Anritsu MS2720T<sup>77</sup> para verificar el comportamiento de las señales durante una prueba de transmisión y recepción realizadas por medio de la aplicación Speedtest<sup>78</sup>, la cual permite enviar y recibir grandes cantidades de información durante cierto tiempo y así medir su velocidad de subida y bajada promedio y sus picos. En la Figura 5.1 se pueden ver ambas señales, de bajada (izquierda) y subida (derecha).



Figura 5.1 – Espectro de frecuencia de señal de DL (izq.) y UL (der.)

La señal de DL se encuentra centrada en una frecuencia de 2685 MHz y tiene un ancho de banda de 10 MHz, en su forma de onda se observan sub-bandas de transmisión debido a la modulación OFDM de la señal, que permite transmitir la información distribuida en las distintas subportadoras ortogonales separadas en 15 kHz, asignadas al UE.

Por otra parte, la señal de UL está centrada en 2565 MHz, con 10MHz de ancho de banda también, pero la forma de onda difiere debido a que la modulación utilizada es SC-FDM la cual no divide al espectro en subportadoras sino que es una portadora única.

#### 5.1.1 Pruebas de velocidad

Por medio del programa Speedtest también se realizaron mediciones de velocidad de la red Movistar, y la red LTE-SDR. Se debieron realizar dos mediciones de la red LTE-SDR, una de ellas utilizando la conexión a internet provista por la Universidad en el laboratorio de 100 Mbps simétricos, es decir, tanto para UL como para DL, y la otra utilizando una conexión privada de la empresa Telecentro<sup>79</sup> asimétrica,

de 100 Mbps de DL y 5 Mbps de UL. Se decidió realizar dos mediciones debido a que las realizadas en la red de la universidad están sujetas a variaciones debidas al consumo de internet en hora pico. En el caso de la red privada de Telecentro, se pudo verificar que los valores tienen menos fluctuaciones, pero al ser asimétricos, no se podía probar correctamente los valores de UL debido a la limitante del proveedor. Es importante destacar que la red privada de Telecentro es usada aquí al solo efecto de acceder a un ISP activo (Internet Service Provider).

En el Grafico 5.1 se observa que la conectividad lograda por el modelo planteado saliendo por la red privada fue más estable tanto de UL como DL. En el caso de DL con picos mayores a 30 Mbps y, en el caso de UL alcanzando el máximo de la velocidad provista por Telecentro. Para probar el alcance de UL se puede verificar que, con la conexión de la Universidad se alcanzaron picos mayores a 13Mbps, de los 100Mbps que provee el servicio.

A su vez, se realizaron las mismas pruebas sobre la red comercial provista por la empresa Tuenti (que utiliza el despliegue de red de la empresa Movistar, de acuerdo a los objetivos definidos en el presente trabajo) dando como resultado valores que van desde 25,4 a 33,7 Mbps promedio de DL y desde 13,6 hasta 22,1 Mbps de UL.

La tabla de valores obtenida se puede ver en el Anexo III – Mediciones.

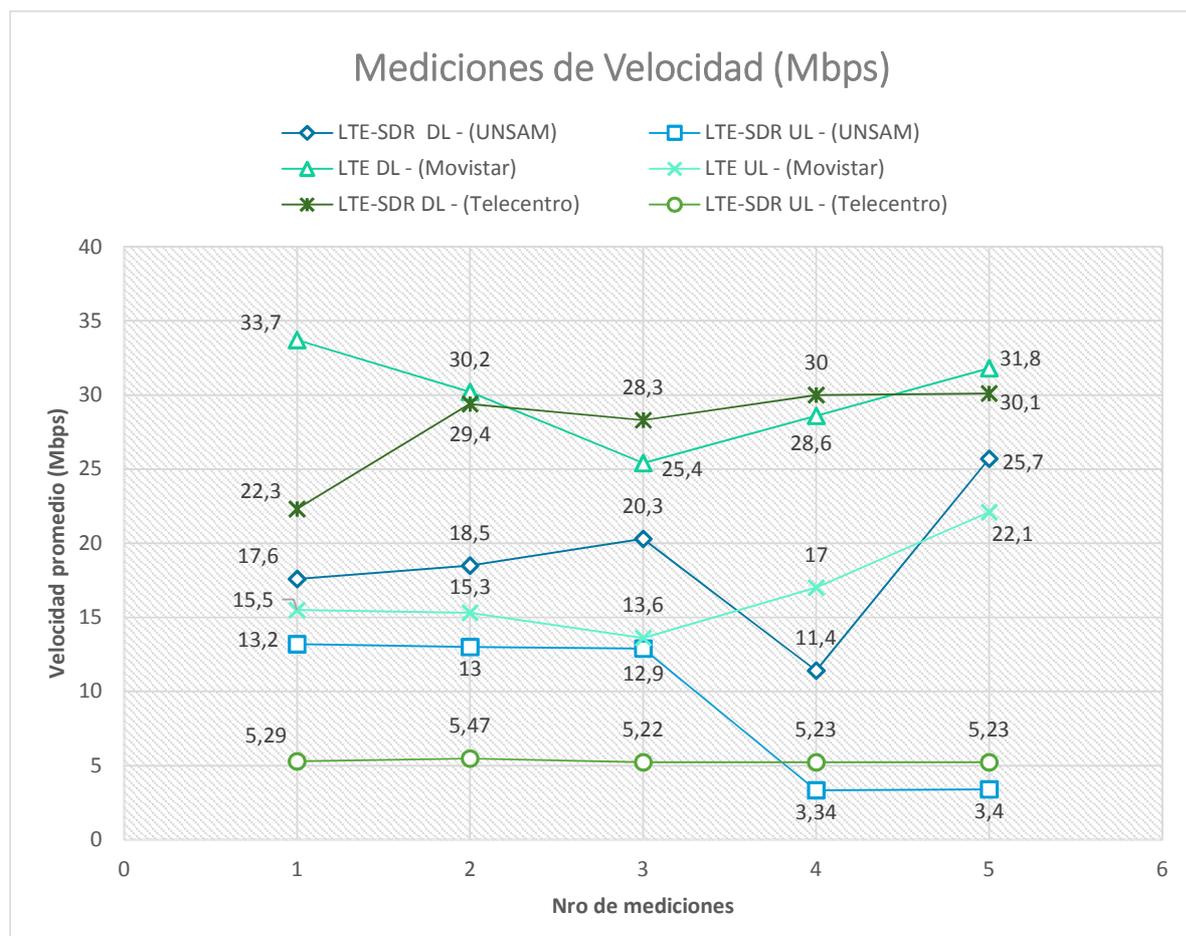


Grafico 5.1 – Pruebas de velocidad alcanzadas por la red LTE-SDR y Tuenti-Movistar.

### 5.1.2 Mediciones de alcance

Para la verificación del alcance de la red se decidió buscar una antena de Movistar en Villa del Parque – Capital Federal, debido a que es un barrio de edificios bajos que entra en la categoría de Ciudad Pequeña. Para la ubicación de la antena se utilizó el programa OpenSignal<sup>80</sup>, el cual indica en el mapa la ubicación de las antenas, el número de identificación (Cell ID) y a cuál antena está conectada el equipo móvil en tiempo real (Figura 5.2).

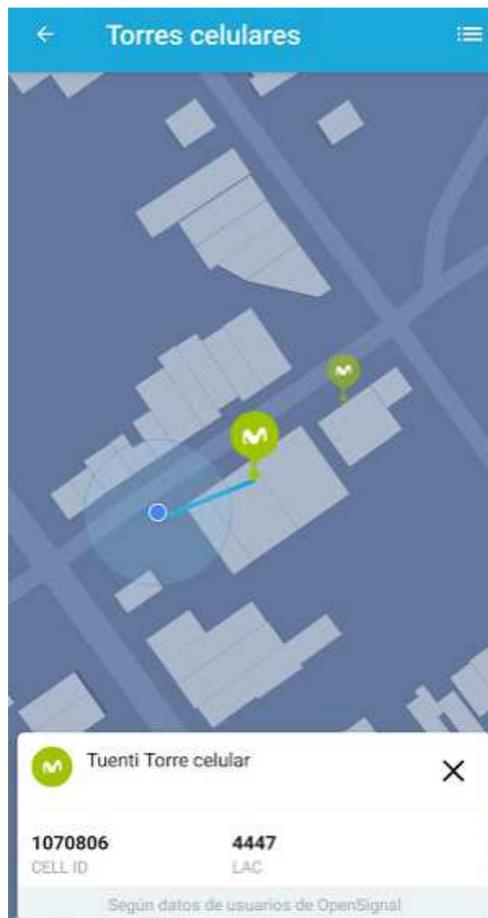


Figura 5.2 – Torre celular Tuenti vista desde la aplicación OpenSignal.

Se seleccionó la antena con Cell ID: 1070806 ubicada en las calles Santo Tomé, entre Av. Nazca y Terrada, instalada sobre un colegio de 2 pisos, esto es una altura aproximada de 5 metros. Una vez ubicada la antena, se comenzaron a tomar las mediciones de potencia de señal a través de la aplicación LTE Discovery<sup>81</sup> que provee además los valores de frecuencia, EARFCN, información de las celdas vecinas, así como también datos de la tarjeta USIM utilizada.

Se realizaron mediciones de potencia cada 10 metros hasta alcanzar los 100 metros, teniendo en cuenta de que el equipo móvil este siempre conectado a la misma antena.

Para realizar las mediciones de la red LTE-SDR se seleccionaron 2 ubicaciones. Por un lado, se tomaron las mediciones en el Campus Migueletes de la Universidad, a una altura de 2 metros. El campus es una

zona con poca edificación, lo cual permite que la señal se encuentre con menor cantidad de interferencia debida a obstáculos (paredes, arboles, entre otros). Las mediciones realizadas en ese contexto fueron en línea de vista.

Luego se realizaron mediciones más comparables con el entorno de Ciudad Pequeña, ubicando la placa en un balcón de un segundo piso en el barrio de Villa del Parque mencionado anteriormente. En este contexto la señal se vio afectada por edificaciones, árboles y un espectro de frecuencias más ocupado por las antenas de alrededores.

En el siguiente grafico se observan los valores obtenidos. En el caso de la señal de Movistar-Tuenti se observa una caída con pendiente aproximadamente recta a medida que el equipo móvil se aleja de la antena, pero se ve interrumpida por un pico, el cual se debe al cruce de la avenida Nazca, una zona en la cual no hay edificaciones y por lo tanto hay menos interferencia.

En el caso de la señal tomada en el campus se observa que al inicio la señal es mucho mayor en las cercanías de la antena, esto se debe a que la altura es menor, pero a medida que nos alejamos la señal cae casi con la misma pendiente que en un entorno de ciudad pequeña. Esto se debe a que la potencia generada por la placa no es suficiente para abarcar un área tan grande. Luego de los 50 metros se observó que el equipo móvil pierde señal por completo, el ultimo valor detectado fue -130 dBm pero no llevo a alcanzar los 60m.

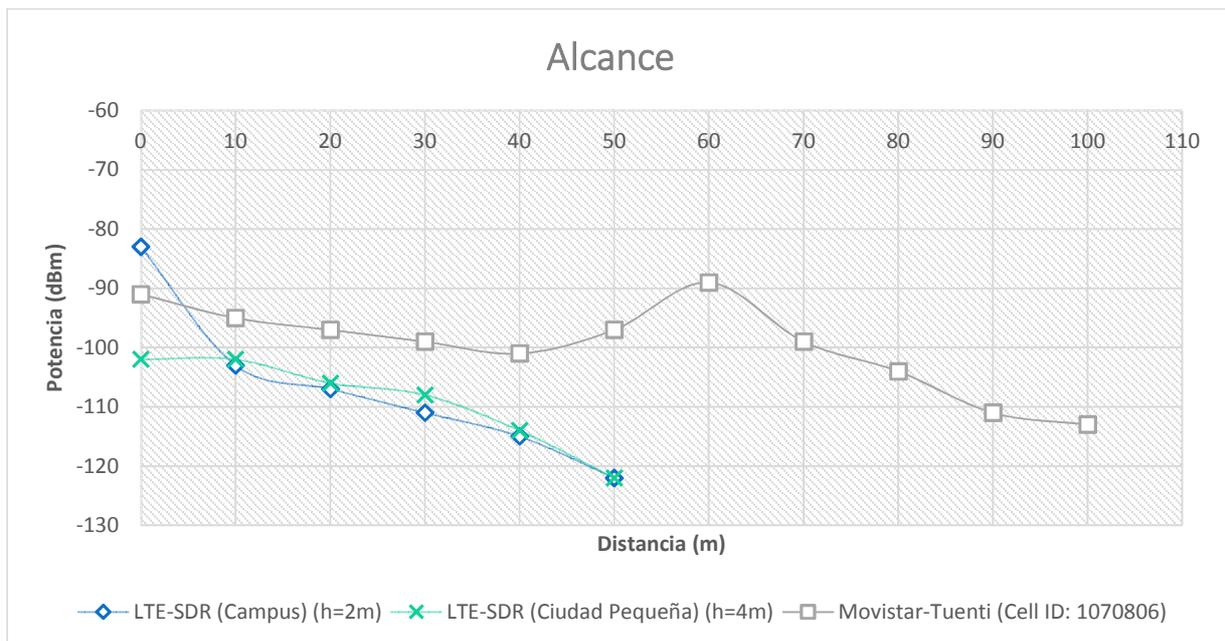


Grafico 5.2 – Mediciones de alcance de la red LTE-SDR y Tuenti-Movistar

### 5.1.3 Pruebas de llamadas VoIP

Por último, se realizaron las pruebas de llamadas VoIP, en la que se constató el correcto funcionamiento de la red, sin latencias ni micro-cortes. Las llamadas fueron completadas con éxito entre las extensiones definidas en la PBX y configuradas en las terminales. La Figura 5.3 es un reporte obtenido del servidor Issabel donde se expresa la cantidad de llamadas entrantes y salientes realizadas entre los dispositivos y la duración total de las mismas.

Filter applied: Start Date = 20 Nov 2019, End Date = 08 Dec 2019

Ext.	User	# Incoming Calls	# Outgoing Calls	Total time (Incoming Calls)	Total time (Outgoing Calls)	Details
1000	1000	12	34	00h. 17m. 48s	00h. 15m. 40s	<a href="#">View</a>
1001	1001	8	4	00h. 00m. 00s	00h. 05m. 00s	<a href="#">View</a>
2000	2000	32	16	00h. 20m. 04s	00h. 17m. 48s	<a href="#">View</a>

Issabel is licensed under GPL. 2006 - 2019.

Figura 5.3 – Reporte de llamadas realizadas y duración.

Al hacer clic en View, el software proporciona gráficos de torta sobre las llamadas entrantes y salientes, particularmente del interno 1000, en el que se puede identificar, del total de llamadas realizadas, quienes fueron los iniciadores en el caso de las llamadas entrantes (grafico superior) y quienes los destinatarios en el caso de las llamadas salientes (grafico inferior). En el segundo gráfico, la sección amarilla indica llamadas realizadas al #43, que es un servicio de prueba de llamadas propio de la PBX para la verificación inicial de la configuración.

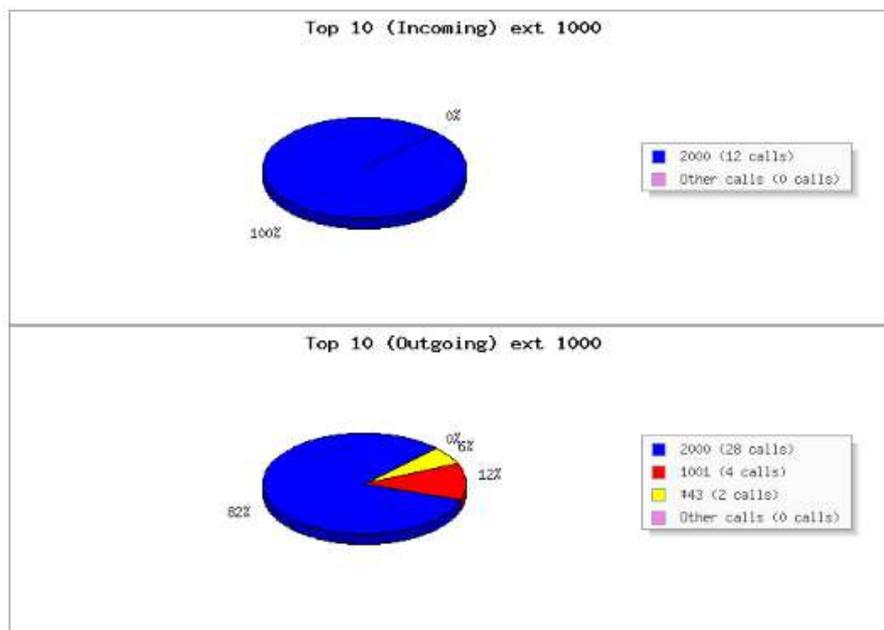


Figura 5.4 – Gráfico de llamadas recibidas y generadas por uno de los internos (1000)

## 5.2 CONCLUSIONES

Una vez finalizadas las etapas de implementación y análisis de resultados se obtienen observaciones relevantes tomando en cuenta que, de acuerdo al objetivo planteado, LTE-SDR tiene limitaciones significativas en su despliegue con respecto a la red corporativa Tuenti-Movistar. Sin embargo, esta última permite conocer los alcances actuales y futuros de la red analizada en este proyecto y evaluar su escalabilidad ante posibles inversiones.

1. Dentro del alcance de este trabajo, y considerando las diferencias en escala de las redes comparadas, LTE-SDR tiene un desenvolvimiento satisfactorio de acuerdo a los parámetros analizados.
2. En el análisis de las velocidades de LTE-SDR se considera que, tanto sobre el ISP de la Universidad de San Martín como sobre la empresa Telecentro, tuvieron una performance aceptable que satisfizo los valores promedio esperados para este tipo de tecnología.
3. En cuanto al alcance de la red, las potencias comparadas muestran claramente que LTE-SDR posee una limitación intrínseca frente a Tuenti-Movistar. Esto último era esperable, pero, aun así, es satisfactorio el conjunto de valores que se observan en el gráfico ad hoc.
4. Los procedimientos e implementaciones llevados a cabo para el despliegue de LTE-SDR cumplen con los estándares tecnológicos definidos por 3GPP para una red de este tipo y su despliegue.
5. Los desarrollos concernientes a las implementaciones de software y las versiones de sistemas operativos utilizadas fueron previamente considerados como los más estables frente a versiones ulteriores y respondieron acorde.
6. Con respecto a la extensión de la red LTE-SDR y el hardware considerado para su despliegue en este trabajo, es importante concluir que cumplieron sobradamente con la planificación previa del inicio del proyecto (diagrama de Gantt ad hoc) y se observó la posibilidad de escalar esta red, en especial en cuanto al alcance.
7. En las pruebas realizadas con grupos de usuarios en el establecimiento de comunicaciones VoIP se concluyó que la conectividad fue la esperada, tanto en calidad de servicio como en cantidad de conexiones no fallidas.

## 5.3 PROCESO DE CIERRE

El proceso de cierre permitió realizar una observación detallada de las acciones acertadas y otras que hubiesen sido posible evitar. Entre ellas se mencionan las siguientes:

1. Justipreciar la elección del sistema operativo previamente instalado en los equipos de prueba de laboratorio de la universidad omitiendo el software previamente instalado que generó solapamiento de procesos. Esto complicó los tiempos de planificación estipulados en el inicio del proyecto.
2. El correcto análisis de riesgo permitió contemplar contingencias inherentes al mismo.
3. El alcance fue el esperado gracias a una buena planificación (aunque no exacta) de los tiempos invertidos en las tareas a realizar.

#### 5.4 PROYECCIONES FUTURAS / ESCALABILIDAD

Este proyecto cumple satisfactoriamente con el objetivo planteado y plantea posibilidades a futuro como las que sigue:

1. Se destaca la factibilidad a futuro de afianzar la tecnología MIMO sobre redes LTE-SDR para proveer servicio a mayor cantidad de usuarios.
2. La tecnología 5G también es una posibilidad a futuro para la red presentada en este proyecto, sosteniendo siempre los estándares del grupo 3GPP, considerando el agregado de un generador de tiempo externo, ya sea a través de una señal externa o la instalación de un GPSDO, debido a que las frecuencias que utiliza son del orden de microondas.
3. Como se mencionó en las conclusiones esta red es escalable en su alcance con el agregado de una o varias torres de manera tal de ampliar su cobertura.

## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO I – BANDAS LTE

A continuación, se observa una tabla en donde se muestran las Bandas designadas para LTE por región, su frecuencia de DL y UL, el ancho de banda y los valores de EARFCN que las definen.

Banda	Nombre	Downlink (MHz)			Ancho de Banda DL/UL (MHz)	Uplink (MHz)			Duplex spacing (MHz)	Area Geográfica	3GPP Release
		Baja	Media	Alta		Baja	Media	Alta			
		Earfcn			Earfcn						
FDD											
1	2100	2110 0	<b>2140</b> <b>300</b>	2170 599	60	1920 18000	<b>1950</b> <b>18300</b>	1980 18599	190	Global	8
2	1900 PCS	1930 600	<b>1960</b> <b>900</b>	1990 1199	60	1850 18600	<b>1880</b> <b>18900</b>	1910 19199	80	NAR	8
3	1800+	1805 1200	<b>1842.5</b> <b>1575</b>	1880 1949	75	1710 19200	<b>1747.5</b> <b>19575</b>	1785 19949	95	Global	8
4	AWS-1	2110 1950	<b>2132.5</b> <b>2175</b>	2155 2399	45	1710 19950	<b>1732.5</b> <b>20175</b>	1755 20399	400	NAR	8
5	850	869 2400	<b>881.5</b> <b>2525</b>	894 2649	25	824 20400	<b>836.5</b> <b>20525</b>	849 20649	45	NAR	8
6	UMTS only	875 2650	<b>880</b> <b>2700</b>	885 2749	10	830 20650	<b>835</b> <b>20700</b>	840 20749	45	APAC	8
7	2600	2620 2750	<b>2655</b> <b>3100</b>	2690 3449	70	2500 20750	<b>2535</b> <b>21100</b>	2570 21449	120	EMEA	8
8	900 GSM	925 3450	<b>942.5</b> <b>3625</b>	960 3799	35	880 21450	<b>897.5</b> <b>21625</b>	915 21799	45	Global	8
9	1800	1844.9 3800	<b>1862.5</b> <b>3975</b>	1879.9 4149	35	1749.9 21800	<b>1767.5</b> <b>21975</b>	1784.9 22149	95	APAC	8
10	AWS-1+	2110 4150	<b>2140</b> <b>4450</b>	2170 4749	60	1710 22150	<b>1740</b> <b>22450</b>	1770 22749	400	NAR	8
11	1500 Lower	1475.9 4750	<b>1486</b> <b>4850</b>	1495.9 4949	20	1427.9 22750	<b>1438</b> <b>22850</b>	1447.9 22949	48	Japan	8
12	700 a	729 5010	<b>737.5</b> <b>5095</b>	746 5179	17	699 23010	<b>707.5</b> <b>23095</b>	716 23179	30	NAR	8.4
13	700 c	746 5180	<b>751</b> <b>5230</b>	756 5279	10	777 23180	<b>782</b> <b>23230</b>	787 23279	-31	NAR	8
14	700 PS	758 5280	<b>763</b> <b>5330</b>	768 5379	10	788 23280	<b>793</b> <b>23330</b>	798 23379	-30	NAR	8
17	700 b	734 5730	<b>740</b> <b>5790</b>	746 5849	12	704 23730	<b>710</b> <b>23790</b>	716 23849	30	NAR	8.3
18	800 Lower	860 5850	<b>867.5</b> <b>5925</b>	875 5999	15	815 23850	<b>822.5</b> <b>23925</b>	830 23999	45	Japan	9
19	800 Upper	875 6000	<b>882.5</b> <b>6075</b>	890 6149	15	830 24000	<b>837.5</b> <b>24075</b>	845 24149	45	Japan	9
20	800 DD	791 6150	<b>806</b> <b>6300</b>	821 6449	30	832 24150	<b>847</b> <b>24300</b>	862 24449	-41	EMEA	9
21	1500 Upper	1495.9	<b>1503.5</b>	1510.9	15	1447.9	<b>1455.5</b>	1462.9	48	Japan	9

		6450	<b>6525</b>	6599		24450	<b>24525</b>	24599			
22	3500	3510 6600	<b>3550</b> <b>7000</b>	3590 7399	80	3410 24600	<b>3450</b> <b>25000</b>	3490 25399	100	EMEA	10.4
23	2000 S-band	2180 7500	<b>2190</b> <b>7600</b>	2200 7699	20	2000 25500	<b>2010</b> <b>25600</b>	2020 25699	180	NAR	10.3
24	1600 L-band	1525 7700	<b>1542</b> <b>7870</b>	1559 8039	34	1626.5 25700	<b>1643.5</b> <b>25870</b>	1660.5 26039	-101.5	NAR	10.1
25	1900+	1930 8040	<b>1962.5</b> <b>8365</b>	1995 8689	65	1850 26040	<b>1882.5</b> <b>26365</b>	1915 26689	80	NAR	10
26	850+	859 8690	<b>876.5</b> <b>8865</b>	894 9039	35	814 26690	<b>831.5</b> <b>26865</b>	849 27039	45	NAR	11.0
27	800 SMR	852 9040	<b>860.5</b> <b>9125</b>	869 9209	17	807 27040	<b>815.5</b> <b>27125</b>	824 27209	45	NAR	11.1
28	700 APT	758 9210	<b>780.5</b> <b>9435</b>	803 9659	45	703 27210	<b>725.5</b> <b>27435</b>	748 27659	55	APAC,EU	11.1
29	700 d	717 9660	<b>722.5</b> <b>9715</b>	728 9769	11	Downlink only				NAR	11.3
30	2300 WCS	2350 9770	<b>2355</b> <b>9820</b>	2360 9869	10	2305 27660	<b>2310</b> <b>27710</b>	2315 27759	45	NAR	12.0
31	450	462.5 9870	<b>465</b> <b>9895</b>	467.5 9919	5	452.5 27760	<b>455</b> <b>27785</b>	457.5 27809	10	Global	12.0
32	1500 L- band	1452 9920	<b>1474</b> <b>10140</b>	1496 10359	44	Downlink only				EMEA	12.4
65	2100+	2110 65536	<b>2155</b> <b>65986</b>	2200 66435	90	1920 131072	<b>1965</b> <b>131522</b>	2010 131971	190	Global	13.2
66	AWS-3	2110 66436	<b>2155</b> <b>66886</b>	2200 67335	90 / 70	1710 131972	<b>1745</b> <b>132322</b>	1780 132671	400	NAR	13.2
67	700 EU	738 67336	<b>748</b> <b>67436</b>	758 67535	20	Downlink only				EMEA	13.2
68	700 ME	753 67536	<b>768</b> <b>67686</b>	783 67835	30	698 132672	<b>713</b> <b>132822</b>	728 132971	55	EMEA	13.3
69	DL 2500	2570 67836	<b>2595</b> <b>68086</b>	2620 68335	50	Downlink only					14.0
70	AWS-4	1995 68336	<b>2007.5</b> <b>68461</b>	2020 68585	25 / 15	1695 132972	<b>1702.5</b> <b>133047</b>	1710 133121	300	NAR	14.0
71	600	617 68586	<b>634.5</b> <b>68761</b>	652 68935	35	663 133122	<b>680.5</b> <b>133297</b>	698 133471	-46	NAR	15.0
72	450 PMR/PAMR	461 68936	<b>463.5</b> <b>68961</b>	466 68985	5	451 133472	<b>453.5</b> <b>133497</b>	456 133521	10	EMEA	15.0
73	450 APAC	460 68986	<b>462.5</b> <b>69011</b>	465 69035	5	450 133522	<b>452.5</b> <b>133547</b>	455 133571	10	APAC	15.0
74	L-band	1475 69036	<b>1496.5</b> <b>69251</b>	1518 69465	43	1427 133572	<b>1448.5</b> <b>133787</b>	1470 134001	48	NAR	15.0
75	DL 1500+	1432 69466	<b>1474.5</b> <b>69891</b>	1517 70315	85	Downlink only				NAR	15.0
76	DL 1500-	1427 70316	<b>1429.5</b> <b>70341</b>	1432 70365	5	Downlink only				NAR	15.0
85	700 a+	728 70366	<b>737</b> <b>70456</b>	746 70545	18	698 134002	<b>707</b> <b>134092</b>	716 134181	30	NAR	15.2

87	410	420 70546	<b>422.5</b> <b>70571</b>	425 70595	5	410 134182	<b>412.5</b> <b>134207</b>	415 134231	10	EMEA	16.2
88	410+	422 70596	<b>424.5</b> <b>70621</b>	427 70645	5	412 134232	<b>414.5</b> <b>134257</b>	417 134281	10	EMEA	16.2
252	Unlicensed NII-1	5150 255144	<b>5200</b> <b>255644</b>	5250 256143	100	Downlink only				Global	LTE-U
255	Unlicensed NII-3	5725 260894	<b>5787.5</b> <b>261519</b>	5850 262143	125	Downlink only				Global	LTE-U

APAC = Asia y Pacifico

APT = Asia Pacific Telecommunity

CALA = Central America Latin America

CBRS = Citizens Broadband Radio Service 3550-3700 MHz

DD = Digital Dividend

EMEA = Europe Middle East and Africa

EU = Europe

NAR = North America Region

PAMR = Public Access Mobile Radio

PS = Public Safety

U-NII = Unlicensed National Information Infrastructure

700 xy = See xy blocks USA FCC

+ = Extended band

## 6.2 ANEXO II – ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE SRSLTE

### 6.2.1 Archivo de configuración enb.conf

```
#####
#                               srsENB configuration file
#####

#####
# eNB configuration
#
# enb_id:      20-bit eNB identifier.
# cell_id:     8-bit cell identifier.
# tac:         16-bit Tracking Area Code.
# mcc:         Mobile Country Code
# mnc:         Mobile Network Code
# mme_addr:    IP address of MME for S1 connection
# gtp_bind_addr: Local IP address to bind for GTP connection
# s1c_bind_addr: Local IP address to bind for S1AP connection
# n_prb:       Number of Physical Resource Blocks (6,15,25,50,75,100)
# tm:          Transmission mode 1-4 (TM1 default)
# nof_ports:   Number of Tx ports (1 port default, set to 2 for TM2/3/4)
#
#####
[enb]
enb_id = 0x19B
cell_id = 0x01
phy_cell_id = 1
tac = 0x0007
mcc = 001
mnc = 01
mme_addr = 127.0.1.100
gtp_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_addr = 127.0.1.1
n_prb = 50
#tm = 4
#nof_ports = 2

#####
# eNB configuration files
#
# sib_config: SIB1, SIB2 and SIB3 configuration file
# note: when enabling mbms, use the sib.conf.mbsfn configuration file which includes SIB13
# rr_config:  Radio Resources configuration file
# drb_config: DRB configuration file
#####
[enb_files]
sib_config = sib.conf
rr_config = rr.conf
drb_config = drb.conf

#####
# RF configuration
#
# dl_earfcn: EARFCN code for DL
# tx_gain: Transmit gain (dB).
# rx_gain: Optional receive gain (dB). If disabled, AGC if enabled
#
# Optional parameters:
# dl_freq:      Override DL frequency corresponding to dl_earfcn
# ul_freq:      Override UL frequency corresponding to dl_earfcn (must be set if dl_freq is set)
```

```

# device_name:      Device driver family. Supported options: "auto" (uses first found), "UHD" or
"bladeRF"
# device_args:     Arguments for the device driver. Options are "auto" or any string.
#                 Default for UHD: "recv_frame_size=9232,send_frame_size=9232"
#                 Default for bladeRF: ""
# #time_adv_nsamples: Transmission time advance (in number of samples) to compensate for RF delay
#                 from antenna to timestamp insertion.
#                 Default "auto". B210 USRP: 100 samples, bladeRF: 27.
# burst_preamble_us: Preamble length to transmit before start of burst.
#                 Default "auto". B210 USRP: 400 us, bladeRF: 0 us.
#####
[rf]
#dl_earfcn = 2175
tx_gain = 80
rx_gain = 40
dl_freq = 2685000000
ul_freq = 2565000000
#device_name = auto

# For best performance in 2x2 MIMO and >= 15 MHz use the following device_args settings:
#   USRP B210: pass num_recv_frames=64,num_send_frames=64

#device_args = auto
#time_adv_nsamples = auto
#burst_preamble_us = auto

#####
# MAC-layer packet capture configuration
#
# Packets are captured to file in the compact format decoded by
# the Wireshark mac-lte-framed dissector and with DLT 147.
# To use the dissector, edit the preferences for DLT_USER to
# add an entry with DLT=147, Payload Protocol=mac-lte-framed.
# For more information see: https://wiki.wireshark.org/MAC-LTE
#
# Please note that this setting will by default only capture MAC
# frames on dedicated channels, and not SIB. You have to build with
# WRITE_SIB_PCAP enabled in srsenb/src/stack/mac/mac.cc if you want
# SIB to be part of the MAC pcap file.
#
# enable: Enable MAC layer packet captures (true/false)
# filename: File path to use for packet captures
#####
[pcap]
enable = true
filename = /tmp/enb.pcap

#####
# Log configuration
#
# Log levels can be set for individual layers. "all_level" sets log
# level for all layers unless otherwise configured.
# Format: e.g. phy_level = info
#
# In the same way, packet hex dumps can be limited for each level.
# "all_hex_limit" sets the hex limit for all layers unless otherwise
# configured.
# Format: e.g. phy_hex_limit = 32
#
# Logging layers: phy, mac, rlc, pdcp, rrc, nas, gtpu, usim, all
# Logging levels: debug, info, warning, error, none
#
# filename: File path to use for log output. Can be set to stdout

```

```

#           to print logs to standard output
# file_max_size: Maximum file size (in kilobytes). When passed, multiple files are created.
#           If set to negative, a single log file will be created.
#####
[log]
all_level = warning
all_hex_limit = 32
filename = /tmp/enb.log
file_max_size = -1

[gui]
enable = false

#####
# Scheduler configuration options
#
# pdsch_mcs:           Optional fixed PDSCH MCS (ignores reported CQIs if specified)
# pdsch_max_mcs:      Optional PDSCH MCS limit
# pusch_mcs:          Optional fixed PUSCH MCS (ignores reported CQIs if specified)
# pusch_max_mcs:      Optional PUSCH MCS limit
# #nof_ctrl_symbols:  Number of control symbols
#
#####
[scheduler]
#pdsch_mcs             = -1
#pdsch_max_mcs        = -1
#pusch_mcs             = -1
pusch_max_mcs         = 16
nof_ctrl_symbols      = 3

#####
# eMBMS configuration options
#
# enable:              Enable MBMS transmission in the eNB
# m1u_multiaddr:       Multicast address the M1-U socket will register to
# m1u_if_addr:         Address of the interface the M1-U interface will listen for multicast packets.
#
#####
#enable = false
#m1u_multiaddr = 239.255.0.1
#m1u_if_addr = 127.0.1.201

#####
# Expert configuration options
#
# pusch_max_its:       Maximum number of turbo decoder iterations (Default 4)
# pusch_8bit_decoder:  Use 8-bit for LLR representation and turbo decoder trellis computation
# (Experimental)
# nof_phy_threads:     Selects the number of PHY threads (maximum 4, minimum 1, default 2)
# metrics_period_secs: Sets the period at which metrics are requested from the eNB.
# metrics_csv_enable:  Write eNB metrics to CSV file.
# pregenerate_signals: Pregenerate uplink signals after attach. Improves CPU performance.
# tx_amplitude:        Transmit amplitude factor (set 0-1 to reduce PAPR)
# link_failure_nof_err: Number of PUSCH failures after which a radio-link failure is triggered.
#                       a link failure is when SNR<0 and CRC=KO
# max_prach_offset_us: Maximum allowed RACH offset (in us)
# eea_pref_list:        Ordered preference list for the selection of encryption algorithm (EEA) (default:
# EEA0, EEA2, EEA1).
# eia_pref_list:        Ordered preference list for the selection of integrity algorithm (EIA) (default:
# EIA2, EIA1, EIA0).
#
#####
[expert]
#pusch_max_its         = 8 # These are half iterations

```

```

#pusch_8bit_decoder = false
#nof_phy_threads = 3
#metrics_period_secs = 1
#metrics_csv_enable = false
#metrics_csv_filename = /tmp/enb_metrics.csv
#pregenerate_signals = false
#tx_amplitude = 0.6
#link_failure_nof_err = 50
#rrc_inactivity_timer = 60000
#max_prach_offset_us = 30
#eea_pref_list = EEA0, EEA2, EEA1
#eia_pref_list = EIA2, EIA1, EIA0

```

## 6.2.2 Archivo de configuración epc.conf:

```

#####
#                               srsEPC configuration file
#####

#####
# MME configuration
#
# mme_code:           8-bit MME code identifies the MME within a group.
# mme_group:         16-bit MME group identifier.
# tac:               16-bit Tracking Area Code.
# mcc:               Mobile Country Code
# mnc:               Mobile Network Code
# apn:               Set Access Point Name (APN)
# mme_bind_addr:     IP bind addr to listen for eNB S1-MME connections
# dns_addr:          DNS server address for the UEs
# encryption_algo:   Preferred encryption algorithm for NAS layer
#                   (default: EEA0, support: EEA1, EEA2)
# integrity_algo:    Preferred integrity protection algorithm for NAS
#                   (default: EIA1, support: EIA1, EIA2 (EIA0 not support))
# paging_timer:      Value of paging timer in seconds (T3413)
#
#####
[mme]
mme_code = 0x1a
mme_group = 0x0001
tac = 0x0007
mcc = 001
mnc = 01
mme_bind_addr = 127.0.1.100
apn = srsapn
dns_addr = 10.1.70.2
encryption_algo = EEA0
integrity_algo = EIA1
paging_timer = 2

#####
# HSS configuration
#
# db_file:           Location of .csv file that stores UEs information.
#
#####
[hss]
db_file = ./user_db.csv

#####
# SP-GW configuration
#
# gtpu_bind_addr:    GTP-U bind address.

```

```

# sgi_if_addr:      SGi TUN interface IP address.
# sgi_if_name:      SGi TUN interface name.
# max_paging_queue: Maximum packets in paging queue (per UE).
#
#####

[spgw]
gtpu_bind_addr  = 127.0.1.100
sgi_if_addr     = 172.16.0.1
sgi_if_name     = srs_spgw_sgi
max_paging_queue = 100

#####
# PCAP configuration
#
# Packets are captured to file in the compact format decoded by
# the Wireshark slap dissector and with DLT 150.
# To use the dissector, edit the preferences for DLT_USER to
# add an entry with DLT=150, Payload Protocol=slap.
#
# enable:  Enable or disable the PCAP.
# filename: File name where to save the PCAP.
#
#####
[pcap]
enable  = true
filename = /tmp/epc.pcap

#####
# Log configuration
#
# Log levels can be set for individual layers. "all_level" sets log
# level for all layers unless otherwise configured.
# Format: e.g. slap_level = info
#
# In the same way, packet hex dumps can be limited for each level.
# "all_hex_limit" sets the hex limit for all layers unless otherwise
# configured.
# Format: e.g. slap_hex_limit = 32
#
# Logging layers: nas, slap, mme_gtpc, spgw_gtpc, gtpu, spgw, hss, all
# Logging levels: debug, info, warning, error, none
#
# filename: File path to use for log output. Can be set to stdout
#           to print logs to standard output
#####
[log]
all_level = info
all_hex_limit = 32
filename = /tmp/epc.log

#nas_level = debug
#slap_level = debug
#mme_gtpc_level = debug
#spgw_gtpc_level = debug
#gtpu_level = debug
#spgw_level = debug
#hss_level = debug

```

### 6.2.3 Archivo de configuración user\_db.csv

```
# .csv to store UE's information in HSS
# Kept in the following format: "Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP,AMF,SQL,QCI,IP_alloc"
#
# Name:      Human readable name to help distinguish UE's. Ignored by the HSS
# IMSI:      UE's IMSI value
# Auth:      Authentication algorithm used by the UE. Valid algorithms are XOR
#            (xor) and MILENAGE (mil)
# Key:       UE's key, where other keys are derived from. Stored in hexadecimal
# OP_Type:   Operator's code type, either OP or OPc
# OP/OPc:    Operator Code/Cyphered Operator Code, stored in hexadecimal
# AMF:       Authentication management field, stored in hexadecimal
# SQL:       UE's Sequence number for freshness of the authentication
# QCI:       QoS Class Identifier for the UE's default bearer.
# IP_alloc:  IP allocation strategy for the SPGW.
#            With 'dynamic' the SPGW will automatically allocate IPs
#            With a valid IPv4 (e.g. '172.16.0.2') the UE will have a statically assigned IP.
#
# Note: Lines starting by '#' are ignored and will be overwritten
ue1,mil,001010123456789,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,0000000
00ce2,7,dynamic
ue2,mil,001010012345678,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,0000000
00ce2,7,dynamic
ue3,mil,001010000000001,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,0000000
00ce2,7,dynamic
ue4,mil,001010000000002,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,0000000
00ce2,7,dynamic
```

### 6.3 ANEXO III – MEDICIONES

Tabla de pruebas de velocidad.

Nro. de Prueba	LTE-SDR DL - (UNSAM)	LTE-SDR UL - (UNSAM)	LTE-SDR DL - (Telecentro)	LTE-SDR UL - (Telecentro)	LTE DL - (Movistar)	LTE UL - (Movistar)
1	17,6	13,2	22,3	5,29	33,7	15,5
2	18,5	13	29,4	5,47	30,2	15,3
3	20,3	12,9	28,3	5,22	25,4	13,6
4	11,4	3,34	30	5,23	28,6	17
5	25,7	3,4	30,1	5,23	31,8	22,1

Tabla de medición de Potencia vs. Distancia.

Potencia vs Distancia	Distancia (m)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
LTE-SDR (Campus) (h=2m)	-83	-103	-107	-111	-115	-122	-	-	-	-	-
LTE-SDR (Ciudad) (h=4m)	-102	-102	-106	-108	-114	-122	-	-	-	-	-
Movistar (Ciudad) (Cell ID: 1070806)	-91	-95	-97	-99	-101	-97	-89	-99	-104	-111	-113

## 6.4 ANEXO IV – PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

Luego de la elección y aprobación del tema propuesto se realizó el pedido formal de inicio de proyecto final por medio del envío del Project Charter. En el mismo se definieron los cargos y responsabilidades y los proveedores de los materiales necesarios para la realización del mismo, así como también los tiempos de entrega.

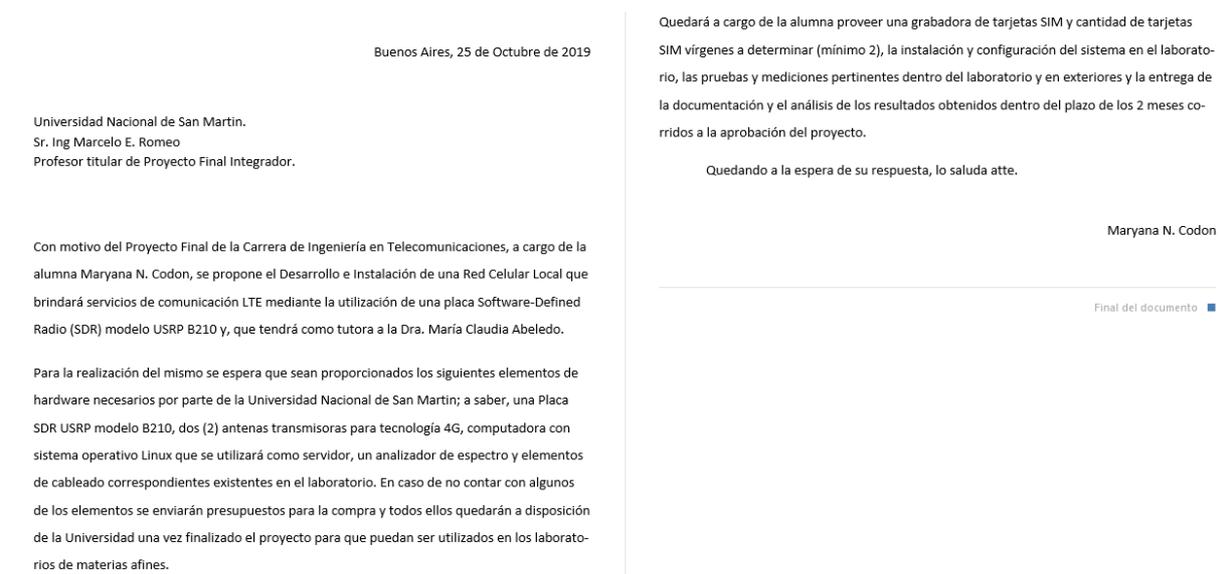


Figura 6.1 – Project charter

Una vez recibida la aprobación formal, se realizó un WBS (Work Breakdown Structure) en donde se listaron las tareas necesarias para la realización del mismo. La misma se muestra a continuación.

<i>Nº Orden</i>	<i>Nombre de la tarea</i>
<b>1</b>	<b>Inicialización</b>
1.1	Lectura y comprensión del manual de placa USRP B210
1.2	Pruebas de conexión y compatibilidad
1.3	Investigación de los softwares SDR disponibles
1.4	Elección del software
<b>2</b>	<b>Compras</b>
2.1	Presupuestos de grabadora de SIM y SIM cards en blanco
2.2	Presentación y aprobación de presupuestos para compras
2.3	Compra y recepción del material
<b>3</b>	<b>Configuración, instalación y desarrollo</b>
3.1	Instalación de servidor Linux
3.2	<b>Instalación de srsLTE y configuración</b>
3.2.1	Instalación de srsLTE
3.2.2	Configuración de ENB
3.2.3	Configuración de EPC

3.2.4	Configuración de base de datos
3.3	<b>Instalación de servidor VoIP</b>
3.3.1	Instalación de Elastix y configuración
3.3.2	Conexión con servidor externo para llamadas salientes
3.4	<b>Configuración de tarjetas SIM</b>
3.4.1	Búsqueda de software de grabado de SIM
3.4.2	Grabado de tarjetas SIM
4	<b>Pruebas</b>
4.1	Pruebas de registración de celular
4.2	Pruebas de llamadas de voz entre celulares
4.3	Prueba de Mensajes entre celulares registrados
4.4	Prueba de uso de datos
4.5	Prueba de distancia respecto de antena en interiores
4.6	Prueba de llamadas salientes a la red local
4.7	Muestra de resultados al Tutor
5	<b>Mediciones</b>
5.1	Medición de señal en ambiente de laboratorio
5.2	Mediciones en el exterior con analizador de espectro
5.3	Medición de pérdida de paquetes (interferencia)
6	<b>Documentación</b>
6.1	Documentación de configuración y puesta en marcha
6.2	Recopilación de datos de medición y análisis de resultados
6.3	Documentación de WBS, Gantt, Análisis de riesgos, etc.
6.4	Documentación del proyecto
6.5	Presentación en Power Point.
7	<b>Presentación final y entrega</b>
7.1	Entrega de documentación para corrección/aprobación
7.2	Exposición final y muestra de funcionamiento

Tabla 6.1 – WBS

Esto permitió comenzar a diagramar los tiempos y el orden en el cual se deberían completar las tareas, así como también las dependencias de las mismas. Toda esta información fue plasmada en un Gantt realizado en la herramienta Microsoft Project 201. En la Figura 6.2 se puede ver una el diagrama Gantt planteado con las fechas de entrega.



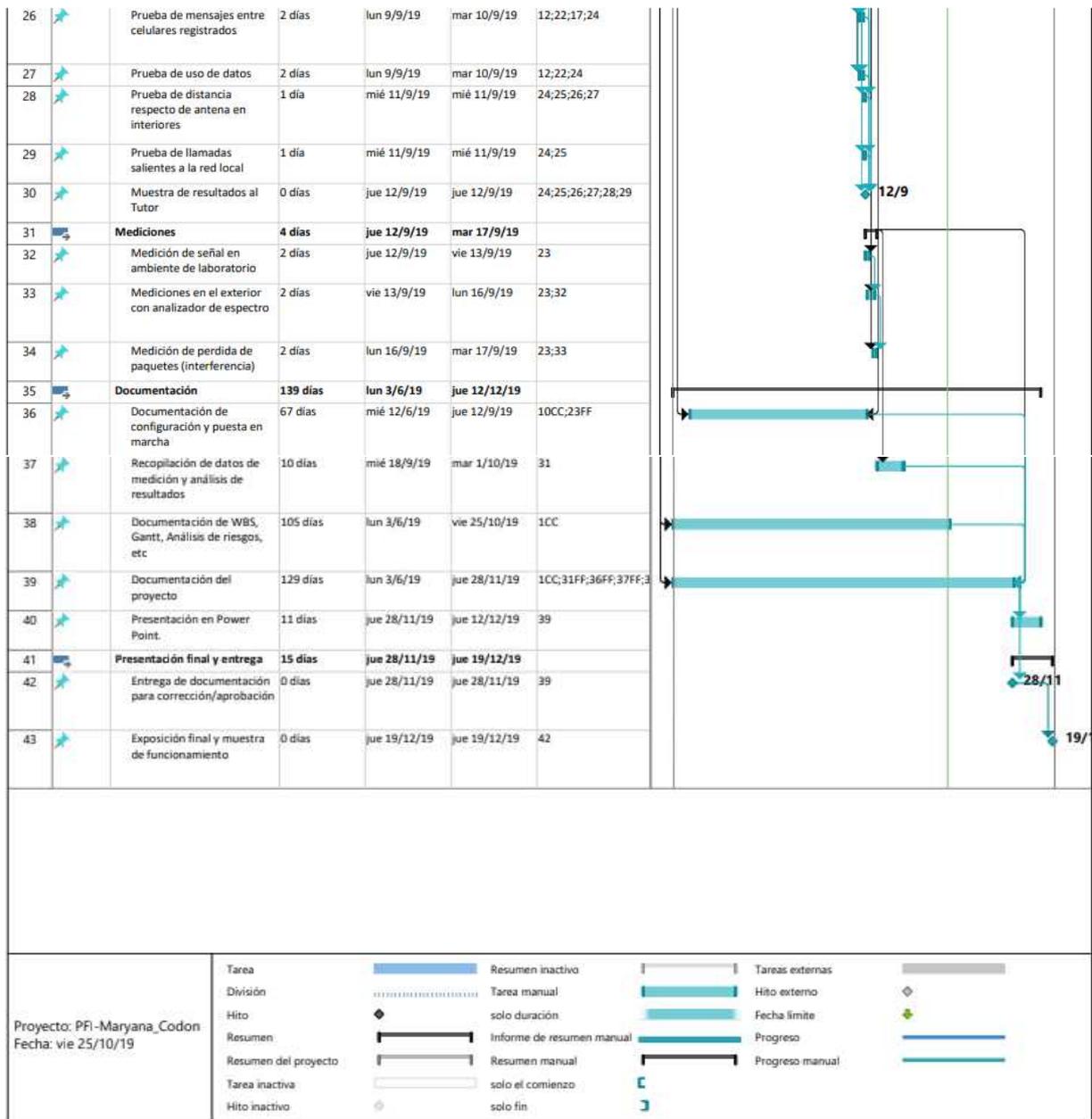


Figura 6.2 – Planificación Gantt

Si bien se cumplió con la fecha de exposición final, se pueden ver retrasos en las entregas debido a un problema no contemplado con la implementación de la central PBX y cambios en los objetivos del proyecto, que produjo el agregado de más tareas de medición de las estipuladas en un primer momento.

Ademas se realizó un análisis de riesgos para poder adelantarse a posibles inconvenientes que se puedan presentar y pre-evaluar las soluciones.

Factor de riesgo	Demoras en la compra de equipos	Problemas de perdida de sincronismo debido al clock interno de la USRP y el software elegido	Problemas de cualquier índole generados por el software elegido.	Entrega del material sea antes de la fecha estipulada	Para la medición de alcance será necesario colocar la placa en un punto alto y no se cuenta con personal para tareas de instalación en altura
Riesgos	Retraso de la fecha de entrega estipulada	Se deberá agregar una señal de clock externa o comprar un GPSDO, provocando posibles retrasos en el desarrollo del mismo	Problemas en la implementación de tecnología 4G, demoras en el caso de tener que analizar otras opciones de software.	La etapa de configuración podrá adelantarse	Las mediciones pueden dar con un error mayor al real lo cual impedirá obtener resultados certeros
Estrategia	Al momento de la búsqueda de presupuestos se buscaran diferentes opciones de proveedores para tener una alternativa en caso de enfrentarse a un problema de entrega de los materiales necesarios	Se analizara si es viable la alternativa de otro tipo de Oscilador externo.	Se contara con el apoyo del Ing. Pablo Bullian para resolver problemas de esta indole	No es un problema.	El objetivo principal es la configuración de central celular. Se hará lo posible por instalar la placa en un lugar alto y se evaluará la contratación de personal capacitado. De lo contrario se entregan los resultados con un grado de error mayor.
Probabilidad de ocurrencia	40%	20%	30%	10%	50%
Consecuencia (1-5 siendo 5 el peor de los casos)	2	5	3	1	3
Magnitud del riesgo (P*C)	0,8	1	0,9	0,1	1,5
Evaluación del Riesgo	Riesgo Bajo	Riesgo Moderado	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Alto

Tabla 6.2 – Análisis de riesgos

Finalmente se realizó un flujo de fondos en donde se evaluó la posibilidad de realizar esta implementación a gran escala, los costos y los beneficios que podría genera. Si bien este análisis fue realizado en forma teórica debido a la imposibilidad de adquirir el permiso de uso de las bandas de frecuencia de LTE, fue una experiencia útil a futuro, para poder aplicarla a otros proyectos.

<b>Instalación de central telefonica celular para uso privado</b>						
Nota: Este analisis es teorico dado que la puesta en marcha solo se podria realizar si el cliente tiene permisos para transmitir en las frecuencias de LTE, y este permiso lo da el ENACOM						
<b>Gastos Operativos x Instalacion</b>		Precio unitario	Cantidad	Precio		
Placa SDR USRP B210		90000	1	90000		
Server (Proliant+8GBram)		108000	1	108000	Dólar (Oct19)	60
Antenas VERT900		2400	2	4800	Precio hora Ing	1000
Sim cards		12,00	10	120	Precio hora Tecnico	357
Grabadora de sim		2700	1	2700	Tasa de interes	1,7
Gabinete exteriores GECL 6060		22467,91	1	22467,91		
Sistema Operativo		0	1	0		
<b>Total x Instalacion</b>				<b>228087,91</b>		
		<b>2020</b>		<b>2021</b>		<b>2022</b>
		Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5
<b>Gastos Operativos</b>	Instalacion	228087,91	0	228087,91	228087,91	456175,82
<b>Gastos de Gestion</b>	Horas de Ingeniero	160000	40000	40000	40000	80000
	Horas de Tecnico		14280	14280	14280	28560
<b>Gastos Financieros</b>	Pago de Prestamo		165750	165750	165750	165750
<b>Total Gastos</b>		388087,91	220030	448117,91	448117,91	730485,82
<b>Ingresos</b>	Prestamo	390000				
	Pago de acreedores		400000	400000	400000	800000
	Mes anterior		1912,09	181882,09	133764,18	85646,27
<b>Estado</b>		1912,09	181882,09	133764,18	85646,27	155160,45
						390424,63

Figura 6.3 – Flujo de fondos

## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

- <sup>1</sup> “LTE Overview” - Autora: Magdalena Nohrborg, para 3GPP -  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> | Accedido el 14/09/2019
- <sup>2</sup> “Software Defined Radio: Challenges and Opportunities”- Autor: Tore Ulversøy -  
Publicado en IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 12, NO. 4, FOURTH QUARTER 2010
- <sup>3</sup> “Movistar” – Sitio oficial Mvistar  
<https://www.movistar.com.ar/> - Accedido el 8/12/2019
- <sup>4</sup> “¿Que es Tuenti?” – Sitio oficial Tuenti.  
<https://www.tuenti.com.ar/que-es-tuenti/> - Accedido el 8/12/2019
- <sup>5</sup> “Development of IMT-Advanced: The SMART approach” – Autor: Stephen M. Blust -  
<https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=en&year=2008&issue=10&ipage=39&ext=html> - Accedido el 14/09/2019
- <sup>6</sup> “About International Telecommunication Union (ITU)” – Sitio oficial de ITU  
<https://www.itu.int/en/about> - Accedido el 14/09/2019
- <sup>7</sup> “UMTS”- Publicado por 3GPP -  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/103-umts> - Accedido el 14/09/2019
- <sup>8</sup> “About 3GPP Home” – sitio oficial de 3GPP -  
<https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp> - Accedido el 14/09/2019
- <sup>9</sup> “Qué es ENACOM” – Sitio oficial ENACOM -  
[https://www.enacom.gob.ar/institucionales\\_p33](https://www.enacom.gob.ar/institucionales_p33) – Accedido el 14/09/2019
- <sup>10</sup> “Indicadores de Mercado TIC y Audiovisual, Argentina” – Publicado por ENACOM - Septiembre 2019 –
- <sup>11</sup> “About RTL-SDR” – Sitio oficial RTL-SDR -  
<https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/> - Accedido el 22/09/2019
- <sup>12</sup> “HackRF One” – sitio oficial Great Scott Gadgets  
<https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/> - Accedido el 22/09/2019
- <sup>13</sup> “Github – mossmann/hackrf: low cost software radio platform” – Comunidad Github de HackRF  
<https://github.com/mossmann/hackrf> - Accedido el 28/09/2019
- <sup>14</sup> “LimeSDR” – sitio oficial LimeMicro  
<https://limemicro.com/products/boards/limesdr/> - Accedido el 22/09/2019
- <sup>15</sup> “USRP B210 USB Software Defined Radio” – Sitio oficial Ettus Research. A National Instrument Brand  
<https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> - Accedido el 22/09/2019
- <sup>16</sup> “About GNU Radio” – Sitio oficial de GNU Radio – The free and open source Radio Ecosystem  
<https://www.gnuradio.org/about/> - Accedido el 28/09/2019
- <sup>17</sup> “About Python” – Sitio oficial de Python.org

---

<https://www.python.org/about/> - Accedido 02/10/2019

<sup>18</sup> “OpenLTE / Wiki / Home” – Creador: Ben Wojtowicz - Publicado en SourceForge.net.

<https://sourceforge.net/p/openlte/wiki/Home/> - Accedido el 29/09/2019

<sup>19</sup> “About Github” – Sitio oficial de Github

<https://github.com/about> - Accedido el 02/10/2019

<sup>20</sup> “Products | srsLTE” – Sitio oficial de Software Radio Systems

<https://www.softwareradiosystems.com/products/#srslte> – Accedido el 29/09/2019

<sup>21</sup> “About us | SRS” – Sitio oficial Software Radio Systems

<https://www.softwareradiosystems.com/about-us/> – Accedido el 29/09/2019

<sup>22</sup> “The C Programming Language First Edition” – Autores: Dennis Ritchie, Brian Kernighan – Publicado por Prentice-Hall INC, Englewood Cliffs, Nueva Jersey 07632 en 1978 - ISBN 0-13-110163-3.

<sup>23</sup> “About us | OpenAirInterface” – Sitio oficial de OpenAirInterface -

[https://www.openairinterface.org/?page\\_id=72](https://www.openairinterface.org/?page_id=72) – Accedido el 29/09/2019

<sup>24</sup> “Presentation EURECOM” – Sitio oficial EURECOM

<http://www.eurecom.fr/en/eurecom/strategy> - Accedido el 02/10/2019

<sup>25</sup> “Software Radios Survey, Critical Evaluation and Future Directions” – Autor: J. Mitola 111 – Publicado en National Telesystems Conference 1992 (NTC-92) doi:10.1109/ntc.1992.267870

<sup>26</sup> “Software Defined Radio with HackRF, Lesson 1: Welcome” – Autor: Michael Ossmann – Publicado por Great Scott Gadgets. -

<https://greatscottgadgets.com/sdr/1/> - Accedido el 12/10/2019

<sup>27</sup> “Software Defined Radio: Challenges and Opportunities” – Autor: Tore Ulversøy – Publicado por: IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 12, NO. 4, FOURTH QUARTER 2010

<sup>28</sup> “Software-Defined Radio for Engineers” – Autores: Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu and Alexander M. Wyglinski - Publicado por Artech House Mobile Communications Series — 30/04/2018

<sup>29</sup> “UHD” – Publicado en Ettus Knowledge Base

<https://kb.ettus.com/UHD> - Accedido el 13/10/2019

<sup>30</sup> “Technical Specification Group Radio Access Network - Requirements for Evolved UTRA and UTRAN (Release 7)” 3GPP TR 25.913 V2.0.0 - Publicado en el sitio oficial 3GPP en 05-2005

<sup>31</sup> “Long Term Evolution (LTE)” – Publicado en Sitio oficial ETSI

<https://www.etsi.org/technologies/mobile/4g> - Accedido el 14/10/2019

<sup>32</sup> “2nd Generation (GERAN) - Overview” - Publicado en Sitio oficial ETSI

<https://www.etsi.org/technologies/mobile/2g> - Accedido el 14/10/2019

<sup>33</sup> “LTE-Advanced” - Autora: Jeanette Wannstrom para 3GPP

<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> - Accedido el 14/10/2019

<sup>34</sup> “ITU global standard for international mobile telecommunications ‘IMT-Advanced’” Sitio oficial ITU

---

<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-adv/Pages/default.aspx> - Accedido el 19/10/2019

<sup>35</sup> “*UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)*” – Publicado por 3GPP  
[ftp://ftp.3gpp.org/Inbox/2008\\_web\\_files/LTA\\_Paper.pdf](ftp://ftp.3gpp.org/Inbox/2008_web_files/LTA_Paper.pdf) - Accedido el 19/10/2019

<sup>36</sup> “*The Evolved Packet Core*” – Autor: Frédéric Firmin para 3GPP  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> - Accedido el 19/10/2019

<sup>37</sup> “*Software-Defined Networking (SDN) Definition*” – Sitio oficial Open Networking  
<https://www.opennetworking.org/sdn-definition/?nab=1> – Accedido el 16/11/2019

<sup>38</sup> “*IMS*” – Publicado en el sitio oficial 3GPP  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/109-ims> - Accedido el 19/10/2019

<sup>39</sup> “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP)*” – Publicado por 3GPP TS 36.413 version 12.3.0 Release 12 – 09/2014  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136400\\_136499/136413/12.03.00\\_60/ts\\_136413v120300p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136413/12.03.00_60/ts_136413v120300p.pdf) - Accedido el 16/11/2019

<sup>40</sup> “*Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)*” - Publicado por 3GPP TS 29.281 version 10.3.0 Release 10 - 09/2011  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/129200\\_129299/129281/10.03.00\\_60/ts\\_129281v100300p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/129200_129299/129281/10.03.00_60/ts_129281v100300p.pdf) - Accedido el 16/11/2019

<sup>41</sup> “*LTE; Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)*” – Publicado por 3GPP TS 36.423 version 11.2.0 Release 11 – 10/2012  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136400\\_136499/136423/11.02.00\\_60/ts\\_136423v110200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136423/11.02.00_60/ts_136423v110200p.pdf) - Accedido el 16/11/2019

<sup>42</sup> “*Diameter Base Protocol*” – Autores: V. Fajardo, Ed., J. Arkko, J. Loughney y G. Zorn, Ed. – Publicado en EITF – RFC 6733 ISSN: 2070-1721 – 10/2012  
<https://tools.ietf.org/html/rfc6733> - Accedido el 16/11/2019

<sup>43</sup> “*B Channel : Type of ISDN Channels*” – Autor: Dinesh Thakur  
<http://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/network-technologies/b-channel-type-of-isdn-channels> - Accedido el 16/11/2019

<sup>44</sup> “*Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 3GPP Evolved Packet System (EPS); Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunnelling Protocol for Control plane (GTPv2-C); Stage 3*” Publicado por 3GPP y ETSI - 3GPP TS 29.274 version 12.6.0 Release - 12 2 ETSI TS 129 274 V12.6.0 – 10/2014  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/129200\\_129299/129274/12.06.00\\_60/ts\\_129274v120600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/129200_129299/129274/12.06.00_60/ts_129274v120600p.pdf) - Accedido el 23/10/2019

<sup>45</sup> “*Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)*” – Sitio oficial de Microsoft  
<https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/networking/technologies/dhcp/dhcp-top> - Accedido el 19/10/2019

<sup>46</sup> “*Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS)*” – RFC 2865 – Publicado por IETF  
<https://tools.ietf.org/html/rfc2865> - Accedido el 19/10/2019

<sup>47</sup> “*Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The basic model*” – Estandar ISO/IEC 7498-1:1994 (Common) – Publicado por ITU-T Study Group 17 - 1994-07-01

---

<http://handle.itu.int/11.1002/1000/2820> - Accedido el 29/10/2019

<sup>48</sup> “*Transmission Control Protocol*” - RFC 793 – Autora: Admiralty Way Marina del Rey - September 1981. - Publicado por Information Sciences Institute University of Southern California en IETF  
<https://tools.ietf.org/html/rfc793> - Accedido el 29/10/2019

<sup>49</sup> “*LTE for Layman (Part 2) - Scaling the LTE*” – Autor: Aayush Shrut - Publicado en LinkedIn  
<https://www.linkedin.com/pulse/lte-layman-scaling-aayush-shrut> - Accedido el 29/10/2019

<sup>50</sup> “*LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols*” – Autores: Suyash Tripathi, Vinay Kulkarni y Alok Kuma – Publicado por Radisys Corporation – 09/2011  
<http://go.radisys.com/rs/radisys/images/paper-lte-eutran.pdf> - Accedido el 16/11/2019

<sup>51</sup> “*NAS*” - Autor: Frédéric Firmin – Sitio oficial 3GPP  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas> - Accedido el 16/11/2019

<sup>52</sup> “*Stream Control Transmission Protocol*” – Autor: R. Stewart, Ed. – Publicado por IETF – RFC 4960 – 09/2007  
<https://tools.ietf.org/html/rfc4960> - Accedido el 16/11/2019

<sup>53</sup> “*User Datagram Protocol*” - RFC 768 – Autor: J. Postel – 28 August 1980 - Publicado en IETF  
<https://tools.ietf.org/html/rfc768> - Accedido el 29/10/2019

<sup>54</sup> “*A Review of Hybrid ARQ in 4G LTE*” – Autores: Sachin K.R , Nikhil Srinath Betgov , Nisarga C , Apeksha S.K , Smt. Usha M.S – Publicado por: International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education - IJARIE- ISSN(O)-2395-4396  
[http://ijariie.com/AdminUploadPdf/A\\_Review\\_of\\_Hybrid\\_ARQ\\_in\\_4G\\_LTE\\_ijariie1200\\_volume\\_1\\_13\\_page\\_160\\_1\\_16.pdf](http://ijariie.com/AdminUploadPdf/A_Review_of_Hybrid_ARQ_in_4G_LTE_ijariie1200_volume_1_13_page_160_1_16.pdf) - Accedido el 25/10/2019

<sup>55</sup> “*Analysis of ARQ schemes*” – Autores: K. Kotuliaková · D. Šimlaščíková · J. Polec – Publicado por Springer Science+Business Media, LLC 2011 - DOI 10.1007/s11235-011-9659-1 - : 19/10/2011

<sup>56</sup> “*LTE Physical Layer Overview - Part III*” – Autor: Frank Rayal – Publicado por: Telesystem Innovations – 22/07/2010  
[https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1278199#](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278199#) - Accedido el 16/11/2019

<sup>57</sup> “*USR P B200/B210 Bus Series*” – Sitio oficial Ettus Research a National Instrument Company  
[https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf) – Accedido el 18/11/2019

<sup>58</sup> “*Board Mounted GPSDO (TCXO) Recommended for USRP B200/B210*” – Sitio oficial Ettus Research  
<https://www.ettus.com/all-products/gpsdo-tcxo-module/> - Accedido el 19/11/2019

<sup>59</sup> “*Ubuntu 16.04.6 LTS (Xenial Xerus)*” – Sitio oficial de Ubuntu.  
<http://ar.releases.ubuntu.com/16.04/> - Accedido el 19/11/2019

<sup>60</sup> “*srsLTE/srsLTE Open source SDR LTE software suite from Software Radio Systems (SRS)*” – Publicado en Github por Software Radio Systems (SRS)  
<https://github.com/srsLTE/srsLTE> - Accedido el 23/11/2019

<sup>61</sup> “*srsLTE Documentation*” – Sitio oficial Software Radio Systems LTE.  
<https://docs.srslte.com/en/latest/index.html> - Accedido el 23/11/2019

<sup>62</sup> “*Mobile Network Codes (MNC) for the international identification plan for public networks and subscriptions (According to Recommendation ITU-T E.212 (05/2008))*” – Publicado por ITU - Geneva, 2014  
[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/opb/sp/T-SP-E.212B-2014-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/sp/T-SP-E.212B-2014-PDF-E.pdf) - Accedido el 23/11/2019

- 
- <sup>63</sup> “*Mobile Country Codes (MCC) and Mobile Network Codes (MNC)*” Publicado por: SMSCarrier.EU  
<https://www.mcc-mnc.com/> - Accedido el 23/11/2019
- <sup>64</sup> “*LG G6 H870*” – Sitio Oficial LG  
<https://www.lg.com/ec/telefonos-celulares/lg-LGH870> - Accedido el 23/11/2019
- <sup>65</sup> “*Xiaomi MI 9 SE*” – Sitio Oficial MI  
<https://www.mi.com/global/mi-9-se/specs> - Accedido el 23/11/2019
- <sup>66</sup> “*LTE SIM Configuration*” – Publicado por MSherman en ORBIT-LAB.ORG  
<https://www.orbit-lab.org/wiki/Documentation/gWide/bLTESIM> - Accedido el 23/11/2019
- <sup>67</sup> “*LISTA DE NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN DE EXPEDIDOR DE LA TARJETA CON CARGO A CUENTA PARA TELECOMUNICACIONES INTERNACIONALES (SEGÚN LA RECOMENDACIÓN UIT-T E.118 (05/2006)) (SITUACIÓN AL 1 DE DICIEMBRE DE 2018)*” – Publicado en Anexo del Boletín Operativo de la ITU  
<https://www.itu.int/pub/T-SP-E.118-2018> - Accedido el 28/11/2019
- <sup>68</sup> “*Getting Started with Asterisk*” – Sitio oficial Asterisk.org  
<https://www.asterisk.org/get-started> - Accedido el 28/11/2019
- <sup>69</sup> “*FreePBX Let freedom ring*” – Sitio oficial FreePBX.org  
<https://www.freepbx.org/> - Accedido el 28/11/2019
- <sup>70</sup> “*Issabel - Everything you need to know about us*” – Sitio oficial Issabel.org  
<https://www.issabel.org/about-us/> - Accedido el 28/11/2019
- <sup>71</sup> “*The CentOS Project*” – Sitio oficial CentOS  
<https://www.centos.org/> - Accedido el 28/11/2019
- <sup>72</sup> “*Apt*” – Sitio oficial Ubuntu  
<https://help.ubuntu.com/lts/serverguide/apt.html> - Accedido el 1/12/2019
- <sup>73</sup> “*SRS eNodeB User Manual » Getting Started*” – Sitio oficial Software Radio System  
[https://docs.srslte.com/en/latest/srsenb/source/2\\_enb\\_getstarted.html#configuration](https://docs.srslte.com/en/latest/srsenb/source/2_enb_getstarted.html#configuration) – Accedido el 1/12/2019
- <sup>74</sup> “*SRS EPC User Manual » Getting Started*” – Sitio oficial Software Radio System  
[https://docs.srslte.com/en/latest/srsepc/source/2\\_epc\\_getstarted.html#configuration](https://docs.srslte.com/en/latest/srsepc/source/2_epc_getstarted.html#configuration) – Accedido el 1/12/2019
- <sup>75</sup> “*LTE Quick Reference – Authentication*” - Sitio oficial: ShareTechNote.com  
[https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_Authentication.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_Authentication.html) - Accedido el 1/12/2019
- <sup>76</sup> “*Products :: ZoiPer*” Sitio oficial ZoiPer  
<https://www.zoiper.com/en/products/zoiper2> - Accedido el 1/12/2019
- <sup>77</sup> “*Spectrum Master MS2720T*” – Sitio oficial Anritsu  
<https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2720t> - Accedido el 6/12/2019
- <sup>78</sup> “*Speedtest*” – Sitio oficial Speedtest de Ookla  
<https://www.speedtest.net/about> - Accedido el 6/12/2019
- <sup>79</sup> “*Telecentro*” - Sitio oficial Telecentro  
<https://telecentro.com.ar/> - Accedido el 8/12/2019

---

<sup>80</sup> “OpenSignal – About Us” – Sitio oficial OpenSignal

<https://www.opensignal.com/about/about-us> - Accedido el 8/12/2019

<sup>81</sup> “LTE Discovery” – Creador: Danial Goodwin – Publicado en Google Play

<https://play.google.com/store/apps/details?id=net.simplyadvanced.ltediscovery> – Accedido el 8/12/2019