



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSMISOR Y RECEPTOR DE
LTE BASADO EN SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR) PARA EL
LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR:

JOSE ALEJANDRO BURGOS ZUMBA

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSMISOR Y RECEPTOR DE
LTE BASADO EN SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR) PARA EL
LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR: JOSE ALEJANDRO BURGOS ZUMBA

DIRECTOR: Ing. JEFFERSON ALEXANDER RIBADENEIRA RAMÍREZ PhD

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Jose Alejandro Burgos Zumba

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jose Alejandro Burgos Zumba, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 21 de julio de 2022




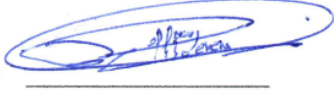

Jose Alejandro Burgos Zumba
0604180364

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSMISOR Y RECEPTOR DE LTE BASADO EN SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR) PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE**, realizado por el señor: **JOSE ALEJANDRO BURGOS ZUMBA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Paul Patricio Romero Riera PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		<u>13-05-2022</u>
Ing. Jefferson Alexander Ribadeneria Ramirez PhD DIRECTOR(A) DE TRABAJO DE TITULACIÓN		<u>13-05-2022</u>
Ing. Paul David Moreno Avilés PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		<u>13-05-2022</u>

DEDICATORIA

A mis padres por ser mi apoyo, a mis hermanos por ser mi fortaleza, a mis abuelos que fueron los pilares para mi formación y a mis amigos que formaron parte de mi vida estudiantil.

Jose

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, hermanos, abuelos y tías que siempre estuvieron a mi lado con su apoyo incondicional para poder llegar a cumplir mis objetivos, por todos los consejos y valores que me han inculcado desde que comencé con mi formación.

Agradezco a los docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por las enseñanzas compartidas, en especial al Ing. Jefferson Ribadeneira por ser la guía para cumplir con mi formación dentro de la institución.

Jose

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
RESUMEN	xviii
SUMMARY	xix
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	2
JUSTIFICACIÓN APLICATIVA	2
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4

CAPITULO I

1	MARCO TEÓRICO	5
1.1	Long Term Evolution (LTE)	5
<i>1.1.1</i>	<i>Arquitectura</i>	<i>5</i>
<i>1.1.1.1</i>	<i>Red de Acceso E-UTRAN (Enhanced UTRAN)</i>	<i>6</i>
<i>1.1.1.2</i>	<i>Evolved Packet Core (EPC)</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Características</i>	<i>11</i>
<i>1.1.2.1</i>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2.2</i>	<i>Adaptative Modulation and Coding (AMC)</i>	<i>13</i>
<i>1.1.3</i>	<i>Bandas de Frecuencia</i>	<i>14</i>

1.1.4	Tramas Radio	15
1.1.5	Multiplexación	18
1.1.5.1	OFDMA	18
1.1.5.2	SC-FDMA	20
1.1.6	Frequency Division Dúplex (FDD) y Time Division Dúplex (TDD)	21
1.1.7	Estados de movilidad y transiciones	22
1.1.8	Canales	23
1.1.8.1	Físicos	24
1.1.8.2	Transporte	25
1.1.8.3	Lógicos	25
1.1.9	QoS	26
1.1.9.1	QCI (QoS Class Identifier)	26
1.1.9.2	ARP (Allocation and Retention Priority)	27
1.1.9.3	APN-Ambr	28
1.1.9.4	UE-Ambr	28
1.1.10	MIMO (Multiple Input Multiple Output)	28
1.2	Radio Definida por Software (SDR)	29
1.3	Tarjetas USRP Ettus B210	30
1.3.1	Estructura Física	30
1.3.2	Estructura Funcional	31
1.4	srsRAN	31
1.4.1	User Equipement (UE)	31
1.4.1.1	Características	32
1.4.2	Estación Base (eNodeB)	32
1.4.2.1	Características	32
1.4.3	Red Central (EPC)	32
1.4.3.1	Características	33
1.4.3.2	HSS	33

CAPITULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	34
2.1	Metodología de la investigación	34
2.1.1	<i>Tipo de investigación</i>	34
2.1.2	<i>Métodos de investigación</i>	34
2.1.3	<i>Técnicas de investigación</i>	34
2.2	Equipos y Materiales	34
2.2.1	<i>Computador 1 (Transmisor)</i>	35
2.2.2	<i>Computador 2 (Receptor)</i>	35
2.2.3	<i>Teléfono celular</i>	36
2.2.4	<i>Tarjeta USRP Ettus B210</i>	37
2.2.5	<i>Antena VERT2450</i>	38
2.2.6	<i>Antena LP0965</i>	38
2.2.7	<i>Antena HyperLOG 30180</i>	39
2.2.8	<i>Antena HyperLOG 7060</i>	39
2.2.9	<i>Cable SMA – SMA</i>	40
2.2.10	<i>Tarjetas SIM</i>	40
2.2.11	<i>Lector de Tarjetas Inteligente</i>	41
2.2.12	<i>Analizador de Espectro</i>	42
2.3	Desarrollo	43
2.3.1	Fase 1: Configuración e Instalación	43
2.3.1.1	<i>Configuración de las tarjetas USRP Ettus B210</i>	43
2.3.1.2	<i>Instalación de srsRAN</i>	45
2.3.1.3	<i>Configuración Tarjetas SIM</i>	45
2.3.2	Fase 2: Escenarios	47
2.3.2.1	<i>Escenario 1: Computador</i>	47
2.3.2.2	<i>Escenario 2: Teléfono Móvil</i>	48
2.3.3	Fase 3: Pruebas	50

2.3.3.1	<i>Prueba 1: Conectividad entre computadores</i>	50
2.3.3.2	<i>Prueba 2: Conexión con teléfono móvil</i>	53

CAPÍTULO III

3	MARCO DE RESULTADOS	57
3.1	Resultados	57
3.1.1	<i>Transmisión de Video</i>	57
3.1.2	<i>MIMO</i>	61
3.1.3	<i>Medidas Indoor</i>	69
3.1.4	<i>Medidas Outdoor</i>	71
3.1.5	<i>Analizador de Espectro</i>	72
3.1.5.1	<i>Power vs RB</i>	73
3.1.5.2	<i>Constell</i>	73
3.1.5.3	<i>Channel power</i>	74
3.1.5.4	<i>Occupied BW</i>	75
3.1.5.5	<i>ACLR</i>	76
3.1.5.6	<i>Control CH Power</i>	77
3.1.5.7	<i>Summary</i>	78
3.1.5.8	<i>Scanner</i>	80
3.1.5.9	<i>SEM</i>	81
3.1.5.10	<i>Co-Ch-Interference</i>	82
3.1.5.11	<i>MIMO</i>	83
3.1.5.12	<i>Carr Agg</i>	84
	CONCLUSIONES	86
	RECOMENDACIONES	87

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Principales Características de LTE	12
Tabla 2-2:	Velocidades LTE	12
Tabla 3-2:	Categorías de User Equipment.....	13
Tabla 4-2:	Bandas de Frecuencia Pareadas	14
Tabla 5-2:	Bandas de Frecuencia No Pareadas.....	15
Tabla 6-2:	Numero de Resource Block	15
Tabla 7-2:	Diferencia entre FDD y TDD.....	21
Tabla 8-2:	Canales Físicos Downlink.....	24
Tabla 9-2:	Canales Físicos Uplink	24
Tabla 10-2:	Canales de Transporte Downlink	25
Tabla 11-2:	Canales de Transporte Uplink.....	25
Tabla 12-2:	Canales Lógicos de Control	25
Tabla 13-2:	Canales Lógicos de Transporte	26
Tabla 14-2:	Valores de QCI definidos en el estándar 3GPP	27
Tabla 1-3:	Características Computador 1 (Transmisor).....	35
Tabla 2-3:	Características Computador 2 (Receptor)	36
Tabla 3-3:	Características Teléfono celular	36
Tabla 4-3:	Datos Tarjetas SIM	47
Tabla 1-4:	Parámetros de calidad de señal LTE	69
Tabla 2-4:	Medidas Indoor.....	70
Tabla 3-4:	Medias Outdoor	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Arquitectura LTE	6
Figura 2-2:	Arquitectura E-UTRAN	7
Figura 3-2:	Arquitectura EPC	8
Figura 4-2:	Entidades e Interfaces LTE	9
Figura 5-2:	Relación entre el ancho de banda del canal y el número de Resource Blocks ..	16
Figura 6-2:	Estructura LTE en el dominio del Tiempo	16
Figura 7-2:	Resource Elementes, Block and Grid	17
Figura 8-2:	Resource Block en Transmisión Uplink	18
Figura 9-2:	Resource Block en Transmisión Downlink	18
Figura 10-2:	Representación OFDM en Tiempo y Frecuencia	19
Figura 11-2:	Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA	20
Figura 12-2:	Diagrama de Funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA	21
Figura 13-2:	Estados LTE	23
Figura 14-2:	Canales Downlink	23
Figura 15-2:	Canales Uplink	24
Figura 16-2:	SU-MIMO y Diversidad de Transmisión	28
Figura 17-2:	MU-MIMO	29
Figura 18-2:	Arquitectura Tarjeta USRP Ettus B210	31
Figura 19-2:	HSS srsRAN	33
Figura 1-3:	Acer Aspire E 15	35
Figura 2-3:	Toshiba Satellite L 45	36
Figura 3-3:	Redmi Note 9 Pro	37
Figura 4-3:	USRP Ettus B210	37
Figura 5-3:	Antena VERT2450	38
Figura 6-3:	Antena LP0965	38
Figura 7-3:	Antena HyperLOG 30180	39
Figura 8-3:	Antena HyperLOG 7060	39
Figura 9-3:	Cable SMA – SMA	40
Figura 10-3:	Tarjeta SIM	40
Figura 11-3:	Lector de Tarjetas Inteligente	41
Figura 12-3:	Adaptador Tarjetas SIM	41
Figura 12-3:	DEVISER Spectrum PROFILER E8600B	42
Figura 14-3:	Comandos de Instalación Tarjetas USRP	43

Figura 15-3:	uhd_find_devices	43
Figura 16-3:	uhd_usrp_probe.....	44
Figura 17-3:	Comandos Instalacion srsRAN.....	45
Figura 18-3:	srsepc.....	45
Figura 19-3:	Tarjeta SIM conectada al computador	46
Figura 20-3:	GRSIMWrite.....	46
Figura 21-3:	Escenario 1	48
Figura 22-3:	Escenario 1 Implementado	48
Figura 23-3:	Escenario 2.....	49
Figura 24-3:	Escenario 2 Implementado	49
Figura 25-3:	srsenb	50
Figura 26-3:	Conexión eNodeB con EPC	50
Figura 27-3:	srsue	51
Figura 28-3:	srsepc Proceso de conexión.....	52
Figura 29-3:	Configuración APN.....	53
Figura 30-3:	Selección de Red	54
Figura 31-3:	Net Monitor Lite.....	54
Figura 32-3:	Enmascarado de Interfaz	55
Figura 33-3:	Traceroute PingTools	56
Figura 1-4:	Selección Emisión	57
Figura 2-4:	Selección Destino y Puerto.....	58
Figura 3-4:	Transcodificación Emisión.....	58
Figura 4-4:	Abrir Ubicación de Red.....	59
Figura 5-4:	Video en User Equipement.....	59
Figura 6-4:	GUI srsenb	60
Figura 7-4:	GUI srsue	60
Figura 8-4:	Trace User Equipement	62
Figura 9-4:	Tercera Planta FIE.....	69
Figura 10-4:	Segunda Planta FIE	70
Figura 11-4:	Planta Baja FIE	70
Figura 12-4:	Exterior FIE.....	72
Figura 13-4:	Modo Power vs RB	73
Figura 14-4:	Modo Constell.....	74
Figura 15-4:	Modo Channel Power.....	75
Figura 16-4:	Modo Occupied BW.....	76
Figura 17-4:	Modo ACLR.....	77
Figura 18-4:	Modo Control CH Power.....	78

Figura 19-4:	Modo Summary Antena 1	79
Figura 20-4:	Modo Summary Antena 2	80
Figura 21-4:	Modo Scanner	81
Figura 22-4:	Modo SEM.....	82
Figura 23-4:	Modo Co-Ch-Interference	83
Figura 24-4:	Modo MIMO.....	84
Figura 25-4:	Modo Carr Agg	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4:	Reference Signal Received Power	62
Gráfico 2-4:	Path Loss	63
Gráfico 3-4:	Carrier Frequency Offset	63
Gráfico 4-4:	Downlink Modulation and Coding Scheme	64
Gráfico 5-4:	Downlink Signal Noise Ratio	64
Gráfico 6-4:	Downlink Average Number of Turbo Decoder Iteration.....	65
Gráfico 7-4:	Downlink Bit Error Rate.....	65
Gráfico 8-4:	Downlink Bloc Error Rate	66
Gráfico 9-4:	Downlink Timing Advance.....	66
Gráfico 10-4:	Uplink Modulation and Coding Scheme	67
Gráfico 11-4:	Uplink Buffer Status	67
Gráfico 12-4:	Uplink Bit Error Rate.....	68
Gráfico 13-4:	Uplink Bloc Error Rate	68

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Mapa Tercera Planta FIE

ANEXO B: Mapa Segunda Planta FIE

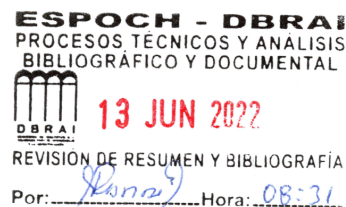
ANEXO C: Mapa Planta Baja FIE

RESUMEN

La implementación de un transmisor y receptor de Long Term Evolution (LTE) basado en Radio definida por Software (SDR) para el laboratorio de comunicaciones de la FIE se llevó a cabo mediante el estudio del estándar de comunicación móvil LTE, SDR y el software srsRAN. Para el desarrollo del proyecto de investigación se distribuyó el trabajo en tres fases conformadas por la configuración e instalación donde se instalaron controladores, software y se configuraron las tarjetas SIM; en la segunda fase se realizó la descripción e implementación de escenarios donde se usó como User Equipment a un computador para el primer escenario y para el segundo escenario se usó un teléfono móvil; como fase final se realizaron pruebas de conectividad con el User Equipment. Los resultados obtenidos fueron una transmisión de video en la cual mediante una interfaz gráfica se pudo observar en tiempo real la respuesta del canal y la modulación de los canales en Uplink y Downlink, se obtuvo una comparación entre una transmisión MIMO y SISO en la cual se pudo determinar que una transmisión MIMO brinda una capacidad mayor pero una transmisión SISO es más estable, se realizaron también mediciones Indoor y Outdoor donde se analizaron las condiciones de calidad de la señal y se realizó un análisis de la señal transmitida con la ayuda de un analizador de espectro, donde se obtuvo una revisión completa de la señal. Con los valores obtenidos en las mediciones se puede concluir que la señal muestra condiciones de borde de celda tanto en Indoor como en Outdoor considerando el peor de los casos y la señal cumple las condiciones de LTE y no genera interferencia en canales aledaños. Se recomienda continuar con pruebas con el transmisor y receptor LTE y usarlo para prácticas de laboratorio.

Palabras clave: <LONG TERM EVOLUTION (LTE)> <SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR)> <TRANSMISIÓN MIMO> <TRANSMISIÓN SISO> <SRSRAN (SOFTWARE)>.

1195-DBRA-UTP-2022



SUMMARY

The implementation of a Long-Term Evolution (LTE) transmitter and receiver based on Software Defined Radio (SDR) for the FIE communications laboratory was carried out through the study of the LTE mobile communication standard, SDR and the srsRAN software. For the development of the research project, the work was distributed in three phases consisting of configuration and installation where drivers, software and SIM cards were installed; in the second phase, the description and implementation of scenarios was carried out where a computer was used as User Equipment for the first scenario and a mobile phone was used for the second scenario; As a final phase, connectivity tests were carried out with the User Equipment. The results obtained were a video transmission in which, through a graphical interface, the response of the channel and the modulation of the channels in Uplink and Downlink could be observed in real time, a comparison was obtained between a MIMO and SISO transmission in which was able to determine that a MIMO transmission provides greater capacity but a SISO transmission is more stable, Indoor and Outdoor measurements were also carried out where the signal quality conditions were analyzed and an analysis of the transmitted signal was carried out with the help of a spectrum analyzer where a complete review of the signal was obtained. With the values obtained in the measurements, it can be concluded that the signal shows cell border conditions both in Indoor and Outdoor, considering the worst case, and the signal meets LTE conditions and does not generate interference in neighboring channels. It is recommended to continue testing with the LTE transmitter and receiver and use it for laboratories.

Keywords: <LONG TERM EVOLUTION (LTE)> <SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR)> <MIMO TRANSMISSION> <SISO TRANSMISSION> <SRSRAN (SOFTWARE)>.



MSc. Wilson Gonzalo Rojas Yumisaca
C.I.0602361842

INTRODUCCIÓN

La implementación de un transmisor y receptor de LTE basado en Software Define Radio (SDR) para el laboratorio de comunicaciones de la FIE es un proyecto que busca innovar con una red 4G de extremo a extremo en la cual se pueden realizar pruebas y estudiar el estándar LTE de manera practica dentro de la Facultad de Informática y Electrónica siendo de apoyo en la enseñanza de las comunicaciones móviles, Esta implementación está enfocada en la conexión entre computadores y la conexión computador – teléfono móvil. Mostrando así una red en la cual se pueden realizar pruebas de conectividad, transmisión de video y conexión a internet, además, de medir los parámetros radioeléctricos de los enlaces dentro de la red.

ANTECEDENTES

La tecnología de Software Defined Radio (SDR) ha ido creciendo constantemente debido al desarrollo de dispositivos de mayor capacidad que permite acelerar el procesamiento de datos en tiempo real y el procesamiento de las señales aplicado a las telecomunicaciones; con el incremento del uso de estos dispositivos ha aumentado la producción y reduciendo el costo de estos y cada vez es más común su aplicación en redes de comunicaciones móviles por lo que resulta necesaria la investigación de distintas tecnologías de uso actual que pueden ser aplicadas a SDR.

En Brasil en el año 2018 se realizó la implementación de una red GSM con SDR logrando un escenario que puede ser replicado en cualquier entorno, esta implementación se realizó en la Universidad de Quindío y fue desarrollada por docentes de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones (Muñoz, y otros, 2018).

En la Facultad de Informática y Electrónica se han realizado pruebas de con SDR de transmisiones AM digital y aplicaciones de radar por lo que se puede dar un paso hacia las comunicaciones móviles que requieren mayor capacidad técnica y entendimiento de la arquitectura. Este proyecto está dirigido a implementar una red de comunicación móvil de cuarta generación específicamente LTE que es de uso mundial actualmente aportando con un avance hacia nuevas aplicaciones a SDR y brindar una implementación practica de una red móvil LTE con futuras aplicaciones dentro de la carrera.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo Implementar un Transmisor y Receptor de LTE basado en Software Define Radio (SDR) para el Laboratorio de Comunicaciones de la FIE?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Qué es la tecnología Long Term Evolution (LTE)?
- ¿Cómo se puede aplicar Software Define Radio a la tecnología LTE?
- ¿Cómo se realizará la implementación de un transmisor y receptor de LTE?
- ¿Qué parámetro se pueden evaluar de la señal?
- ¿Cómo se puede conectar un teléfono móvil a la red LTE implementada?
- ¿Qué aplicaciones puede tener a futuro la implementación de un transmisor y receptor LTE?

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Actualmente en Software Define Radio se implementan muchos sistemas inalámbricos como los sistemas de comunicaciones móviles, por ejemplo, 4G LTE que mediante el software srsRAN de código abierto se puede realizar una implementación de una red LTE completa de extremo a extremo, donde en un computador se puede realizar la implementación de la red central ligera (EPC) que proporciona los componentes principales como, Mobility Management Entity (MME), Home Subscriber Service (HS), Users Gateway (S-GW) y Packet Gateway (P-GW); también permite la implementación de la estación base (eNodeB) que es completamente desarrollada en software y basada en Linux, esta se conecta a la red central y crea una celda LTE local para transmitir y recibir señales por aire mediante los SDRs obteniendo una conexión inalámbrica con otro ordenador donde se realiza la implementación del equipo del usuario (UE) que está basada en software y se conecta a la red LTE que proporciona una interfaz de red estándar con conectividad móvil de alta velocidad, teniendo así una implementación completa de una red 4G LTE de extremo a extremo en la cual se pueden realizar transmisión de video en diferentes calidades, análisis de la calidad de la señal con diferentes parámetros y comprobar el funcionamiento de la red móvil aplicando lo aprendido en la carrera.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Para poder realizar la implementación se usará el sistema operativo Ubuntu en el cual se instalarán los controladores de las tarjetas USRP y el software srsRAN, esto se debe hacer para el equipo

que simulará las funciones de transmisor y el equipo que simulará las funciones de receptor. Una vez realizada la instalación y conexión de los equipos se tendrá un escenario con dos computadores conectados mediante un radioenlace generado por las tarjetas USRP.

En el Equipo 1 se hará la implementación del equipo del usuario (UE) el cual con la ayuda de la tarjeta Ettus USRP B210 se podrá conectar con el Equipo 2 en el que se realiza la implementación de la Red Central (EPC) que permitirá modificar la configuración de la base de datos de los usuarios que se pueden conectar a la red además de brindar una conexión a internet, la Estación Base (eNodeB) la cual se encargará de la gestión de la comunicación inalámbrica donde se configurará la frecuencia a la que operará la base teniendo por defecto las frecuencias de Downlink = 2685 MHz y Uplink = 2565 MHz, el software srsRAN admite distintos anchos de banda y modos de transmisión, se usarán los valores por defecto; de esta forma se realizará la implementación de la red LTE.

En la Estación Base y el Equipo del Usuario se realizará un análisis de la señal en tiempo real, con la ayuda del software que entrega los valores de la Relación Señal a Ruido (SNR), Perdidas de Línea, Bit Rate, Bloc Error Rate, Calidad del Canal y Desplazamiento de la Frecuencia Portadora, con estos valores se realizará el análisis y evaluación de la red LTE bajo los parámetros del estándar.

Adicional se realizará una prueba con la implementación del transmisor LTE donde se remplazará el receptor con un teléfono móvil lo que permitirá tener movilidad en el Equipo del Usuario, para poder realizar la conexión entre el teléfono y la Estación Base se deberá usar una tarjeta SIM en la que se grabará la configuración de la red LTE y registrará la información en la base de datos de la Red Central para que se permita la conexión con la Estación Base. Una vez realizado el proceso y logrando la conexión se tendrá otro escenario en el cual un teléfono móvil se conecta a la Estación Base que le brinda una conexión a internet simulando una comunicación móvil real, este escenario da la posibilidad de realizar pruebas de cobertura de la señal que brinda la red LTE en un ambiente Indoor.

La implementación de un transmisor y receptor LTE será de gran aporte académico para la institución especialmente al Laboratorio de Comunicaciones de la FIE ya que aportará en la demostración del funcionamiento de la tecnología de comunicación móvil 4G LTE de manera practica donde se podrá comprobar la parte teórica aprendida en la carrera implementando una red completa 4G LTE en la cual se pueden medir parámetros de la señal, realizar capturas de paquetes de las capas 1, 2 y 3 donde se podrá analizar los canales de datos y de control, además

de realizar la conexión con un teléfono móvil, teniendo así una demostración completa de la tecnología LTE.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar un Transmisor y Receptor de LTE basado en Software Define Radio (SDR) para el Laboratorio de Comunicaciones de la FIE

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el estándar Long Term Evolution (LTE) y su aplicación con Software Defined Radio
- Implementar una red LTE de extremo a extremo con la ayuda del software srsRAN
- Realizar la comunicación de un teléfono móvil a la red LTE implementada con el software srsRAN.
- Medir y evaluar los parámetros de calidad de la señal como la Relación Señal a Ruido (SNR), Perdidas de Línea, Bit Rate, Bloc Error Rate, Calidad del Canal y Desplazamiento de la Frecuencia Portadora.
- Medir y evaluar la cobertura radio que se obtiene en un entorno Indoor de la red LTE implementada con USRP

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Long Term Evolution (LTE)

LTE es una tecnología de comunicaciones móviles determinada por el 3GPP para la cuarta generación (4G), brinda un rendimiento eficiente frente a sus tecnologías predecesoras como GSM o CDMA, LTE permite altas velocidades de transmisión y recepción en dispositivos móviles y hace posible la coexistencia con HSPA y sistemas anteriores permitiendo a los operadores móviles una migración hacia esta tecnología de cuarta generación. Toda la arquitectura de red de la tecnología Long Term Evolution está basada en IP (Internet Protocol), permitiendo únicamente el envío y recepción de paquetes. Se han definido diferentes mecanismos para proporcionar el servicio de comunicación móvil.

LTE aplica enlaces OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para reducir las interferencias en la transmisión y potenciar la eficiencia espectral, utilizando canales de tamaño adaptativo entre 1,25 y 20 MHz. LTE utiliza acceso OFDMA en Downlink, que se adapta de gran forma para lograr altas tasas de transmisión con gran eficiencia espectral, sin embargo, el uso de OFDMA en el enlace ascendente no es posible debido al alto porcentaje de “potencia de pico (PAPR)” a “potencia media” característico de los sistemas donde se aplica OFDMA lo que comprometería la eficiencia energética de los User Equipments, por lo tanto LTE utiliza para Uplink SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access), que es similar a OFDMA, pero tiene una ventaja de 2 a 6 dB de PAPR sobre el método de OFDMA. (Huidrobo, 2014)

1.1.1 Arquitectura

La arquitectura de una red LTE tiene una estructura más simple que las generaciones predecesoras, esta arquitectura está dividida en la parte de acceso a la red (E-UTRAN) y su parte de Core (EPC Evolved Packet Core), que logra interconectar diversas redes de acceso de la misma generación o de generaciones pasadas; en ocasiones pueden ser redes heterogéneas entre ellas o redes no heterogéneas. Por lo tanto, el core LTE brinda el acceso a redes 3GPP y no 3GPP. (Cubero)

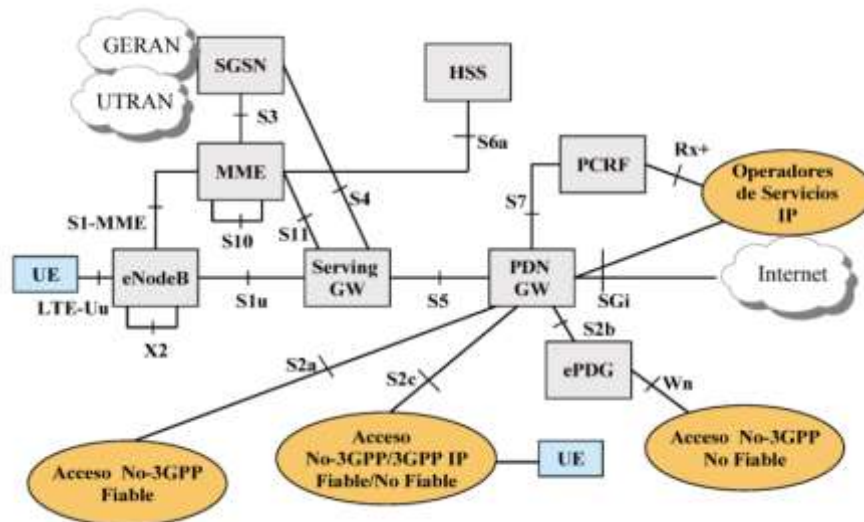


Figura 1-1: Arquitectura LTE

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.1.1 Red de Acceso E-UTRAN (Enhanced UTRAN)

La red de acceso está destinada a ser una infraestructura que brinde mayor velocidad de conexión, baja latencia, una transmisión orientada a paquetes y que soporte varias tecnologías de acceso radioeléctrico. Esta arquitectura de acceso se basa en la conmutación de paquetes (PS) y se acepta que los servicios de voz y video son en tiempo real y sobre la conmutación de paquete. Los puntos de vista más importantes relacionados con la evolución de esta tecnología de comunicación son:

- Soporta una diversidad de redes de acceso, la selección de la red de acceso se basa en políticas de la operadora móvil, preferencias del usuario y las condiciones radioeléctricas de la red.
- Mantenimiento de la calidad del servicio a lo largo de toda la red y entre redes, también la calidad de servicio en el enlace radioeléctrico con el usuario.
- Soporte a la movilidad radioeléctrica entre dominios y entre redes.

En Long Term Evolution la red de acceso está formada por un nodo de acceso llamado Enhanced Node B (eNodeB), este nodo está conectado con otros eNodeB, así como con el core de LTE para la conexión de señalización (MME) como de datos de usuario (SGW). El eNodeB proporciona el back-end tanto del plano de usuario E-UTRA como del plano de control hacia el User Equipment. (Vaca, 2015)

Una nueva interfaz llamada X2 conecta los eNodeB como una red de malla lo que permite la comunicación directa entre los elementos de la red para el intercambio de información y señalización, también facilita el handover de las llamadas entre eNodeB. El E-UTRAN está conectado al EPC a través de la interfaz S1, que conecta los eNodeB a la Entidad de Gestión de la Movilidad (MME) y el Servidor Gateway (SGW) como se puede ver en Figura 1-2.

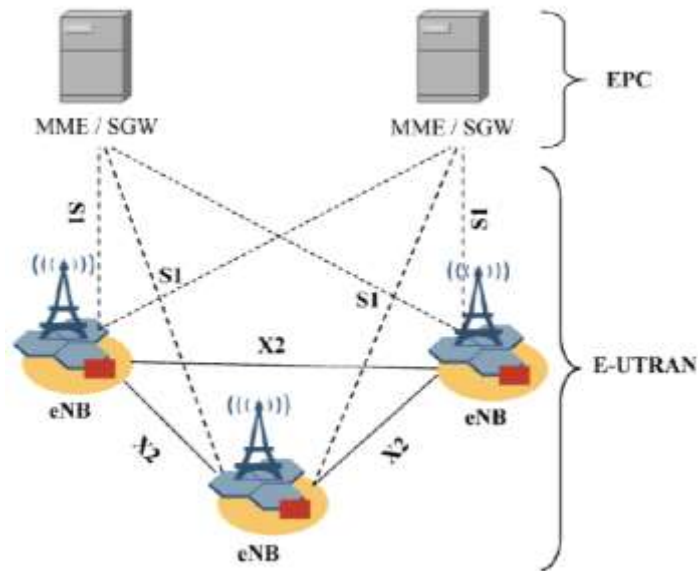


Figura 1-2: Arquitectura E-UTRAN

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.1.1.1 Enhanced Node B (eNodeB)

El eNodeB es la evolución del NodeB de la tecnología móvil UMTS para dar soporte a las funcionalidades propuestas por LTE, eNodeB cumple las funciones de:

- Gestión de los recursos radioeléctricos como la asignación dinámica de los recursos tanto en Uplink como Downlink para la transmisión ordenada de los paquetes.
- Selección del MME asociado a un UE.
- Direcccionamiento de los datos del usuario hacia SGW.
- La configuración y la transmisión de notificaciones de las llamadas entrantes y de la información del usuario.
- Medición y configuración de informes de la movilidad.
- Interfaces: la interfaz entre los eNodeB y el EPC. (Degollado, 2017)

1.1.1.2 Evolved Packet Core (EPC)

El core de LTE es una red basada en IP que se puede ver en la Figura 1-3 en donde se muestra la arquitectura y las interconexiones con el núcleo de datos de redes de segunda y tercera generación. Esta arquitectura se rige bajo los mismos principios de diseño de las redes 3GPP precedentes, con la diferencia que esta arquitectura divide las funciones del Gateway de control en un plano de control liderado por el MME (Mobility Management Entity) y un plano de usuario controlado por el SGW (Serving Gateway). Las funciones originales del GGSN son implementadas por el PDN Gateway (PGW). EPC se basa en los siguientes principios:

- El uso de protocolos IP en todas las interfaces que conectan los elementos de la red.

- La división del plano de control y el plano de usuario.
- Un punto de anclaje común (PGW).
- Capacidad para asignar direcciones IP independientes.
- SGW siendo el punto que conecta el eNodeB a la red principal.
- Políticas de facturación y normas de calidad de servicio. (Taboada, 2016)

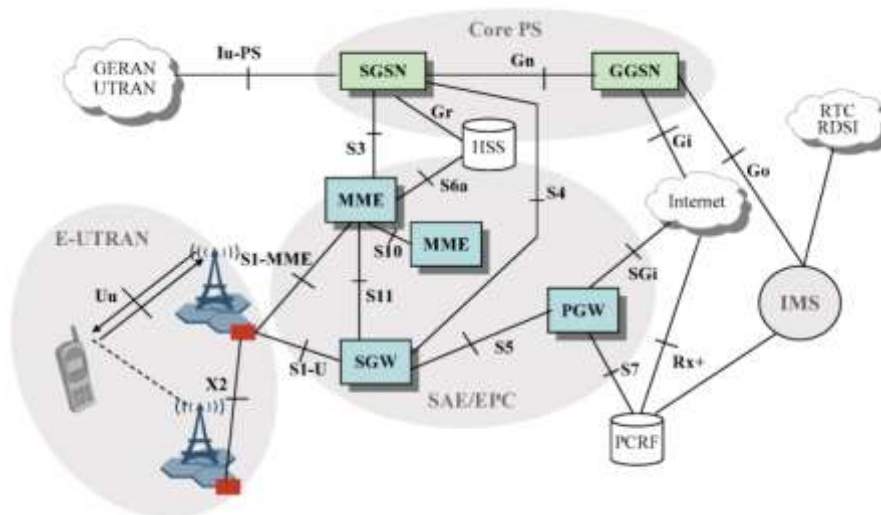


Figura 1-3: Arquitectura EPC

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.1.2.1 Entidades

Una parte fundamental del Core LTE son las entidades lógicas que se muestran en Figura 1-4 y se detallan a continuación.

Mobility Management Entity (MME)

Encargada de obtener los datos del usuario mediante información almacenada en HSS, también autentica, autoriza y selecciona la red de datos externa (PDN) óptima para establecer la conexión entre E-UTRAN y las redes o servicios externos. MME proporciona la conexión entre el eNodeB y la red GSM, UMTS o HSPA existentes a través del SGSN (Serving GPRS Support Node). Además, realiza funciones de administración de movilidad entre la red y recolecta información de facturación para los Operadores Móviles.

Serving Gateway (SGW)

Es una entidad destinada al plano de usuario que es controlado por el MME, es el punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio establecidas en el PCRF (Policy and Charging Rules Function).

PDN Gateway (PGW)

Una entidad que puede ser comparada con la entidad GGSN por sus funciones ya que tiene un papel importante en el control de la movilidad; asigna la dirección IP al User Equipement.

Home Subscriber Server (HSS)

Entidad que almacena y administra los datos relativos a la suscripción de los usuarios a la red.

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)

Encargada de funciones de control de políticas y reglas de facturación. (Vaca, 2015)

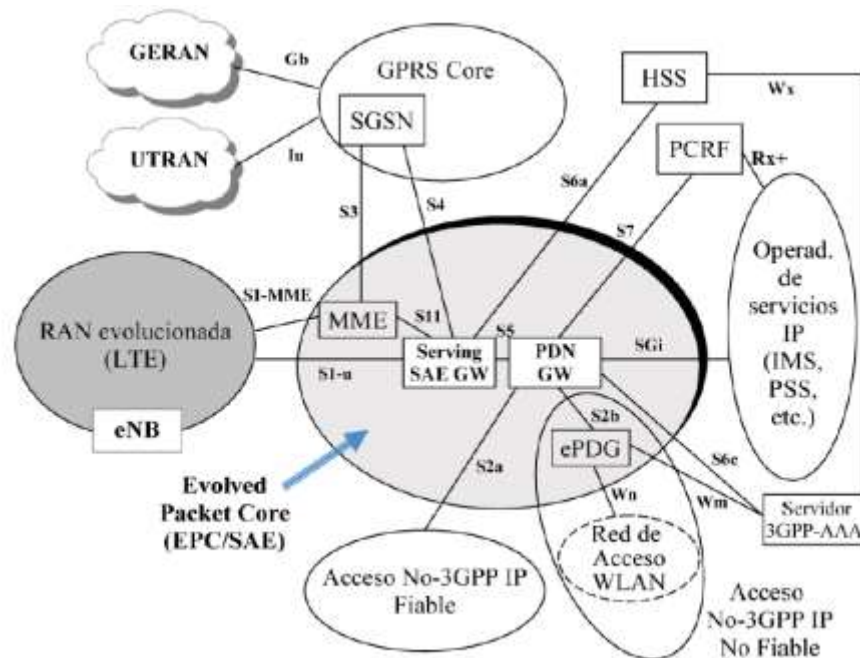


Figura 1-4: Entidades e Interfaces LTE

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.1.2.2 Interfaces

En LTE existe una amplia interconexión entre los diversos elementos de la red con la ayuda de las interfaces, como ejemplo de las interconexiones más importantes se tiene a los eNodeB que se conectan al menos a un MME usando la interfaz lógica S1-MME. El MME se conecta a los HSS mediante de la interfaz S6a para poder obtener la información de suscripción de los usuarios. SGW se conecta con los eNodeB por la interfaz S1-U; PGW se conecta a las redes externas por la interfaz SGi. SGW y PGW para conectarse entre sí usan la interfaz S5 si el usuario no está usando roaming o usan la interfaz S8 si el usuario es visitante y está usando roaming dependiendo del caso. Una de las interfaces más importantes es la S11 usada para la señalización del plano de control en MME y SGW, esta interfaz es usada para establecer la conexión IP de los usuarios a

través de la conexión entre Gateways con los eNodeB, también brinda soporte para movilidad entre los diferentes eNodeB. En la Figura 1-4 se muestra como las interfaces son usadas por los elementos de la red para su interconexión. (Vaca, 2015)

S1-MME

Es la interfaz de referencia para el plano de control que interconecta E-UTRAN y MME.

S1-U

Punto de referencia entre E-UTRAN y SGW.

S2

Conecta el PGW a otras redes IP no-3GPP ya sean fiables y no fiables.

S3

Dispone al usuario y permite el intercambio de información entre redes 3GPP y LTE.

S4

Controla y da soporte a la movilidad entre las redes 3GPP y LTE. Si no hay un direct túnel esta interfaz brinda el tunneling necesario del plano de usuario de la red.

S5

Conecta al SGW y PGW, también proporciona el tunneling para los datos del plano de usuario entre estas entidades; además, se usa para la relocalización de los SGW si existe movilidad de los UE.

S6a

Permite el intercambio de información de los usuarios para su autenticación.

S7

Soporta la transferencia de políticas Calidad de Servicio (QoS) y políticas de cobro desde PCRF hacia PCEF.

S8

Interfaz de referencia inter-PLMN que provee conexión con los planos de control y de usuario entre el SGW en la red visitante o local.

S9

Soporta el envío de las políticas QoS y control de cobro entre el PCRF local y visitante.

S10

Punto de referencia entre los MME.

S11

Interfaz de referencia para la conexión entre MME y SGW.

S12

Punto de referencia entre UTRAN y SGW.

S13

Permite la interconexión entre MME y EIR.

SGi

Interfaz de referencia entre PGW y PDN (Public Data Network).

Rx

Conecta el PCRF a otras redes de operadores de servicios IP. (Vaca, 2015)

En la red LTE las interfaces más usadas son las interfaces S1 que conecta los eNodeB con el Core LTE y la interfaz X2 que conecta los eNodeB entre sí.

1.1.2 Características

Las principales características que presenta LTE son:

- Alta Eficiencia Espectral
 - ♦ OFDMA en Downlink, esta técnica de acceso múltiple es robusta frente a interferencias múltiples y es de alta afinidad a las técnicas avanzadas como la programación del canal en el dominio de la frecuencia y MIMO.
 - ♦ SC-OFDM en Uplink, ofrece PAPR baja y la ortogonalidad del usuario en el dominio de la frecuencia.
 - ♦ MIMO (Multiple Input Multiple Output) da soporte para el uso de varias antenas con canales de transmisión múltiples
- Muy Baja Latencia
 - ♦ Reducción del tiempo de preparación y transferencia

- ◆ Corta latencia Handover (HO) y tiempo de interrupción
- ◆ Reducción de TTI (trama radio)
- ◆ Simplificación de estados RRC (idle, connected)
- Soporte de ancho de banda variable
 - ◆ 1.25, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
- Arquitectura de protocolos simple
 - ◆ Compartición de canales
 - ◆ Solo modo paquetes (PS), con capacidad VoIP
- Arquitectura sencilla
 - ◆ ENodeB como único nodo E-UTRAN
 - ◆ Menor número de interfaces de RAN
 - eNodeB – MME/SAE-Gateway (S1)
 - ENodeB – ENodeB (X2)
- Compatibilidad e interoperabilidad con las versiones 3GPP anteriores. (Huidrobo, 2014)

En la Tabla 1- se muestra un resumen de los principales parámetros de LTE.

Tabla 1-2: Principales Características de LTE

Esquema de Acceso	UL	SC-FDMA
	DL	OFDMA
Ancho de Banda		1.25 – 3 – 5 – 10 – 15 – 20 MHz
TTI Mínimo		1 milisegundos
Espaciamiento entre subportadoras		15 kHz
Longitud de prefijo cíclico	Corto	4,7 microsegundos
	Largo	16,7 microsegundos
Modulación		QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexación espacial		Hasta 8 capas para el UL por UE Hasta 4 capas para el DL por UE Soporte MU-MIMO tanto para UL como DL

Fuente: Huidrobo, 2014.

Las velocidades de transmisión de LTE son diferentes y se basan en las configuraciones de las antenas y modulación usada, en la Tabla 1- se realiza un resumen de las velocidades que puede usar esta tecnología. (Degollado, 2017)

Tabla 1-2: Velocidades LTE

FDD Downlink (64 QAM)			
Configuración Antena	SIMO	MIMO 2X2	MIMO 4X4
Velocidad pico [Mbit/s]	100	172,8	326,4
FDD Uplink (Única Antena)			

Modulación	QPSK	16 QAM	64 QAM
Velocidad pico [Mbit/s]	50	57,6	86,4

Fuente: Huidobro, 2014.

Estas velocidades de transmisión representan la máxima velocidad que el sistema podría soportar, sin embargo, los valores reales se han reducido para adaptarlos a las categorías de User Equipment existentes, que se muestran en la Tabla 3-.

Tabla 3-2: Categorías de User Equipment

Categoría		1	2	3	4	5
Velocidad Pico [Mbit/s]	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capacidad para funcionalidades físicas						
Ancho de Banda RF		20 MHz				
Modulación	DL	QPSK, 16 QAM, 64 QAM				
	UL	QPSK, 16 QAM				QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiple Antena						
Diversidad 2Rx		Requerimientos de rendimiento asumidos				
MIMO 2X2		No soportado	Obligatorio			
MIMO 4X4		No soportado				Obligatorio

Fuente: Huidobro, 2014.

LTE utiliza un conjunto de mecanismos en la capa física para potenciar el rendimiento y disminuir la latencia. Entre los mecanismos están la petición de repetición automática híbrida (HARQ) y la modulación y codificación adaptativa (AMC). (Vaca, 2015)

1.1.2.1 Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)

Es una técnica usada para asegurar que los datos se transmiten de forma segura detectando cuando se producen errores de transmisión y facilitando la retransmisión desde la base (eNodeB). (Degollado, 2017)

1.1.2.2 Adaptive Modulation and Coding (AMC)

Es el mecanismo usado para incrementar el rendimiento de la transmisión de datos de un canal con desvanecimiento. Este mecanismo varía el esquema de modulación y codificación en Downlink sobre las condiciones asignadas de canal de cada usuario. Cuando la calidad del enlace es buena, la red LTE puede utilizar el esquema de modulación de mayor o menor número de bits de codificación. Cuando las condiciones del enlace son deficientes por desvanecimiento o interferencias en el radioenlace el sistema puede utilizar una modulación menor o una codificación más fuerte de canal para mantener unos márgenes de calidad aceptables en el enlace radioeléctrico. (Cubero)

1.1.3 Bandas de Frecuencia

LTE ofrece flexibilidad de frecuencias al momento de elegir la banda de operación ya que puede operar en múltiples bandas de frecuencia incluyendo las de 2G y 3G. El 3GPP ha identificado varios pares de frecuencia del espectro, unas bandas pareadas (para FDD) que se muestran en la Tabla 4- y bandas no pareadas que se muestran en la Tabla 5-. Las bandas de frecuencia FDD se emparejan para permitir una transmisión simultánea en dos frecuencias de Downlink y Uplink, también tiene una separación suficiente para permitir que las señales transmitidas no se afecten entre sí y por lo tanto afecte el comportamiento del receptor. (Degollado, 2017)

Tabla 4-2: Bandas de Frecuencia Pareadas

Índice de la Banda de Operación	Rango de la Banda de Frecuencia Uplink (MHZ)	Rango de la Banda de Frecuencia Downlink (MHZ)	Modo de Duplexación
1	1920 – 1980	2110 – 2170	FDD
2	1850 – 1910	1930 – 1990	FDD
3	1710 – 1785	1805 – 1880	FDD
4	1710 – 1755	2110 – 2155	FDD
5	824 – 849	869 – 894	FDD
6	830 – 840	875 – 885	FDD
7	2500 – 2570	2620 – 2690	FDD
8	880 – 915	925 – 960	FDD
9	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	FDD
10	1710 – 1770	2110 – 2170	FDD
11	1427.9 – 1447.9	1475.9 – 1495.9	FDD
12	699 – 716	729 – 746	FDD
13	777 – 787	746 – 756	FDD
14	788 – 798	758 – 768	FDD
15	Reservada	Reservada	FDD
16	Reservada	Reservada	FDD
17	704 – 716	734 – 746	FDD
18	815 – 830	860 – 875	FDD
19	830 – 845	875 – 890	FDD
20	832 – 862	791 – 821	FDD
21	1447.9 – 1462.9	1495.9 – 1510.9	FDD
22	3410 – 3490	3510 – 3590	FDD
23	2000 – 2020	2180 – 2200	FDD
24	1626.5 – 1660.5	1525 – 1559	FDD
25	1850 – 1915	1930 – 1995	FDD

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

Las bandas de frecuencia de TDD son impares porque Uplink y Downlink comparten la misma frecuencia con multiplexación de tiempo.

Tabla 5-2: Bandas de Frecuencia No Pareadas

Índice de la Banda de Operación	Rango de la Banda de Frecuencia Downlink y Uplink (MHZ)	Modo de Duplexación
33	1900 – 1920	TDD
34	2010 – 2025	TDD
35	1850 – 1910	TDD
36	1930 – 1990	TDD
37	1910 – 1930	TDD
38	2570 – 2620	TDD
39	1880 – 1920	TDD
40	2300 – 2400	TDD
41	2496 – 2690	TDD
42	3400 – 3600	TDD
43	3600 - 3800	TDD

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

1.1.4 Tramas Radio

Resource Block (RB) es la cantidad mínima de recursos que se puede establecer el eNodeB a un User Equipment en Uplink o Downlink. Esta es la unidad más pequeña de datos en la capa física, también se conoce como Physical Resource Block (PRB). Un Resource Block ocupa físicamente 0,5 ms o 1 slot en el dominio del tiempo y 180 kHz en el dominio de la frecuencia.

El número de subportadoras por Resource Block y el número de símbolos por Resource Block varían en función de la longitud del Cyclic Prefix (CP) y del espacio entre subportadoras como se muestra en la Tabla 6-.

Tabla 6-2: Numero de Resource Block

Ancho de Banda del Canal	Numero de Resource Blocks
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

LTE en su estándar se especifica que cuenta con 12 subportadoras consecutivas con un espacio entre ellas de 15 kHz que para mantener la ortogonalidad da una longitud de símbolo de $1/15 \text{ kHz} = 66,7 \mu\text{s}$. Esto permite configuraciones de anchos de banda de transmisión de 6 a 110 Resource Blocks sobre una sola frecuencia portadora. El número total de Resource Blocks en el ancho de banda de transmisión ocupa alrededor del 90% del ancho de banda del canal. En el caso 1,4 kHz el porcentaje cae al 77%, esto ayuda a reducir las emisiones indeseadas fuera de banda como se muestra en la Figura 1-5. (Vaca, 2015)

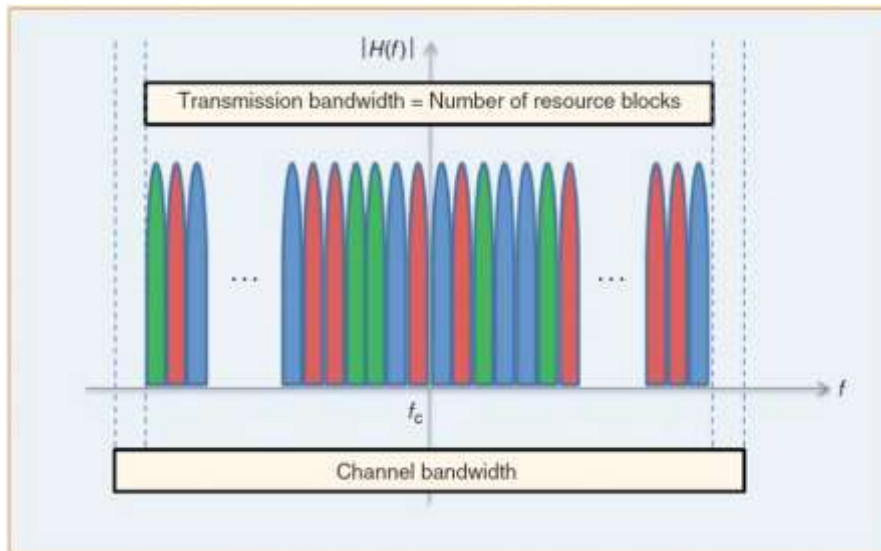


Figura 1-5: Relación entre el ancho de banda del canal y el número de Resource Blocks

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

Las tramas de radio FDD duran 10 ms y están divididas en 20 slots de 0,5 ms tal como se muestra en la Figura 1-6. Donde cada trama de 10 ms esta subdividida en 10 subtramas con una longitud de 1 ms y cada subtrama está compuesta de dos slots de longitud de 0,5 ms cada uno. Finalmente, cada slot consiste en un número de símbolo OFDM. El tamaño máximo de un bloque de datos es de 6,144 bits y se utiliza el algoritmo CRC-24 para la detección de errores. (Huidrobo, 2014)

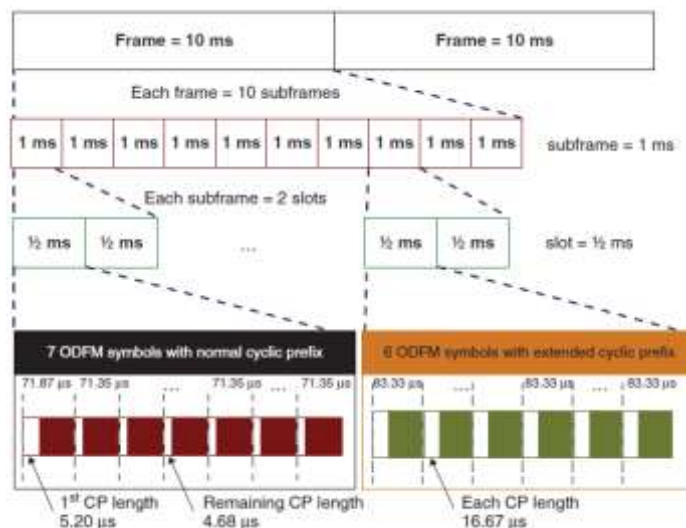


Figura 1-6: Estructura LTE en el dominio del Tiempo

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

Una de las características más atractivas de OFDM es la representación en tiempo – frecuencia de la señal transmitida. Luego de la modulación y codificación, una versión transformada del valor complejo de la señal modulada, Physical Resource Element, es mapeado en un sistema de coordenadas en tiempo – frecuencia, Resource Grid, que tienen al tiempo en el eje X y a la

frecuencia en el eje Y. La coordenada X de un Resource Element indica el símbolo OFDM al que pertenece en tiempo. La coordenada Y significa la subportadora OFDM a la que pertenece en frecuencia. La Figura 1-7 muestra el Resource Grid de LTE en Downlink cuando es usado un Cyclic Prefix normal.

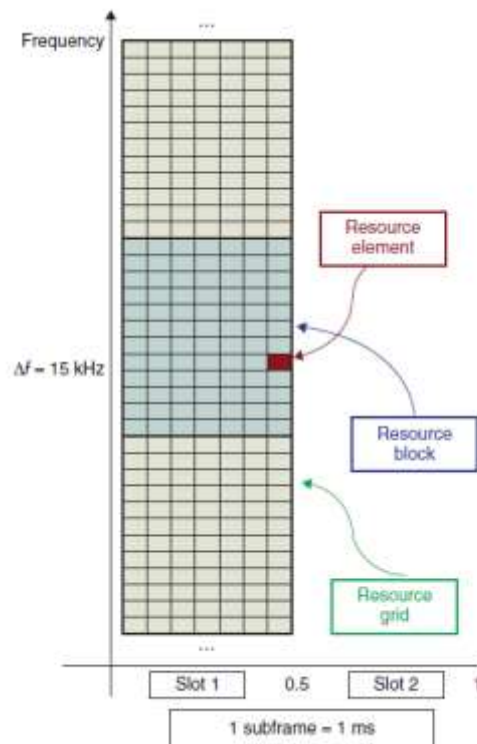


Figura 1-7: Resource Elementes, Block and Grid

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

Un Resource Element se ubica en la unión de un Símbolo OFDM y una subportadora. La separación entre subportadoras es de 15 kHz y en el caso de un Cyclic Prefix normal son 14 símbolos OFDM por subportadora o siete símbolos por slot. Un Resource Block es definido como un grupo de Resource Elements correspondiendo a 12 subportadoras o 180 KHz en el dominio de la frecuencia y un slot de 0.5 ms en el dominio del tiempo. En caso de un Cyclic Prefix normal con 7 símbolos OFDM por slot cada Resource Block consiste en 84 Resource Elements. En caso de un Cyclic Prefix extendido con 6 símbolos OFDM por slot el Resource Block contiene 72 Resource Elements.

La definición de Resource Block se aplica de igual manera en las transmisiones Downlink y Uplink. Existe una diferencia menor entre Downlink y Uplink respecto a la ubicación de la frecuencia central portadora relativa de las subportadoras. En Uplink como se muestra en la Figura 1-8, una subportadora DC no usada es definida en la frecuencia central de una portadora Uplink que esta entre dos subportadoras Uplink. (Zarrinkoub, 2014)

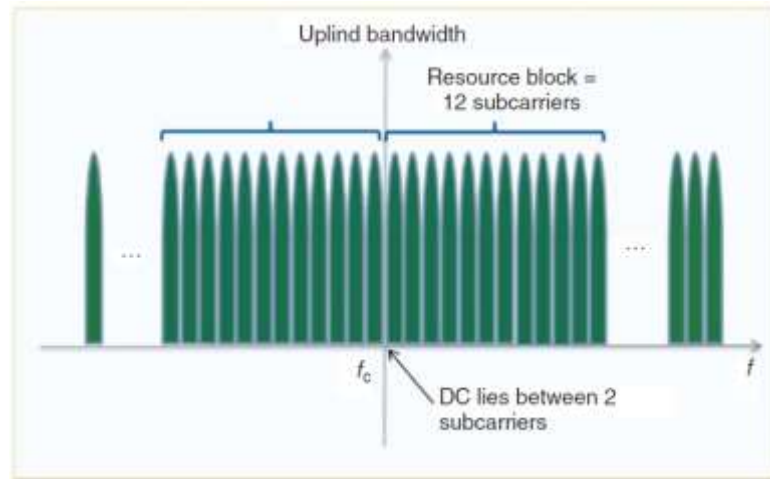


Figura 1-8: Resource Block en Transmisión Uplink

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

En Downlink la subportadora que coincide con la frecuencia central de la portadora se deja sin uso. Como se muestra en la Figura 1-9. La razón por la que la subportadora DC no es usada en la transmisión Downlink es por la posibilidad de una alta interferencia desproporcionada. (Zarrinkoub, 2014)

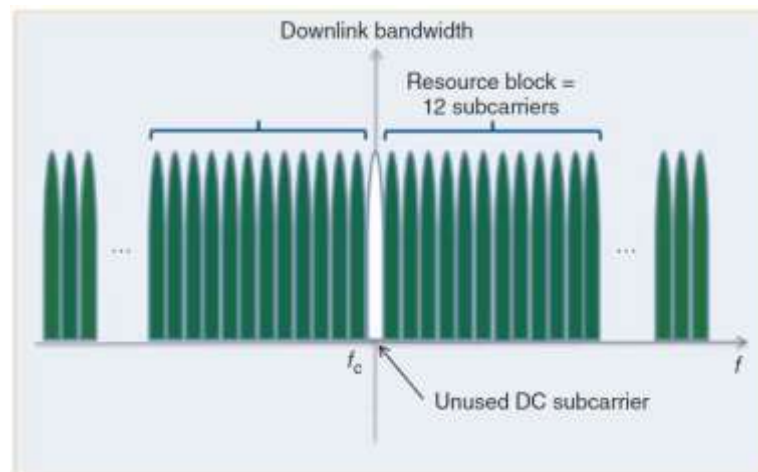


Figura 1-9: Resource Block en Transmisión Downlink

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

1.1.5 Multiplexación

Long Term Evolution se basa en OFDM usando OFDMA para Downlink y SC-FDMA para Uplink, a continuación, se explica estos métodos.

1.1.5.1 OFDMA

Es una variación de la multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM). Esta multiplexación hace uso de un gran número de subportadoras ortogonales muy cercanas entre sí

y que se transmiten en paralelo. Cada subportadora se modula con un esquema de modulación común a una velocidad de símbolo determinada.

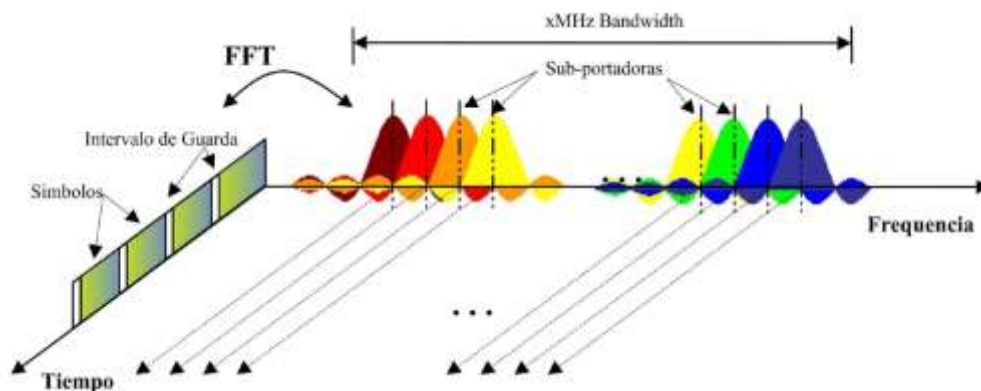


Figura 1-10: Representación OFDM en Tiempo y Frecuencia

Fuente: Huidobro, 2014.

En la Figura 1-10 se muestran las características de una señal OFDM. En el dominio de la frecuencia, las diversas subportadoras están graficadas con diferentes colores donde se puede ver la separación entre las diferentes subportadoras. En el dominio del tiempo se insertan los intervalos de guarda entre cada uno de los símbolos con la finalidad de evitar interferencias entre símbolos en el receptor causado comúnmente por el retraso provocado por el efecto multitrayecto en el radioenlace.

OFDMA establece de forma dinámica entre los usuarios subconjuntos de las subportadoras obteniendo como resultado es un sistema más robusto frente a interferencias, con mayor capacidad, lo que se debe a la eficiencia de trunking de multiplexación de los usuarios y también a la capacidad de organizar a los usuarios para una mayor resistencia al desvanecimiento selectivo en frecuencia. La forma de operación se basa en la separación de una sola señal en subportadoras, lo que significa que se divide una señal extremadamente rápida en varias señales más lentas que optimiza el acceso móvil, y con los nuevos subcanales se pueden transmitir la información sin estar expuestos a las interferencias y al efecto de la distorsión multitrayecto a la que se enfrenta la transmisión de una única portadora. Las subportadoras se reciben en el receptor y se reconstruye en una sola señal para formar una transmisión de alta velocidad.

Se puede diferenciar OFDM con OFDMA porque OFDMA tiene la capacidad para asignar dinámicamente un subconjunto de las subportadoras a los usuarios individuales haciendo de esta una versión multiusuario de OFDM, como se puede ver en la Figura 1-11.

Uno de los parámetros clave que afecte a todos los móviles es el de la duración de las baterías y es necesario asegurar que los móviles utilicen la menor cantidad posible de energía de la batería,

los móviles deben operar de forma eficiente en las etapas de amplificación de potencia teniendo como resultado un efecto adverso por la modulación de radio frecuencia y el formato de la señal. OFDM tiene una relación PAPR alta que es inaceptable para un terminal móvil por lo tanto LTE usa para Uplink un esquema de modulación en formato híbrido que es SC-FDMA. (Vaca, 2015)

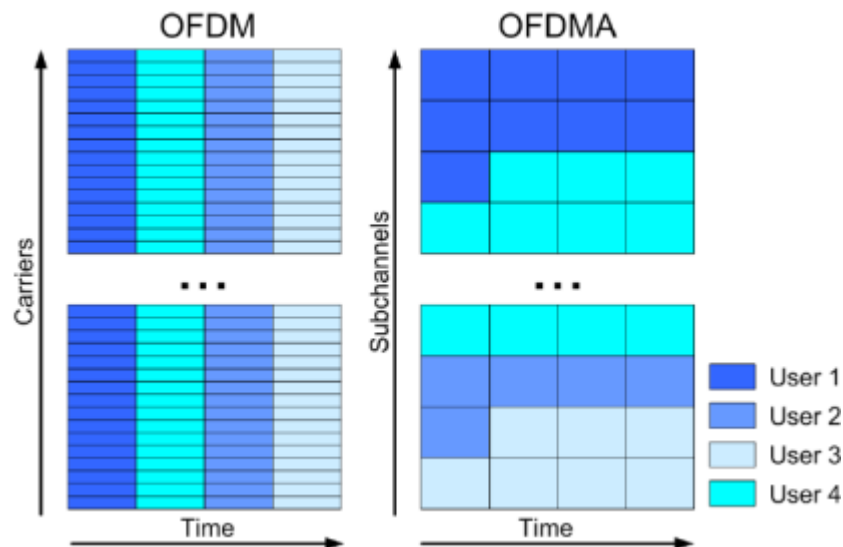


Figura 1-11: Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.5.2 SC-FDMA

Long Term Evolution eligió a SC-FDMA para Uplink ya que combina las técnicas de PARP bajo con la resistencia a interferencias y la atribución de frecuencias flexible de OFDMA. Los símbolos que representan a la información en el dominio del tiempo se transforman al dominio de la frecuencia usando una transformada discreta de Fourier (Discret Fourier Transform DFT), en el dominio de la frecuencia se establece la ubicación deseada en el ancho de banda de canal global antes de ser transformada nuevamente al dominio del tiempo usando una transformada inversa rápida de Fourier (Inverse Fast Fourier Transform IFFT), como último paso, se inserta el Cyclic Prefix. La principal diferencia con OFDMA es que en la modulación OFDMA se transmite los datos de cuatro símbolos QPSK en paralelo cada uno en una subportadora, mientras que en SC-FDMA se transmite los datos de cuatro símbolos QPSK en serie a cuatro veces la tasa de transmisión como se muestra en la Figura 1-12. (Huidobro, 2014)

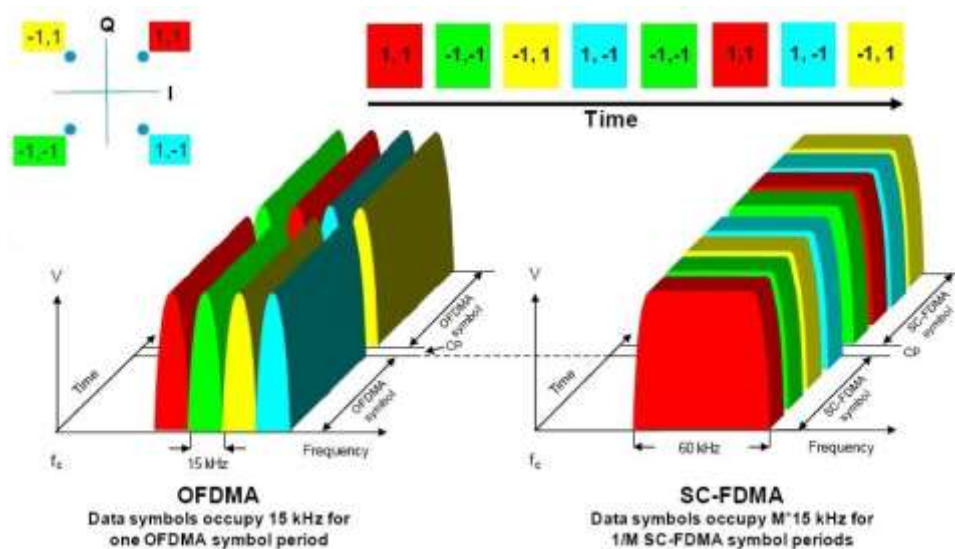


Figura 1-12: Diagrama de Funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.6 Frequency Division Dúplex (FDD) y Time Division Dúplex (TDD)

Para Long Term Evolution se han definido los modos de duplexación FDD y TDD, que brindan la posibilidad del uso de frecuencias pareadas y no pareadas. El modo FDD tiene el beneficio de una mayor eficiencia espectral, TDD brinda una aplicación adicional al poder ser usado como tecnología de transmisión de acceso (backhaul). En la Tabla 7- se resumen algunas diferencias entre FDD y TDD.

Tabla 7-2: Diferencia entre FDD y TDD

Parámetro	FDD	TDD
<i>Espectro</i>	Requiere un espectro pareado con separación de frecuencia suficiente para permitir full dúplex	No requiere espectro pareado. Tx y Rx en la misma banda.
<i>Reciprocidad de canal</i>	Las características del canal son diferentes en ambos sentidos	Es la misma en ambos sentidos, lo que permite Tx y Rx con un único conjunto de parámetros
<i>Asimetría Uplink/Downlink (UL/DL)</i>	La capacidad UL/DL se determina por la asignación de frecuencias que es fija	La relación UL/DL se puede cambiar dinámicamente en función de la demanda
<i>Periodo / Banda de Guarda</i>	Banda de seguridad necesaria para aislar UL y DL. Bandas de guarda grandes no influyen en la capacidad	Banda de guarda necesaria. El periodo de protección limita la capacidad
<i>Transmisión Discontinua</i>	Se requiere transmisión continua	La transmisión discontinua es necesaria para permitir transmisiones en UL y DL, lo que puede degradar el rendimiento.

Fuente: Huidobro, 2014.

FDD y TDD tienen sus propias fortalezas y debilidades. FDD se tiene una adaptación óptima para aplicaciones como llamadas de voz que tienen un tráfico simétrico que en el caso de emplear TDD se desperdicia ancho de banda. TDD es superior en las aplicaciones que tienen el tráfico asimétrico, como la navegación en internet donde es común que la descarga sea mucho mayor a la carga, TDD puede asignar más tiempo para la parte que requiere más ancho de banda. Al usar FDD el ancho de banda no se puede reasignar dinámicamente por lo que el ancho de banda no utilizado se desperdicia. Al momento de la planificación de los eNodeB FDD tiene una ventaja sobre TDD por usar distintas bandas de frecuencia para Uplink y Downlink ya que no se requiere una planificación espacial entre eNodeB, en el caso de TDD se debe tomar en cuenta las consideraciones la selección de frecuencias para evitar que las estaciones base vecinas se interfieran. (Vaca, 2015)

1.1.7 Estados de movilidad y transiciones

El User Equipment puede estar en uno de tres estados que son, detached, active e idle cómo se puede ver en la Figura 1-13.

Detached: es un estado temporal en el que el User Equipment está encendido, pero está en el proceso de búsqueda y registro de la red.

Active: el User Equipment está registrado con la red y tiene una conexión RRC con el eNodeB.

Idle: Es un estado de ahorro de energía donde User Equipment no está transmitiendo ni recibiendo paquetes, los datos del UE no se guarda en el eNodeB y su ubicación es conocida únicamente por el MME, y solo en una Área de Seguimiento (Tracking Area TA) que está formada en varios eNodeB. La MME conoce el Área de Seguimiento en la que el User Equipment se registró por última vez y si es necesario lanza una alerta (paging) para localizarlo dentro de una celda. (Degollado, 2017)

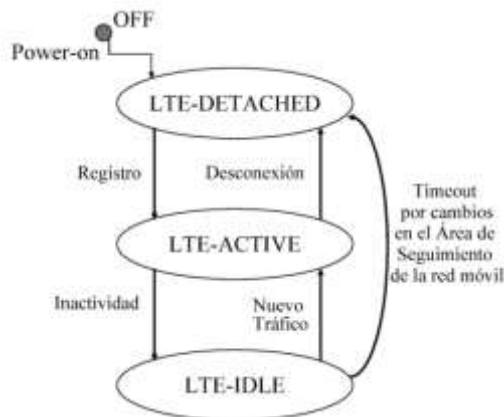


Figura 1-13: Estados LTE

Fuente: Huidobro, 2014.

1.1.8 Canales

La tecnología LTE cuenta con tres categorías de canales en los que se pueden agrupar en canales físicos, de transporte y lógicos siendo así en nivel físico el más bajo siendo el encargado de proporcionar el transporte de los datos del usuario y mensajes de control, los canales de transporte transfieren la información a la subcapa MAC y las capas superiores y los canales lógicos proporcionan servicios para la subcapa MAC dentro de la estructura LTE. (Jiménez, y otros, 2017)

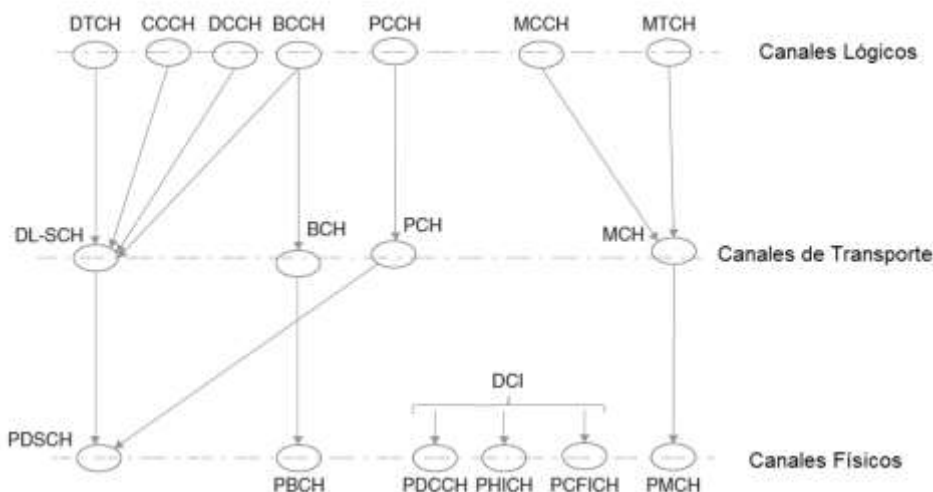


Figura 1-14: Canales Downlink

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

Los canales Downlink y Uplink en los canales físicos y de transporte operan y tienen características diferentes por lo que se puede estudiar de forma individual, en las Figura 1-14 y Figura 1-15 se muestran los canales Downlink y Uplink respectivamente; a continuación, se detalla la función de cada uno de los canales. (Vaca, 2015)

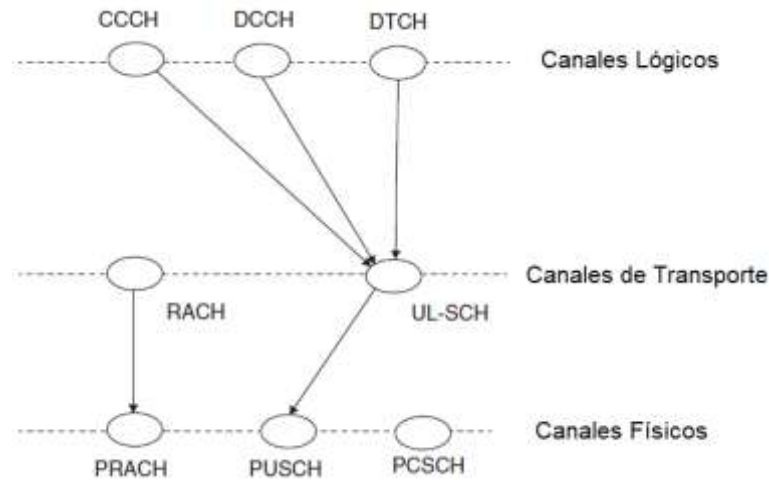


Figura 1-15: Canales Uplink

Fuente: Understanding LTE with MATLAB, 2014.

1.1.8.1 Físicos

Las señales que se generan en la capa 1 del modelo OSI y son usadas para la sincronización del sistema, identificación de celdas y la estimación del radioenlace. Este canal se encarga de llevar los datos de las capas superiores incluyendo los datos de control, configuración y del usuario; los canales físicos varían entre el Uplink y Downlink. En la Tabla 8- y Tabla 9- se realiza una explicación de los distintos canales físicos de Downlink y Uplink.

Tabla 8-2: Canales Físicos Downlink

Canal Físico	Función
PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)	Información de paginación y tráfico unicast de datos de usuarios.
PBCH (Physical Broadcast Channel)	Información del sistema requerida por el terminal para acceder a la red durante la búsqueda de celda
PDCCH (Physical Downlink Control Channel)	Información de control de enlace descendente
PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel)	Indicador HARQ (HI) y ACK / NACK para paquetes del enlace ascendente
PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel)	Información del formato de control que contiene información necesaria para decodificar PDCCH
PMCH (Physical Multicast Channel)	Transmisión multimedia de frecuencia única cuando opera

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Tabla 9-2: Canales Físicos Uplink

Canal Físico	Función
PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)	Tráfico de datos de usuario del enlace ascendente
PRACH (Physical Random Access Channel)	Acceso inicial a la red mediante preámbulos de acceso aleatorio

PUCCH (Physical Uplink Control Channel)	Información de control de enlace ascendente
---	---

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

1.1.8.2 Transporte

Los canales de transporte LTE son diferentes en Uplink y Downlink, ya que cada uno tiene necesidades diferentes y operan de una forma distinta. Estos canales entregan información de transferencia de información a la capa de control de acceso al medio (MAC) y las capas superiores. En la Tabla 10- se detallan los canales de Transporte Downlink y en la Tabla 11- los canales de Transporte Uplink. (Cubero)

Tabla 10-2: Canales de Transporte Downlink

Canal Transporte	Función
DL-SCH (Downlink Shared Channel)	Es el principal para la transferencia de datos en Downlink. Es utilizado por muchos canales lógicos
BCH (Broadcast Channel)	Mapea a los canales de control de difusión.
PCH (Paging Channel)	Para transmitir el PCCH
MCH (Multicast Channel)	Se utiliza para transmitir información MCCH para crear transmisiones de multidifusión

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Tabla 11-2: Canales de Transporte Uplink

Canal Transporte	Función
UL-SCH (Uplink Shared Channel)	Es el principal para la transferencia de datos en Uplink. Es utilizado por muchos canales lógicos
RACH (Random Access Channel)	Se utiliza para los requisitos de acceso aleatorio

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

1.1.8.3 Lógicos

Los canales lógicos se dividen en canales para control y canales para tráfico, cada uno con diferentes funciones que se muestran en la Tabla 11-1 y Tabla 13- respectivamente.

Tabla 11-1: Canales Lógicos de Control

Canal Control	Función
BCCH (Broadcast Control Channel)	Proporciona información del sistema a todos los User Equipment conectados al eNodeB
PCCH (Paging Control Channel)	Se utiliza para enviar información de aviso de búsqueda de una unidad en una red
CCCH (Common Control Channel)	Se emplea para obtener información de acceso aleatorio
MCCH (Multicast Control Channel)	Se utiliza para la información necesaria para la recepción de multicast

DCCH (Dedicated Control Channel)	Se utiliza para llevar información específica del usuario
--	---

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Tabla 13-2: Canales Lógicos de Transporte

Canal Trafico	Función
DTCH (Dedicated Traffic Channel)	Se utiliza para la transmisión de los datos del usuario
MTCH (Multicast Traffic Channel)	Utilizado para transmisión de datos multicast

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

1.1.9 QoS

La calidad de servicio en LTE se basa en EPS Bearer Services que es un servicio de transferencia de paquetes IP que tiene asociados parámetros de calidad de servicio (QoS) y TFT (Traffic Flow Template) o filtro de paquetes que es usado para elegir el flujo de paquetes que debe recibir dicho trato de QoS. La calidad de servicio extremo a extremo se sustenta en la calidad que proporcionan los servicios portadores subyacentes: el servicio portador local, el servicio portador UMTS y el servicio portador extremo.

Cada servicio portador EPS siempre tiene asociados como mínimo dos parámetros: QCI (QoS Class Identifier) y ARP (Allocation and Retention Priority). El parámetro QCI define el comportamiento del plano de usuario del servicio EPS, el parámetro ARP se aplica a la operativa del plano de control. De forma complementaria algunos servicios portadores denominados servicios de tasa garantizada (GBR Bearers) especifican también un parámetro de tasa media garantizada GBR (guaranteed Bit Rate) y otro de tasa máxima permitida MBR (Maximum Bit Rate).

Cada portador de EPS (GBR y no-GBR) está asociado con el siguiente nivel de portador de los parámetros de QoS: QCI y ARP. (Huidrobo, 2014)

1.1.9.1 QCI (QoS Class Identifier)

Es un valor que se utiliza como referencia para acceder en nodos específicos a los parámetros de control de nivel de portador y tratamiento del reenvío de paquetes y que han sido configurados por el operador propietario del nodo de acceso. En Tabla 14- se muestran los valores de QCI definidos en el estándar del 3GPP.

Tabla 14-2: Valores de QCI definidos en el estándar 3GPP

QCI	Tipo de Recurso	Prioridad	Retarde de paquetes [ms]	Tasa de errores de paquetes
1	GBR	2	100	10^{-2}
2		4	150	10^{-3}
3		3	50	10^{-3}
4		5	300	10^{-6}
5	No-GBR	1	100	10^{-3}
6		6	300	10^{-6}
7		7	100	10^{-6}
8		8	300	10^{-3}
9		9	300	10^{-6}

Fuente: Huidobro, 2014.

QCI es un parámetro que representa una definida clase de servicio o comportamiento de la red y su valor no indica de una forma directa ninguna magnitud relacionada con las prestaciones de la red, sino que, simplemente se concibe como un puntero a una determinada clase de servicio. (Vaca, 2015)

GBR (Guaranteed Bit Rate)

Denota la tasa de bits que se pueden esperar sea proporcionada por un portador de GBR.

MBR (Maximum Bit Rate)

Limita la velocidad de bits.

1.1.9.2 ARP (Allocation and Retention Priority)

Contiene información sobre el nivel de prioridad de la capacidad de suscripción preferente y la vulnerabilidad de suscripción preferente. Su principal propósito es determinar la posibilidad de si la petición de una subportadora puede ser aceptada o debe ser rechazada en caso de limitaciones en los recursos. La información del nivel de prioridad de asignación se utiliza para tomar esta decisión y asegurarse de que la solicitud del titular con el nivel de prioridad más alta es la preferida. Además, la ARP se puede utilizar para decidir que portador rechazar en caso de existir limitaciones excepcionales de recursos.

La ARP no está incluida en el perfil EPS QoS enviado al UE y el tratamiento de reenvío de paquetes debe ser determinado únicamente por los otros parámetros QoS del portador EPS: QCI, GBR y el MBR, y por los parámetros Ambr.

Cada Acceso APN (Access Point Node) se asocia con los siguientes parámetros QoS: APN-Ambr y UE-Ambr; Ambr significa Aggregate maximum bir rate. (Cubero)

1.1.9.3 APN-Ambr

Es un parámetro de suscripción almacenado por el APN en el HSS, que limita la velocidad agregada de bits que se puede esperar que se facilite a través de todos los portadores no-GBR y en todas las conexiones PDN del APN. Cada uno de estos portadores no-GBR podría utilizar toda la APN-Ambr. Los portadores GBR están fuera del alcance de la APN-Ambr. El P-GW cumple la APN-Ambr en enlace descendente. La aplicación de la APN-Ambr en el enlace ascendente se hace en la UE y, además, en el P-GW. (Degollado, 2017)

1.1.9.4 UE-Ambr

Se define por cada usuario (UE) y representa la tasa total de bits que quede ser consumida por todos los portadores no-GBR de un UE. Esta limitada por un parámetro de suscripción almacenado en el HSS. El MME fijara la UE-Ambr a la suma de la APN-Ambr de todos los APN activos hasta el valor del capital suscrito UE-Ambr.

1.1.10 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Es clave para alcanzar la eficiencia espectral, es usado para aumentar la cobertura de la señal y la capacidad de la capa física. Aumentar más antenas en un sistema brinda la posibilidad de mejorar en rendimiento por la radiación de la señal emitida por diferentes caminos que llegara con diferentes retardos al receptor. MIMO soporta diferentes configuraciones de antena incluyendo protocolos SU-MIMO (Single User – MIMO) es usado para la transmisión con dos o cuatro antenas en Downlink, también se especifica diversidad de transmisión como se muestra en la Figura 1-16 y MU- MIMO (Multiple Users – MIMO) ofrece ganancias para la celda en su capacidad, pero no aumenta la tasa de usuario que se muestra en la Figura 1-17.

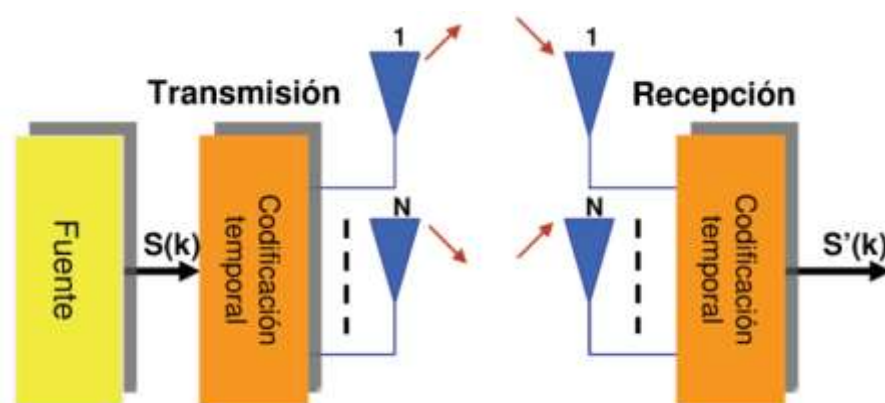


Figura 1-16: SU-MIMO y Diversidad de Transmisión

Fuente: Huidobro, 2014.

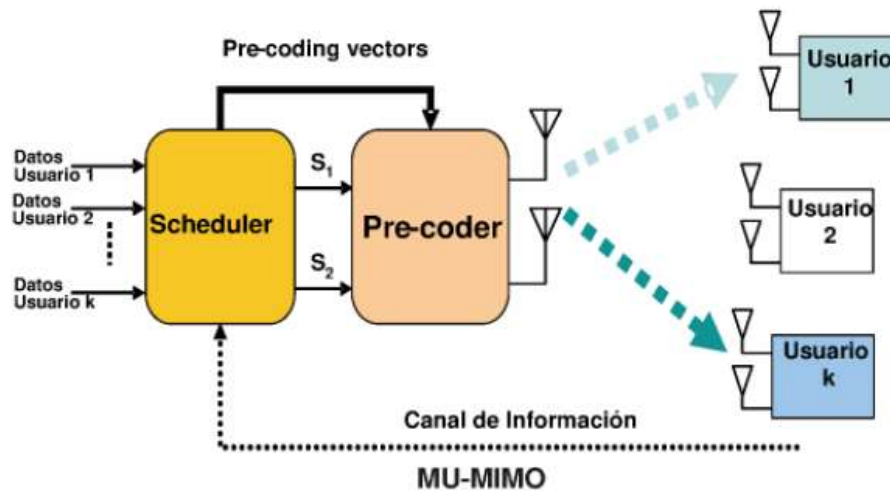


Figura 1-17: MU-MIMO

Fuente: Huidobro, 2014.

1.2 Radio Definida por Software (SDR)

SDR (Software Defined Radio) o radio definido por software es una tecnología dúctil compuesta por una parte hardware (radio frecuencia) y otra parte basada en software (procesado en banda base). El Wireless Innovation Forum en colaboración con el grupo de trabajo P1900.1 del IEEE, han tratado de establecer una definición para el SDR y una visión general de esta tecnología y de sus beneficios y en resumen lo han definido como “Radio en la cual alguna o todas las funciones de la capa física están definidas mediante software”.

Los dispositivos radio tradicionales, basados en hardware estaban limitados en cuanto a lo que funcionalidad respecta ya que solo podían modificarse mediante la intervención física. En cambio, los sistemas SDR son equipos de radiocomunicaciones en los que las propiedades como la modulación, el ancho de banda de la señal, la frecuencia de portadora y la técnica de acceso múltiple son definidos mediante software. Esta variación, permite una mayor flexibilidad, una reducción drástica de costes de producción y mantenimiento, así como una inversión mínima a la hora de añadir nuevas prestaciones a los sistemas.

La tecnología SDR permite el uso de dispositivos inalámbricos multimodo, multibanda y multifuncionales que se pueden mejorar utilizando actualizaciones de software. Por otra parte, los equipos SDR actuales también implementan funciones como la criptografía, codificación FEC y codificación de fuente de la voz, de video o de cualquier tipo de datos de entrada.

Las conocidas radios definidas por software ofrecen diferentes beneficios tanto a los fabricantes de los equipos radios, proveedores de servicio y como no podría ser de otra forma, a los usuarios finales, las principales ventajas son:

- El uso de SDR tiene como objetivo reducir el coste a los usuarios finales y proporcionarles acceso ubicuo a las comunicaciones inalámbricas
- La reutilización del software en diferentes productos de radio lo que reduce drásticamente el coste de desarrollo.
- Añadir nuevas capacidades y características a la infraestructura existente sin requerir grandes inversiones de capital.

En el 2011, el Wireless Innovation Forum encargó a Mobile Experts LLC la realización de un estudio de mercado para evaluar la adopción de las tecnologías SDR en los diferentes sectores. Más del 93% del mercado de infraestructuras para comunicaciones móviles específicamente estaciones base, utiliza tecnología SDR y se espera un crecimiento futuro para soportar una mayor demanda de datos móviles por parte de los usuarios. Prueba de ello, son los mil millones de radios definidas por software que fueron expedidas en 2011 para aplicaciones de terminales móviles. (Rico, y otros, 2019)

1.3 Tarjetas USRP Ettus B210

Las tarjetas USRP agrupan sistemas de comunicación en un solo equipo o hardware con la finalidad de reducir costos y de esta manera su uso sea más accesible para universidades, aficionados y centros de investigación en general. Las USRP son controladas por un computador. Gran parte de software relacionado a las tarjetas USRP son de código abierto permitiendo la accesibilidad al controlador la manipulación de las tarjetas mediante una computadora. Las tarjetas USRP en su mayoría operan en Linux en distribuciones como Ubuntu, pero también pueden operar en Windows (Mendoza, y otros, 2017)

1.3.1 Estructura Física

La Tarjeta USRP B210 está compuesta de varios puertos lógicos de entrada y salida, así como también puertos para entradas adicionales como relojes de precisión, antenas GPS, ranuras de expansión entre otros. También se la puede colocar en un encapsulado plástico con el fin de proteger los componentes electrónicos de la tarjeta. En la Figura 1-18 se muestra la estructura física de la tarjeta.

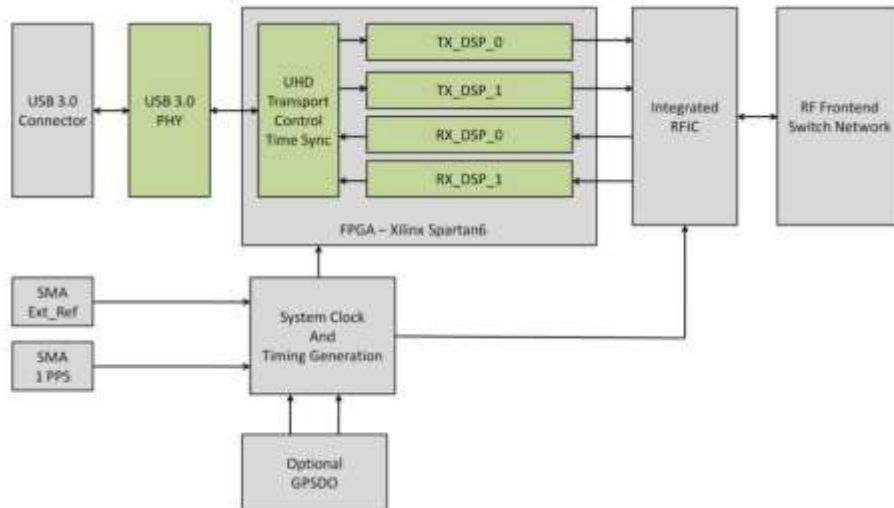


Figura 1-18: Arquitectura Tarjeta USRP Ettus B210

Fuente: National Instruments, 2021

1.3.2 Estructura Funcional

La USRP B210 está compuesta de bloques, componentes y/o dispositivos, que le permiten llevar a cabo la transmisión, recepción y el procesamiento de la señal. El conector USB 3.0 permite la comunicación entre el computador y la USRP, mediante este puerto se puede realizar transferencia de información a alta velocidad.

El bloque USB 3.0 PHY se encarga de convertir la información que intercambian el computador y la USRP a código Python que es el lenguaje que utiliza la tarjeta para ejecutar el procesamiento de la señal. En el bloque FPGA se realiza el control, transporte y sincronización mediante el controlador UHD que es requerido para trabajar con dispositivos USRP. Es una librería escrita en C++ pensada para trabajar en plataformas Linux, Windows y Mac OS. Este controlador es el encargado de proveer control sobre los productos de Ettus Research. Además, dentro del bloque FPGA se identifica el puerto configurado es decir si se realizara una transmisión o una recepción. (Mendoza, y otros, 2017)

1.4 srsRAN

srsRAN es una suite de radio de software 4G y 5G gratuita y de código abierto, Con aplicaciones de UE, eNodeB y EPC, srsRAN se puede utilizar con soluciones de red central de terceros para construir redes inalámbricas móviles completas de extremo a extremo. (Software Radio Systems, 2022)

1.4.1 User Equipement (UE)

SrsUE es un módem 4G LTE UE implementado completamente en software. Al ejecutarse como una aplicación en un sistema operativo estándar basado en Linux, srsUE se conecta a cualquier

red LTE y proporciona una interfaz de red estándar con conectividad móvil de alta velocidad. Para transmitir y recibir señales de radio por aire, srsUE requiere hardware SDR como Ettus Research USRP.

1.4.1.1 Características

- Configuraciones TDD y FDD
- Anchos de banda probados: 1,4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
- Modos de transmisión 1 (antena única), 2 (diversidad de transmisión), 3 (CCD) y 4 (multiplexación espacial de bucle cerrado)
- Frecuencias portadoras DL / UL configurables manualmente
- Capturas de paquetes Wireshark de capa MAC y NAS
- Métricas de seguimiento de la línea de comandos
- Simulador de canales para canales EPA, EVA y ETU 3GPP
- Soporte de QoS (Software Radio Systems, 2022)

1.4.2 Estación Base (eNodeB)

SrsENB es una estación base LTE eNodeB implementada completamente en software. Al ejecutarse como una aplicación en un sistema operativo estándar basado en Linux, srsENB se conecta a cualquier red central LTE (EPC) y crea una celda LTE local.

1.4.2.1 Características

- Configuraciones FDD
- Anchos de banda probados: 1,4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
- Modos de transmisión 1 (antena única), 2 (diversidad de transmisión), 3 (CCD) y 4 (multiplexación espacial de bucle cerrado)
- Servicio de difusión y multidifusión multimedia evolucionado (eMBMS)
- Captura de paquetes de capa MAC Wireshark
- Métricas de seguimiento de la línea de comandos
- Archivos de configuración detallados (Software Radio Systems, 2022)

1.4.3 Red Central (EPC)

srsEPC es una implementación ligera de una red central LTE completa (EPC). La aplicación srsEPC se ejecuta como un único binario, pero proporciona los componentes clave de EPC del Servicio de abonado doméstico (HSS), la Entidad de gestión de movilidad (MME), la Pasarela de servicio (S-GW) y la Pasarela de red de paquetes de datos (P-GW).

1.4.3.1 Características

La red central srsEPC LTE incluye la implementación de las entidades MME, HSS y SPGW. Las características de cada una de estas entidades se describen con más detalle a continuación.

- MME: La entidad srsEPC MME proporciona soporte para protocolos NAS y SIAP que cumplen con los estándares para proporcionar comunicación de plano de control entre el EPC y los UE y eNB.
- HSS: La entidad srsEPC HSS proporciona soporte para configurar los parámetros de autenticación de UE y otros parámetros que se pueden configurar por UE.
- SPGW: La entidad srsEPC SPGW proporciona soporte para la comunicación en el plano de usuario entre el EPC y los eNodeB, utilizando interfaces S1-U y SGI. (Software Radio Systems, 2022)

1.4.3.2 HSS

Dentro del software esta entidad está basada en una base de datos en formato CSV que se muestra en la Figura 1-19. En la cual se almacena la información de los User Equipements que en la sección Configuración Tarjetas SIM se detallan los valores a usar.

```
# .csv to store UE's information in HSS
"# Kept in the following format: ""Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP/OPc,AMF,SQN,QCI,IP_alloc""
#
# Name:      Human readable name to help distinguish UE's. Ignored by the HSS
# Auth:      Authentication algorithm used by the UE. Valid algorithms are XOR
#            (xor) and MILENAGE (mil)
# IMSI:      UE's IMSI value
# 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
# SQN:       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
ue2,mil,001010123456780,00112233445566778899aabbccddeeff,opc,63bfa50ee6523365ff14c1f45f88737d,8000,000000001234,7,dynamic
ue1,xor,001010123456789,00112233445566778899aabbccddeeff,opc,63bfa50ee6523365ff14c1f45f88737d,9001,000000001425,7,dynamic
sim1,mil,001010000000001,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,000000001635,7,dynamic
sim2,mil,001010000000002,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,000000001755,7,dynamic
sim3,mil,001010000000003,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,opc,000102030405060708090a0b0c0d0e0f,9001,000000001324,7,dynamic
```

Figura 1-19: HSS srsRAN

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica la metodología aplicada en el proyecto de investigación

2.1 Metodología de la investigación

2.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación seleccionado es la investigación tecnológica que tiene como objetivo la búsqueda de soluciones a problemas del ámbito tecnológico que den respuesta a un problema concreto. La innovación puede darse introduciendo elementos novedosos en la solución o bien, reorganizando de otra forma elementos ya existentes. Se dice pues que no siempre se da en la investigación porque la búsqueda de conocimiento útil también se puede dar reutilizando elementos en el mismo orden para otros problemas.

2.1.2 Métodos de investigación

Este proyecto se basa en dos métodos: investigativo y aplicativo.

Método Investigativo

Usado para recopilar información y documentación necesaria para el desarrollo de la red LTE, además del uso de los equipos y funcionamiento de software.

Método Aplicativo

Se usa este método al aplicar los conocimientos adquiridos y los conocimientos que se generaran durante el desarrollo del proyecto al momento de realizar la implementación de la red 4G LTE.

2.1.3 Técnicas de investigación

Para el proyecto se aplicó la técnica de Fichaje.

Fichaje

Esta es una técnica auxiliar empleada en la investigación científica, consiste en registrar datos que se van obteniendo en las diferentes pruebas.

2.2 Equipos y Materiales

En la implementación del transmisor y receptor de LTE se usaron dos computadores que cumplen la función de transmisor y receptor además de las tarjetas que brindaron la comunicación inalámbrica y transmisión de la señal LTE, además de las antenas, cables, tarjetas SIM y teléfono

celular para conectarse a la red. En esta sección se realiza una explicación de las características de los equipos y materiales.

2.2.1 Computador 1 (Transmisor)

Para el transmisor se eligió un computador con mayor capacidad de procesamiento que el receptor, ya que en este computador se realizó la implementación de la Estación Central (EPC) y el eNodeB y las características de este computador se muestran en la Tabla 1- y se observa en la Figura 2-1.

Tabla 1-3: Características Computador 1 (Transmisor)

<i>Marca</i>	ACER
<i>Procesador</i>	Inter Core i5-7200U
<i>Velocidad del Procesador</i>	2.5 GHz
<i>Memoria RAM</i>	8 GB DDR4
<i>Disco</i>	1 TB HDD
<i>Puertos USB 3.0</i>	2
<i>Software</i>	Ubuntu 20.04

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.



Figura 2-1: Acer Aspire E 15

Fuente: Amazon, 2021

2.2.2 Computador 2 (Receptor)

Para el receptor se usó un equipo con menor capacidad del computador 1 ya que en el receptor no es necesaria una gran capacidad de procesamiento al simular el User Equipment y el computador seleccionado cumple de con los requerimientos. En la Tabla 2- se detallan las características y se lo puede ver en la Figura 2-2.

Tabla 2-3: Características Computador 2 (Receptor)

<i>Marca</i>	Toshiba
<i>Procesador</i>	Inter Core i5-5200U
<i>Velocidad del Procesador</i>	2.5 GHz
<i>Memoria RAM</i>	6 GB DDR3
<i>Disco</i>	1 TB HDD
<i>Puertos USB 3.0</i>	2
<i>Software</i>	Ubuntu 20.04

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.



Figura 2-2: Toshiba Satellite L 45

Fuente: SoloTodo, 2021

2.2.3 Teléfono celular

Como una opción al receptor implementado en un computador se usó un teléfono celular teniendo así una implementación real de un User Equipment, este es un equipo de usuario común en las redes LTE, para que el teléfono pueda conectarse a la red LTE es necesario que tenga una tarjeta SIM con los datos registrados en la base de usuarios (HSS) en la Estación Central (EPC). Las características del teléfono celular se presentan en la Tabla 2-1 y se observa en la Figura 2-3.

Tabla 2-1: Características Teléfono celular

<i>Marca</i>	Redmi
<i>Procesador</i>	Snapdragon 720g
<i>Velocidad del Procesador</i>	2.3 GHz
<i>Memoria RAM</i>	6 GB
<i>Almacenamiento</i>	128 GB
<i>Software</i>	Android 10

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.



Figura 2-3: Redmi Note 9 Pro

Fuente: Xataka, 2021

2.2.4 Tarjeta USRP Ettus B210

La tarjeta se puede ver en Figura 2-4, puede operar en frecuencias de 70 MHz a 6 GHz con un ancho de banda desde los 200 kHz hasta los 56 MHz dependiendo del modo de transmisión ya que cuenta con la opción de MIMO 2x2 en este modo se puede usar un ancho de banda instantáneo de 30.72 MHz y en un modo 1x1 puede llegar al ancho de banda máximo de operación. (National Instruments, 2019)



Figura 2-4: USRP Ettus B210

Fuente: National Instruments, 2021

2.2.5 Antena VERT2450

Es una antena vertical que opera en las bandas de 2.4 – 2.5 GHz y en la banda de 4.9 – 5.9 GHz, es omnidireccional y tiene una ganancia de 3 dBi, puede ser conectada directamente a la tarjeta USRP. Esta se muestra en la Figura 2-5. (National Instrument, 2022)



Figura 2-5: Antena VERT2450

Fuente: National Instruments, 2021

2.2.6 Antena LP0965

Es una antena logarítmica periódica Microstrip que trabaja en la banda de 850 MHz hasta 6.5 GHz, directiva con una ganancia de 5 – 6 dBi. Esta antena necesita un cable SMA para poder conectarse a la tarjeta USRP como se puede ver en la Figura 2-6. (National Instrument, 2022)



Figura 2-6: Antena LP0965

Fuente: National Instruments, 2021

2.2.7 Antena HyperLOG 30180

Es una antena logarítmica periódica que tiene un rango de frecuencias de 380 MHz hasta los 18 GHz con una ganancia de 5 dBi en las frecuencias de operación de transmisor LTE cuenta con un conector SMA hembra. Se muestra en la Figura 2-7. (Aaronia AG, 2022)



Figura 2-7: Antena HyperLOG 30180

Fuente: AARONIA, 2021

2.2.8 Antena HyperLOG 7060

Es una antena logarítmica periódica que tiene un rango de frecuencias de 700 MHz hasta los 6 GHz con una ganancia de 5 dBi, cuenta con un conector SMA hembra. Se la observa en la Figura 2-8. (Aaronia AG, 2022)



Figura 2-8: Antena HyperLOG 7060

Fuente: AARONIA, 2021

2.2.9 Cable SMA – SMA

Es un cable coaxial de 50 Ohm de 1 metro de longitud con conectores SMA macho en cada extremo como se puede ver en la Figura 2-9; cuenta con bajas pérdidas hasta los 6 GHz. (National Instrument, 2022)



Figura 2-9: Cable SMA – SMA

Fuente: National Instruments, 2021

2.2.10 Tarjetas SIM

Para poder conectar el teléfono celular a la red este debe contar con una tarjeta SIM programada con los parámetros de la red almacenados en la base de datos de usuarios (HSS). Para el proyecto se usaron tarjetas SIM en blanco reprogramables en las cuales se grabaron los datos de suscriptor detallados en la sección Configuración Tarjetas SIM. Las tarjetas SIM se pueden ver en la Figura 2-10.



Figura 2-10: Tarjeta SIM

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.2.11 Lector de Tarjetas Inteligente

Para programar las tarjetas SIM es necesario un lector de tarjetas, para esto se usó un lector de tarjetas inteligente que se muestra en la Figura 2-11. Este lector se conecta mediante USB 2.0, soporta el protocolo CCID que le permite conectar una tarjeta inteligente a un computador con una velocidad de comunicación de 200 bps.



Figura 2-11: Lector de Tarjetas Inteligente

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Para que el lector pueda conectar las tarjetas SIM al computador este necesita una tarjeta que sirve como adaptador de tarjetas SIM, esta tarjeta se muestra en la Figura 2-12. Este adaptador permite conectar cualquier tamaño de tarjeta SIM lo que lo hace ideal para las tarjetas SIM usadas en este proyecto de investigación.



Figura 2-12: Adaptador Tarjetas SIM

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.2.12 Analizador de Espectro

Para realizar un análisis de la señal se optó por un analizador de espectro que permite realizar pruebas con la señal LTE que se transmite, este es un equipo de la marca DEVISER específicamente el modelo Spectrum Profiler E8600B que se puede ver en la Figura 2-13, trabaja en el rango de frecuencia de 9 kHz a 6 GHz y permite realizar un análisis de la señal para obtener un perfil completo de la misma. Permite realizar un análisis de LTE en modos FDD y TDD además de que se puede extraer la información por USB, LAN y más. (Deviser, 2020)



Figura 2-13. DEVISER Spectrum PROFILER E8600B

Fuente: Deviser Instruments Incorporated, 2020.

Las opciones de análisis de la señal LTE que brinda el analizador de espectro son:

- Power vs RB: Muestra la potencia de los Resource Blocks dentro del Resource Grid.
- Constell: Muestra el diagrama de constelación de las señales de sincronización y las modulaciones.
- Channel power: Muestra la potencia recibida en el ancho de banda de transmisión.
- Occupied BW: Muestra el ancho de banda y el porcentaje de utilización de este.
- ACLR: Adjacent Channel Leakage Ratio, muestra cuanto afecta la transmisión a canales vecinos.
- Control CH Power: Muestra la potencia de canales de sincronización y control de la señal.
- Summary: Muestra un resumen de la señal y la potencia de los canales de control.
- Scanner: Indica los parámetros radioeléctricos de la señal.
- SEM: Spectrum Emission Mask, muestra las emisiones fuera de banda.
- Co-Ch-Interference: Muestra la interferencia co-canal.
- MIMO: Muestra la potencia de los canales además del time align y la diferencia de potencia.
- Carr Agg: Muestra las portadoras y un detalle de estas.

2.3 Desarrollo

Para el desarrollo del proyecto de investigación se realizó un reconocimiento de los equipos y materiales usados y se dividió en tres fases las cuales fueron: configuración de equipos e instalación de software como primera fase, la explicación de escenarios como segunda fase y como fase final la ejecución de pruebas.

2.3.1 Fase 1: Configuración e Instalación

En esta fase se realizó la instalación de los complementos necesarios para que el sistema operativo pueda recibir la información obtenida por las tarjetas USRP, además, se realizó la instalación de los softwares necesarios para el desarrollo del proyecto.

2.3.1.1 Configuración de las tarjetas USRP Ettus B210

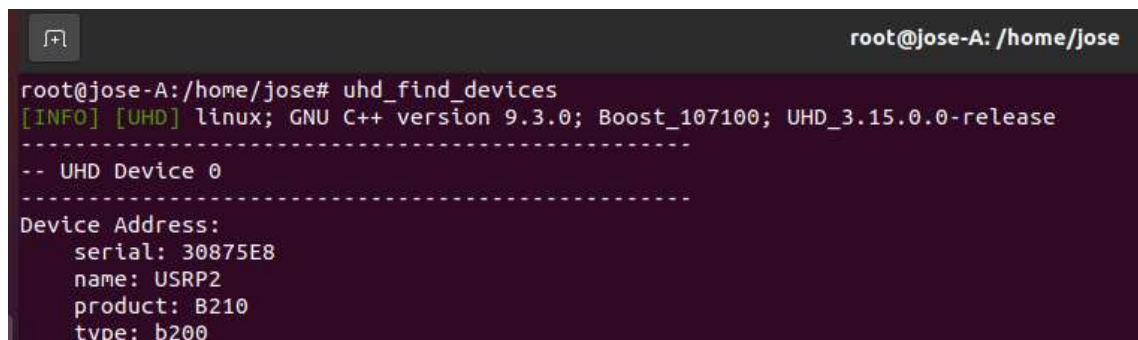
Como requisito previo para el proyecto se debe usar el sistema operativo Ubuntu 20.04 que tiene que ser instalado de forma nativa en los computadores a los cuales se conectan con un cable USB tipo B a la tarjeta USRP Ettus B210 a la cual se conecta una antena con el cable de 50 ohmios en el puerto TX/RX 1. Luego se ejecutan los comandos mostrados en la Figura 2-14.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install libuhd-dev libuhd3.15.0 uhd-host
sudo su
uhd_images_downloader
uhd_find_devices
uhd_usrp_probe
```

Figura 2-14: Comandos de Instalación Tarjetas USRP

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Con los comandos se actualiza la lista de paquetes disponibles con sus versiones actuales y se instalan las dependencias para las tarjetas USRP. Se inicia el modo de super usuario, se descargan las imágenes UHD (USRP Hardware Driver) y se buscan las tarjetas conectadas al equipo. Finalmente se realiza una prueba del funcionamiento de la tarjeta USRP conectada teniendo como resultados lo que se muestra en la Figura 2-15 y la Figura 2-16. Con esto se puede comprobar que la computadora reconoce a la tarjeta USRP y puede ser usada.



```
root@jose-A: /home/jose# uhd_find_devices
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 9.3.0; Boost_107100; UHD_3.15.0.0-release
-----
-- UHD Device 0
-----
Device Address:
  serial: 30875E8
  name: USRP2
  product: B210
  type: b200
```

Figura 2-15: uhd_find_devices

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

```

root@jose-A: /home/jose# uhd_usrp_probe
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 9.3.0; Boost_107100; UHD_3.15.0.0-release
[INFO] [B210] Detected Device: B210
[INFO] [B210] Operating over USB 3.
[INFO] [B210] Initialize CODEC control...
[INFO] [B210] Initialize Radio control...
[INFO] [B210] Performing register loopback test...
[INFO] [B210] Register loopback test passed
[INFO] [B210] Performing register loopback test...
[INFO] [B210] Register loopback test passed
[INFO] [B210] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B210] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B210] Actually got clock rate 16.000000 MHz.

Device: B-Series Device

Mboard: B210
serial: 30B75EB
name: USRP2
product: 2
revision: 4
FW Version: 8.0
FPGA Version: 16.0

Time sources: none, internal, external, gpsdo
Clock sources: internal, external, gpsdo
Sensors: ref_locked

RX DSP: 0
Freq range: -8.000 to 8.000 MHz

RX DSP: 1
Freq range: -8.000 to 8.000 MHz

RX Dboard: A

RX Frontend: A
Name: FE-RX2
Antennas: TX/RX, RX2
Sensors: temp, rsst, lo_locked
Freq range: 50.000 to 6000.000 MHz
Gain range PGA: 0.0 to 76.0 step 1.0 dB
Bandwidth range: 200000.0 to 56000000.0 step 0.0 Hz
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

RX Frontend: B
Name: FE-RX1
Antennas: TX/RX, RX2
Sensors: temp, rsst, lo_locked
Freq range: 50.000 to 6000.000 MHz
Gain range PGA: 0.0 to 76.0 step 1.0 dB
Bandwidth range: 200000.0 to 56000000.0 step 0.0 Hz
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

RX Codec: A
Name: B210 RX dual ADC
Gain Elements: None

TX DSP: 0
Freq range: -8.000 to 8.000 MHz

TX DSP: 1
Freq range: -8.000 to 8.000 MHz

TX Dboard: A

TX Frontend: A
Name: FE-TX2
Antennas: TX/RX
Sensors: temp, lo_locked
Freq range: 50.000 to 6000.000 MHz
Gain range PGA: 0.0 to 89.8 step 0.2 dB
Bandwidth range: 200000.0 to 56000000.0 step 0.0 Hz
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

TX Frontend: B
Name: FE-TX1
Antennas: TX/RX
Sensors: temp, lo_locked
Freq range: 50.000 to 6000.000 MHz
Gain range PGA: 0.0 to 89.8 step 0.2 dB
Bandwidth range: 200000.0 to 56000000.0 step 0.0 Hz
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

TX Codec: A
Name: B210 TX dual DAC
Gain Elements: None

```

Figura 2-16: uhd_usrp_probe

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021

2.3.1.2 Instalación de srsRAN

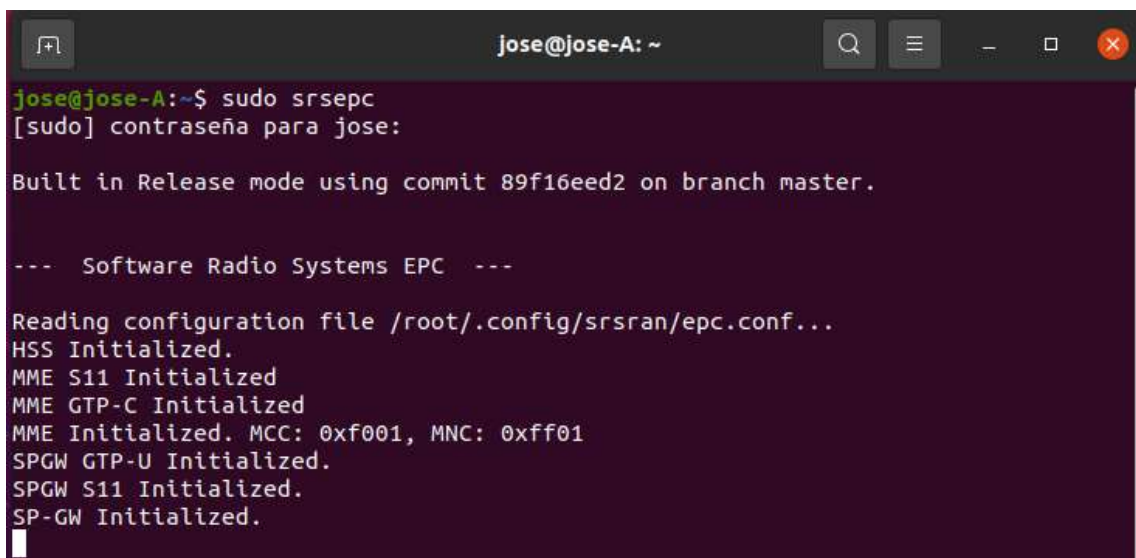
Para la instalación de software srsRAN se deben ejecutar los comandos mostrados en la Figura 2-17.

```
sudo add-apt-repository ppa:softwareradiosystems/srsran
sudo apt-get update
sudo apt-get install srsran -y
sudo srsepc
```

Figura 2-17: Comandos Instalacion srsRAN

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Al ejecutar los comandos se agrega el repositorio en el que se encuentra almacenado el software srsRAN y sus complementos, con esto se realiza una instalación con un solo comando sin necesidad de descargar cada uno de los complementos necesarios ya que estos se instalan de forma automática. Al finalizar la instalación es recomendable comprobar el correcto funcionamiento del software y para esto se inicia el EPC y se verifica que inicie sin ningún error. En la Figura 2-18 se muestra el resultado de iniciar el EPC.



```
jose@jose-A: ~
jose@jose-A:~$ sudo srsepc
[sudo] contraseña para jose:

Built in Release mode using commit 89f16eed2 on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

Reading configuration file /root/.config/srsran/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 2-18: srsepc

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.3.1.3 Configuración Tarjetas SIM

Para la configuración de las tarjetas SIM es necesario usar el software GRSIMWrite que puede ser descargado de internet, también es necesario un lector de tarjetas inteligentes con una tarjeta con puertos para tarjetas SIM, Micro SIM y Nano SIM que se muestra en la sección de Equipos y Materiales. Para la programación de los SIM se debe colocar un SIM en el adaptador y este insertarlo en el lector de tarjetas inteligentes el que debe conectarse al computador como se puede ver en la Figura 2-19.



Figura 2-19: Tarjeta SIM conectada al computador

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Una vez que la tarjeta SIM fue leída por el computador se inicia el software GRSIMWrite que permite leer y grabar información en la tarjeta SIM a través de una interfaz gráfica como se muestra en la Figura 2-20. Este software permitió programar la tarjeta SIM con los datos de usuario.

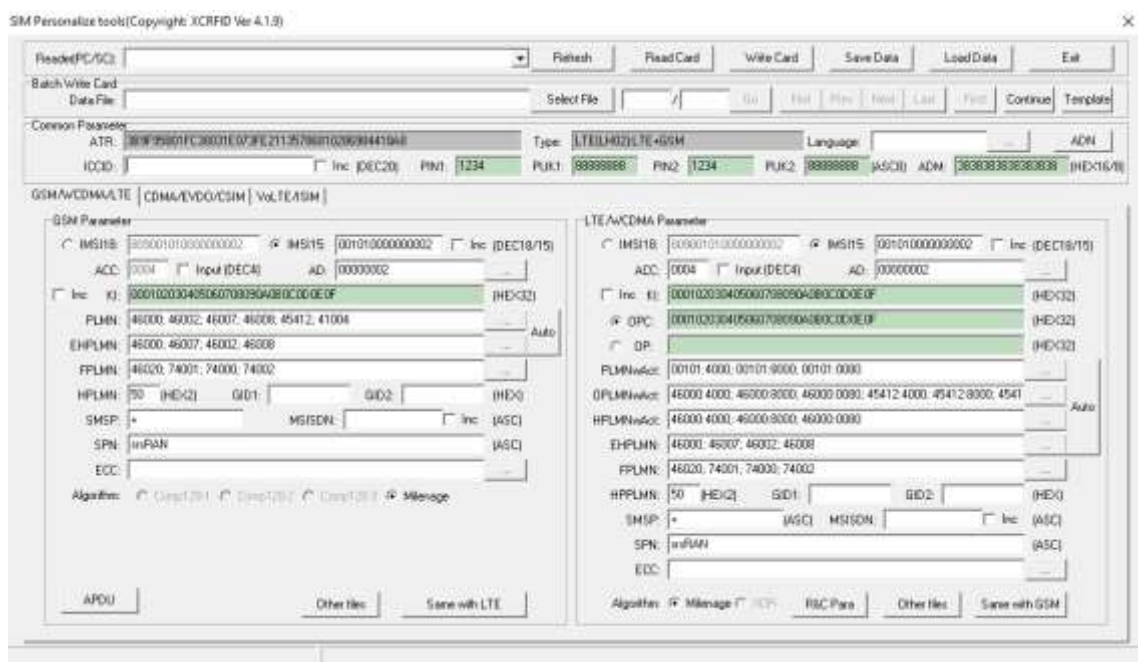


Figura 2-20: GRSIMWrite

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

La información que se inserta en la tarjeta SIM es la que se detalla en la Sección 1.4.3.2, estos datos se deben grabar en la base de datos de usuarios del software srsRAN y también se deben modificar los valores que se detallan a continuación:

- ICCID: Integrated circuit card identifier, usado para identificar a la tarjeta SIM.
- IMSI 15: International mobile subscriber identity, identificador de la línea o número.
- KI: Clave de autenticación.
- OPC: Clave generada con el Operator Code.
- Algoritmo: Algoritmo de encriptación usado.
- SPN; Nombre de la Red.

La información que se grabó en cada una de las tarjetas SIM se detalla en la Tabla 4-.

Tabla 4-3: Datos Tarjetas SIM

	SIM 1	SIM 2	SIM 3
ICCID	89010010100000000017	89010010100000000018	89010010100000000019
IMSI 15	0010100000000001	0010100000000002	0010100000000003
KI	000102030405060708090A0B0C0D0E0F	000102030405060708090A0B0C0D0E0F	000102030405060708090A0B0C0D0E0F
OPC	000102030405060708090A0B0C0D0E0F	000102030405060708090A0B0C0D0E0F	000102030405060708090A0B0C0D0E0F
ALG	Milenage	Milenage	Milenage
SPN	srsRAN	srsRAN	srsRAN

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.3.2 Fase 2: Escenarios

En este proyecto se usaron dos escenarios en los cuales se desarrollaron las distintas pruebas, estos escenarios se dividen por los equipos que son usados como User Equipment en los que se tiene a una computadora y teléfonos móviles. A continuación, se detallan los escenarios.

2.3.2.1 Escenario 1: Computador

Este escenario sirvió para las primeras pruebas en las que se realizó la configuración, conexión entre equipos y transmisión de video. La Figura 2-21 muestra la composición del escenario, donde en un equipo se debe iniciar la estación central (EPC) y la estación base (eNodeB), en el segundo computador se inicia el User Equipment (UE). Para lograr la conexión entre estos dos equipos se necesitan de dos tarjetas USRP Ettus B210 cada una conectada a un computador, y a estas tarjetas se debe conectar una antena para la transmisión y recepción de los datos entre computadores.

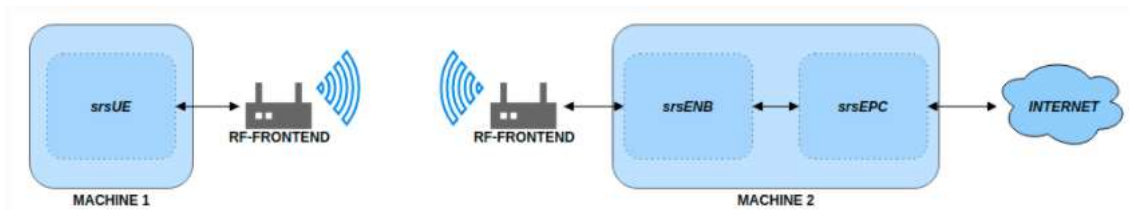


Figura 2-21: Escenario 1

Fuente: Software Radio Systems, 2021.

En la práctica el escenario estuvo conformado por el Computador 1 (Transmisor) en el lado derecho y el Computador 2 (Receptor) en el lado izquierdo, ambos conectados a una Tarjeta USRP Ettus B210 a la cual se conecta la Antena LP0965 para así tener implementado el escenario propuesto como se puede ver en la Figura 2-22.



Figura 2-22: Escenario 1 Implementado

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.3.2.2 Escenario 2: Teléfono Móvil

En este escenario se reemplazó el computador por un teléfono móvil el cual se conectó a la red generada por la primera computadora donde se inició la estación base (eNodeB) y la estación central (EPC). Para lograr la conexión entre el teléfono móvil y la computadora se debe usar una tarjeta SIM que anteriormente debe ser configurada y grabada con la información registrada en el software srsRAN. La computadora también provee una salida a internet al teléfono móvil como se puede ver en la Figura 2-23.

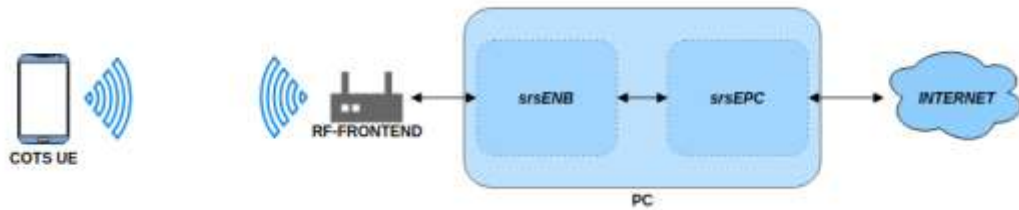


Figura 2-23: Escenario 2

Fuente: Software Radio Systems, 2021.

Para el segundo escenario se mantuvo al Computador 1 (Transmisor) conectado a una Tarjeta USRP Ettus B210 pero cambiando la antena y usando la Antena VERT2450 para que el Teléfono celular pueda conectarse a la red LTE. El escenario 2 implementado se muestra en la Figura 2-24.

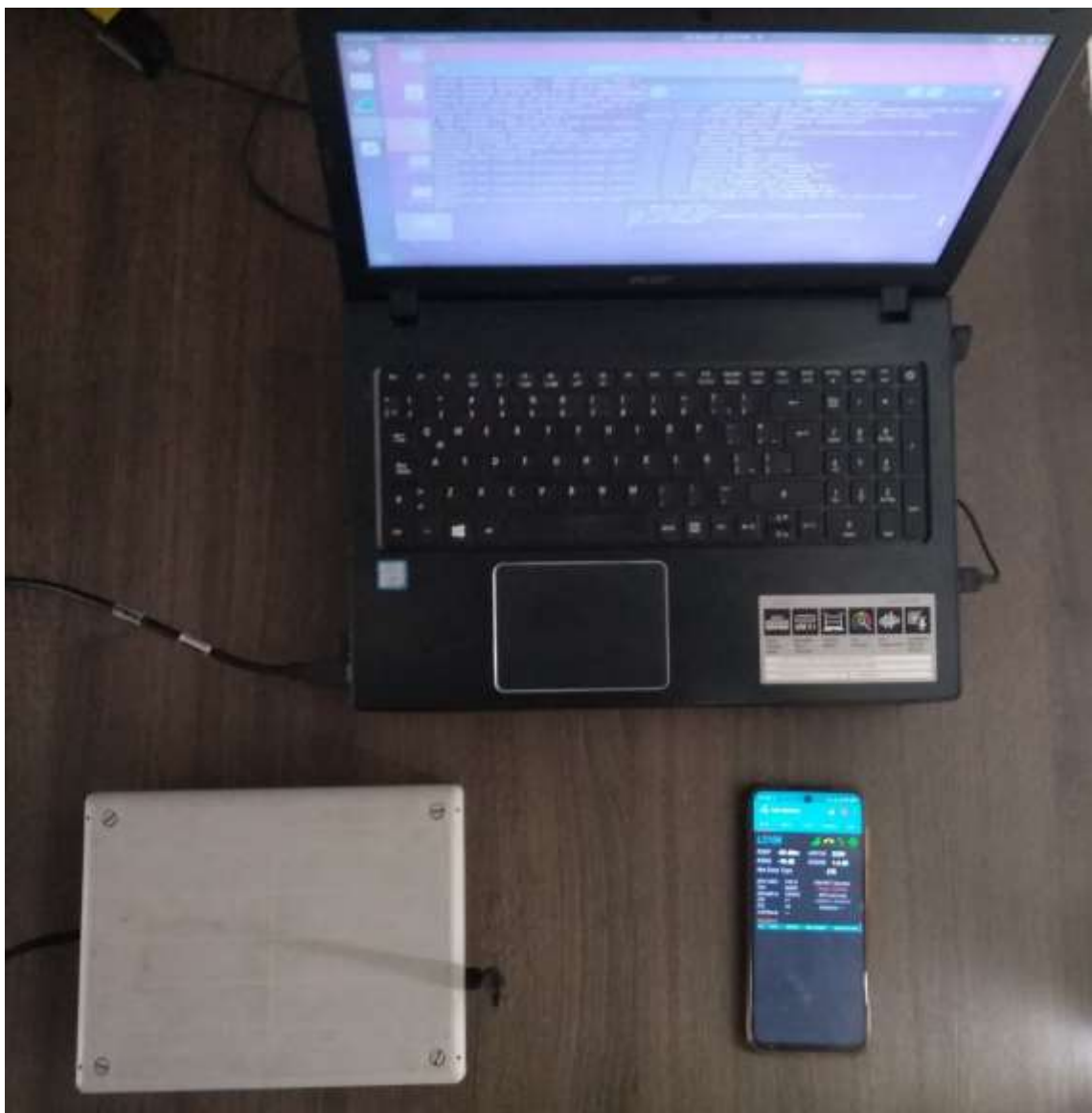


Figura 2-24: Escenario 2 Implementado

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.3.3 Fase 3: Pruebas

Las pruebas fueron realizadas para comprobar el funcionamiento de la implementación del transmisor y receptor de LTE probando así los diferentes escenarios.

2.3.3.1 Prueba 1: Conectividad entre computadores

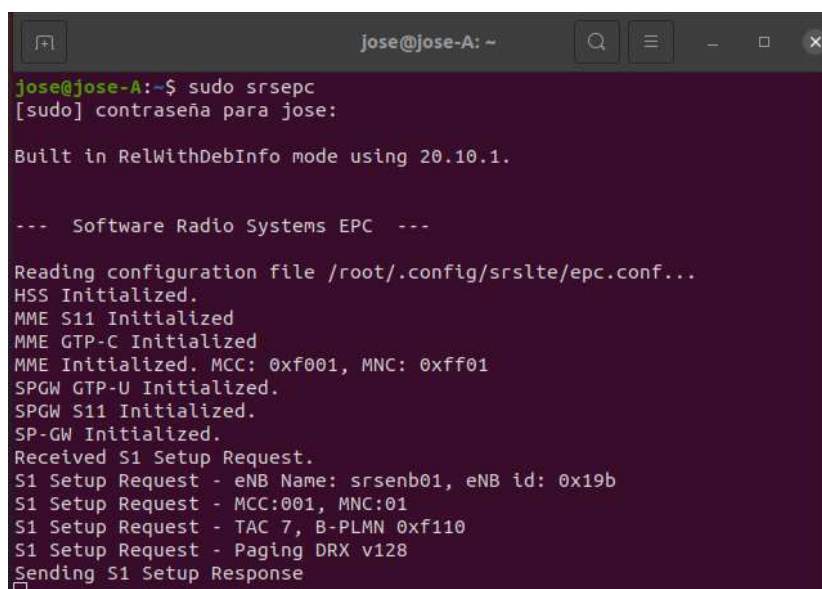
Para la conexión entre los dos computadores se usó el Escenario 1 en donde en el computador uno se inició la estación central como se muestra en La Figura 2-18. Al tener iniciado el EPC se pudo iniciar la estación base como se muestra en la Figura 2-25. Una vez iniciado el eNodeB este deberá conectarse al core mostrando en pantalla que existe la conexión como se ve en la Figura 2-26.



```
jose@jose-A: ~  
jose@jose-A:~$ sudo srseNB  
[sudo] contraseña para jose:  
--- Software Radio Systems LTE eNodeB ---  
  
Reading configuration file /root/.config/srsran/enb.conf...  
WARNING: cpufreq scaling governor is not set to performance mode. Realtime processing could be compromised. Consider setting it to performance mode before running the application.  
  
Built in Release mode using commit 09f10eed2 on branch master.  
  
Opening 1 channels in RF device=default with args=default  
[INFO] [UHD] linux: GNU C++ version 9.3.0; Boost_107100; UHD_3.15.0.0-release  
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.  
Opening USRP channels=1, args: type=b200, master_clock_rate=23.04e6  
[INFO] [UHD_RF] RF UHD Generic Instance constructed  
[INFO] [B200] Detected Device: B210  
[INFO] [B200] Operating over USB 3.  
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...  
[INFO] [B200] Initialize Radio control...  
[INFO] [B200] Performing register loopback test...  
[INFO] [B200] Register loopback test passed  
[INFO] [B200] Performing register loopback test...  
[INFO] [B200] Register loopback test passed  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...  
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.  
Setting frequency: DL=2080.0 MHz, UL=2560.0 MHz for cc_idx=0 nrof_prb=50  
  
==== eNodeB started ===  
Type <t> to view trace  
Starting plot for worker_id=0  
Creating plot window 'srseNB_PCI 1'...  
$StandardPaths: XDG_RUNTIME_DIR not set, defaulting to '/tmp/runtime-root'
```

Figura 2-25: srseNB

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

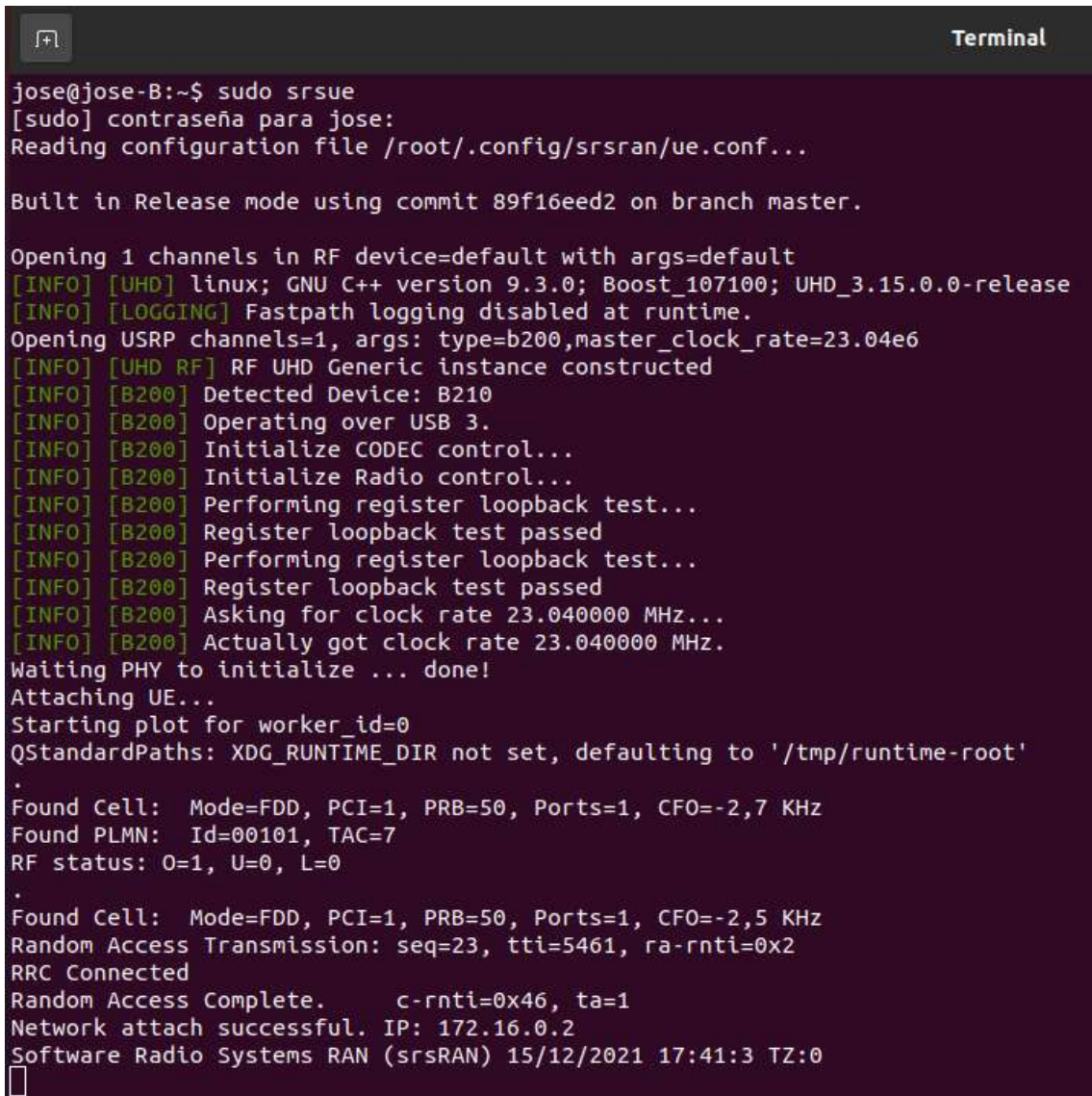


```
jose@jose-A: ~  
jose@jose-A:~$ sudo srsePC  
[sudo] contraseña para jose:  
  
Built in RelWithDebInfo mode using 20.10.1.  
  
--- Software Radio Systems EPC ---  
  
Reading configuration file /root/.config/srslte/epc.conf...  
HSS Initialized.  
MME S11 Initialized  
MME GTP-C Initialized  
MME 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  
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0xf110  
S1 Setup Request - Paging DRX v128  
Sending S1 Setup Response
```

Figura 2-26: Conexión eNodeB con EPC

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Una vez conectado el eNodeB con el core se tiene implementado el transmisor por lo que se puede iniciar en el segundo computador al User Equipment; al iniciar el User Equipment se conecta al eNodeB mostrando en la ventana la conexión exitosa como se muestra en la Figura 2-27. También la conexión entre eNodeB y User Equipment se muestra en la ventana del eNodeB y en la ventana del EPC, se puede observar la información de conexión como la solicitud de conexión del User Equipment con los pasos de autenticación en la red LTE y la asignación de la dirección IP, este procedimiento se puede ver en la Figura 2-28. Al finalizar el proceso se tiene una conexión satisfactoria entre las dos computadoras superando la prueba 1.



```
jose@jose-B:~$ sudo srsue
[sudo] contraseña para jose:
Reading configuration file /root/.config/srsran/ue.conf...

Built in Release mode using commit 89f16eed2 on branch master.

Opening 1 channels in RF device=default with args=default
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 9.3.0; Boost_107100; UHD_3.15.0.0-release
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Opening USRP channels=1, args: type=b200,master_clock_rate=23.04e6
[INFO] [UHD RF] RF UHD Generic instance constructed
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Waiting PHY to initialize ... done!
Attaching UE...
Starting plot for worker_id=0
QStandardPaths: XDG_RUNTIME_DIR not set, defaulting to '/tmp/runtime-root'
.
Found Cell: Mode=FDD, PCI=1, PRB=50, Ports=1, CFO=-2,7 KHz
Found PLMN: Id=00101, TAC=7
RF status: O=1, U=0, L=0
.
Found Cell: Mode=FDD, PCI=1, PRB=50, Ports=1, CFO=-2,5 KHz
Random Access Transmission: seq=23, tti=5461, ra-rnti=0x2
RRC Connected
Random Access Complete.      c-rnti=0x46, ta=1
Network attach successful. IP: 172.16.0.2
Software Radio Systems RAN (srsRAN) 15/12/2021 17:41:3 TZ:0
█
```

Figura 2-27: srsue

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

```

jose@jose-A:~$ sudo srsepc
[sudo] contraseña para jose:
Built in Release mode using commit 89f16eed2 on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

Reading configuration file /root/.config/srsran/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
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0xf110
S1 Setup Request - Paging DRX v128
Sending S1 Setup Response
Initial UE message: LIBLTE_MME_MSG_TYPE_ATTACH_REQUEST
Received Initial UE message -- Attach Request
Attach request -- M-TMSI: 0x76a91177
Attach request -- eNB-UE S1AP Id: 1
Attach request -- Attach type: 2
Attach Request -- UE Network Capabilities EEA: 11110000
Attach Request -- UE Network Capabilities EIA: 01110000
Attach Request -- MS Network Capabilities Present: true
PDN Connectivity Request -- EPS Bearer Identity requested: 0
PDN Connectivity Request -- Procedure Transaction Id: 9
PDN Connectivity Request -- ESM Information Transfer requested: true
UL NAS: Received Identity Response
ID Response -- IMSI: 001010000000003
Downlink NAS: Sent Authentication Request
UL NAS: Received Authentication Response
Authentication Response -- IMSI 001010000000003
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: 001010000000003
Sending ESM information request
UL NAS: Received ESM Information Response
ESM Info: APN ia
ESM Info: 9 Protocol Configuration Options
Getting subscription information -- QCI 7
Sending Create Session Request.
Creating Session Response -- IMSI: 1010000000003
Creating Session Response -- MME control TEID: 1
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_CREATE_SESSION_REQUEST
SPGW: Allocated Ctrl TEID 1
SPGW: Allocated User 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 001010000000003
Adding attach accept to Initial Context Setup Request
Sent Initial Context Setup Request. E-RAB id 5
Received Initial Context Setup Response
E-RAB Context Setup. E-RAB id 5
E-RAB Context -- eNB TEID 0x1; eNB GTP-U Address 127.0.1.1
UL NAS: Received Attach Complete
Unpacked Attached Complete Message. IMSI 1010000000003
Unpacked Activate Default EPS Bearer message. EPS Bearer id 5
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_MODIFY_BEARER_REQUEST
Sending EMM Information

```

Figura 2-28: srsepc Proceso de conexión.

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

2.3.3.2 Prueba 2: Conexión con teléfono móvil

Para la segunda prueba se debe iniciar el core y la estación base de igual forma que en la prueba 1 con la diferencia que esta vez la conexión se realizó a un teléfono móvil que debe conectarse a la red LTE. Para poder conectarse a la red LTE se debe configurar en el teléfono el APN como se muestra en la Figura 2-29, luego se debe seleccionar de forma manual la red a la que se desea conectar seccionando la red “**Software Radio System RAN 4G**” como se muestra en la Figura 2-30.

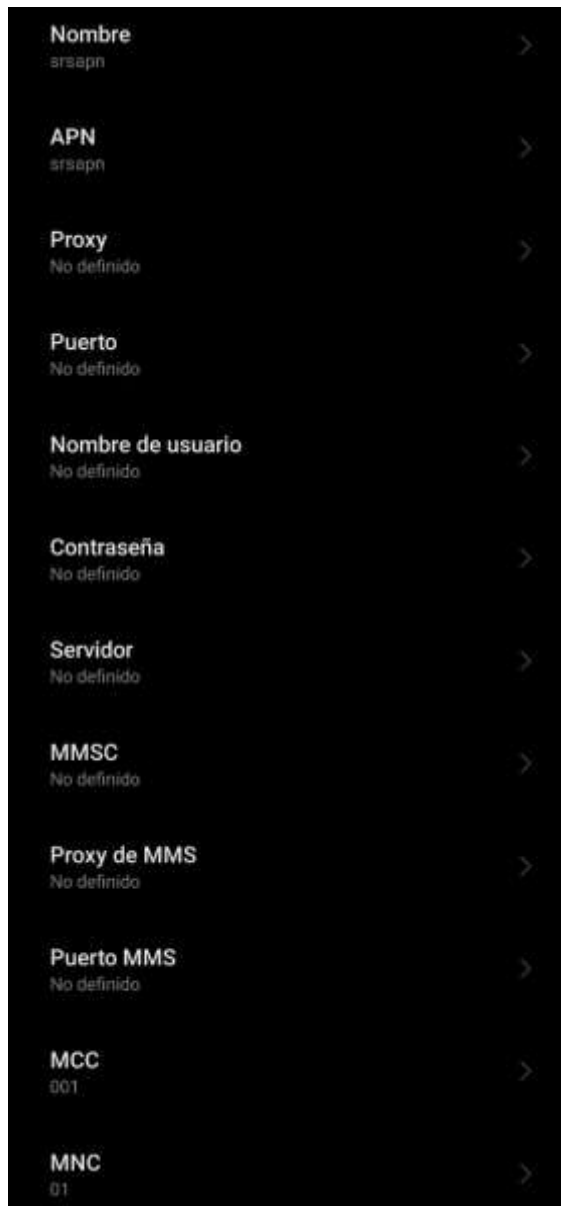


Figura 2-29: Configuración APN

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

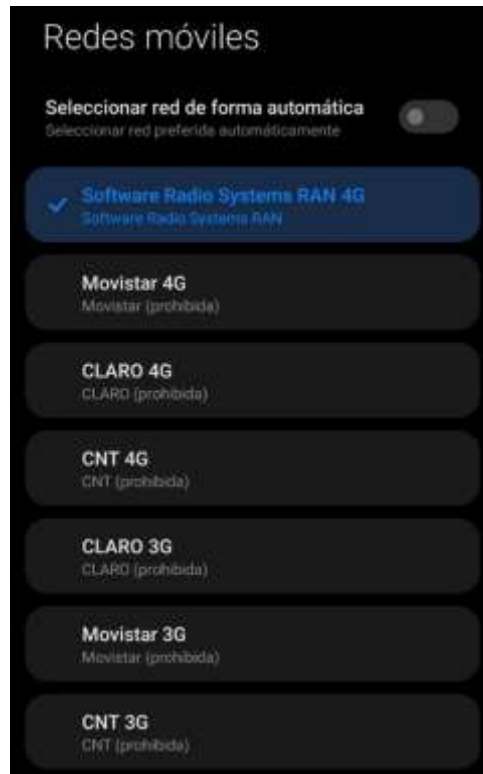


Figura 2-30: Selección de Red

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Una vez conectado el teléfono a la red LTE se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento de la red, se pudo medir los parámetros radioeléctricos con la ayuda de la aplicación Net Monitor Lite que entrega la información que se puede ver en la Figura 2-31.



Figura 2-31: Net Monitor Lite

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Para otorgar una salida a internet al teléfono móvil se debe enmascarar a la interfaz de red en la computadora en la que se está ejecutando el EPC. Para esto se debe usar el nombre de la interfaz con la que se tiene conexión a internet, en el caso de las pruebas realizadas la conexión era mediante la interfaz WiFi por lo que se usó el comando que se muestra en la Figura 2-32.

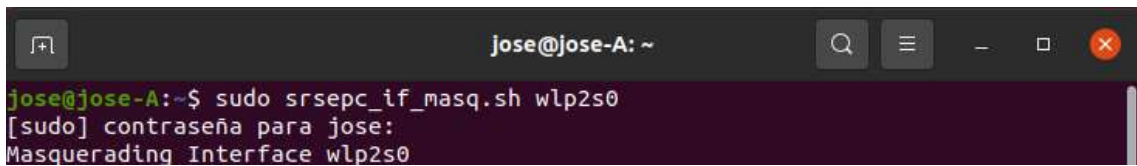
A terminal window titled 'jose@jose-A: ~' with search, menu, and window control icons. The terminal shows the command 'jose@jose-A:~\$ sudo srsepc_if_masq.sh wlp2s0' and its output: '[sudo] contraseña para jose:' followed by 'Masquerading Interface wlp2s0'.

Figura 2-32: Enmascarado de Interfaz

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Una vez que el teléfono obtuvo conexión a internet se realizaron pruebas de ping y un rastreo de la ruta del paquete para poder comprobar que se está enviando por la red LTE implementada. Con la aplicación PingTools se pudo realizar un rastreo del paquete viendo los puntos por los que este pasa teniendo como resultado que el paquete salió de la dirección que asigno el EPC al teléfono para luego salir de esta hacia internet, todo este proceso se puede ver en la Figura 2-33.



Figura 2-33: Traceroute PingTools

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

CAPÍTULO III

3 MARCO DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas con la red LTE en los diferentes escenarios planteados.

3.1 Resultados

3.1.1 Transmisión de Video

Para realizar una transmisión de video desde el core LTE hacia el User Equipment se debe crear un servidor de video, con la aplicación VLC se puede realizar esto, es recomendable contar con un video en formato .mp4. Primero se debe configurar la transmisión eligiendo el video a transmitir como se muestra en la Figura 3-1, luego se debe configurar el destino donde se selecciona HTTP con el puerto 8080 y una ruta por defecto que es la dirección ip del eNodeB mostrado en la Figura 3-2. El video al estar en formato .mp4 no se debe codificar para transmitir por lo que se debe deshabilitar esta opción como en la Figura 3-3.

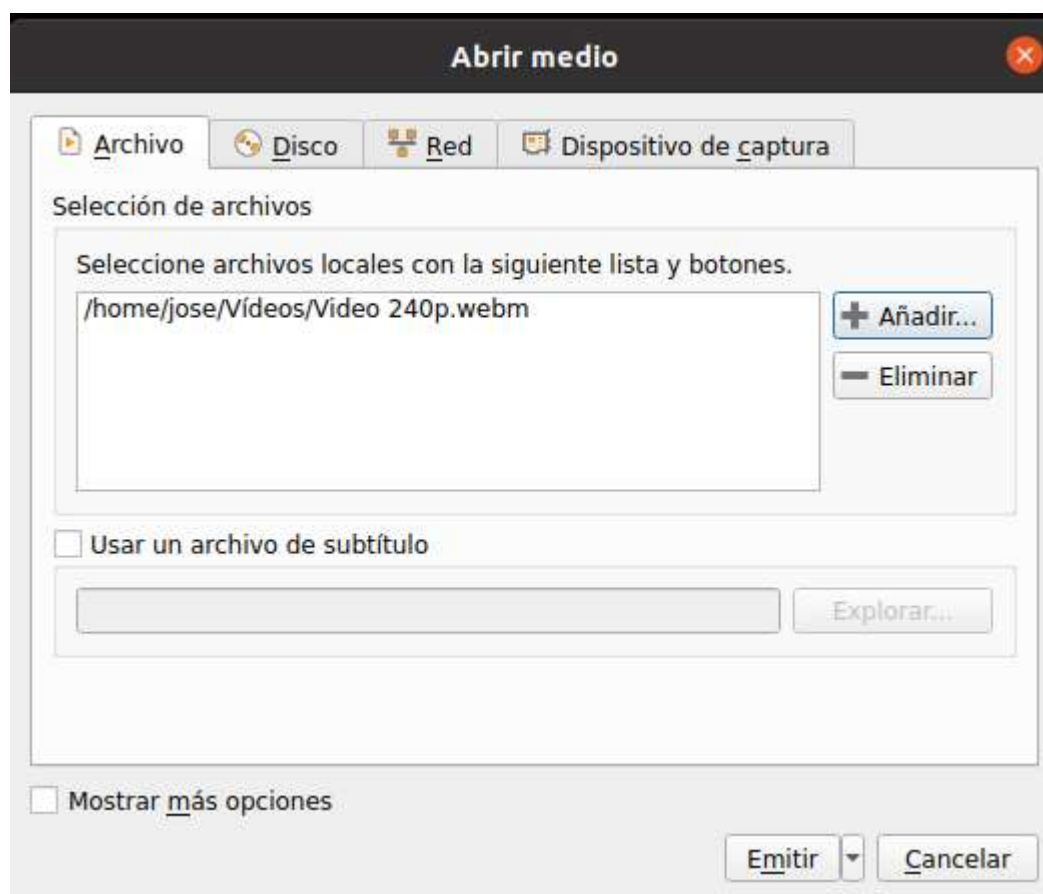


Figura 3-1: Selección Emisión

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

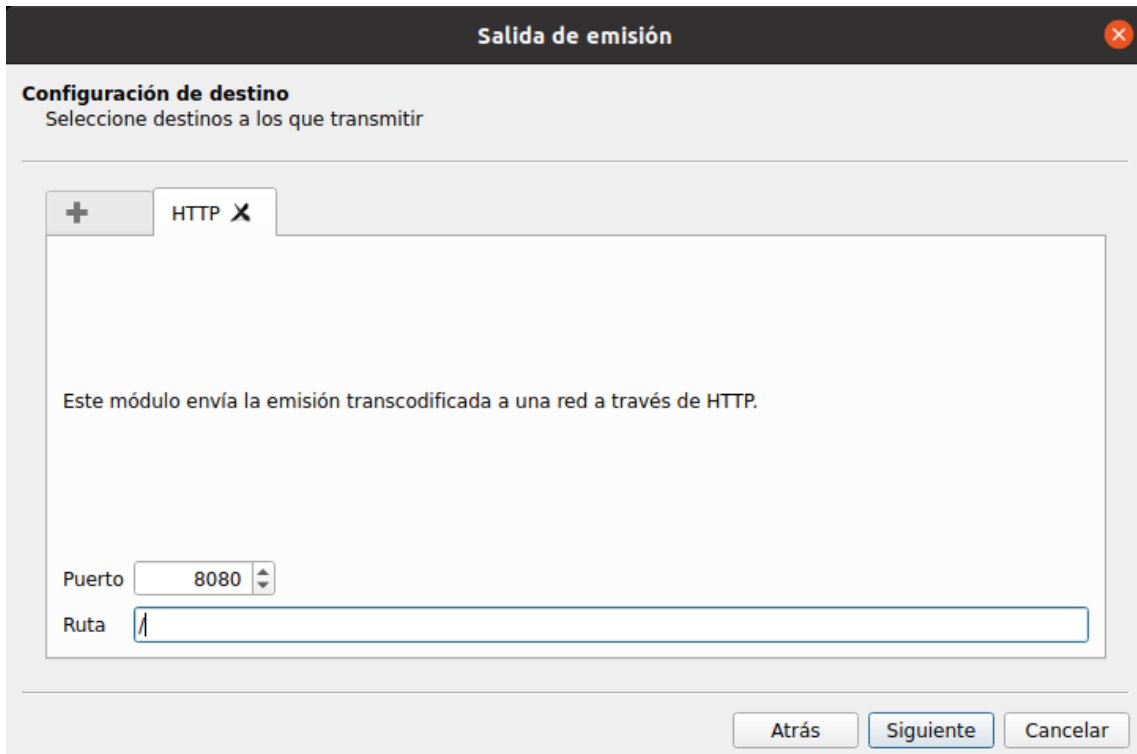


Figura 3-2: Selección Destino y Puerto

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

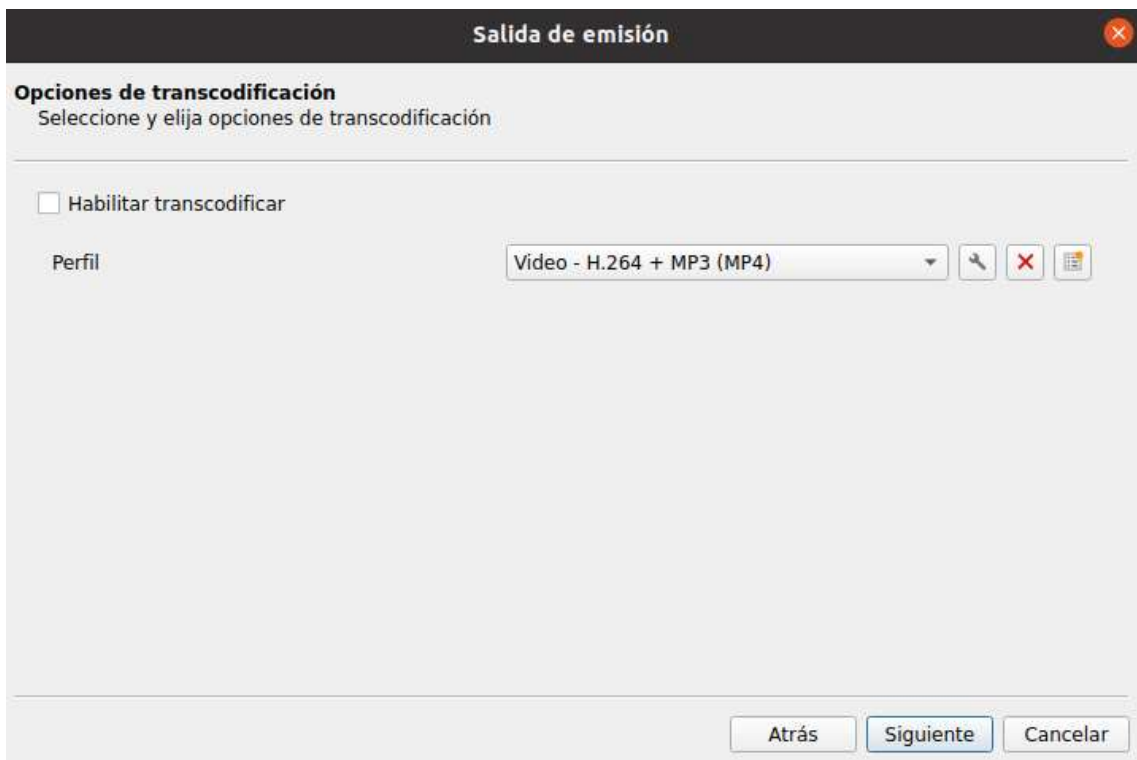


Figura 3-3: Transcodificación Emisión

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el receptor para recibir la señal en el software VLC se usó la opción de “Abrir Ubicación de red” donde se debe ingresar la dirección IP del eNodeB al que está conectado y el puerto como

se muestra en Figura 3-4 obteniendo así una conexión a la transmisión de video con un retraso de 1000 ms por el viaje de la señal desde el eNodeB hacia el User Equipement teniendo como resultado lo que se muestra en la Figura 3-5.

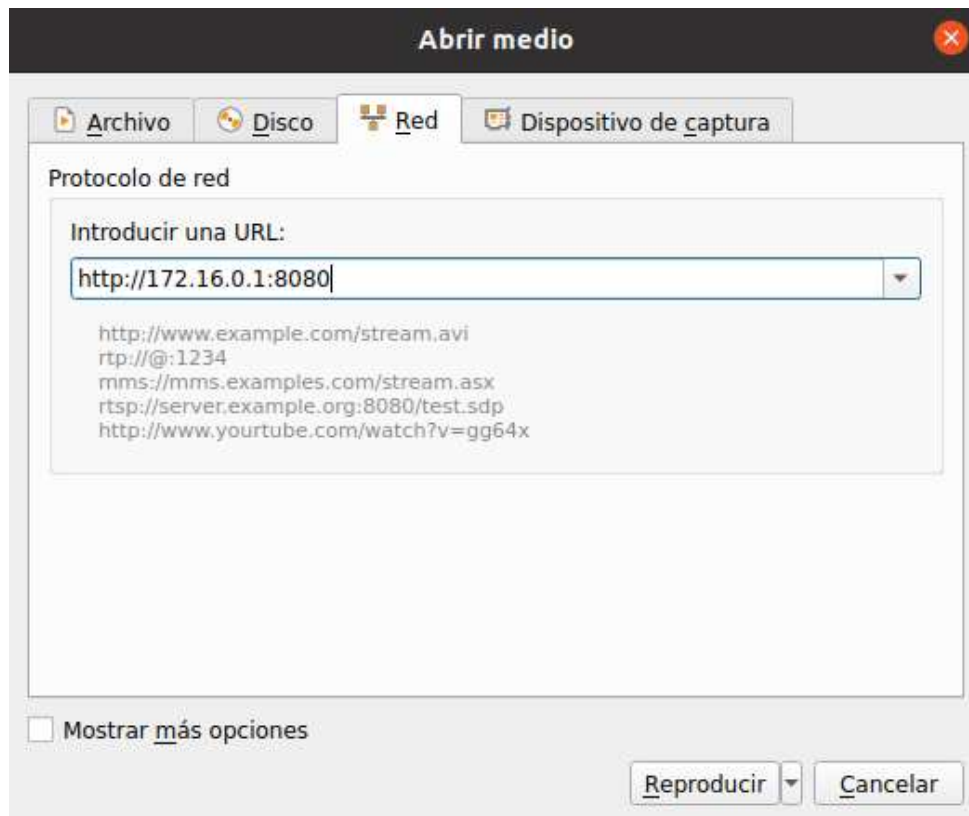


Figura 3-4: Abrir Ubicación de Red

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

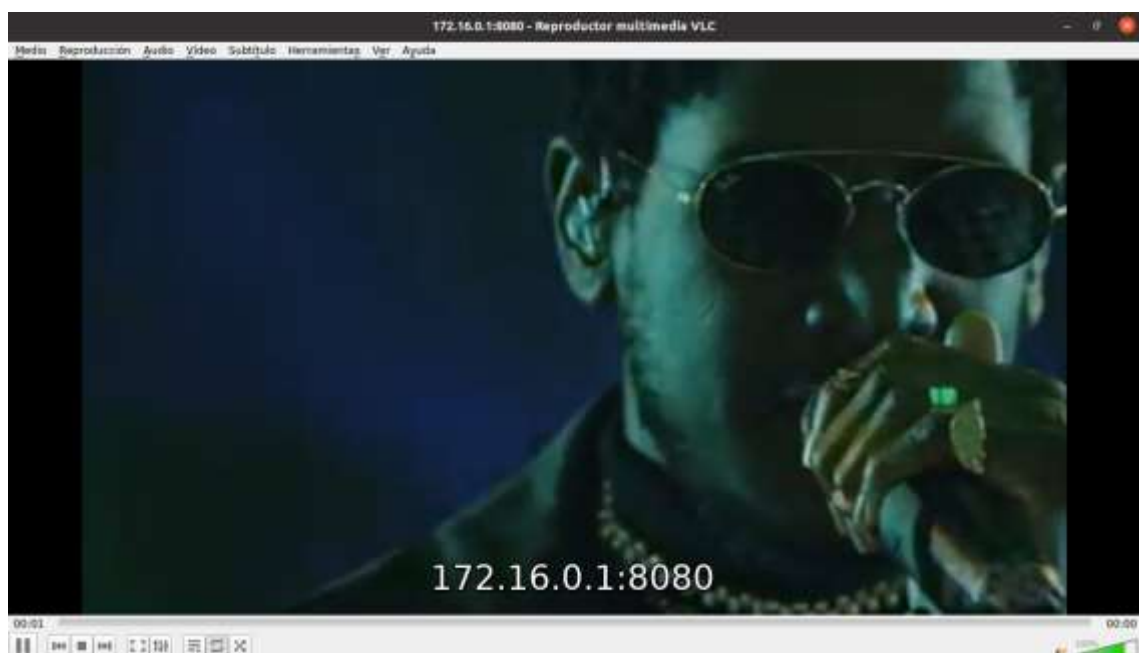


Figura 3-5: Video en User Equipement

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Para tener una mejor idea de la transmisión se muestran los parámetros radioeléctricos de la red de forma gráfica, la respuesta del canal en magnitud y fase, así como las constelaciones de modulación de los canales Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) y Physical Uplink Control Channel (PUCCH) en el eNodeB y en el User Equipment se muestra la respuesta del canal y la constelación de modulación del canal Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) como se puede ver en la Figura 3-6 y Figura 3-7 respectivamente.

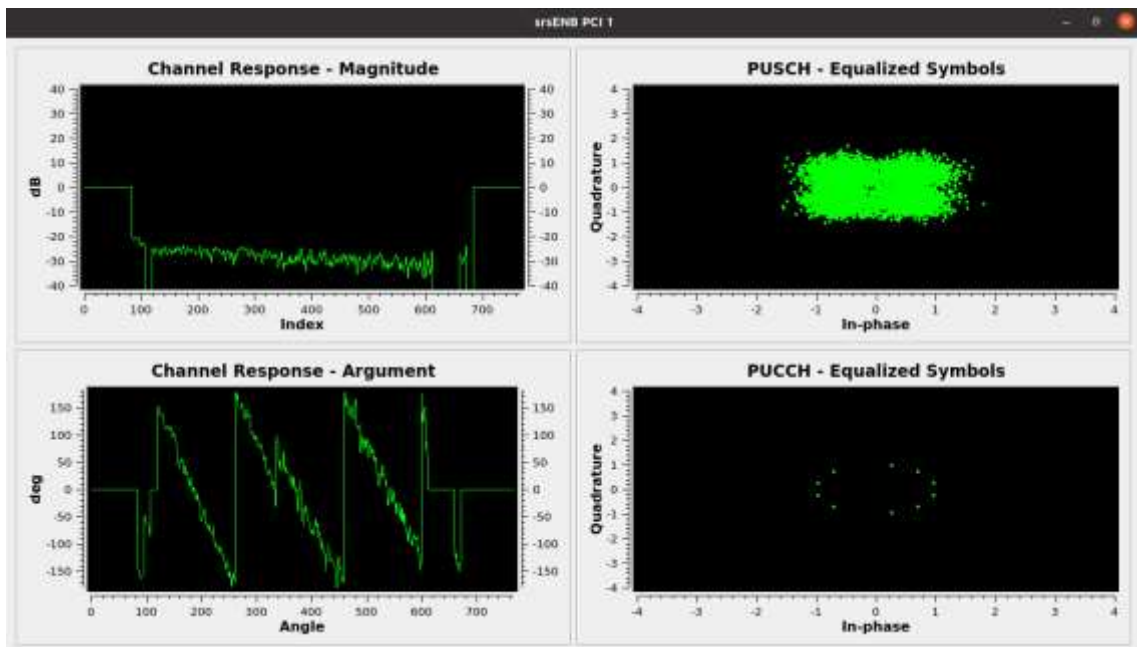


Figura 3-6: GUI srsenb

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

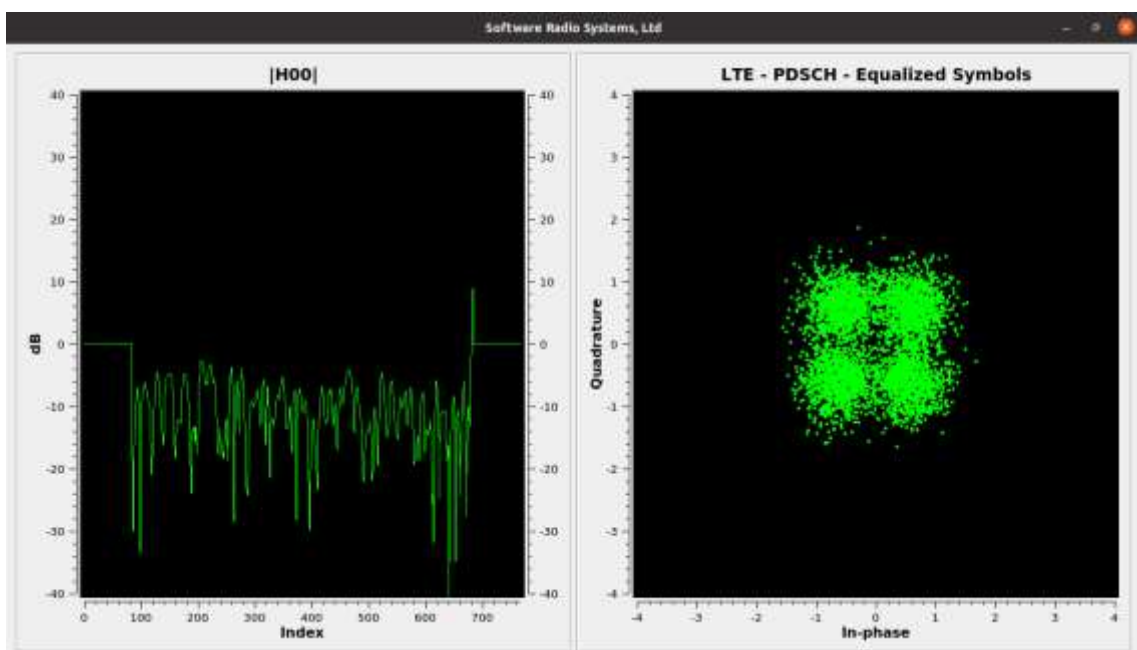


Figura 3-7. GUI srsue

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Para esta prueba se usaron una Antena LP0965 tanto en el transmisor como en el receptor conectados a una tarjeta USRP respectivamente conectados al Computador 1 (Transmisor) y al Computador 2 (Receptor).

3.1.2 MIMO

Se realizó una transmisión 1x1 (SISO) y una transmisión 2x2 (MIMO), luego se hizo una comparación en la que se buscó determinar si una transmisión MIMO tenía un mejor desempeño. Para obtener los datos se usó el srsue (User Equipement) en este se puede realizar rastreo pulsando la letra “t”, los datos que entrega el User Equipement se enlistan a continuación y se muestran en la Figura 3-8:

- Reference Signal Receive Power (rsrp): Nivel de la señal recibida desde el eNodeB.
- Path Loss (pl): Pérdidas de línea.
- Carrier Frequency Offset (cfo): Desplazamiento de la frecuencia de la portadora.
- Downlink Modulation and Coding Scheme (mcs): Esquema de codificación de modulación.
- Signal Noise Ratio (snr): Relación señal a ruido.
- Average Number of Turbo Decoder Iterations (iter): promedio de iteraciones del decodificador turbo.
- Downlink Bit Error Rate (brate): Tasa de errores de bit en Downlink.
- Downlink Bloc Error Rate (bler): Tasa de errores de bloque en Downlink.
- Timing Advance (ta_us): control de tiempo de transmisión de la señal Uplink.
- Uplink Modulation and Coding Scheme (mcs): Esquema de modulación y codificación en Uplink.
- Uplink Buffer Status (buff): Estado del buffer en Uplink.
- Uplink Bit Error Rate (brate): Tasa de errores de bit en Uplink.
- Uplink Downlink Bloc Error Rate (bler): Tasa de errores de bloque en Uplink.

En la transmisión 1x1 se usó el mismo escenario que en la prueba anterior usando la Antena LP0965, para la prueba 2x2 se usó la Antena LP0965 conectada al puerto TX/RX 1 tanto en el transmisor como en el receptor y en el puerto TX/RX 2 se usó la Antena VERT2450 de igual forma teniendo así una transmisión MIMO.

Para realizar la comparación se tomaron 180 valores que se almacenaron en tablas de Excel, se realizó una tabla para cada modo de transmisión teniendo una tabla para el modo 1x1 y una tabla para el modo 2x2, estas fueron usadas para generar los gráficos en los cuales se realizó una regresión lineal para una correcta interpretación de estos. Los resultados de estos se presentan a continuación.

Signal					DL						UL			
cc	pci	rsrp	pl	cfo	mcs	snr	iter	brate	bler	ta_us	mcs	buff	brate	bler
0	1	-84	84	2.5k	3	30	0.5	1.8k	0%	0.5	1	0.0	6.3k	40%
0	1	-84	84	2.5k	3	29	0.5	912	0%	1.0	0	0.0	1.3k	50%
0	1	-84	84	2.5k	14	30	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	50%
0	1	-84	84	2.5k	14	30	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	50%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	33%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	50%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	33%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	50%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	33%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	33%
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	33%

Signal					DL						UL			
cc	pci	rsrp	pl	cfo	mcs	snr	iter	brate	bler	ta_us	mcs	buff	brate	bler
0	1	-84	84	2.5k	14	29	0.5	744	0%	1.0	0	0.0	1.3k	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.0	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.0	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	30	0.5	168	0%	1.6	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.6	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.6	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.6	0	0.0	0.0	0%
0	1	-84	84	2.5k	0	29	0.0	0.0	0%	1.6	0	0.0	0.0	0%

Figura 3-8: Trace User Equipment

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 1-4 se puede observar que la transmisión sin MIMO tiene una mejor potencia que la señal que se transmitió con MIMO, esta diferencia es mínima, esto se da por la potencia que la tarjeta USRP necesita para la transmisión con dos antenas por lo que la potencia de transmisión es menor al usar dos antenas que solo una.

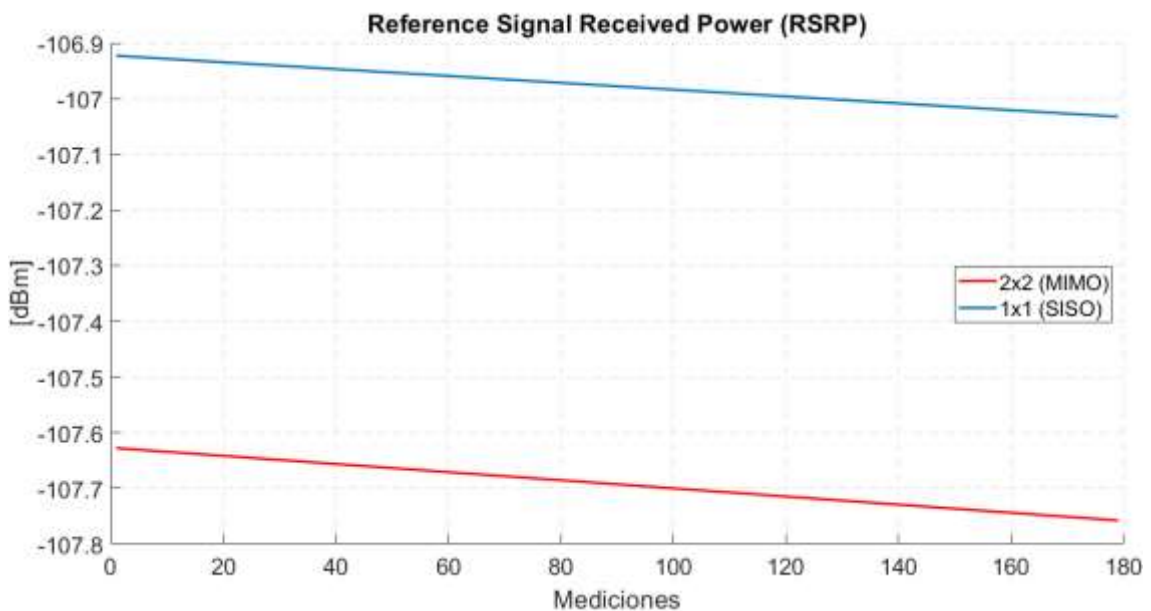


Gráfico 1-4: Reference Signal Received Power

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 2-4 las pérdidas de línea que están directamente relacionadas con el nivel de señal recibida teniendo así el mismo resultado que este.

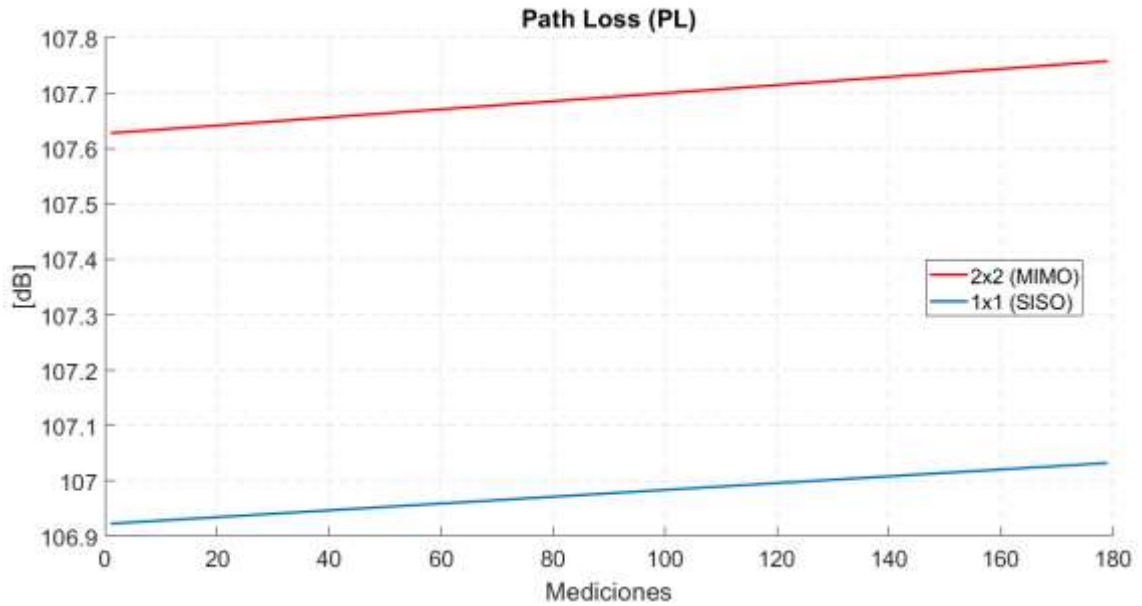


Gráfico 2-4: Path Loss

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021

La transmisión con MIMO tiene una tendencia más plana que la transmisión sin MIMO, lo que significa que al transmitir con dos antenas se tiene menor desplazamiento de la frecuencia portadora que con una transmisión sin MIMO como se muestra en el Gráfico 3-4 que tiene una variación mayor lo que puede afectar a la señal.

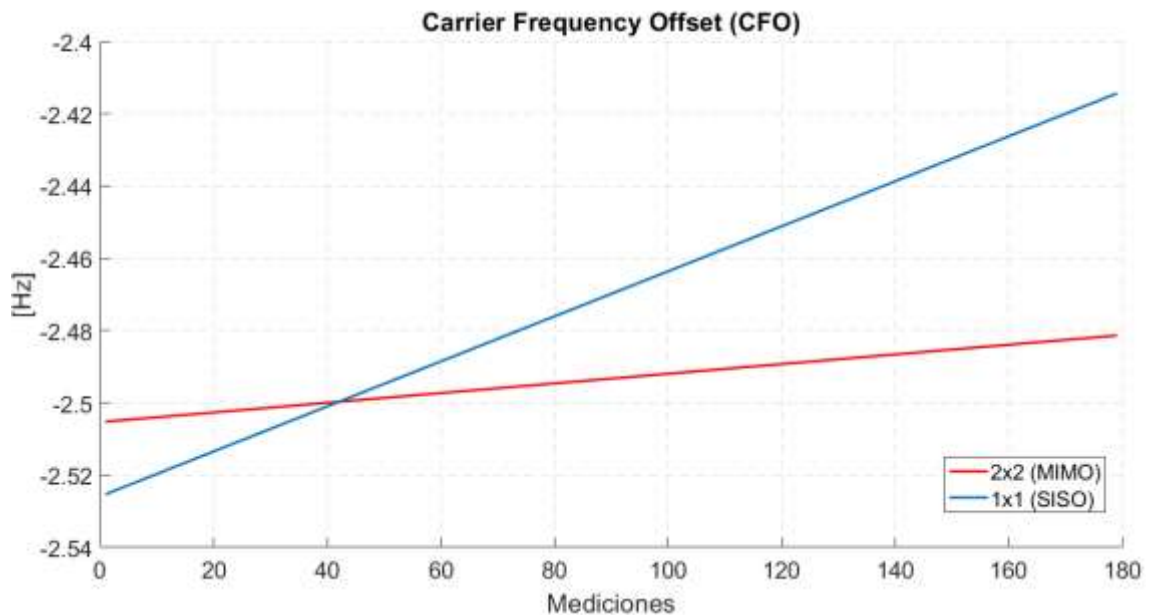


Gráfico 3-4: Carrier Frequency Offset

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

El esquema de modulación en Downlink muestra que la tendencia se encuentra entre 5 y 6 como se ve en el Gráfico 4-4 lo que significa que se está usando una modulación QPSK tanto en la

transmisión MIMO con en la transmisión sin MIMO por lo que se puede decir que el uso de una o más antenas no afecta a la modulación usada.

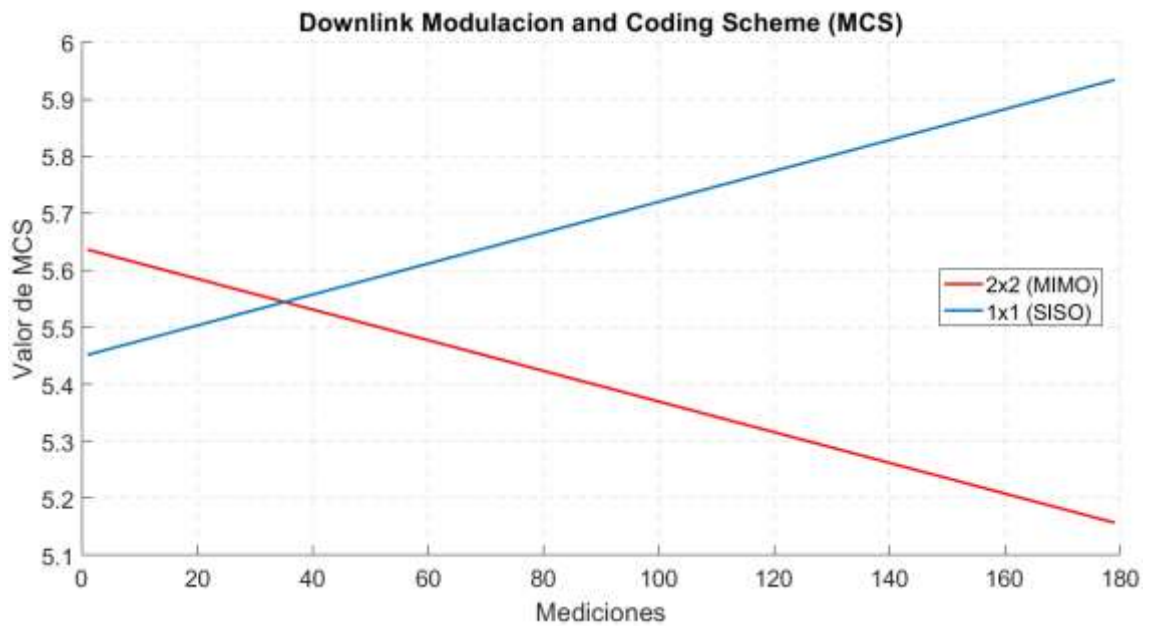


Gráfico 4-4: Downlink Modulation and Coding Scheme

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 5-4 se puede ver que la señal que tiene una mejor relación señal a ruido es la que se transmitió sin MIMO y con 2 dB de diferencia se encuentra la señal que se transmitió con MIMO, esto se puede dar por la potencia con la que se recibe la señal, como se observa en los resultados de RSRP la señal sin MIMO es la se recibía con mayor potencia.

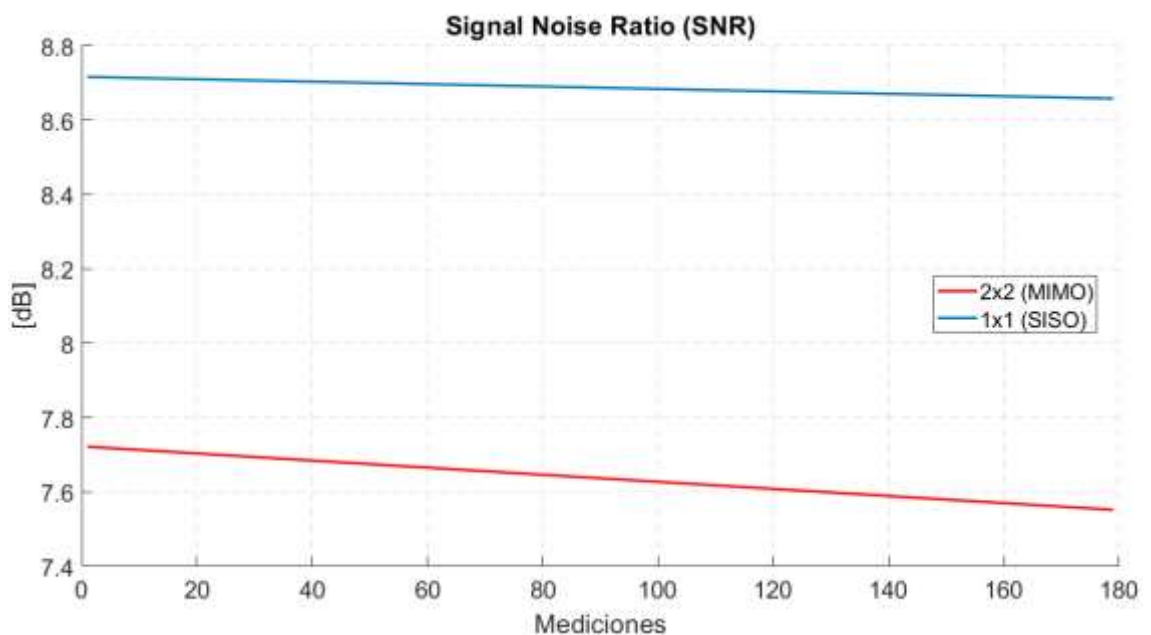


Gráfico 5-4: Downlink Signal Noise Ratio

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

El promedio de iteraciones del Decodificador Turbo en la transmisión sin MIMO se observa que tiene una tendencia a aumentar según se da la transmisión, en el caso de la transmisión 2x2 este promedio tiende a bajar como se puede apreciar en el Gráfico 6-4.

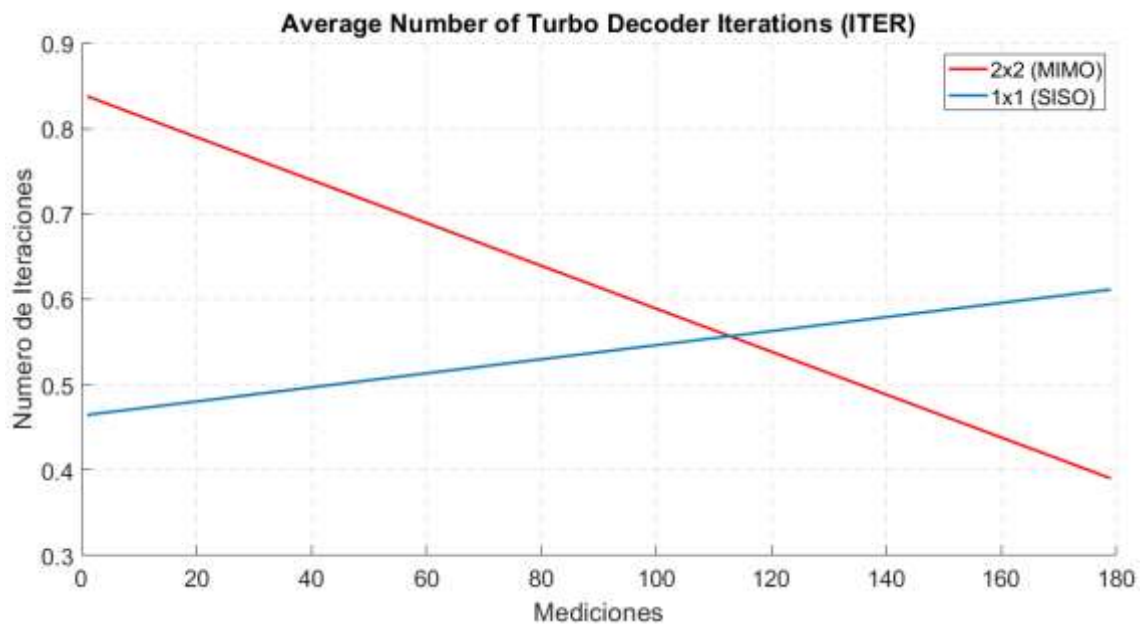


Gráfico 6-4: Downlink Average Number of Turbo Decoder Iteration

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 7-4 se observa que en la transmisión con MIMO existe un mayor número de errores de bit que en la transmisión sin MIMO, este resultado se produce por la capacidad de procesamiento de datos teniendo mayor número de datos en la transmisión con MIMO.

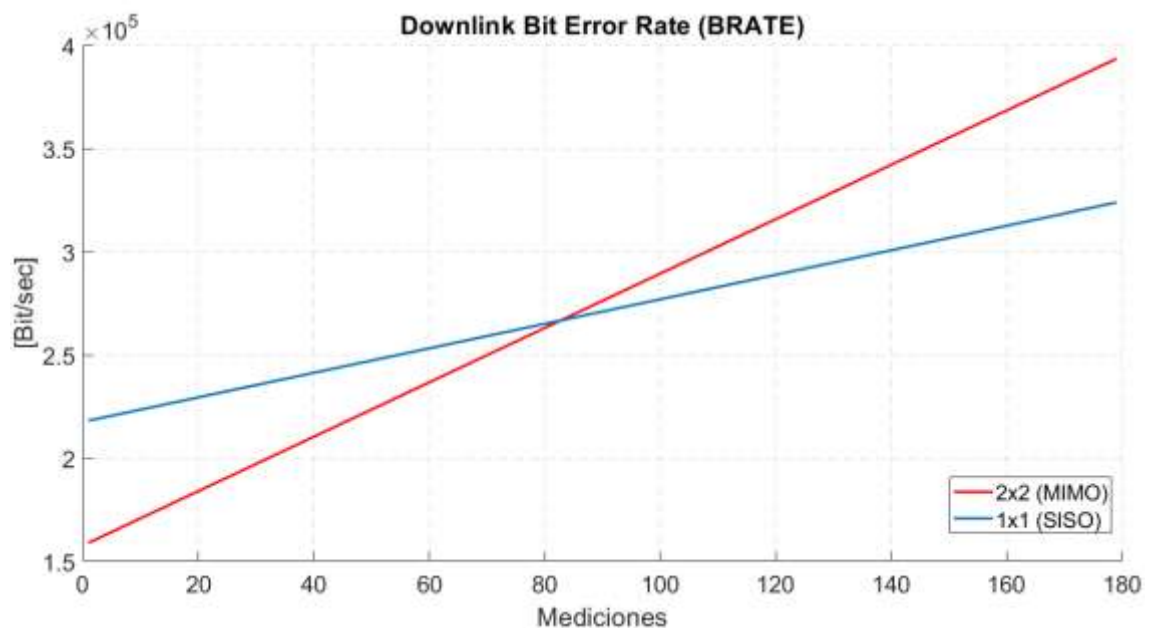


Gráfico 7-4: Downlink Bit Error Rate

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Se tienen menos errores por bloque en la transmisión con MIMO como se puede ver en el Gráfico 8-4 donde los errores por bloques inician en un valor alto, pero a lo largo de las mediciones este valor baja mientras que en la transmisión sin MIMO este valor tiende a subir.

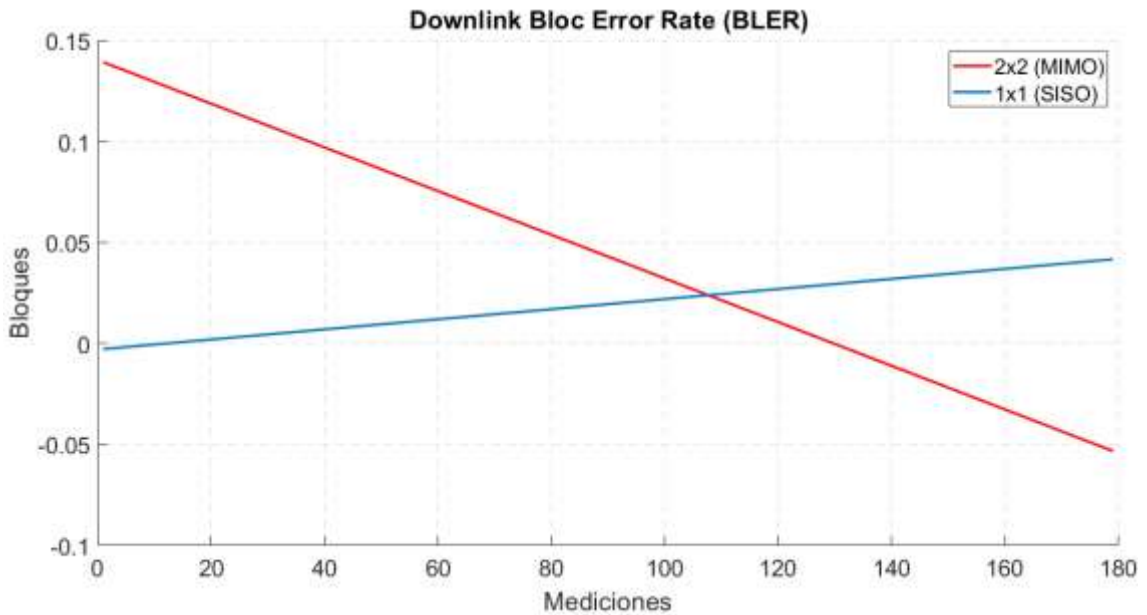


Gráfico 8-4: Downlink Bloc Error Rate

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el control del tiempo con el Timing Advance se observa en el Gráfico 9-4 que la transmisión con MIMO tiene una tendencia plana y se mantiene en un solo valor, en cambio la transmisión sin MIMO tiende a subir por lo que se presenta un mayor retraso de la señal.

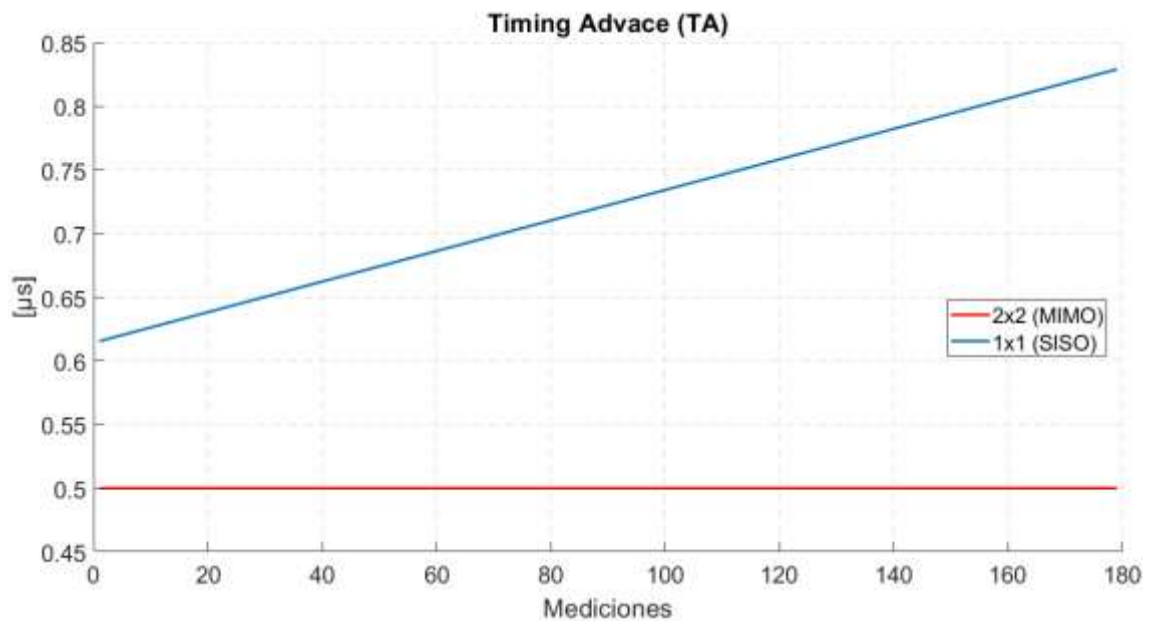


Gráfico 9-4: Downlink Timing Advance

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

El esquema de modulación en Uplink en el caso de la transmisión con MIMO y sin MIMO ambos se encuentran entre los valores que se muestran en el Gráfico 10-4. Esto significa que en ambos casos se usa una modulación QPSK.

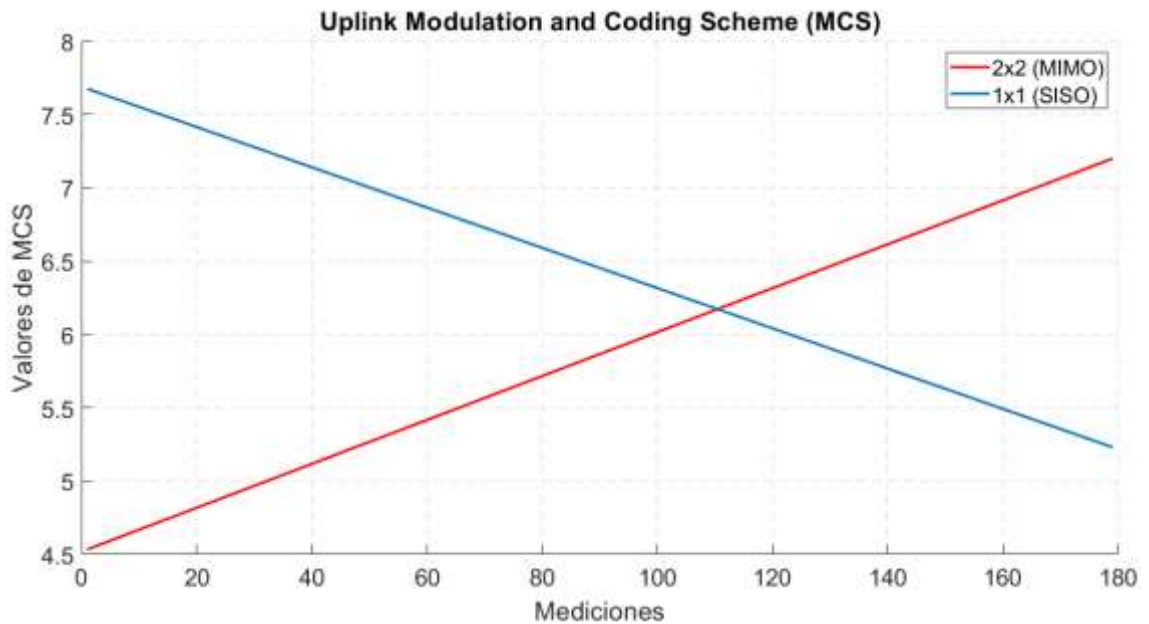


Gráfico 10-4: Uplink Modulation and Coding Scheme

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 11-4 se puede ver que existe un mayor número de bytes en el buffer cuando se realiza una transmisión sin MIMO tendiendo a aumentar, en la transmisión con MIMO se muestra que el número de bytes es menor y tiene un crecimiento bajo.

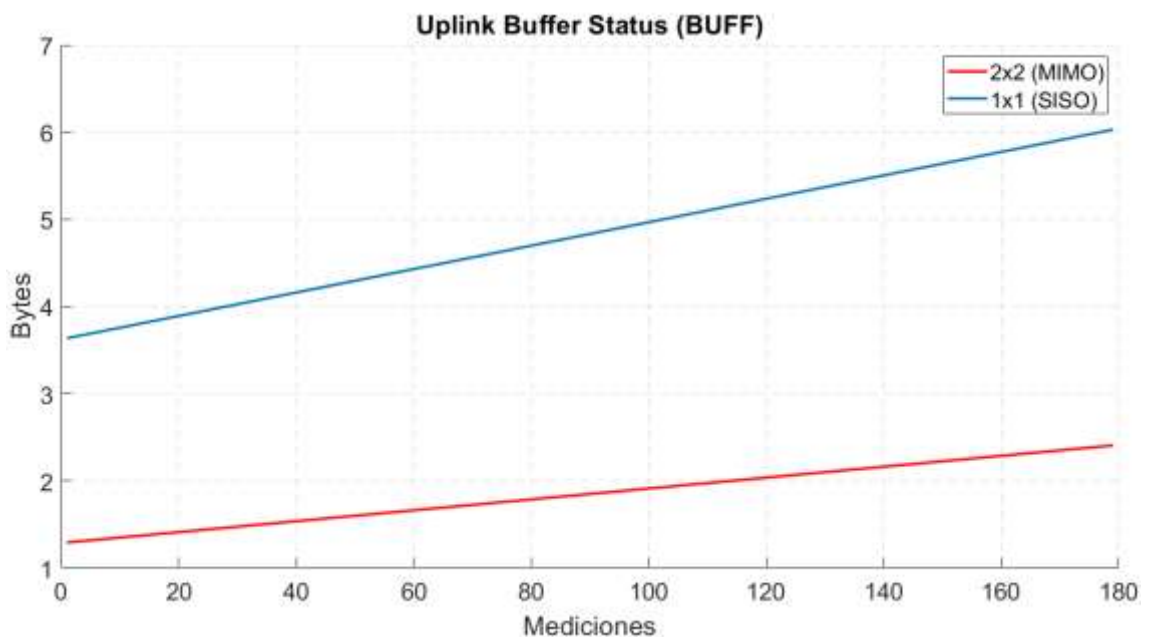


Gráfico 11-4: Uplink Buffer Status

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En el Gráfico 12-4 se observa que en la transmisión con MIMO la tendencia de los errores de bit aumenta a lo largo de la prueba, en cambio la transmisión con MIMO se tiene un error que se mantiene constante sin un gran crecimiento a lo largo de las mediciones.

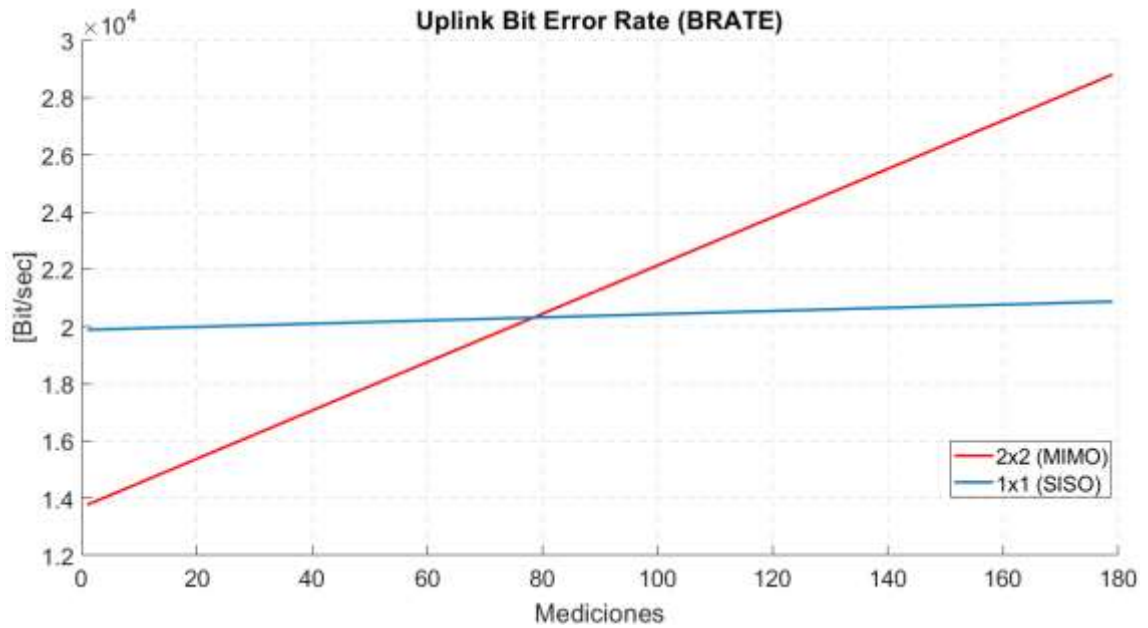


Gráfico 12-4: Uplink Bit Error Rate

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En los errores por bloque se puede ver en el Gráfico 13-4 que se inicia un menor número de errores en la transmisión con MIMO, pero este aumenta en forma progresiva, en la transmisión sin MIMO se tiene un inicio con mayor número de errores, pero con un crecimiento más lento llegando a igualar en un punto a la transmisión con MIMO, pero con una tendencia de crecimiento menor.

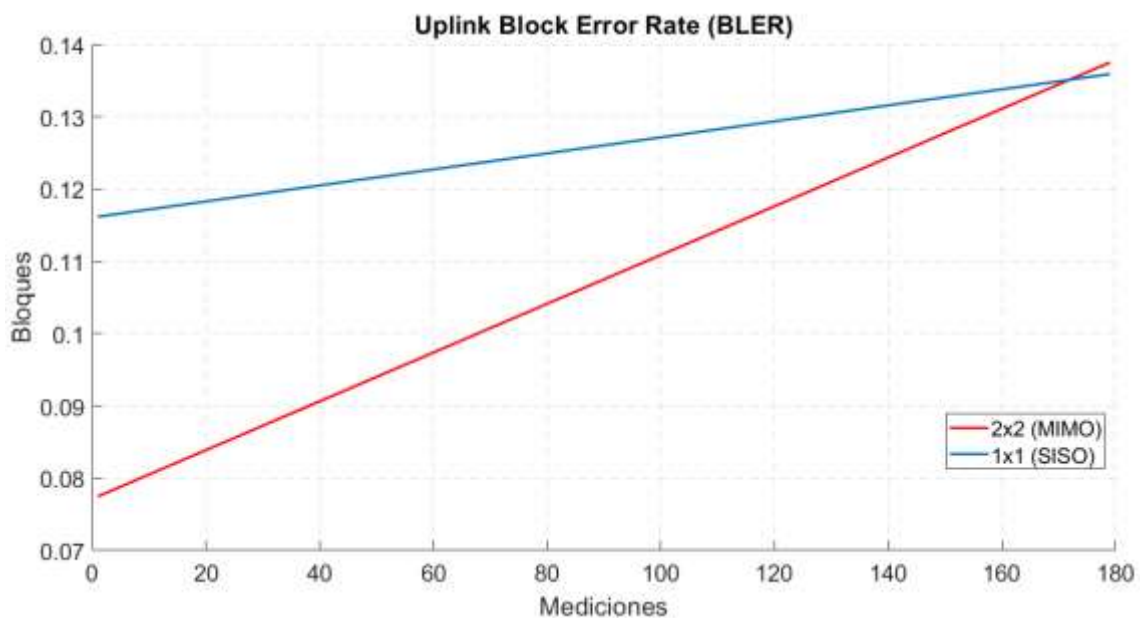


Gráfico 13-4: Uplink Bloc Error Rate

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.3 Medidas Indoor

Para comprobar un funcionamiento de la implementación se realizaron medidas en un ambiente indoor, estas mediciones se las realizaron en la Facultad de Informática y Electrónica. Se colocó al transmisor en el Hall de la Tercera Planta y se tomaron medidas en diferentes puntos de la FIE, estos puntos se detallan en la Figura 3-9, Figura 3-10 y Figura 3-11 desde la planta superior hasta la planta inferior. En la Sección de Anexos se presentan los mapas completos de cada una de las plantas.

El escenario que se usó para esta prueba estuvo conformado por el Computador 1 (Transmisor) conectado a la tarjeta USRP a la cual se le conectó en el puerto TX/RX 1 la Antena VERT2450 y en el puerto TX/RX 2 de igual manera se conectó una Antena VERT2450. Estas antenas con su ganancia brindan una cobertura buena dentro de los valores de calidad de señal que se muestran en la Tabla 1- y esta prueba tiene la finalidad de comprobar si el escenario planteado cumple los parámetros de calidad.

Tabla 1-4: Parámetros de calidad de señal LTE

Condición RF	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	RSSNR [dB]
Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Buena	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
Mitad de celda	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
Borde de celda	≤ -100	< -20	≤ 0

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

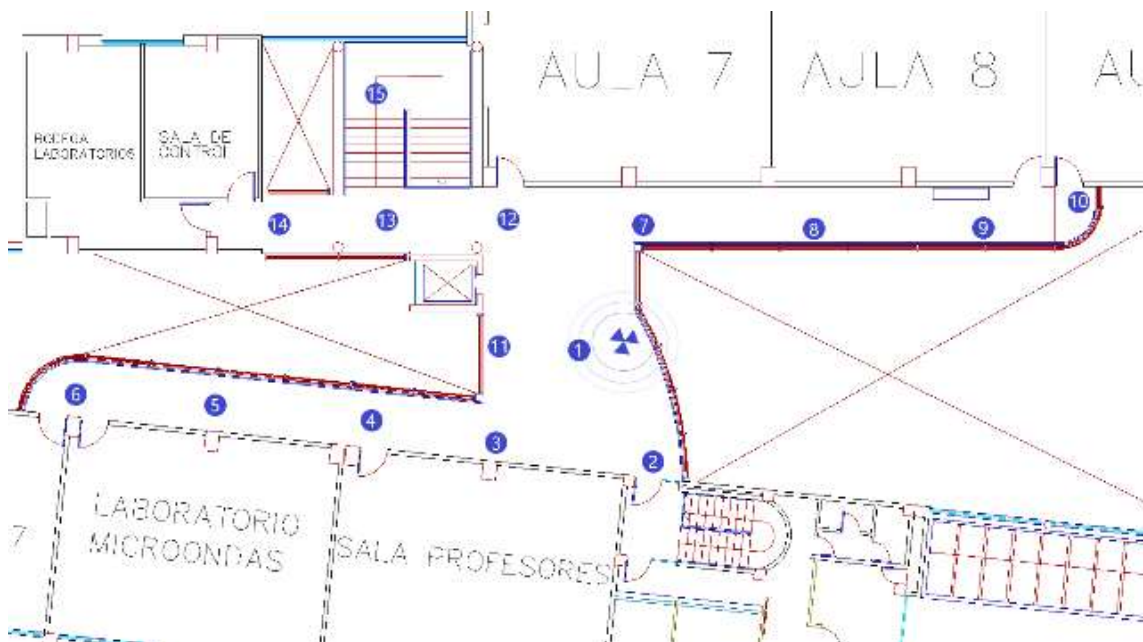


Figura 3-9: Tercera Planta FIE

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021

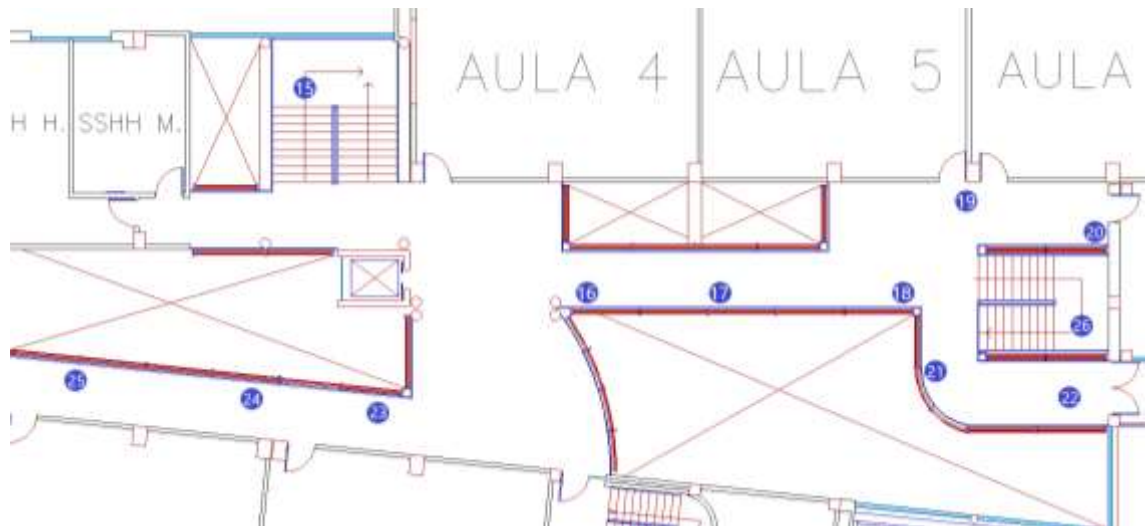


Figura 3-10: Segunda Planta FIE

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.



Figura 3-11: Planta Baja FIE

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Tabla 2-4: Medidas Indoor

Ubicación	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	ARFCN	RSSNR [dB]
1	-94	-6	3350	2,8
2	-101	-6	3350	2,0
3	-109	-6	3350	1,8
4	-111	-6	3350	1,5
5	-111	-6	3350	1,5
6	-115	-7	3350	0,6
7	-105	-7	3350	1,4
8	-107	-6	3350	1,8
9	-114	-7	3350	1,8
10	-109	-6	3350	1,3
11	-108	-6	3350	2,2

12	-102	-6	3350	1,5
13	-122	-10	3350	0,6
14	-119	-8	3350	0,8
15	-120	-9	3350	0,6
16	-106	-6	3350	1,8
17	-105	-6	3350	1,8
18	-116	-7	3350	1,8
19	-119	-8	3350	1,1
20	-111	-6	3350	1,4
21	-116	-7	3350	1,5
22	-109	-6	3350	1,4
23	-117	-7	3350	0,7
24	-118	-8	3350	0,6
25	-120	-9	3350	0,3
26	-117	-7	3350	0,8
27	-131	-17	3350	0,6
28	-114	-7	3350	1,4
29	-112	-6	3350	1,7
30	-109	-6	3350	1,6
31	-111	-6	3350	1,1
32	-109	-6	3350	1,5
33	-112	-6	3350	1,1
34	-111	-6	3350	1,5
35	-121	-9	3350	0,3
36	-121	-9	3350	0,3

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En los resultados obtenidos se observa que los valores de RSRP están entre -94 y -122 ubicándose así en las dos últimas condiciones de mitad y limite celda, Los valores de RSRQ están debajo de -10 dB dando así un valor de celda excelente y por último el valor de RSSNR se encuentra en el valor de mitad de celda mostrando un valor de SNR bajo; se pudo observar que la señal mostro condiciones de mitad de celda.

3.1.4 Medidas Outdoor

Para las medidas Outdoor se ubicó a la estación base en la ventada del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica y las mediciones se las realizó en los exteriores de la facultad. En la Figura 3-12 se muestra las ubicaciones en las que se realizaron las mediciones y los resultados se presentan en la Tabla 3-.

El escenario que se usó para esta prueba estuvo conformado por el Computador 1 (Transmisor) conectado a la tarjeta USRP a la cual se le conectó en el puerto TX/RX 1 a la Antena HyperLOG 7060 y en el puerto TX/RX 2 Antena HyperLOG 30180. Se eligió usar estas antenas ya que tienen una mejor ganancia pueden brindar una mayor cobertura para las medidas Outdoor.



Figura 3-12: Exterior FIE

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

Tabla 3-4: Medias Outdoor

<i>Ubicación</i>	<i>RSRP [dBm]</i>	<i>RSRQ [dB]</i>	<i>ARFCN</i>	<i>RSSNR [dB]</i>	<i>Potencia Esperada [dBm]</i>
1	-124 – -129	-9 – -17	3350	-2,0 – -3,2	-107,18
2	-125 – -139	-9 – -14	3350	-0,2 – -9,5	-112,76
3	-123 – -125	-12 – -15	3350	-1 – -7,6	-113,2
4	-127 – -138	-17 – -20	3350	-10,6 – -13,7	-115,45
5	-122 – -125	-13 – -14	3350	-0,2 – -4,2	-117,81
6	-122 – -125	-14 – -17	3350	-0,2 – -3,4	-117,01
7	-134 – -140	-20	3350	-9,3 – -10,6	-116,16

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En los resultados se obtuvo un valor de RSRP entre -122 y -140 lo que muestra que se encuentra en el borde de celda, se tiene un valor mínimo de -13 y máximo de -20 en RSRQ lo que indica que se encuentra en mitad de celda y el valor de RSSNR se encuentra entre -2 a -12 lo que indica que está en una condición de borde de celda; con los resultados obtenidos se conoce que la señal tiene unas condiciones de borde de celda.

3.1.5 Analizador de Espectro

Para comprobar el correcto funcionamiento de la transmisión y mostrar que esta se encuentra dentro de los parámetros de funcionamiento óptimo y calidad de la señal se analizó la señal con el Analizador de Espectro, el cual permite realizar una amplia revisión de la señal con los distintos

modos LTE que este permite. La transmisión se la realizó con el escenario formado por el Computador 1 (Transmisor) conectado a la Tarjeta USRP Ettus B210, se usaron dos antenas conectadas a las tarjetas específicamente la Antena HyperLOG 7060 y la Antena HyperLOG 30180, en el Analizador de Espectro se usó la Antena VERT2450 para recibir la señal.

3.1.5.1 Power vs RB

En la Figura 3-13 se muestra la medición que se obtuvo, en el momento de la medición la señal contaba con 275 Resource Blocks activos con una utilización del 55% y una potencia del canal de -72.9 dBm.

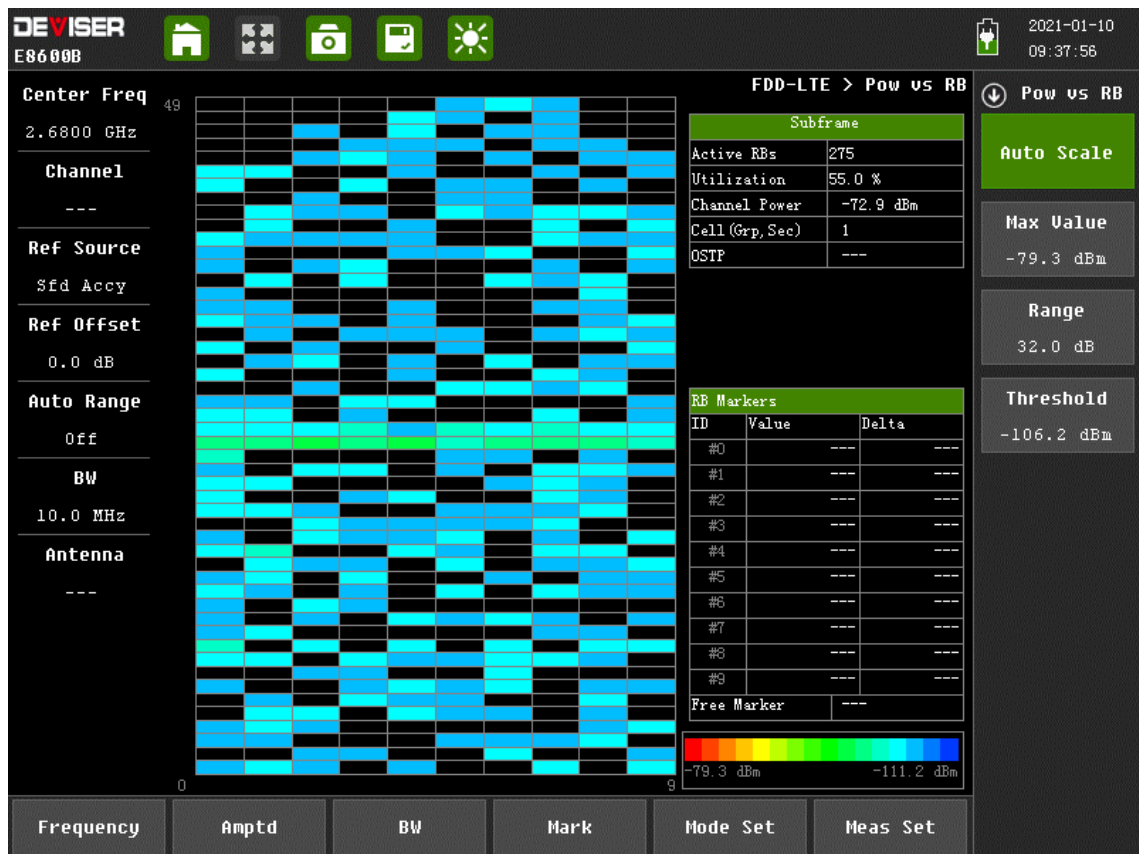


Figura 3-13: Modo Power vs RB

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.2 Constell

En este modo se obtuvo una modulación QPSK con un valor de potencia de la señal RS de -98.2 dBm, esta señal es usada para la minimización del EVM que muestra la magnitud del vector de error para todos los canales en todos los tiempos de símbolo en el intervalo de medición, en el momento de la medición se obtuvo un EVM del 11.1% con un error de cuadratura de 0.758 grados como se observa en la Figura 3-14.

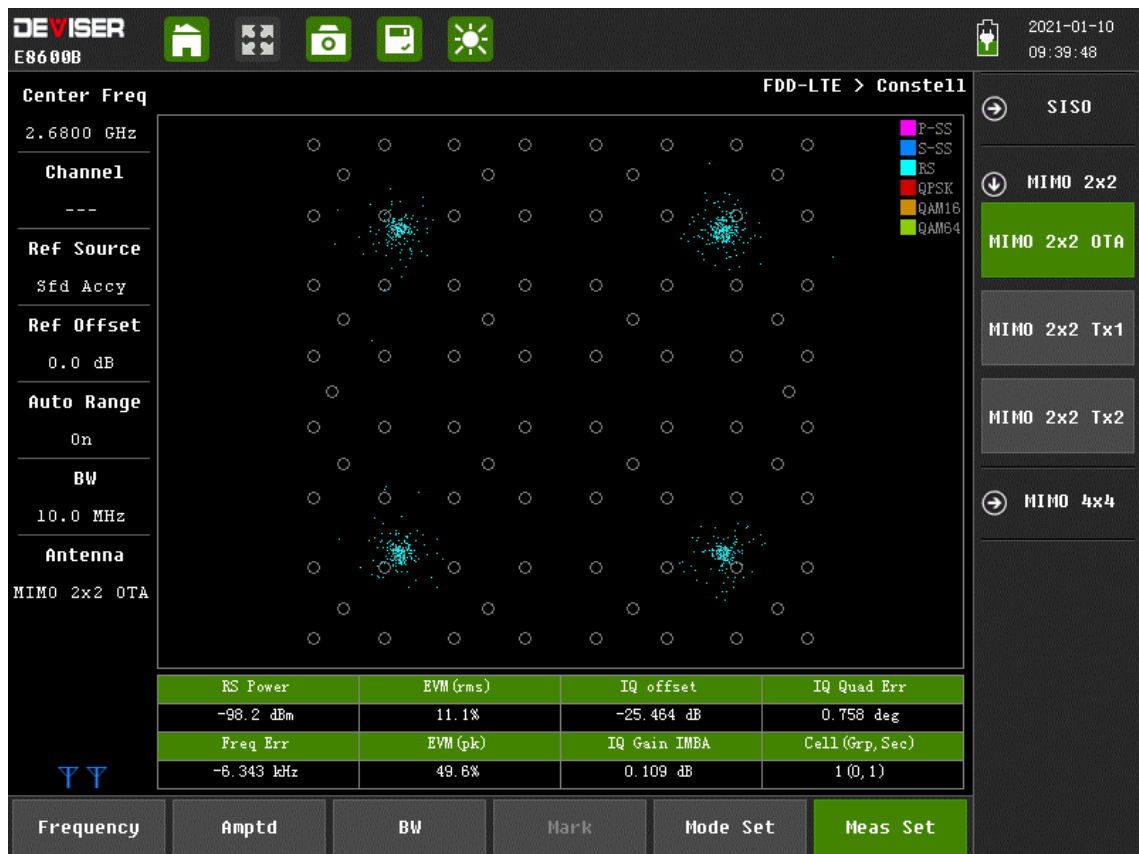


Figura 3-14: Modo Constell

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.3 Channel power

Se observa en la Figura 3-15, que en el ancho de banda de 10 MHz se tiene una potencia del canal de -65.2 dBm, lo que significa una densidad de potencia de -135.2 dBm/Hz con un pico de potencia de -70.7 dBm en la frecuencia central de 2.68 GHz.

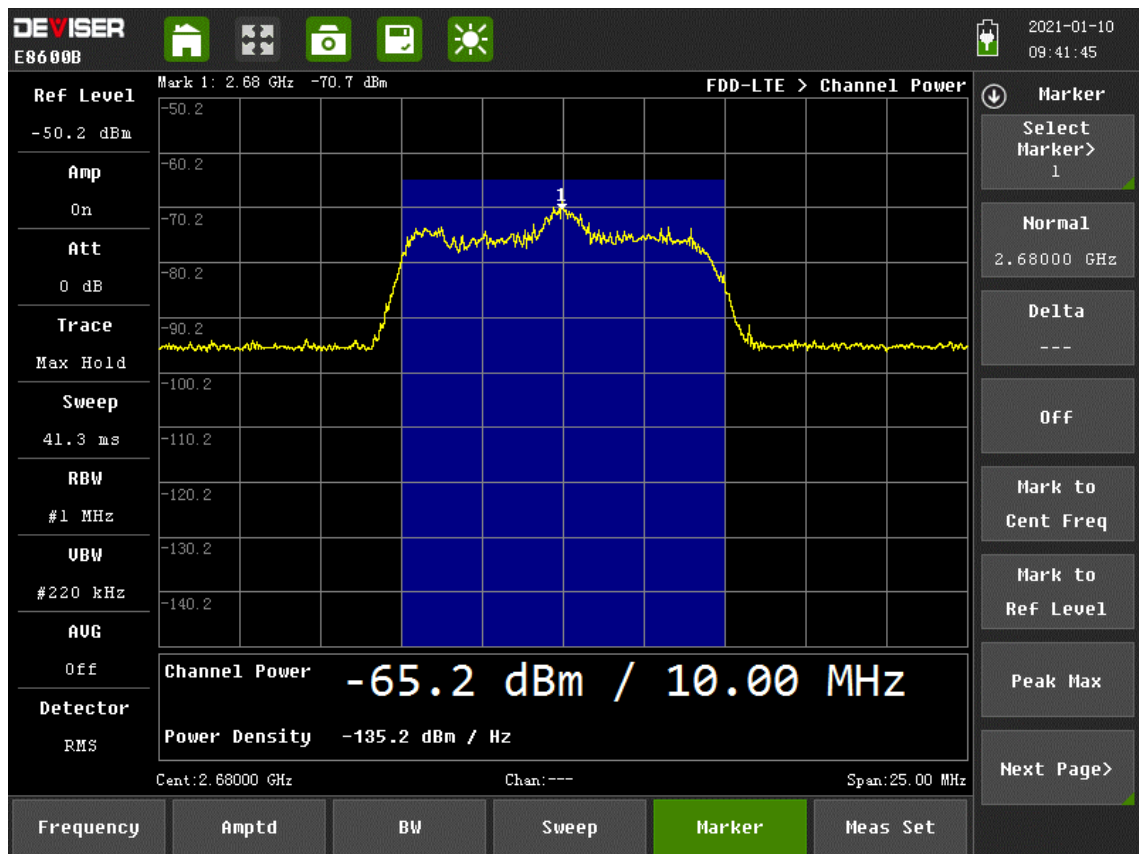


Figura 3-15: Modo Channel Power

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.4 Occupied BW

Del ancho de banda de 10 MHz con el que se teóricamente se transmite la señal se ocupa un ancho de 9.132 MHz con una potencia de -68.3 dBm teniendo así una ocupación del 99% del ancho de banda como se puede observar en la Figura 3-16.

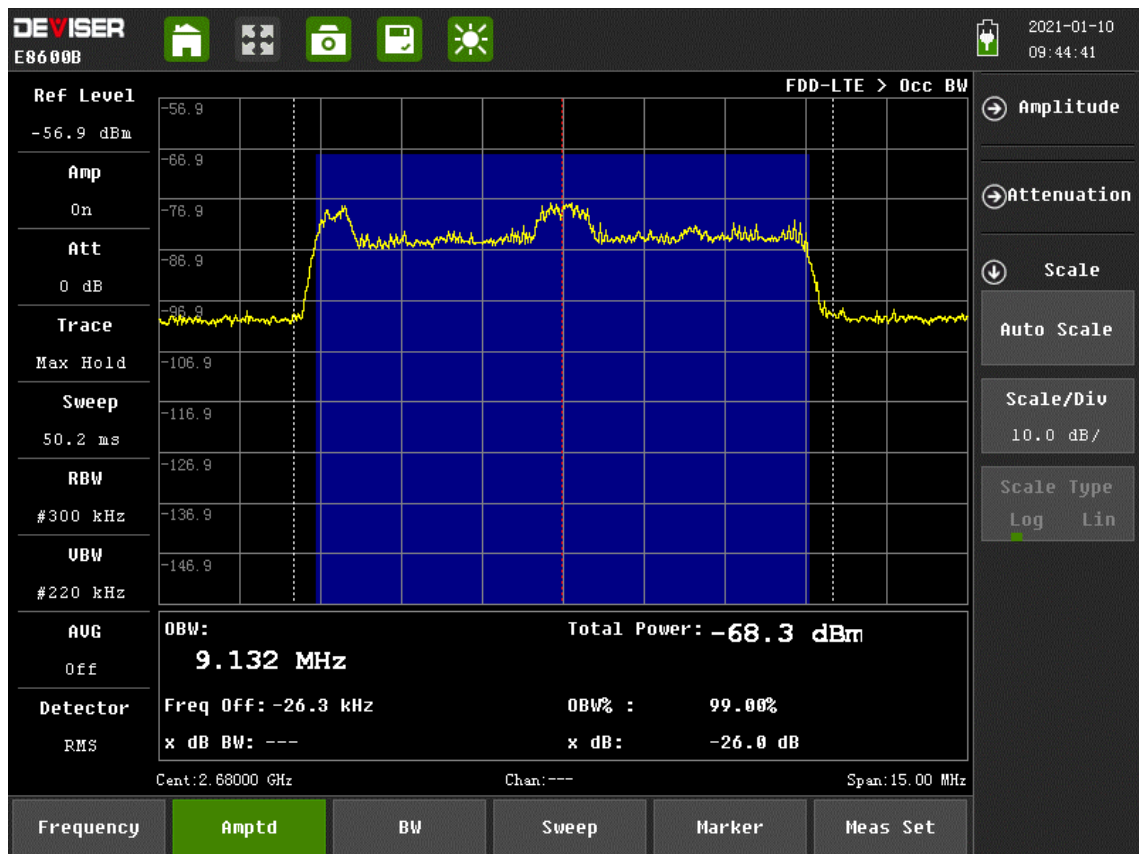


Figura 3-16: Modo Occupied BW

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.5 ACLR

ACLR es la relación entre la potencia media filtrada centrada en la frecuencia del canal asignado y la potencia media filtrada centrada en la frecuencia del canal adyacente según lo definido por el 3GPP. Se muestra que en la medición obtenida la señal pasó la prueba en cada uno de los lados ya que la interferencia es baja en el canal central y en los canales adyacentes no existe una interferencia por lo que la transmisión se realiza sin problema, se muestra en la Figura 3-17.

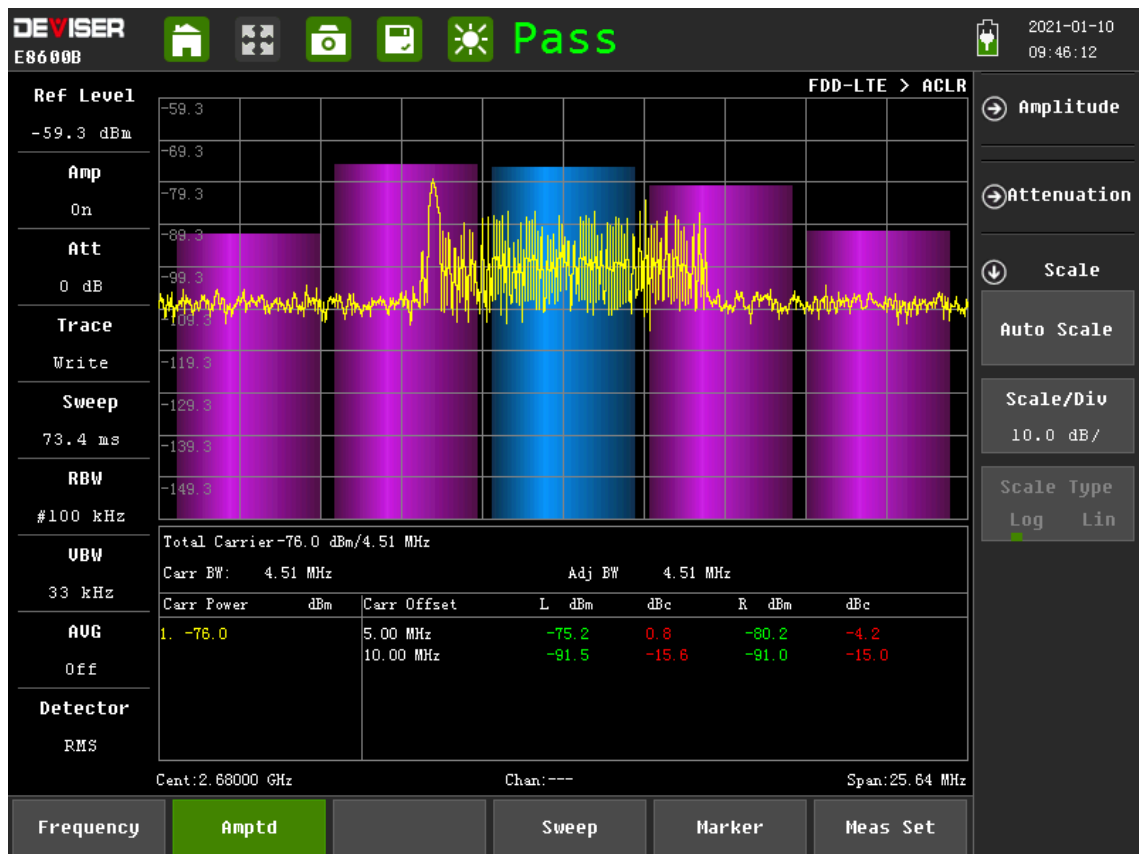


Figura 3-17: Modo ACLR

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.6 Control CH Power

En la Figura 3-18 se observa que la potencia de la señal P-SS, es la señal de sincronización primaria de una trama de enlace descendente y tiene una potencia de -91.7 dBm, la señal S-SS que es la señal secundaria de sincronización para una trama tiene una potencia de -91.6 dBm, la potencia del canal Physical Broadcast Channel (PBCH) es de -92.3 dBm, el canal Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH) que especifica el número de símbolos OFDM al comienzo de una subtrama PDCCH tiene una potencia de -92.2 dBm y las señales RS de cada antena tiene una potencia de -99.2 y -89.5 dBm.



Figura 3-18: Modo Control CH Power

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.7 Summary

En este modo se realizó un análisis para cada una de las antenas, como resultados para la antena transmisora 1 se obtuvo una potencia pico de -54.188 dBm y un promedio de potencia de -69.085 dBm; los valores de potencia de los canales LTE son aproximados a los valores analizados en el modo Control CH Power, El valor de potencia en la transmisión 16-QAM es el -87.7 dBm lo que indica que la transmisión que se está realizando en este tipo de modulación como se observa en la Figura 3-19.



Figura 3-19: Modo Summary Antena 1

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

En los resultados obtenidos por transmisión realizada con la antena 2, esta antena entrego una potencia pico de -55.204 dBm y un promedio de potencia de -69.136 dBm obteniendo así unos valores muy cercanos a los de la antena 1, al igual que con la primera antena los valores de los canales LTE son aproximados y con esta antena también se está transmitiendo con una modulación 16-QAM con una potencia de -87.7 dBm y se muestra en la Figura 3-20.



Figura 3-20: Modo Summary Antena 2

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.8 Scanner

Este modo proporciona valores ya vistos en los modos Control CH Power y Summary, pero también muestra un valor importante que es el de la relación señal – ruido, este valor tiene una potencia de 5.6 dB que haciendo referencia a Tabla 1-4: Parámetros de calidad de señal LTE se encuentra con un valor de mitad de celda y se puede ver en la Figura 3-21.



Figura 3-21: Modo Scanner

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.9 SEM

En este modo se realizó una prueba a la señal a ver si esta cumple a con la máscara diseñada para LTE específicamente para las bandas E-UTRA superiores a 1 GHz en la cual se observa que la señal se encuentra centrada dentro del canal de 10 MHz y en los canales laterales la potencia se encuentra bajo los márgenes pasando así la prueba de forma exitosa como se observa en la Figura 3-22.

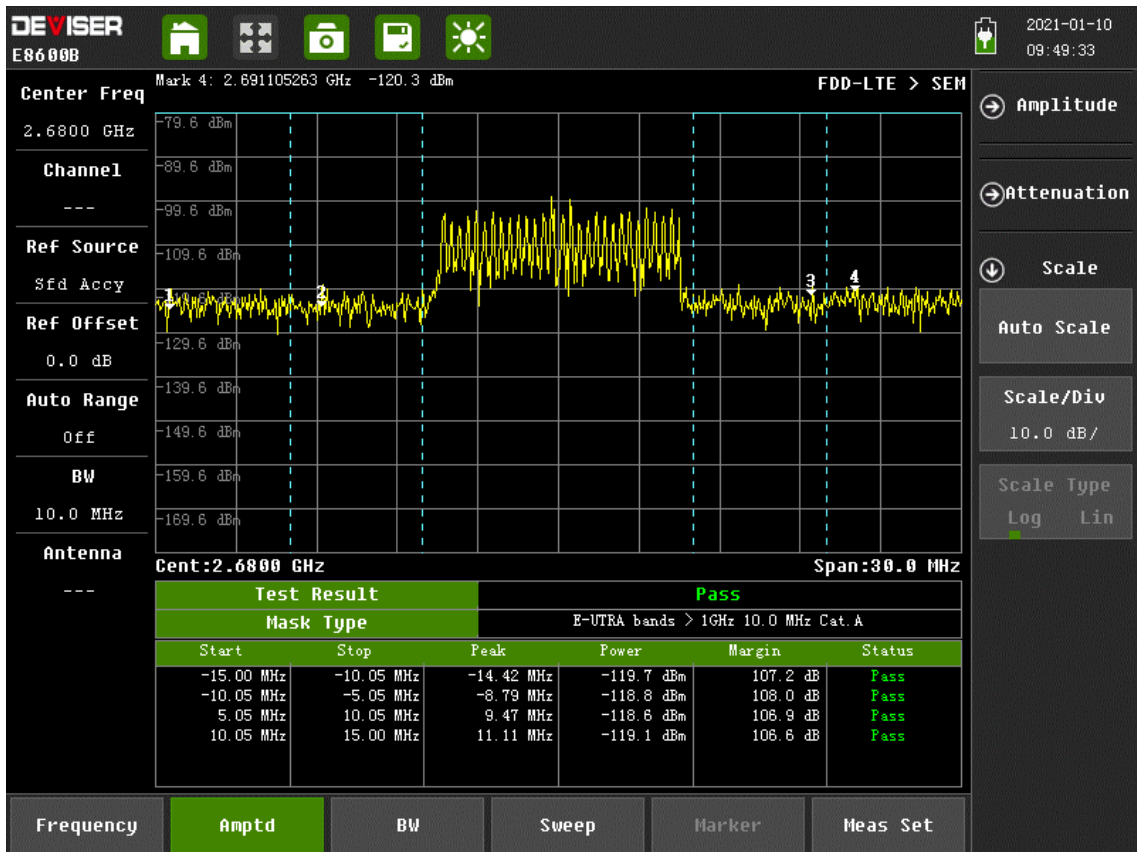


Figura 3-22: Modo SEM

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.10 Co-Ch-Interference

En la Figura 3-23 se observa que existe varios puntos de interferencia, existe una marca en la frecuencia de 4.5 MHz con el 4.5% de interferencia, se puede notar que el valor máximo de interferencia en el cuadro entre 14.4% y 16.8% aproximadamente en 4.4 MHz

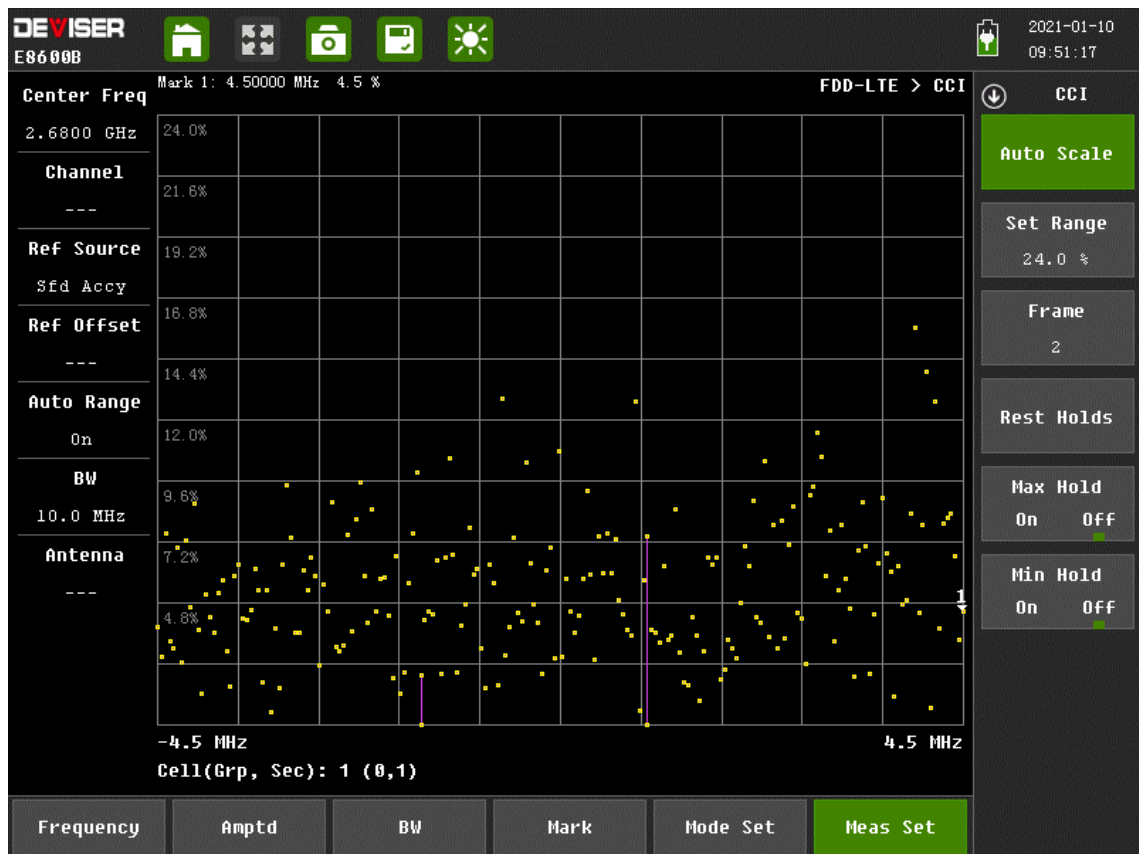


Figura 3-23: Modo Co-Ch-Interference

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.11 MIMO

Este modo muestra el funcionamiento de la transmisión MIMO, se observa que la antena 0 (antena transmisora 1) entrega una potencia de -96.8 dBm y la antena 1 (antena transmisora 2) entrega una potencia de -92.6 dBm teniendo así una mejor potencia con una diferencia de 4.2 dB, el tiempo de Aling o sincronización es de 0.0 ns por lo tanto tienen un funcionamiento correcto y las antenas no se interfieren entre sí como se puede ver en la Figura 3-24.



Figura 3-24: Modo MIMO

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

3.1.5.12 Carr Agg

En el modo de portadoras agregadas se puede observar que se transmite con una portadora única con la frecuencia centrada es decir la frecuencia central se encuentra en 2.68 GHz y no existe un desplazamiento además muestra la información de la potencia con la que llega la señal de cada antena como ya se ha visto en los anteriores modos y se muestra en la Figura 3-25.



Figura 3-25: Modo Carr Agg

Realizado por: Jose A, Burgos Z, 2021.

CONCLUSIONES

Comparando la transmisión MIMO con la transmisión SISO se tiene una mejor RSRP con MIMO con un valor aproximado de -106,9 dBm frente a 107,6 dBm de la transmisión SISO, el valor de SNR es mejor en la transmisión SISO con un valor aproximado de 8,7 dBm frente e MIMO con un valor de 7,7 dB.

En las mediciones Indoor se obtuvo un valor promedio de RSRP de -112,56 dBm mostrando una condición de borde de celda, un valor promedio de RSRQ de -7,14 dB indicando una condición excelente y un valor promedio de RSSNR de 1,29 dB mostrando una condición de mitad de celda; se puede concluir que la señal mostro una condición de borde de celda en las mediciones Indoor.

En las mediciones Outdoor se obtuvo un valor promedio de RSRP de -129,43 dBm mostrando una condición de borde de celda, un valor promedio de RSRQ de -15,71 dB indicando una condición de mitad de celda y un valor promedio de RSSNR de -6,74 dB mostrando una condición de borde de celda; tomando en cuenta la peor de las condiciones la señal mostro una condición de borde de celda en las mediciones Outdoor.

Los valores obtenidos en el análisis de la señal se destacan los valores de la ocupación del ancho de banda con una ocupación de 9,123 MHz sobre el canal de 10 MHz, el tiempo de Align entre las antenas de 0,0 ns y el cumplimiento de la máscara de LTE para las bandas E-UTRA superiores a 1 GHz.

RECOMENDACIONES

Para futuras implementaciones se recomienda en la transmisión usar un amplificador de potencia para altas frecuencias que mejoraría significativamente la potencia de la señal recibida brindando un mejor desempeño a la red además de mayor cobertura.

Continuar con la ejecución de pruebas con la red LTE implementada ya que brinda un entorno de aprendizaje donde se puede comprender el funcionamiento esta tecnología de comunicación móvil. Con la red LTE implementada se pueden realizar diferentes prácticas de laboratorio en las que los estudiantes pueden comprobar el proceso de completo de una transmisión LTE desde el punto de vista de Estación central mostrando cada uno de los pasos y solicitudes de conexión, también pueden comprobar el proceso de conexión de un teléfono móvil a la red LTE, además la posibilidad de realizar mapas de cobertura y mediciones de parámetros radioeléctricos.

El software srsRAN también da la posibilidad de emular afectaciones al canal de transmisión, permitiendo así tener un canal con desvanecimientos temporales, ruido blanco añadido, retardos, fallas del radioenlace y una simulación del efecto Doppler en un tren de alta velocidad lo que sería muy útil en un entorno de aprendizaje.

Continuar con la investigación del software srsRAN para futuras implementaciones de redes 4G y en un futuro de redes 5G.

BIBLIOGRAFÍA

AARONIA AG. *HyperLOG 30180: Antenas log-periódicas hasta 18Ghz Línea HyperLOG 30xxx*. [En línea]. Aaronia. 2022. [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://aaronia-shop.com/productos/breitbandantennen-hyperlog30180>.

AARONIA AG. *HyperLOG® 7060*. [En línea]. Aaronia. 2022. [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://aaronia-shop.com/productos/breitband-antenne-hyperlog7060>.

CUBERO, R. Planificación de una Red 4G. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, Madrid-España, 2017. [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: https://oa.upm.es/38378/7/PFG_RUBEN_MARTIN_CUBERO.pdf.

DEGOLLADO, E. Análisis de Propagacion en Ambientes Urbanos Afectador por Pérdida por Trayectoria y Desvanecimiento Lento (Slow Shadowing) de la Señal de Comunicaciones Móviles en la Banda AWS. [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México-México, 2017. [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/22906/1/AN%C3%81LISIS%20DE%20PROPA GACI%C3%93N%20EN%20AMBIENTES%20URBANOS%20AFECTADOS%20POR.pdf>.

DEVISER. *E8400/E8600B SpectrumPROFILERTM*. [En línea] 2020. Disponible en: https://www.deviserinstrument.com/uploads/3/4/7/9/34796732/e8400b_datasheet.pdf.

FIGUEIRA, Y. Simulación de la Codificación de Canal Sobre un Sistema de Comunicaciones Móviles Basado en el Estándar LTE. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela. 2017. [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/20086/1/Cuerpo%20de%20la%20Tesis%20.pdf>.

HUIDROBO, M. 2014. *Comunicaciones móviles: sistemas GSM, UMTS y LTE*. Madrid-España: RA-MA Editorial, 2014. pp. 249-311

JIMÉNEZ, Jesús & OCHOVO, Jaime. Evaluación Comparativa de Redes Móviles. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, Madrid-España, 2017. [Consulta: 22 octubre 2021]. Disponible en: https://oa.upm.es/49728/1/PFC_JESUS_JIMENEZ_MOTILLA_JAIME_OCHOVO_PAVON.pdf.

LEMA, F. Estudio para la Recomendación de Parámetros Técnicos a Utilizarse en el Control de Redes LTE 4G en Ecuador. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito-Ecuador, 2017. [Consulta: 21 octubre 2021]. Disponible en: <https://1library.co/document/zwv4vx1q-estudio-recomendacion-parametros-tecnicos-utilizarse-control-redes-ecuador.html>.

MENDOZA, Norma & AGUALONGO, Luis. Diseño e Implementación de un Sistema de Medición de Patrones de Irradiación de Antenas en el Rango de Frecuencias de hasta 6 GHz Utilizado Taarjetas USRP. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba-Ecuador, 2017. [Consulta: 30 octubre 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8436/1/98T00183.pdf>.

MERCHÁN, Christian. Diseño e Implementación de un Sistema Radar Utilizando Sistema SDR a Través de Tecnología USRP para Aplicaciones Topográficas. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba-Ecuador, 2016. [Consulta: 25 octubre 2021]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/234580743.pdf>.

PASTOR, Ignacio & VALENTE, João. "Muestreo adaptativo aplicado a la robótica: Revisión del estado de la técnica". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 2, (2017) pp. 123-132.

MUÑOZ, Wilmar, y otros. "Red de comunicaciones móviles mediante radio definida por software y USRP". *Revista Espacios* [En línea] 2018. [Consulta: 19 de octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n26/18392624.html>.

National Instrument. *LP0965 Antenna Ettus Research*. [En línea] 2022. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/lp0965/>.

National Instrument. *VERT2450 Antenna Ettus Research*. [En línea] 2022. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/>.

National Instruments. *USRP B200/B210 Bus Series*. [En línea] 2019. Disponible en: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf.

National Instruments. *USRP B210 (Board Only)*. [En línea] 2022. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.

RICO, Rogelio & SALAS, Saul. *SDR y GNU Radio como plataforma para un laboratorio de comunicaciones digitales.* [En línea] 2019. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/journal/5122/512261374007/html/>.

RODRIGUEZ, Paco. *Sistemas de comunicaciones móviles: de la tercera a la cuarta generación.* [En línea] 2011. Disponible en:
<https://www.xatakamovil.com/conectividad/sistemas-de-comunicaciones-moviles-de-la-tercera-a-la-cuarta-generacion>.

SOFTWARE RADIO SYSTEMS. *srsRAN 21.10 Documentation.* [En línea] 2022. Disponible en: https://docs.srslte.com/en/latest/app_notes/source/.

TABOADA, Patricia. *Sistemas LTE para Trenes de Alta Velocidad.* [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Madrid-España. 2016. [Consulta: 5 noviembre 2021]. Disponible en:
https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/669997/Taboada_Perez_Patricia_tfg.pdf?sequence=1.

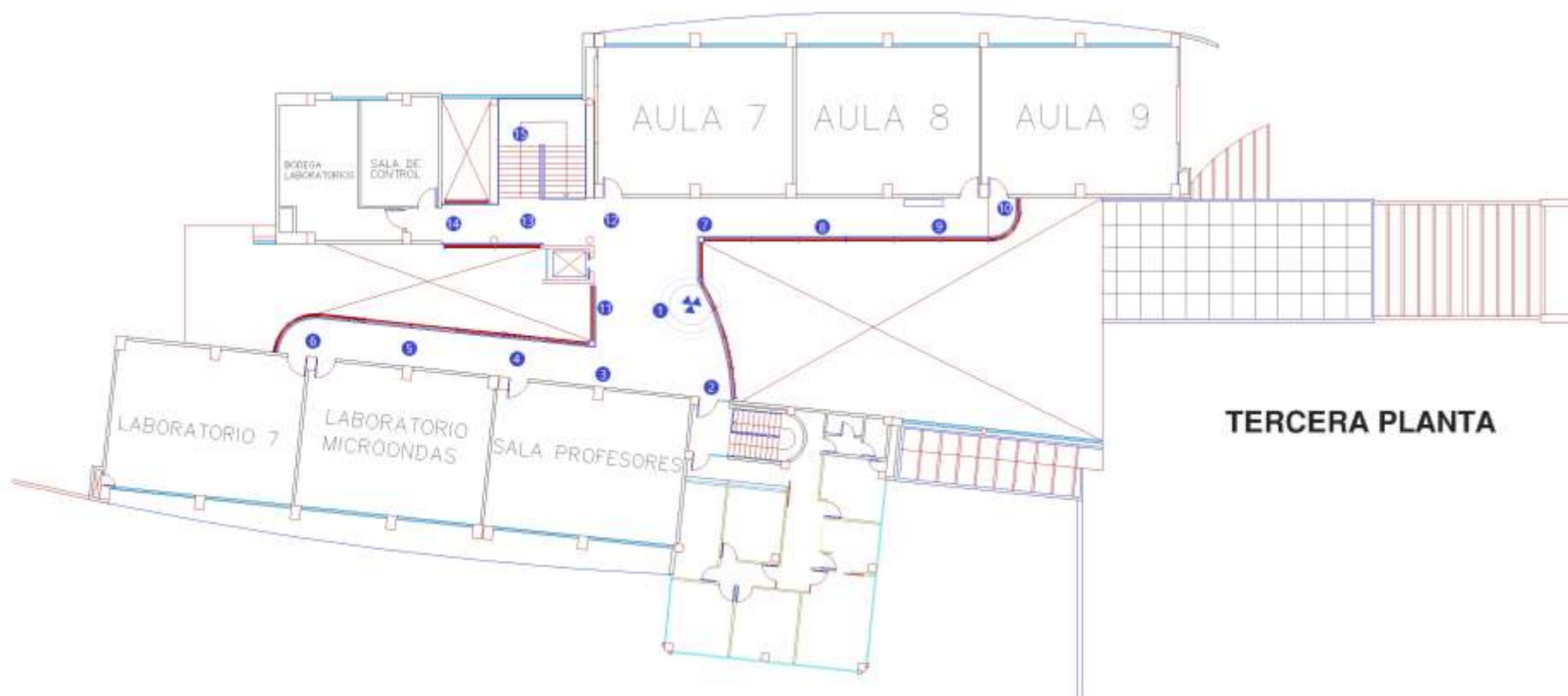
VACA, Joanna. *Simulación del Modelo de Propagación Cost 231 Walfisch - Ikegami para el Canal Móvil de Bandas 4G.* [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Ambato-Ecuador, 2015. [Consulta: 6 diciembre 2021]. Disponible en:
https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/19382/1/Tesis_t1094ec.pdf.

VÁSQUEZ, Jeremy. *Diseño de una red móvil 4G con el operador Telefónica de Costa Rica, para brindar un mejor servicio de telefonía celular en la zona rural Horquetas de Sarapiquí, en los pueblos San Bernardino, Las Vegas, Los Ángeles y Finca 10.* [En línea] (Trabajo de titulación). (Licenciatura) Uiversiadd Latina de Costa Rica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Heredia-Costa Rica 2020. [Consulta: 15 diciembre 2021]. Disponible en:
https://repositorio.ulatina.ac.cr/bitstream/20.500.12411/260/2/TFG_Ulatina_Jeremy_Vasquez_Suazo.pdf.

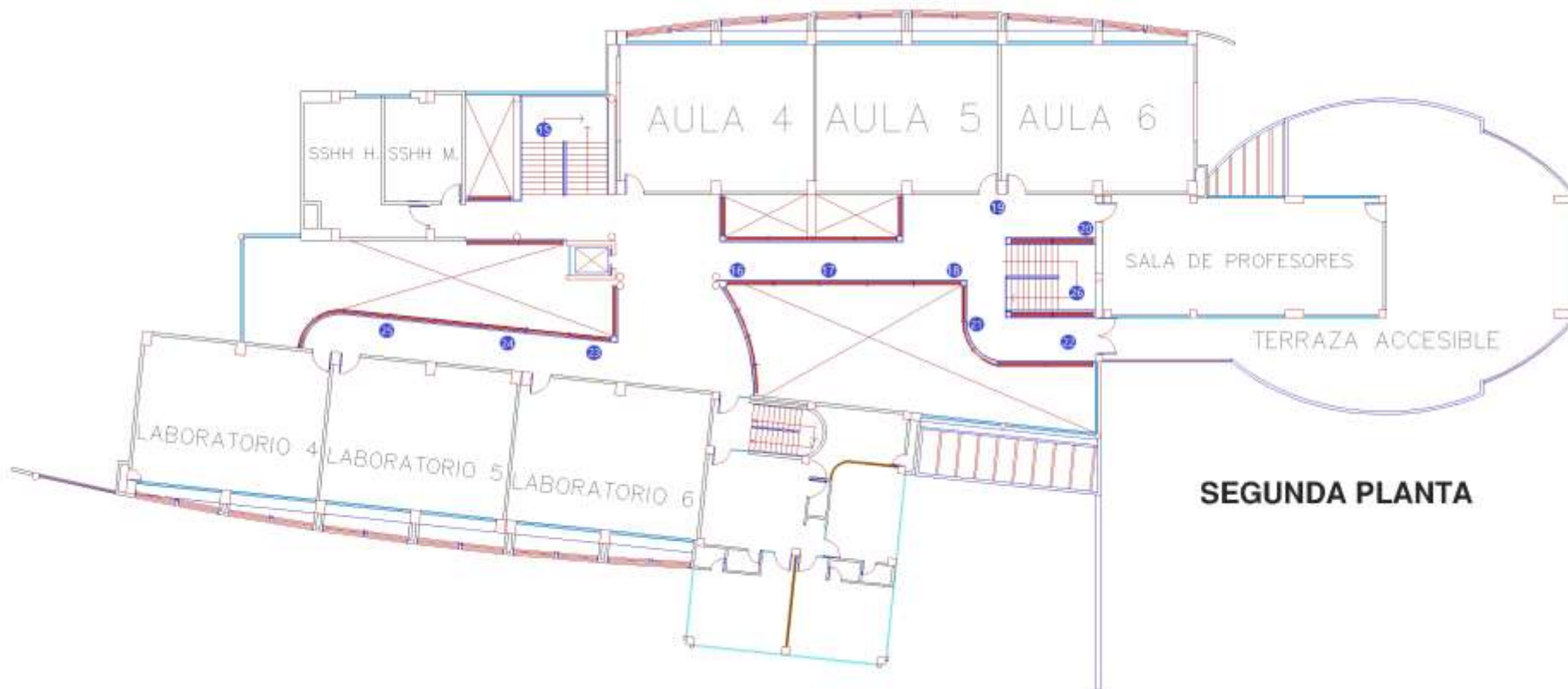
ZARRINKOUB, H. *Understanding LTE with MATLAB : from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation.* Massachusetts-USA : Wiley, 2014. pp. 1-46

ANEXOS

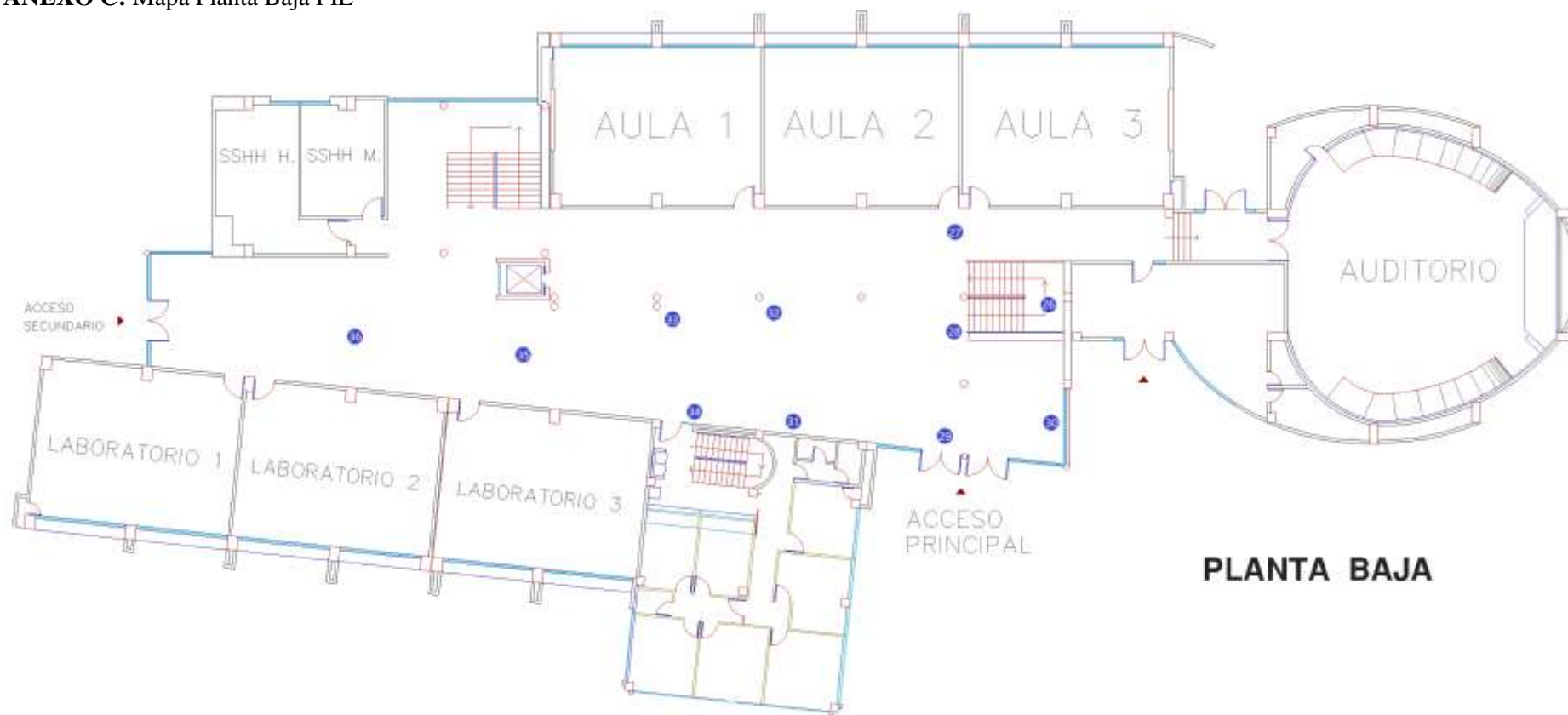
ANEXO A: Mapa Tercera Planta FIE



ANEXO B: Mapa Segunda Planta FIE



ANEXO C: Mapa Planta Baja FIE



PLANTA BAJA



epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 29 / 06 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: JOSE ALEJANDRO BURGOS ZUMBA
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: TELECOMUNICACIONES
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES
f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc.



1195-DBRA-UPT-2022