



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE APRENDIZAJE DE
COMUNICACIÓN MÓVIL 4G MEDIANTE DISPOSITIVOS SDR Y
SOFTWARE LIBRE”**



AUTOR: Jefferson Marcelo Malte Noguera
DIRECTOR: MSc. Edgar Alberto Maya Olalla
Ibarra-Ecuador

2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004817282		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Malte Noguera Jefferson Marcelo		
DIRECCIÓN:	Ibarra- Vicente Fierro 1-122		
EMAIL:	jmmalten@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2 605914	TELÉFONO MÓVIL:	0990953891

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO DE UN SISTEMA DE APRENDIZAJE DE COMUNICACIÓN MÓVIL 4G MEDIANTE DISPOSITIVOS SDR Y SOFTWARE LIBRE
AUTOR (ES):	Malte Noguera Jefferson Marcelo
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	28 de febrero 2024
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Telecomunicaciones
ASESOR /DIRECTOR:	MSC. Edgar Maya

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de febrero de 2024

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Jefferson Marcelo Malte Noguera

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de febrero de 2024

MSC. MAYA OLALLA EDGAR ALBERTO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) 
.....
MSC. Edgar Maya
C.C.: 1002702197

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diseño de un sistema de aprendizaje de comunicación móvil 4g mediante dispositivos SDR y software libre” elaborado por Jefferson Marcelo Malte Noguera, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

MSC. Edgar Maya
C.C.: 1002702197

(f):.....

MSC. Jaime Michilena
C.C.: 1002198438



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

A mis padres y familiares, cuyo amor, apoyo condicional y aliento han sido la fuerza impulsadora que me ha guiado cada paso de mi carrera académica. Su sacrificio y dedicación es el fruto de este logro trascendental. A ustedes que creyeron en mí incluso cuando yo dudaba, les dedico este trabajo con profunda gratitud y aprecio.

Malte Noguera Jefferson Marcelo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y ser la guía para superar cada desafío personal y académico. A mis padres José Malte y Elvia Noguera, quienes han sido motivo de inspiración y dedicación, gracias a su sacrificio y aliento que me permitieron cumplir mis metas.

A mi novia Tanya por su paciencia y amor durante este proceso, tu apoyo ha sido fundamental para superar momentos difíciles, gracias por estar a mi lado y ser mi compañera en esta travesía.

A mis hermanos y sobrinos, por su respaldo y amor constante que me han brindado.

A los ingenieros y amigos de la carrera, agradezco por compartir conocimientos y experiencias, su colaboración ha sido fundamental en mi crecimiento académico y profesional.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación aborda el desarrollo e implementación de un sistema de comunicación móvil 4G, con el objetivo de reforzar los conocimientos teóricos-prácticos de los estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones mediante el diseño de prácticas de laboratorio enfocadas a esta tecnología de comunicación móvil. Este proyecto se realiza con la metodología en cascada, que permite identificar los requisitos del sistema, planificar el diseño de la red, integrar la implementación de prácticas para verificar su funcionamiento, realizar pruebas y analizar los resultados obtenidos. Los resultados de cada práctica de laboratorio obtenidos permiten identificar correctamente el modo de operación de la red 4G permitiendo recopilar y elaborar un documento que reúne todas las prácticas de laboratorio. Este documento sirve como un registro completo de las actividades realizadas y da una valiosa referencia para futuros estudios y aplicaciones prácticas de la tecnología de comunicación móvil de cuarta generación.

Palabras clave: Comunicación móvil 4G, Arquitectura 4G, Emulador, Radio definida por software, OpenAirInterface.

ABSTRACT

The present degree work addresses the development and implementation of a 4G mobile communication system, with the aim of reinforcing the theoretical-practical knowledge of students of the Telecommunications career through the design of laboratory practices focused on this mobile communication technology. . . This project is carried out with the waterfall methodology, which allows identifying the system requirements, planning the network design, integrating the implementation of practices to verify its operation, performing tests and analyzing the results obtained. The results of each laboratory practice obtained allow the mode of operation of the 4G network to be correctly identified, allowing the compilation and preparation of a document that brings together all the laboratory practices. This document serves as a complete record of the activities carried out and gives a valuable reference for future studies and practical applications of fourth generation mobile communication technology.

Keywords: 4G Mobile Communication, 4G Architecture, Emulator, Software Defined Radio, OpenAirInterface.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo I	1
1.1 Problema.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Alcance.....	4
Capitulo II.....	6
2.1 Introducción a 4G -LTE	6
2.1.1 Evolución de sistemas móviles	6
2.1.2 ITU	8
2.1.3 IMT-Advanced.....	8
2.1.4 Estandarización LTE.....	9
2.1.5 3GPP	9
2.2 Descripción de un sistema 4G.....	9
2.2.1 LTE	10
2.2.2 LTE-Advanced.....	10
2.2.3 Arquitectura del sistema LTE	11
2.3 Interfaz aérea: Capa física.....	18
2.3.1 Procesamiento de capa física.....	18

2.3.2	Asignación de recursos	20
2.3.3	Tecnologías de Múltiple Acceso	21
2.3.4	Estructuras con Varias Antena (MIMO)	22
2.3.5	Canales Físicos LTE	23
2.4	Interfaz aérea: Pila de protocolos	24
2.4.1	Control de acceso al medio (MAC)	25
2.4.2	Control de enlace de radio (RLC)	26
2.4.3	Protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP)	28
2.4.4	Control de recursos de radio (RRC)	28
2.4.5	Mapeo entre canales	29
2.5	Señalización de capa superior	30
2.5.1	Gestión de movilidad del EPS (EMM)	31
2.5.2	Gestión de sesiones EPS (ESM)	31
2.6	Procedimientos de acceso	32
2.6.1	Adquisición de celdas	32
2.6.2	Procedimiento de acceso aleatorio	33
2.6.3	Establecimiento de conexión	34
2.7	Dispositivos SDR	35
2.7.1	Características	36
2.7.2	Relación con la emulación de redes LTE	37

2.7.3	Dispositivos que soportan LTE.....	38
2.7.4	Software	39
2.8	OpenAirInterface.....	39
2.8.1	EURECOM	40
2.8.2	OpenAirInterface5G.....	40
2.8.3	OpenAir-CN.....	40
2.9	Metodología	41
CAPITULO III.....		42
3.1	Etapas de la metodología implementada.....	42
3.2	Análisis de requisitos	43
3.2.1	Requerimientos del sistema.....	44
3.2.2	Requerimientos de Stakeholders	45
3.2.3	Requerimientos de arquitectura.....	46
3.3	Diseño.....	48
3.3.1	Componentes del sistema	48
3.3.2	Definición de la arquitectura de red	53
3.4	Implementación.....	55
3.4.1	Instalación sistema operativo	56
3.4.2	Instalación de complementos	56
3.4.3	Instalación modulo LimeSDR.....	58

3.4.4	Instalación OpenAirInterface	58
3.4.5	Configuración eNB	61
3.4.6	Configuración EPC	63
3.4.7	Compilación y puesta en marcha	67
3.5	Pruebas y validación.....	67
3.6	Documentación y entrega.....	68
CAPITULO IV.....		69
4.1	Definición de temas de laboratorio	69
4.2	Hojas guías de prácticas de laboratorio.....	71
4.2.1	Practica 1: Configuración e implementación de elementos LTE.....	71
4.2.2	Práctica 2: Análisis del espectro LTE	74
4.2.3	Práctica 3: Análisis del protocolo LTE	77
4.2.4	Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE.....	82
4.2.5	Práctica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.....	85
4.2.6	Práctica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda	89
4.3	Desarrollo de prácticas.....	92
4.3.1	Práctica 1: Configuración e implementación de elementos LTE.....	92
4.3.2	Práctica 2: Análisis del espectro LTE	104
4.3.3	Práctica 3: Análisis del protocolo LTE	114

4.3.4	Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE.....	125
4.3.5	Practica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional:	138
4.3.6	Practica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda	150
CAPITULO V.....		163
5.1	Resultados Práctica 1: Configuración e implementación de elementos LTE ...	163
5.2	Resultados Práctica 2: Análisis del espectro LTE.....	165
5.3	Resultados Práctica 3: Análisis del protocolo LTE.....	170
5.4	Resultados Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE	176
5.5	Resultados Práctica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.....	179
5.6	Resultados Práctica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda.....	184
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		191
Conclusiones		191
Recomendaciones		192
BIBLIOGRAFIA		194
ANEXO A Instalación del sistema operativo		197
ANEXO B: Detalles de la Instalación de Complementos		197
1.	Instalación del kernel de baja latencia.....	197
2.	Configuración de la administración de energía en el BIOS	197

3.	Desactivación del escalado de frecuencia de la CPU.....	198
ANEXO C: Detalles de la Instalación del Módulo LimeSDR.....		198
1.	Instalación Soapy SDR.....	198
2.	Instalación LimeSuite.....	199
ANEXO D: Detalles de la Instalación de OpenAirInterface		200
1.	Instalación eNodeB	200
2.	Instalación EPC	201
ANEXO E: DOCUMENTO GUIA DE LABORATORIOS		203

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Interfaces EPC</i>	<i>17</i>
Tabla 2	<i>Canales físicos de enlace descendente.....</i>	<i>23</i>
Tabla 3	<i>Canales de transporte de enlace descendente y ascendente</i>	<i>26</i>
Tabla 4	<i>Canales de control.....</i>	<i>27</i>
Tabla 5	<i>Canales de trafico</i>	<i>28</i>
Tabla 6	<i>Aplicaciones destacadas de SDR</i>	<i>39</i>
Tabla 7	<i>Abreviatura de los requerimientos</i>	<i>43</i>
Tabla 8	<i>Requerimientos del sistema</i>	<i>44</i>
Tabla 9	<i>Requerimientos de Stakeholders</i>	<i>45</i>
Tabla 10	<i>Requerimientos de arquitectura</i>	<i>47</i>
Tabla 11	<i>Elección PC.....</i>	<i>49</i>
Tabla 12	<i>Características mini PC Intel NUC 8 NUC8i7HVK</i>	<i>50</i>
Tabla 13	<i>Características SDR.....</i>	<i>50</i>

Tabla 14 Elección SDR.....	51
Tabla 15 Elección UE comercial.....	52
Tabla 16 Direccionamiento de las interfaces de la red.....	54
Tabla 17 Medición de la velocidad de red	163
Tabla 18 Índices de modulación y codificación	164
Tabla 19 Mediciones relacionadas con UE.....	164
Tabla 20 Tiempo de paquetes SIB1	170
Tabla 21 Detalles paquete SIB1	171
Tabla 22 Tiempo de paquetes SI.....	171
Tabla 23 Valores de respuesta de acceso aleatorio	172
Tabla 24 Valores en Msg3.....	173
Tabla 25 Valores Msg4.....	173
Tabla 26 Proceso de conexión.....	174
Tabla 27 Parámetros de AIA.....	175
Tabla 28 Resultados prueba TCP con flujos paralelos	176
Tabla 29 Resultados prueba de rendimiento UDP.....	177
Tabla 30 Prueba de rendimiento RTT	178

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evolución de la telefonía móvil	7
Figura 2 Arquitectura del sistema LTE.....	11
Figura 3 Arquitectura equipo de usuario	12
Figura 4 Arquitectura E-UTRAN	14

Figura 5	<i>Arquitectura básica de la red troncal EPC</i>	15
Figura 6	<i>Ruta de datos de enlace descendente de capa física</i>	20
Figura 7	<i>Modos FDD y TDD</i>	22
Figura 8	<i>Pila de protocolos</i>	24
Figura 9	<i>Protocolos utilizados en las interfaces Uu y SI-MME</i>	25
Figura 10	<i>Relación entre canales del enlace descendente</i>	29
Figura 11	<i>Relación entre canales en el enlace ascendente</i>	30
Figura 12	<i>Protocolos NAS entre UE y MME</i>	31
Figura 13	<i>Adquisición de información del sistema.</i>	33
Figura 14	<i>Acceso aleatorio basado en contención</i>	34
Figura 15	<i>Proceso de conexión</i>	35
Figura 16	<i>Diagrama de bloques funcionales SDR</i>	36
Figura 17	<i>Procesos Metodología en Cascada</i>	41
Figura 18	<i>Configuraciones OpenAirInterface</i>	48
Figura 19	<i>Escenario emulador LTE</i>	53
Figura 20	<i>Diagrama de red</i>	54
Figura 21	<i>Sistema emulador LTE armado en el laboratorio</i>	55
Figura 22	<i>Diagrama de flujo del proceso de implementación</i>	56
Figura 23	<i>Diagrama de flujo compilación y puesta de marcha del emulador</i>	67
Figura 24	<i>Diagrama de conexión y topología de red</i>	72
Figura 25	<i>Diagrama de conexión y topología de red practica 2</i>	76
Figura 26	<i>Diagrama de conexión y topología de red práctica 3</i>	79
Figura 27	<i>Diagrama de conexión y topología de red práctica 4</i>	83

Figura 28	<i>Diagrama de conexión y topología de red practica 5</i>	87
Figura 29	<i>Diagrama de conexión y topología de red practica 6</i>	90
Figura 30	<i>Resultados comandos de verificación interfaz de red y SDR</i>	93
Figura 31	<i>Scripts de ejecución rápida de la red lte</i>	94
Figura 32	<i>Software de visualización de OAI</i>	95
Figura 33	<i>Validación de certificados HSS y MME</i>	99
Figura 34	<i>Disponibilidad de archivos PEM</i>	99
Figura 35	<i>Creación de base de datos</i>	100
Figura 36	<i>Estado de conexión MME</i>	100
Figura 37	<i>Tabla de estadísticas MME</i>	101
Figura 38	<i>Interfaz de red USB dongle LTE</i>	102
Figura 39	<i>Configuración USB dongle LTE</i>	103
Figura 40	<i>Conexión de UE a red LTE</i>	104
Figura 41	<i>Configuración celular</i>	105
Figura 42	<i>Descarga Phyton</i>	106
Figura 43	<i>Ingreso a variables de entorno del sistema</i>	106
Figura 44	<i>Agregar ruta de entorno para Python</i>	107
Figura 45	<i>Descarga controlador PothosSDR</i>	107
Figura 46	<i>Instalación Pothos SDR</i>	109
Figura 47	<i>Ejecución GNU Radio</i>	110
Figura 48	<i>Diagrama de bloques analizador de espectro</i>	111
Figura 49	<i>Ejecución diagrama de flujo</i>	112
Figura 50	<i>Ejecución del analizador de espectro</i>	113

Figura 51 <i>Buscar redes disponibles desde el celular</i>	114
Figura 52 <i>Activación subdirectores heurísticos</i>	115
Figura 53 <i>Activación de protocolos LTE</i>	116
Figura 54 <i>Inicio de capturas Wireshark</i>	118
Figura 55 <i>Filtrar paquetes SIB1</i>	119
Figura 56 <i>Filtro de SIB1 realizado por longitud de paquetes</i>	119
Figura 57 <i>Detalles del paquete SIB1</i>	120
Figura 58 <i>Filtrado de paquetes SI</i>	121
Figura 59 <i>Paquetes Msg</i>	121
Figura 60 <i>Parámetros Msg2</i>	122
Figura 61 <i>Parámetros Msg3</i>	122
Figura 62 <i>Parámetros Msg4</i>	123
Figura 63 <i>Conexión RRC</i>	123
Figura 64 <i>Vector de autenticación</i>	124
Figura 65 <i>Solicitud de autenticación</i>	124
Figura 66 <i>Respuesta de autenticación</i>	125
Figura 67 <i>Versión iperf3</i>	126
Figura 68 <i>Iperf3 para Windows</i>	127
Figura 69 <i>Dirección IP EPC</i>	127
Figura 70 <i>Ejecución iperf3 en Windows</i>	128
Figura 71 <i>Interfaz de red LTE</i>	128
Figura 72 <i>Transmisión de datos desde el cliente al servidor</i>	129
Figura 73 <i>Filtrado de paquetes TCP por puerto</i>	130

Figura 74 <i>Rendimiento TCP desde cliente a servidor</i>	130
Figura 75 <i>Envío de paquetes omitiendo el periodo lento</i>	131
Figura 76 <i>Envío de paquetes TCP desde el servidor al cliente</i>	132
Figura 77 <i>Envío de paquetes TCP DL con flujos paralelos</i>	133
Figura 78 <i>Prueba de rendimiento UDP</i>	134
Figura 79 <i>Envío de paquetes UDP desde el extremo del servidor</i>	135
Figura 80 <i>Envío de paquetes UDP visto desde el servidor</i>	135
Figura 81 <i>Envío de paquetes UDP con ancho de bando objeto</i>	136
Figura 82 <i>Medición de RTT</i>	137
Figura 83 <i>Bloques de procesamiento para la captura de señal LTE</i>	146
Figura 84 <i>Ancho de banda 25 PRB</i>	166
Figura 85 <i>Ancho de banda 50 PRB</i>	166
Figura 86 <i>Ancho de banda 100 PRB</i>	167
Figura 87 <i>Señal de sincronización 25 PRB</i>	167
Figura 88 <i>Señal de sincronización 50 PRB</i>	168
Figura 89 <i>Señal de sincronización 100 PRB</i>	168
Figura 90 <i>Uso del ancho de banda para 25 PRB</i>	169
Figura 91 <i>Uso del ancho de banda para 50 PRB</i>	169
Figura 92 <i>Uso del ancho de banda para 100 PRB</i>	169
Figura 93 <i>Uso del ancho de banda prueba de velocidad baja</i>	170
Figura 94 <i>Solicitud de autenticación y respuesta de autenticación</i>	176
Figura 95 <i>Pruebas de desplazamiento de tiempo y frecuencia</i>	179
Figura 96 <i>Efecto de error de LCP0 real y LCP1 asumido</i>	180

Figura 97 <i>Efecto de error de LCPI real y LCPI0 asumido</i>	180
Figura 98 <i>10 símbolos OFDM de señal LTE real</i>	181
Figura 99 <i>Acercamiento de picos señal LTE real</i>	182
Figura 100 <i>Función objetivo de la estación temporal símbolo 1</i>	182
Figura 101 <i>Función objetivo de la estación temporal símbolo 2</i>	183
Figura 102 <i>Función objetivo de la estación temporal símbolo 3</i>	183
Figura 103 <i>Magnitud y fase de PSS</i>	184
Figura 104 <i>Autocorrelación para secuencias Zadoff-Chu</i>	186
Figura 105 <i>Correlación cruzada y autocorrelación</i>	187
Figura 106 <i>Modificación índice de raíz</i>	187
Figura 107 <i>Correlación cruzada señal LTE con $u = 29$</i>	188
Figura 108 <i>Correlación cruzada señal LTE con $u = 34$</i>	189
Figura 109 <i>Secuencias pares e impares para la señal LTE capturada en la subtrama 0</i>	189
Figura 110 <i>Secuencias pares e impares para la señal LTE capturada en la subtrama 5</i>	190

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1) Modelo de señal recibida $r(k)$	139
Ecuación (2) Estimación máxima verosimilitud para el retardo temporal.....	141
Ecuación (3) Estimación máxima verosimilitud para el desplazamiento frecuencial .	142
Ecuación(4) secuencia Zadoff-Chu.....	151
Ecuación (5) Ecuación señal de sincronización secundaria.....	156

Ecuación (6) Indices m_0 y m_1	156
Ecuación (7) Secuencias $s_0(m_0)(n)$ y $s_1(m_1)(n)$	157
Ecuación (8) Generación de la secuencia binaria $\tilde{s}(n)$	157
Ecuación (9) Secuencias de aleatorización $c_0(n)$ y $c_1(n)$	157
Ecuación (10) Generación de la secuencia binaria $\tilde{c}(n)$	157
Ecuación (11) Secuencias $z_1^{(m_0)}(n)$ y $z_1^{(m_1)}(n)$	158
Ecuación (12) Generación de la secuencia binaria $\tilde{z}(n)$	158

Capítulo I

INTRODUCCION

En este capítulo, se presentará una breve introducción al proyecto propuesto, que abordará; la problemática de investigación, justificación, sus objetivos tanto generales como específicos, el alcance y otros aspectos relevantes.

1.1 Problema

La carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte busca formar ingenieros competentes, críticos, humanistas, líderes y emprendedores con responsabilidad social. Para desarrollar estos conocimientos y competencias la carrera cuenta con 4 laboratorios entre uno de estos se encuentra el laboratorio de redes en el cual se llevan a cabo diferentes practicas utilizando equipos como ruteadores, switches herramientas de verificación de conectividad, módulos y terminales para la transmisión de data relacionando así el conocimiento teórico con prácticas de laboratorio (UTN, 2022). Al buscar la mejora continua del plan académico se han adquirido equipos con el fin de reforzar la parte práctica de los estudiantes de la carrera, entre estos equipos se pueden mencionar Radios Definidos por Software.

En la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones se imparte la materia de redes móviles en la cual se adquiere conocimiento sobre los diferentes estándares y generaciones existentes de redes de comunicación móvil, las prácticas de laboratorio desarrolladas en esa materia no se basan en equipos físicos que ayuden a fortalecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes, por lo cual existe una falta de estudio práctico, además, los dispositivos SDR adquiridos al ser equipos nuevos presentan un desconocimiento en el manejo y mantenimiento por parte de algunos estudiantes y docentes de la carrera.

Ya que, el estudio de tecnologías móviles, en especial 4G, debe ser realizado de forma intensiva al ser la tecnología que predomina en la actualidad, se plantea diseñar un sistema de aprendizaje de comunicación móvil 4G mediante dispositivos SDR y software libre, cuyo fin es reforzar los conocimientos teóricos-prácticos de los estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones.

1.2 Justificación

Las redes de comunicaciones móviles han realizado un gran avance desde la aparición de los primeros estándares, atravesando por diferentes generaciones con el fin de prestar los servicios que demandan los usuarios, la tecnología 4G busca proporcionar alta velocidad, alta calidad, servicio de bajo coste para servicios de datos y voz. Las conexiones móviles 4G son la base de la industria móvil en América Latina ya que representará un 70% de las conexiones totales a finales de 2025(Gsma, 2021).

En Ecuador la tecnología 4G comenzó a funcionar desde 2014, sin embargo, el cambio hacia esta tecnología se lo ha realizado paulatinamente. El Gobierno en su plan nacional de desarrollo busca cerrar la brecha digital, incrementando la cobertura poblacional con tecnología 4G o superior, dando conectividad a todo el territorio nacional. El porcentaje de cobertura poblacional con tecnología 4G en el año 2020 era de 60.74% y la meta a cumplir para 2025 es del 92% de cobertura a nivel nacional. Para llevar a cabo este plan de ampliación de cobertura de redes 4G en todas las áreas geográficas se ha dispuesto que las áreas que dispongan de SMA con tecnologías 2G y 3G migren a la tecnología 4G. (Ministerio de Telecomunicaciones, 2021). La carrera de ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte en su misión de formar ingenieros competentes ejecuta procesos que permiten mantener los conocimientos científicos y de innovación, por tal motivo la implementación de un módulo de aprendizaje enfocado a tecnología de comunicación móvil 4G, fomenta al

estudiante el estudio de esta tecnología y permite reforzar los conocimientos teóricos-prácticos además de brindar herramientas útiles para el desarrollo del perfil profesional, el estudiante al desarrollar las prácticas de laboratorio propuestas no solo estará aprendiendo sobre comunicación móvil 4G, también desarrollará conocimiento en dispositivos de Radio Definida por Software, los cuales permiten realizar una infinidad de aplicaciones abriendo así el campo de las telecomunicaciones para la incursión de nuevos proyectos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de aprendizaje de comunicación móvil 4G mediante una emulación de red, utilizando dispositivos SDR y software libre basado en el estándar LTE de 3GPP, para reforzar el estudio teórico-práctico de redes móviles de los estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad técnica del Norte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información mediante una investigación bibliográfica sobre tecnología de telefonía móvil 4G y el uso de hardware y software para la emulación de una red basada en el estándar LTE de 3GPP.
- Diseñar un entorno emulado de una red móvil 4G utilizando dispositivos SDR y software libre.
- Implementar un conjunto de prácticas de laboratorio mediante un entorno emulado de una red móvil 4G para la materia de redes móviles.
- Desarrollar un documento con la recopilación de las guías de laboratorio desarrolladas.

1.4 Alcance

Este proyecto tiene como finalidad establecer una propuesta de prácticas de laboratorio sobre tecnología de comunicación móvil de cuarta generación mediante un sistema emulador de red 4G para la materia de redes móviles de la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte, con la intención de reforzar el conocimiento teórico-práctico adquirido en esta tecnología de comunicación móvil debido a su gran importancia en la actualidad.

El desarrollo de este proyecto se lo realizará utilizando la metodología en cascada, en su prima fase se realizará un análisis de requerimientos, donde se recopilará información de los requisitos para llevar a cabo el proyecto, donde se detallará los elementos que conforman una arquitectura de red móvil 4G, basándose en el estándar LTE de la norma 3GPP Release 10, además de hardware y software que se utilizarán para llevar a cabo la emulación de este.

A continuación, se realizará el diseño de una red móvil 4G utilizando dispositivos SDR que permitan emular las partes que conforman la arquitectura 4G, como son: la parte de radio conocida como E-UTRAN, la cual está conformada por el equipo de usuario (UE) y la estación base que se encarga de proporcionar la interfaz de radio conocida como Evolved Node B (eNB). Se utilizará el software Open Air Interface (OAI), el cual es un software de código abierto y libre basado en el estándar LTE de 3GPP que permitirá realizar la configuración de la red LTE de extremo a extremo es decir el acceso de radio implementada en el eNodeB como en el equipo de usuario y la red de núcleo EPC (OpenAirInterface, 2022).

Se implementará un conjunto de 6 prácticas de laboratorio para afianzar de una manera adecuada los conocimientos teóricos-prácticos adquiridos por los estudiantes, donde se verán temas como: configuración e implementación de los elementos de una red

4G LTE, análisis de protocolo LTE, evaluación del rendimiento de la red, búsqueda de celdas LTE, recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional y un análisis de espectro LTE.

Una vez finalizada la etapa de implementación se presentará un documento que recopile todas las prácticas de laboratorio que permitan a los estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones poder trabajar con el sistema emulador de red 4G de una forma adecuada para poner en práctica sus conocimientos teóricos en un entorno emulado.

Capítulo II

Marco Teórico

Este capítulo se enfoca en la recopilación y análisis de información relevante a fin de sustentar el desarrollo del proyecto centrado en la emulación de una red LTE. Se abordan conceptos, arquitectura y funcionamiento de dicha red, junto con la descripción de dispositivos de radio definida por software (SDR) elemento importante para emular la interfaz área y el software OpenAirInterface seleccionado para llevar a cabo este proyecto.

2.1 Introducción a 4G -LTE

Para entender los sistemas móviles 4G, se aborda temas como la evolución de los sistemas móviles, la importancia de la ITU en la creación de estándares globales. Se analiza IMT-Advanced como tecnología móvil. También se examina el proceso de estandarización que dio origen a la tecnología LTE, liderado por el 3GPP, y su contribución fundamental para las comunicaciones móviles de alta velocidad y eficiencia.

2.1.1 Evolución de sistemas móviles

Como se puede observar en la Figura 1 la evolución de las redes móviles se ha clasificado en diferentes 'generaciones', cada una con sus propias características y tecnologías. A continuación, se presentará una breve descripción de cada generación.

Figura 1

Evolución de la telefonía móvil



Nota. La evolución de redes móviles se clasifica por generaciones. Elaboración propia.

La primera generación de sistemas móviles comenzó en la década de 1980, utilizaba la transmisión analógica y no existía una coordinación global ni regional para el establecimiento de normas técnicas.

En la segunda generación, se incorporaron funciones como el correo de voz y el servicio de mensajes de texto (SMS). Se implementaron métodos de codificación que permitieron tasas de datos más altas, con una velocidad de hasta 384kbps.

En la tercera generación de redes móviles, se abordó la mejora de la eficiencia en la transferencia de datos en la interfaz aérea. El estándar 3G, tenía estándares uniformes a nivel mundial lo que permitió una amplia gama de servicios, incluyendo videollamadas y transmisión de datos en Internet.

Las redes móviles de cuarta generación (4G) surgieron gracias a los avances tecnológicos y dieron lugar a la “Long Term Evolution” (LTE). Esta tecnología se enfocó en aumentar la velocidad y capacidad de las redes móviles, al mismo tiempo que reducía la latencia. La arquitectura de estas se simplificaba. Entre los elementos clave de la red, se encuentran las estaciones base, también conocidas como eNodeB, y los elementos del núcleo, como MME, P-GW y S-GW.

Las redes de quinta generación, también conocidas como 5G, incluyen nuevos elementos como la tecnología NR (New Radio) y una verdadera red convergente que incluya 4G LTE, tecnologías de acceso que no sean 3GPP, Wi-Fi, así como el Core de la red, que incluiría NFV, SDN, Internet de las Cosas (IoT) y nube (Mishra, 2018).

2.1.2 ITU

La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones, por sus siglas en inglés) es una agencia especializada de las Naciones Unidas encargada de coordinar y regular las telecomunicaciones a nivel internacional. La ITU desarrolla y coordina los estándares para las tecnologías de la información y las comunicaciones. La ITU se divide en tres sectores:

- Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R).
- Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (UIT-T).
- Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones (UIT-D).

2.1.3 IMT-Advanced

El término IMT-Advanced se utiliza para referirse a sistemas con nuevas interfaces radioeléctricas que soportan las capacidades de los sistemas posteriores a las IMT-2000. El UIT-R considera que el paso a las capacidades IMT-Advanced es el paso a 4G. El proceso para definir las IMT-Advanced fue establecido por ITU-R WP5D, donde se acordaron criterios de evaluación, donde las tecnologías propuestas debían evaluarse de acuerdo con un conjunto de requisitos técnicos mínimos.

En octubre de 2010, el UIT-R determinó que se incluirán dos tecnologías en la primera versión de IMT-Advanced: LTE versión 10 ("LTE-Advanced") y WirelessMAN-Advanced, basado en la especificación IEEE 802.16m (Dahlman et al., 2011).

2.1.4 Estandarización LTE

La tarea de especificar las tecnologías de comunicación móvil se delega en organizaciones como 3GPP, que cuentan con un marco establecido para los sistemas IMT y el espectro necesario puesto a disposición por la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Dahlman et al., 2016).

2.1.5 3GPP

El 3GPP es una organización encargada de desarrollar especificaciones para sistemas móviles de tercera y cuarta generación. Originalmente, la organización se enfocó en el desarrollo de un sistema 3G basado en la interfaz de radio UTRA y en la red central GSM mejorada. Sin embargo, 3GPP ha ampliado su trabajo para incluir el desarrollo de estándares 4G LTE (Korhonen, 2014).

2.2 Descripción de un sistema 4G

De acuerdo a Cox (2014) originalmente, la ITU tenía la intención de que el término 4G solo se usara para los sistemas que cumplieran con los requisitos de IMT-Advanced. Sin embargo, LTE no lo hizo y tampoco Mobile WiMAX 1.0 (IEEE 802.16e). Debido a esto, la comunidad de ingenieros llegó a describir estos sistemas como 3.9G, pero, estas consideraciones no impidieron que la comunidad de marketing describiera LTE y WiMAX 1.0 móvil como tecnologías 4G, aunque esa descripción no estaba justificada desde un punto de vista de rendimiento, había algo de lógica sólida: hay una clara técnica de transición en el paso de UMTS a LTE que no existe en el paso de LTE a LTE-Advanced.

No pasó mucho tiempo antes de que la ITU admitiera la derrota y en diciembre de 2010 la ITU aprobó el uso de 4G para describir no solo LTE y WiMAX 1.0 móvil, sino también cualquier otra tecnología con un rendimiento sustancialmente mejor que los primeros sistemas 3G (p. 17).

2.2.1 LTE

Long-Term Evolution (LTE) es un estándar de transmisión inalámbrica de datos de alta velocidad, fue desarrollado por 3GPP, fue introducido por primera vez en el Release 8 de 3GPP, en el cual se detalla la mayoría de sus funciones importantes. Sin embargo, se omitieron algunas características menos importantes del sistema que fueron incluidos en el Release 9 (Cox, 2014).

LTE es un estándar de comunicaciones móviles de alta velocidad que ofrece velocidades máximas de transmisión de hasta 326 Mbit/s en el enlace descendente y 86,4 Mbit/s en el enlace ascendente, con un ancho de banda escalable de 1,25 hasta 20 MHz, que abarca 1,25 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. También es capaz de funcionar en modo TDD y FDD, aumentando la eficiencia espectral en un 100% a 200% en comparación con HSPA. LTE también ofrece una reducción de la latencia a menos de 10 ms de ida y vuelta entre el equipo del usuario y la estación base, y a menos de 100 ms para el tiempo de transición de los modos inactivo a activo (Huidobro, 2012).

2.2.2 LTE-Advanced

LTE advanced es un estándar que introduce mejoras en LTE, cuyo objetivo es cumplir los requisitos establecidos para la interfaz de radio IMT-Advanced fue presentado el 7 de octubre de 2009 en el Release 10 de 3GPP.

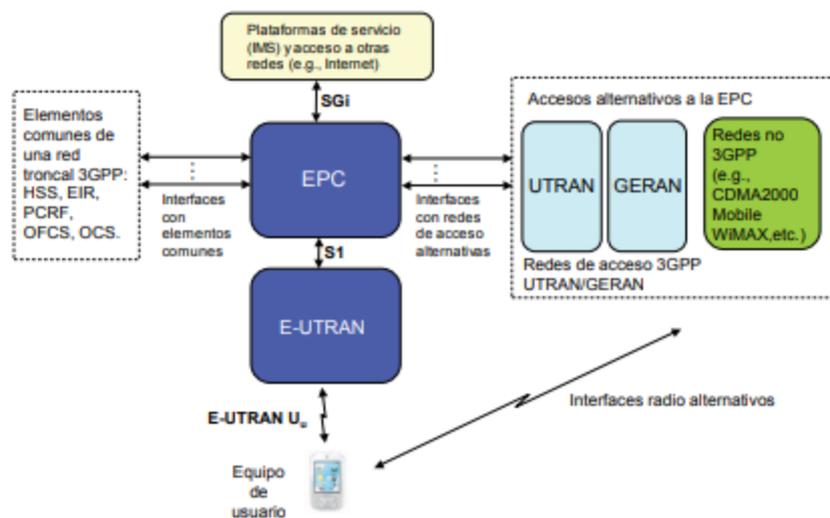
Entre los requisitos principales a cumplir se encuentra una velocidad máxima de datos de 1000 Mbps en el enlace descendente y 500 Mbps en el enlace ascendente. En la práctica, el sistema fue diseñado para entregar velocidades máximas de 3000 y 1500 Mbps respectivamente, utilizando un ancho de banda total de 100 MHz. Además, incluye objetivos para la eficiencia del espectro y es retro compatible con LTE (Cox, 2014).

2.2.3 Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura del sistema LTE en las especificaciones se denomina como Evolved Packet System (EPS). En la Figura 2 se puede observar los componentes principales del sistema LTE, el equipo de usuario (UE), la radio terrestre UMTS evolucionada red de acceso (E-UTRAN) y el núcleo de paquetes evolucionado (EPC) (Agusti et al., 2010).

Figura 2

Arquitectura del sistema LTE



Nota. UE, E-UTRAN y EPC tienen cada uno sus propias arquitecturas. Tomado de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 62), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

Las principales interfaces entre las diferentes partes del sistema son:

- Uu: es la interfaz de radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN.
- S1: Facilita a la EPC la administración del acceso de los UE a través de E-UTRAN.
- S-Gi: punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE.

2.2.3.1 Equipo de usuario

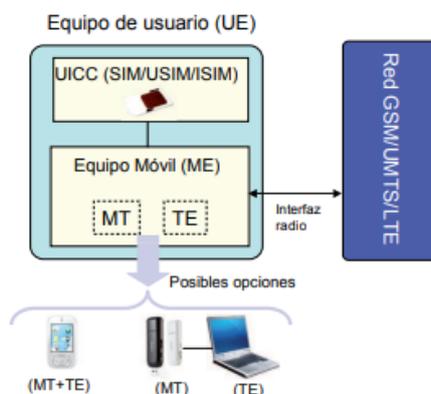
Equipo de usuario, o UE, es un término que se usa en las comunicaciones inalámbricas LTE y 4G para describir un dispositivo móvil, como un teléfono inteligente, una tableta, una computadora portátil u otro tipo de dispositivo inalámbrico que se usa para acceder a la red mediante la interfaz de radio.

- Arquitectura de UE

La arquitectura interna del equipo de usuario es idéntica a la utilizada para UMTS y GSM. Como se puede apreciar en la Figura 3, el equipo de usuario se compone de dos elementos básicos:

Figura 3

Arquitectura equipo de usuario



Nota. El UE presenta dos partes el UICC y ME. Tomado de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 107), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

El equipo móvil (ME), se divide en 2 componentes, la terminación móvil (MT) que maneja todas las funciones de comunicación y el equipo terminal (TE) que se ocupada de la interacción con el usuario.

La tarjeta de circuito integrado universal o por sus siglas en ingles UICC es una tarjeta inteligente conocida como tarjeta SIM, el cual ejecuta una aplicación conocida

como módulo de identidad de suscriptor universal (USIM), que almacena datos específicos del usuario como el número de teléfono y la identidad de la red.

2.2.3.2 Red de acceso de radio

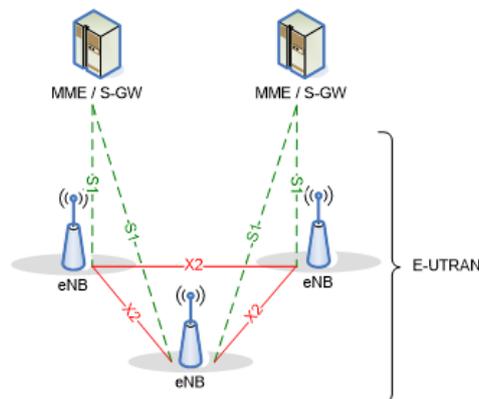
La E-UTRAN es la red de acceso especificada para LTE la cual es responsable de sustentar la transmisión de radio con los equipos de usuario, de gestionar el uso de los recursos de radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente.

- Arquitectura E-UTRAN

E-UTRAN se compone de un solo elemento denominado Nodo B evolucionado (eNB), cada eNB es una estación base que controla los móviles en una o más celdas. Sus funciones principales son:

- Enviar transmisiones de radio a todos los móviles en el enlace descendente y recibe transmisiones de ellos en el enlace ascendente.
- Controla la operación de bajo nivel de todos los móviles, enviado mensajes de señalización como comandos de handover relacionados con esas transmisiones de radio.

De acuerdo con la especificación técnica 36.300 de 3GPP (3GPP, 2010, p.15), la Figura 4 muestra los eNB conectados entre sí por la interfaz X2 también se conectan mediante el interfaz S1 al EPC , más concretamente al MME (Mobility Management Entity) mediante el interfaz S1-MME y al Serving Gateway (S-GW) mediante la interfaz S1-U.

Figura 4*Arquitectura E-UTRAN*

Nota. La interfaz S1 admite una relación de muchos a muchos entre MME y eNB.

Tomado de “*Overall Architecture*”, de 3GPP, 2010, GPP TS 36.300.

- **ENodeB**

El eNodeB es la evolución del Nodo B de UMTS para soportar las funcionalidades de LTE. En concreto, el eNB alberga las siguientes funciones:

- Funciones para la Gestión de Recursos de Radio.
- Selección de un MME en la unión del UE.
- Enrutamiento de datos del plano de usuario hacia la puerta de enlace de servicio (S-SW).
- Programación y transmisión de información de difusión.
- Configuración de medición e informes de medición para movilidad y programación.

2.2.3.3 Red Central: EPC

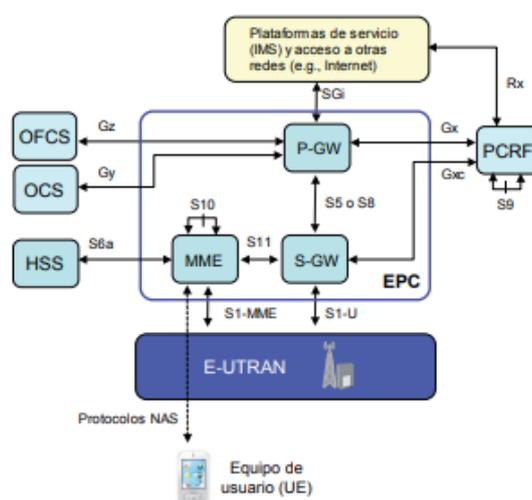
La red central de LTE (4G) es comúnmente denominada EPC (Evolved Packet Core) y se compone exclusivamente de una red de paquetes basada en el protocolo IP (Huidobro, 2012).

- Arquitectura EPC

En la Figura 5 se puede observar el núcleo del sistema EPC compuesto por tres entidades de red: MME (Mobility Management Entity), S-GW (Serving Gateway) y P-GW (Packet Data Network Gateway). En conjunto con la base de datos principal del sistema HSS (Home Subscriber Server) de 3GPP, ofrecen el servicio de conectividad IP para los dispositivos de usuario conectados a través de E-UTRAN.

Figura 5

Arquitectura básica de la red troncal EPC



Nota. Las entidades del EPC manejan sus propias interfaces para la comunicación. Tomado de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 79), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

- **MME (Mobility Management Entity):** se encuentra en el plano de control y desempeña diversas funciones de soporte para EPS. De acuerdo con la especificación técnica 23.002 de 3GPP algunas de estas funciones incluyen:
 - Gestión de la movilidad.
 - Señalización y seguridad NAS (Non-Access Stratum).

- Selección de PDN GW (Packet Data Network Gateway) (3GPP, 2013, p. 30).
- **HSS (Home Subscriber Server):** es la base de datos principal que almacena la información de suscripción de un usuario. De acuerdo con la especificación técnica 23.002 de 3GPP (3GPP, 2013, p. 22), el HSS tiene la responsabilidad de mantener la siguiente información relacionada con el usuario:
 - Datos de identificación, numeración y direccionamiento del usuario.
 - Información de seguridad del usuario, como el control de acceso a la red para autenticación y autorización.
 - Información del perfil de usuario.
- **S-GW (Serving Gateway):** Todos los datos de usuario, tanto entrantes como salientes, pasan a través del S-GW, que se convierte en el primer punto de interconexión entre la E-UTRAN y el EPC. Cada UE se le asigna un S-GW durante la conexión inicial, y en un momento dado no puede haber más de un S-GW asignado a un mismo UE. Conforme a Korhonen (2014) el S-GW implementa varias funciones esenciales, que incluyen:
 - Actuar como punto de anclaje de movilidad local para el traspaso entre eNB.
 - Almacenar en búfer los paquetes de enlace descendente en el modo inactivo de E-UTRAN e iniciar el procedimiento de solicitud de servicio de red cuando sea necesario.
 - Enrutar y reenviar paquetes dentro de la red (p. 150).
- **P-GW (Packet Data Network Gateway):** conecta el EPC con las redes IP externas, como Internet. El P-GW es responsable de dirigir los paquetes de datos de usuario hacia y desde las PDN, lo que implica gestionar el transporte de tráfico

IP entre el UE y las redes externas. Mientras que solo puede haber un S-GW por UE, es posible tener más de un P-GW por UE. Conforme a Korhonen (2014), el P-GW realiza las siguientes funciones:

- Filtrado de paquetes por usuarios.
- Asignación de direcciones IP para el UE.
- Marcado de paquetes a nivel de transporte tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente (p. 150).

2.2.3.4 Interfaces

A continuación, en la Tabla 1 se presentan las principales características de cada interfaz:

Tabla 1

Interfaces EPC

Interfaz	Característica
S1-MME	Punto de referencia para el plano de control entre el E-UTRAN y el MME.
S1-U	Punto de referencia entre el E-UTRAN y el SGW.
S2	Conecta el PGW a otras redes IP no-3GPP.
S3	Permite la comunicación e intercambio de información entre redes 3GPP y LTE/SAE.
S4	Controla y soporta la movilidad entre redes 3GPP y LTE/SAE.
S5	Conecta el SGW con el PGW y realiza el túnel de datos de usuario entre estas dos interfaces.
S6a	Permite la transferencia de información de usuarios (almacenada en el HSS) y la autenticación/autorización al EPS.
S7	Soporta la transferencia de políticas de QoS y reglas de cobro desde el PCRF al PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) en el PGW.
S8	Punto de referencia inter-PLMN que proporciona el plano de control y el plano de usuario entre el SGW en la red visitante y la red local.

S9	Interfaz que permite la transferencia de políticas de QoS y control de cobro entre el Home PCRF y el Visited PCRF.
S10	Punto de referencia entre los MME.
S11	Punto de referencia para la conexión entre el MME y el SGW.
S12	Punto de referencia entre UTRAN y SGW para establecer el túnel de plano de usuario entre UTRAN y SGW cuando se utiliza la función de túnel directo.
S13	Permite la interconexión entre el MME y el EIR.
SGi	Punto de referencia entre el PGW y la PDN (Public Data Network), por ejemplo, Internet.
Rx	Interfaz que permite la conexión del PCRF a otras redes de operadores de servicios IP.

Nota. Las interfaces que se presentan corresponden únicamente al EPC. Elaboración propia

2.3 Interfaz aérea: Capa física

Según Dahlman et al. (2011), la capa física desempeña diversas funciones esenciales en el sistema, incluyendo la codificación, el procesamiento ARQ híbrido de capa física, la modulación, el procesamiento de múltiples antenas y el mapeo de señales a los recursos físicos de tiempo y frecuencia adecuados. Asimismo, la capa física brinda servicios a la capa MAC a través de los canales de transporte. En la transmisión descendente y ascendente (p. 123).

2.3.1 Procesamiento de capa física

El procesamiento de la capa física en el enlace descendente de los datos recibidos de capas superiores involucra los siguientes pasos.

- **Inserción de CRC:** La inserción de CRC es una técnica utilizada para detectar y corregir errores en los datos transmitidos. Un código CRC se calcula a partir de los bits de datos y se adjunta al final del paquete. En el receptor, se realiza un

cálculo similar del CRC y se compara con el CRC recibido. Si hay una discrepancia, se considera que se ha producido un error y se solicita una retransmisión.

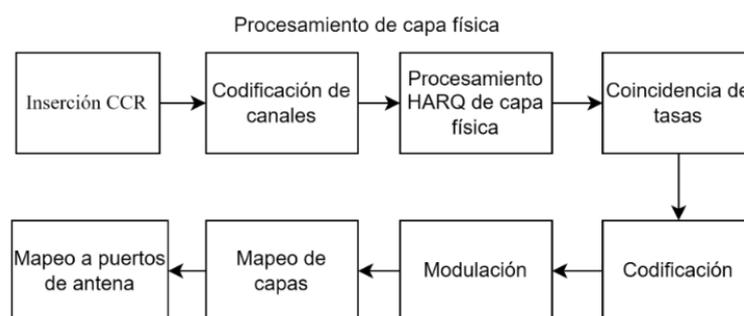
- **Codificación de canales:** LTE emplea dos esquemas de corrección de errores directos. La codificación convolucional es adecuada para velocidades bajas, mientras que la codificación turbo es más eficiente a velocidades más altas, pero no funciona bien con datos cortos o velocidades bajas.(3GPP, 2013c)
- **Procesamiento ARQ híbrido de capa física:** combina la corrección de errores ARQ con técnicas de procesamiento de capa física, permitiendo corregir errores selectivamente en lugar de retransmitir todo el paquete de datos, reduciendo así la sobrecarga de retransmisión y mejorando la eficiencia de la transmisión.
- **Coincidencia de tasas y entrelazado de canales:** se encarga de ajustar la velocidad de transmisión de los datos y mejora la resistencia a los errores de transmisión reorganizando los datos antes de la transmisión.
- **Codificación:** transforma una secuencia de bits de entrada en una secuencia de bits de salida pseudoaleatoria, eliminando secuencias largas de bits con valores similares para evitar problemas en el receptor, como la pérdida de sincronización e interferencias.(3GPP, 2013b)
- **Modulación:** se modula una señal portadora analógica para enviar símbolos y no bits directamente. Cada símbolo puede representar información de uno o más bits, según el esquema de modulación empleado. LTE utiliza cuatro esquemas de modulación diferentes: BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.
- **Mapeo y precodificación de capas:** implica dividir los datos en “capas” y ajustar las señales en cada capa para lograr una transmisión eficiente y una recepción de alta calidad.

- **Mapeo a recursos asignados y puertos de antena:** se encarga de asignar los recursos de transmisión disponibles y los puertos de antena a los datos que se transmitirán. Esto asegura una transmisión eficiente y de alta calidad.

La Figura 6 muestra la ruta de datos en el enlace descendente de la capa física. Cabe mencionar que el procesamiento de datos en la dirección del enlace ascendente sigue los mismos principios (Korhonen, 2014, p 63).

Figura 6

Ruta de datos de enlace descendente de capa física



Nota. Para el proceso de enlace ascendente se utiliza el mismo procedimiento en sentido inverso. Adaptado de *Introduction to 4G Mobile Communications* (p. 63), por Korhonen, 2014, Artech House.

2.3.2 Asignación de recursos

La asignación de recursos se refiere a cómo se distribuyen los recursos de transmisión disponibles en la red para transmitir datos de manera eficiente y garantizar un rendimiento óptimo. Dos de las técnicas clave utilizadas para la asignación de recursos son OFDMA y SC-FDMA.

2.3.2.1 OFDMA

OFDMA, conocida como Orthogonal Frequency Division Multiple Access, es una técnica de acceso múltiple que divide el ancho de banda en múltiples subportadoras

ortogonales. Cada subportadora se asigna a un usuario o dispositivo para transmitir datos. Esta técnica es eficiente en la asignación de recursos y permite la transmisión simultánea de datos a múltiples usuarios. OFDMA es especialmente apropiada para el acceso descendente en LTE, donde la estación base puede transmitir datos a varios dispositivos de usuario al mismo tiempo.

2.3.2.2 SC-FDMA

SC-FDMA, abreviatura de Single Carrier Frequency Division Multiple Access, se emplea en el acceso ascendente de LTE. A diferencia de OFDMA, SC-FDMA es una técnica de acceso de portadora única diseñada para la transmisión eficiente de un solo usuario hacia la estación base. Esta técnica se utiliza en el enlace ascendente para que los dispositivos de usuario puedan transmitir datos de manera eficaz y con un bajo consumo de energías.

2.3.3 Tecnologías de Múltiple Acceso

LTE utiliza una combinación de tecnologías de acceso para permitir una comunicación eficiente y confiable en redes móviles.

2.3.3.1 FDD y TDD

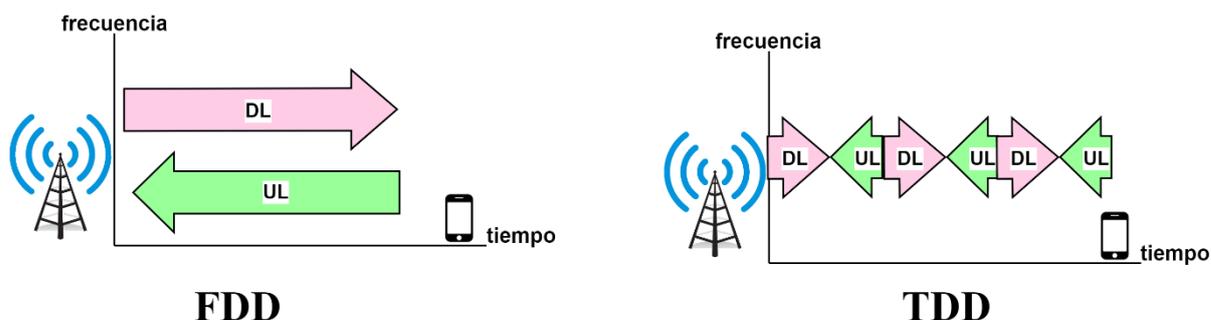
En LTE se han definido los modos FDD y TDD, que permiten el uso de bandas de frecuencias pareadas y no pareadas

Como se puede apreciar en la Figura 7 cuando se usa duplexación por división de frecuencia (FDD), la estación base y el móvil transmiten y reciben al mismo tiempo, pero usan diferentes frecuencias portadoras. Usando duplexación por división de tiempo (TDD), transmiten y reciben en la misma frecuencia portadora, pero en diferentes momentos.

En el modo FDD, los anchos de banda del enlace ascendente y descendente son fijos y suelen ser los mismos. Esto lo hace adecuado para comunicaciones de voz, en las que las tasas de datos de enlace ascendente y descendente son muy similares. En el modo TDD, el sistema puede ajustar cuánto tiempo se asigna al enlace ascendente y descendente. Esto lo hace adecuado para aplicaciones como la navegación web, en las que la tasa de datos del enlace descendente puede ser mucho mayor que la tasa del enlace ascendente. (Huidobro, 2012).

Figura 7

Modos FDD y TDD



Nota. El modo FDD usa dos frecuencias y el modo TDD usa una frecuencia por slots de tiempo. Elaboración propia.

2.3.4 Estructuras con Varias Antena (MIMO)

Las técnicas de múltiples antenas pueden verse como un conjunto de técnicas que se basan en el uso de múltiples antenas en el receptor y/o el transmisor. Las técnicas de múltiples antenas se pueden utilizar para lograr un mejor rendimiento del sistema, incluida una mejor capacidad del sistema y una mejor cobertura, así como una mejor provisión de servicios, velocidades de datos por usuario más altas (Dahlman et al., 2011).

Uno de los componentes claves en LTE para alcanzar la eficiencia espectral es el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO, Múltiple Input Múltiple Output). Se utilizan para aumentar la cobertura y la capacidad de la capa física. La adición

de más antenas para un sistema radio da la posibilidad de mejorar en el rendimiento, debido a que la radiación de las señales se realizará por caminos físicos diferentes y llegarán con distintos retardos al receptor. (Huidobro, 2012).

2.3.5 Canales Físicos LTE

Los canales físicos llevan los datos de las capas superiores, incluido el control, la configuración y los datos de usuario, estos canales son diferentes para el enlace ascendente y descendente teniendo características y operaciones diferentes (Ghosh et al., 2011, p. 239).

A continuación, en la Tabla 2 se presentan los canales físicos de enlace descendente y ascendente con una breve descripción:

Tabla 2

Canales físicos de enlace descendente

Nombre del canal	Abreviatura	Descripción
Canales físicos de enlace descendentes		
Physical Downlink Control Channel	PDCCH	Asigna recursos y controla la transmisión de datos entre la estación base y los dispositivos móviles.
Physical Downlink Shared Channel	PDSCH	Este canal transporta datos de usuario y señalización de capa superior.
Physical Broadcast Channel	PBCH	Transporta información del sistema.
Physical Multicast Channel	PMCH	Transporta información de multidifusión/difusión.
Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel	PHICH	Este canal transporta H-ARQ ACK/NAK asociados con transmisiones de datos de enlace ascendente.
Physical Control Format Indicator Channel	PCFICH	Informa al UE sobre el número de símbolos OFDM utilizados.
Canales físicos de enlace ascendente		
Physical Uplink Control Channel	PUCCH	Transporta información de control de enlace ascendente.
Physical Uplink Shared Channel	PUSCH	Transporta datos de usuario y señalización de capa superior

Physical Random-Access Channel	PRACH	Este canal transporta el preámbulo de acceso aleatorio enviado por los UE.
---------------------------------------	--------------	--

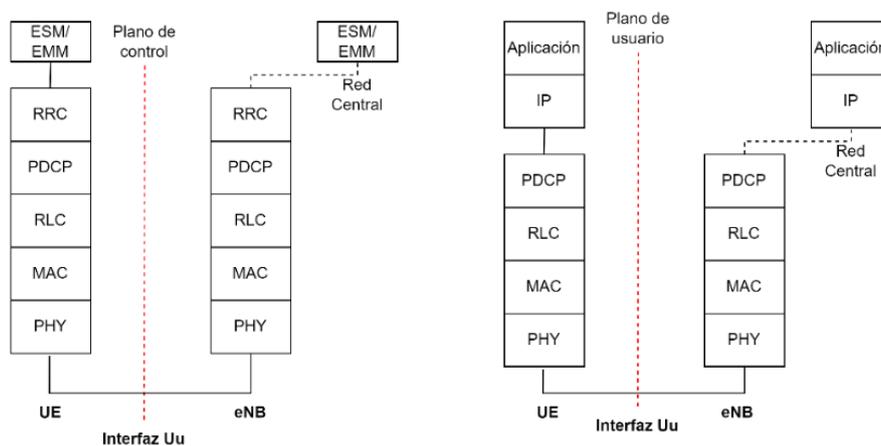
Nota. La abreviatura corresponde a las siglas del canal en inglés. Elaboración propia.

2.4 Interfaz aérea: Pila de protocolos

La Figura 8 muestra la pila de protocolos la cual se divide en dos partes: los planos de control y de usuario. El plano de control se encarga de la gestión de señalización y conexiones de usuarios, mientras que el plano de usuario transporta datos de aplicaciones.

Figura 8

Pila de protocolos



Nota. En el plano de control se realiza el protocolo RRC a diferencia que en el plano de usuario. Elaboración propia.

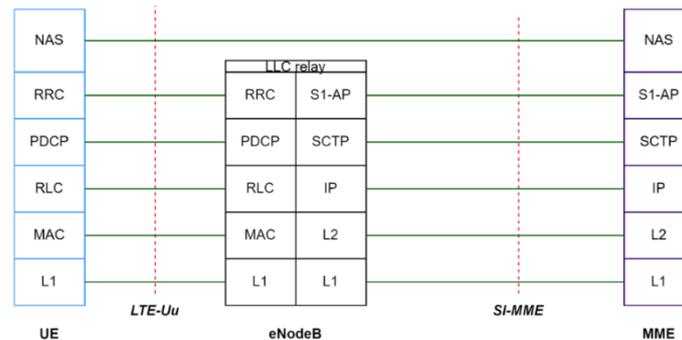
El plano de control se basa en el intercambio de información en estratos de acceso (AS) y estrato de no acceso (NAS). Los protocolos AS gestionan el acceso de radio entre el equipo de usuario y el eNB, mientras que los protocolos NAS operan en la red central, gestionando la comunicación entre el equipo de usuario y la CN (Korhonen, 2014).

La Figura 9 muestra la pila de protocolos utilizada en la interfaz entre el equipo de usuario y los eNB (Uu), así como entre este y el MME en la red core (SI-MME). Las

capas de protocolos inferiores al NAS se encargan de implementar funcionalidades como paging, handover, administración del contexto de usuario, entre otras (Huidobro, 2012).

Figura 9

Protocolos utilizados en las interfaces Uu y SI-MME



Nota. El protocolo NAS se ejecuta directamente entre el UE y el MME. Adaptado de *Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE* (p. 232), por Huidobro, 2012, Alfaomega Grupo Editor, S.A.

2.4.1 Control de acceso al medio (MAC)

La capa MAC se encarga de la multiplexación de canales lógicos, la gestión de retransmisiones ARQ híbridas y la programación de enlace ascendente y enlace descendente. Además, desempeña un papel crucial en la multiplexación/desmultiplexación de datos a través de múltiples componentes portadores cuando se utiliza la agregación de portadoras. (Dahlman et al., 2011)

2.4.1.1 Canales de transporte

Los canales de transporte en LTE son diferentes en el enlace ascendente y descendente, ya que cada uno tiene necesidades y opera de una manera diferente. Los canales de transporte ofrecen información de transferencia de información a la capa de control de acceso al medio (MAC) y las capas superiores.

A continuación, se ofrece una breve descripción de los canales de transporte de enlace descendente según lo propuesto por Ghosh et al. (2011) en la Tabla 3, y de los canales de transporte de enlace ascendente según Agusti et al. (2010).

Tabla 3

Canales de transporte de enlace descendente y ascendente

Nombre	Abreviatura	Descripción
Canales de transporte enlace descendente		
Broadcast Channel	BCH	Transmite información fundamental para el establecimiento de la comunicación LTE.
Downlink Shared Channel	DL-SCH	Se utiliza para transmitir los datos de control y de tráfico.
Multicast Channel	MCH	Asociado a los canales lógicos MCCH y MTCH para el servicio multicast/broadcast.
Paging Channel	PCH	Se requiere para la transmisión a través de toda el área de cobertura celular.
Canales de transporte de enlace ascendente		
Uplink Shared Channel	UL-SCH	Transporta tanto información de usuario como señalización.
Random Access Channel	RACH	Se utiliza para enviar peticiones de acceso al sistema, así como para transmitir mensajes cortos de información de control.

Nota. La abreviatura corresponde a sus siglas en inglés. Elaboración propia.

2.4.2 Control de enlace de radio (RLC)

RLC desempeña un papel fundamental en la gestión del enlace de radio en LTE, proporcionando servicios de control de flujo, segmentación y reensamblaje de paquetes, control de errores y control de prioridades para garantizar una comunicación confiable y eficiente entre el UE y el eNodeB.

2.4.2.1 Canales lógicos

El MAC utiliza los canales lógicos para proporcionar servicios al RLC. Cada tipo de canal lógico se define por el tipo de información que se transfiere. Una clasificación general de los canales lógicos se divide en dos grupos canales de control y canales de tráfico.

- Canales de control

Los canales de control se utilizan únicamente para la transferencia de información del plano de control. La Tabla 4, muestra los canales de control estipulados en la especificación técnica 36.300 de 3GPP (3GPP, 2010).

Tabla 4

Canales de control

Canales de control	Abreviatura	Descripción
Broadcast Control Channel	BCCH	Un canal de enlace descendente para transmitir información de control del sistema.
Multicast Control Channel	MCCH	Un canal de enlace descendente de punto a multipunto utilizado para transmitir información de control a los UE en la celda.
Paging Control Channel	PCCH	Un canal de enlace descendente, este canal se usa para paginación cuando la red no conoce la celda de ubicación del UE.
Common Control Channel	CCCH	Canal para transmitir información de control entre los UE y la red.
Dedicated Control Channel	DCCH	Un canal bidireccional punto a punto que transmite información de control dedicada entre un UE y la red.

Nota. La abreviatura corresponde a las siglas del canal en inglés. Elaboración propia.

- Canales de tráfico

Los canales de tráfico se utilizan únicamente para la transferencia de información del plano de usuario. La Tabla 5 muestra una breve descripción de los canales de tráfico según Ghosh et al. (2011, p. 237).

Tabla 5

Canales de tráfico

Canales de tráfico	Abreviatura	Descripción
Dedicated Traffic Channel	DTCH	Es un canal punto a punto, dedicado a un UE, para la transferencia de información de usuario, puede existir tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente.
Multicast Traffic Channel	MTCH	Canal unidireccional de punto a multipunto canal de datos que transmite datos de tráfico desde la red a los UE.

Nota. La abreviatura corresponde a las siglas del canal en inglés. Elaboración propia.

2.4.3 Protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP)

El protocolo PDCP se sitúa sobre la subcapa RLC y se aplica a todos los flujos de datos transmitidos en el plano de usuario, así como a la mayoría de los mensajes emitidos por el Controlador de Recursos de Radio (RRC) transmitidos a través del plano de control.

El protocolo PDCP, tiene varias funcionalidades importantes. En primer lugar, realiza la compresión/descompresión de las cabeceras de los paquetes IP que llegan al eNB. Además, se encarga del cifrado de los datos y la señalización. También implementa mecanismos de protección de la integridad de los mensajes de señalización generados por la capa RRC y los protocolos del NAS ubicados en la MME, también ofrece funcionalidades adicionales (Agusti et al., 2010).

2.4.4 Control de recursos de radio (RRC)

El protocolo RRC (Radio Resource Control) es responsable de controlar el comportamiento del dispositivo móvil cuando se encuentra en el modo de operación

"estado conectado", gestiona la señalización de aviso (paging) y la información del sistema cuando el sistema aún no ha establecido los servicios portadores de radio.

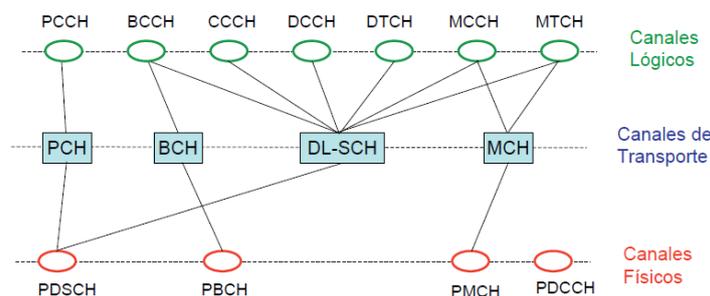
Sus principales funciones incluyen la difusión de información común, el control de la conexión RRC, la gestión de la movilidad entre tecnologías de acceso, la configuración de medidas y transferencia de información para la movilidad y la gestión de los mecanismos de configuración de medidas y transferencia de información en el caso de movilidad (Agusti et al., 2010).

2.4.5 Mapeo entre canales

En la Figura 10 se representa la relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace descendente. El canal BCH contiene información como la canalización disponible, el número de trama y la configuración de los canales físicos. El resto de la información del sistema llega a los dispositivos móviles a través de los System Information Blocks (SIB), que se transmiten mediante el canal de transporte compartido (DL-SCH). (Agusti et al., 2010).

Figura 10

Relación entre canales del enlace descendente

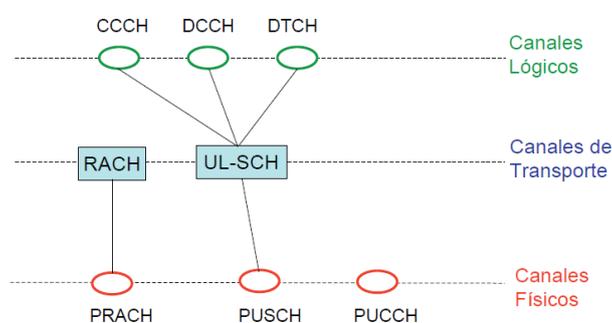


Nota. PDCCH no tiene relación con canales de transporte ni lógicos, ya que transmite señalización en la capa física. Tomada de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 289), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

En la Figura 11 se observa la relación de canales del enlace ascendente, existen tres tipos canales lógicos, Para procesar la señal en el canal PUSCH, se requiere un canal de control a nivel físico, conocido como PUCCH, que lleva la señalización necesaria para modular, demodular y ubicar la señal SC-FDMA utilizada en el canal PUSCH. Los canales físicos (PRACH) y de transporte (RACH) están directamente relacionados entre sí (Agusti et al., 2010).

Figura 11

Relación entre canales en el enlace ascendente



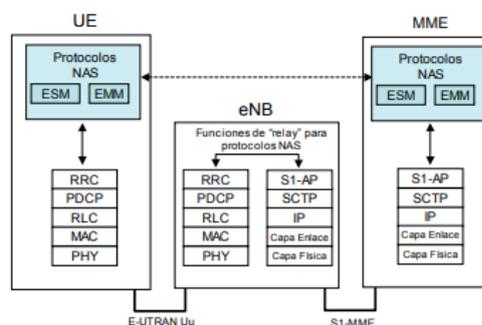
Nota. PUCCH transmite señalización a nivel físico, sin relación con canales de transporte ni lógicos. Tomada de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 230), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

2.5 Señalización de capa superior

Los protocolos NAS, desarrollados por el 3GPP, se encargan de la gestión de movilidad de los dispositivos de usuario (EMM) y la gestión de sesiones para establecer la conectividad entre el dispositivo de usuario y la pasarela P-GW (ESM), diseñados específicamente para E-UTRAN, En la Figura 12 se muestra el ámbito de los protocolos NAS en la red LTE (Agusti et al., 2010).

Figura 12

Protocolos NAS entre UE y MME



Nota. Los protocolos NAS se comunican directamente entre un UE y un nodo MME. Tomado de *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (p. 96), por Agusti et al., 2010, Fundación Vodafone España.

2.5.1 Gestión de movilidad del EPS (EMM)

El protocolo EMM controla la movilidad de los dispositivos de usuario en E-UTRAN para acceder a la red troncal EPC. Sus funciones incluyen los procedimientos de registro y cancelación de registro del usuario en la red LTE, así como la actualización del área de seguimiento. Estos procedimientos garantizan la accesibilidad a los servicios de la red LTE y la activación de un servicio, también se encarga de la autenticación del usuario, el intercambio de identificadores y el establecimiento de claves de cifrado e integridad (Agusti et al., 2010).

2.5.2 Gestión de sesiones EPS (ESM)

El protocolo ESM facilita los procedimientos de gestión de servicios entre el equipo de usuario y la red LTE en E-UTRAN. Permite la activación, desactivación y modificación de servicios portadores EPS, incluyendo servicios portadores dedicados para aplicar QoS específico a flujos de paquetes. En LTE, la activación del servicio portador por defecto puede realizarse durante el registro, reduciendo la señalización necesaria.

El protocolo también permite solicitar la conexión a una red externa y activar servicios portadores con dicha red. Se soporta un mecanismo de asignación de recursos solicitado por el equipo de usuario para transferir datos con características de QoS específicas (3GPP, 2014).

2.6 Procedimientos de acceso

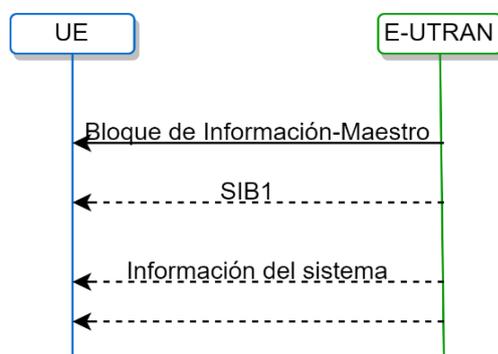
Los procedimientos de acceso son una serie de acciones y protocolos que permiten que un dispositivo móvil se conecte a una red LTE y establezca una comunicación exitosa con la estación base.

2.6.1 Adquisición de celdas

Antes de que un terminal LTE pueda comunicarse con la red, debe realizar dos pasos principales: buscar y adquirir sincronización con una celda en la red, y recibir y decodificar la información necesaria para operar en esa celda. La búsqueda de celdas LTE consta de tres partes fundamentales:

- Adquisición de la sincronización de frecuencia y símbolos de la celda.
- Determinación del inicio de la trama de enlace descendente
- Identificación de la identidad de la celda en la capa física.

Un terminal se sincroniza con una celda y adquiere información del sistema para operar correctamente en la red. Se transmite a través de dos canales: MIB (Master-Information Block) y SIB (System-Information Blocks) como se puede observar en la Figura 13 (Dahlman et al., 2011).

Figura 13**Adquisición de información del sistema.**

Nota. Posterior al SIB1 se envían diferentes bloques de información del sistema. Adaptado de *AN INTRODUCTION TO LTE, LTE-ADVANCED, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*, por Cox, 2014.

MIB: Transmitida a través del BCH contiene información esencial para que el terminal pueda acceder a la información del sistema proporcionada a través del DL-SCH. Incluye detalles sobre el ancho de banda del enlace descendente, la configuración de la celda y el número de trama del sistema.

SIB: La información principal está en los SIB transmitidos a través del DL-SCH, los SIB se enumeran acorde a la función que realizan. Los SIB 1 establecen la programación de otros SIB y proporcionan datos para la selección de red y celda. Los SIB 2 describen los recursos de radio y físicos de la celda, como la potencia de transmisión. Los SIB 3 a 8 especifican procedimientos de reelección de celdas en diferentes escenarios, incluyendo cambios de frecuencia. (Cox, 2014).

2.6.2 Procedimiento de acceso aleatorio

El acceso aleatorio en LTE es esencial para establecer conexiones y tiene varios usos, como el acceso inicial, la recuperación tras una falla, el traspaso y el

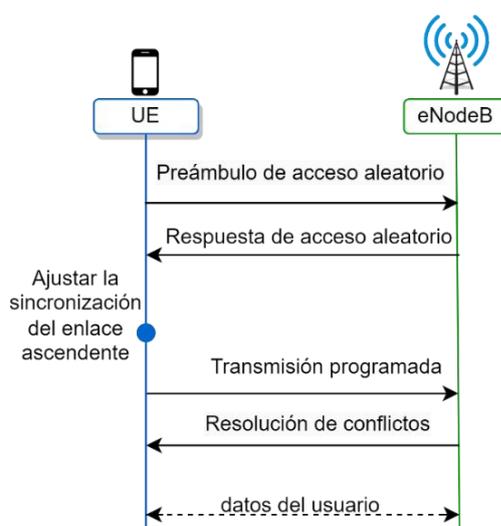
posicionamiento. Se utiliza para sincronizar el enlace ascendente y asignar una identidad única al terminal. Puede ser basado en contención o sin contención.(Dahlman et al., 2011)

Como se puede observar en la Figura 14 el acceso aleatorio basado en contención implica cuatro pasos:

- transmisión de un preámbulo
- ajuste de temporización
- transmisión de la identidad del terminal
- resolución de conflictos por parte de la red.

Figura 14

Acceso aleatorio basado en contención



Nota. En la transmisión programada se realiza la solicitud de conexión RRC. Adaptado de *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* (p. 31), por Dahlman et al., 2011, Elsevier Ltd.

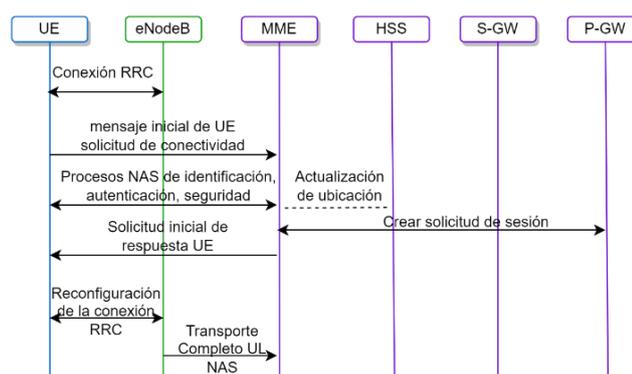
2.6.3 Establecimiento de conexión

El procedimiento de conexión es un paso obligatorio que el UE debe realizar con el fin de obtener servicios NAS, como conectividad a Internet.

Luego de realizar el proceso de acceso aleatorio, el UE debe establecer una conexión de Control de Radio (RRC) con el eNB. Este procedimiento se emplea para llevar a cabo el procedimiento de Servicios de Acceso a Red (NAS). Cuando el procedimiento de adjuntar tiene éxito, se establece un contexto para el UE en el Equipo de Gestión de Movilidad (MME), se crea un portador predeterminado entre el UE y la Puerta de Enlace de Datos del Paquete (P-GW), y se le asigna una dirección IP. Esto habilita al UE usar servicios de Internet con conectividad IP. A continuación, se describe el procedimiento de conexión en la Figura 15 (Rao & Gajula, 2011).

Figura 15

Proceso de conexión



Nota. En la figura se puede observar un resumen del establecimiento de conexión.

Elaboración propia.

2.7 Dispositivos SDR

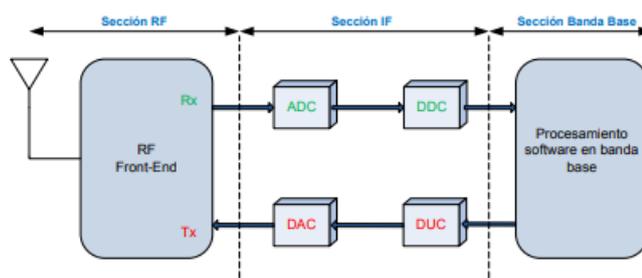
De acuerdo a Sabry (2022) la radio definida por software, también conocida como SDR (Software Defined Radio), es un sistema de comunicación por radio que reemplaza los componentes de hardware tradicionales, como mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores y detectores, con componentes basados en software que se ejecutan en una computadora personal o dispositivo integrado.

El esquema básico de SDR este compuesto por 3 bloques funcionales, como se puede observar en la Figura 16.

- **Sección RF:** Transmite y recibe señales de radiofrecuencia, ajusta estas señales y las convierte en frecuencias intermedias (IF) durante la recepción, o amplifica y modula la señal de IF durante la transmisión.
- **Sección IF:** Transforma la señal IF en una señal banda base y viceversa.
- **Sección banda base:** Realiza el procesamiento de la señal en banda base, incluye la modulación, demodulación y análisis espectral mediante software.

Figura 16

Diagrama de bloques funcionales SDR



Nota. Los módulos ADC/DAC realizan la conversión analógica digital y viceversa, los módulos DDC/DUC ajustan la velocidad de muestreo. Tomado de Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software (p. 13), por (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011)

2.7.1 Características

De acuerdo a Grayver (2013) Las características principales de SDR incluyen:

- **Interoperabilidad:** Permite trabajar con una variedad de protocolos y sistemas de comunicación.

- **Uso eficiente de los recursos** Adopta la configuración y el rendimiento de la radio según las necesidades, minimiza el desperdicio de recursos como ancho de banda y potencia.
- **Reutilización de frecuencias:** Utiliza una misma frecuencia para múltiples aplicaciones o servicios, modifica la configuración de radio para evitar interferencias.
- **Obsolescencia reducida:** Mantiene actualizado el software, prolongando su vida útil.
- **Costo más bajo:** Posee una eficiencia y flexibilidad en hardware y software, a comparación de sistemas de radio tradicionales que requieren un hardware específico.
- **Investigación y desarrollo:** Permite experimentar nuevos algoritmos, protocolos y aplicaciones a ingenieros y científicos, acelerando la innovación de las comunicaciones inalámbricas.

2.7.2 Relación con la emulación de redes LTE

Debido a la evolución de la tecnología móvil, esta ha permanecido en constante investigación y desarrollo. Dado que la construcción de sistemas reales resulta costosa, se han implementado plataformas de simulación y emulación para el análisis de estos sistemas de comunicación móvil.

Por una parte, la simulación se enfoca en evaluar el rendimiento de la transmisión entre estaciones base y dispositivos móviles, evaluar métricas de rendimiento de la capa de aplicación. Sin embargo, la simulación a nivel de sistema a menudo simplifica la capa física y, por lo tanto, puede no reflejar de manera precisa la realidad.

La emulación, por otro lado, se presenta como una aproximación más cercana a los sistemas de comunicación inalámbrica. En el caso de LTE las plataformas de emulación abarcan todas las capas del sistema y tienen la capacidad de probar y analizar estrategias y algoritmos en detalle. Además, la emulación permite el uso de abstracciones de la capa física o la sustitución de componentes del sistema por hardware, lo que facilita la realización de experimentos a gran escala. (Wang et al., 2014)

Una plataforma de emulación posibilita configuraciones diversas y ofrece un enfoque más preciso en las pruebas, evaluación y validación del sistema LTE real. Esto proporciona un entorno de pruebas completo y enriquecedor para evaluar algoritmos y estrategias innovadoras.

2.7.3 Dispositivos que soportan LTE

Los dispositivos SDR que admiten la comunicación LTE son bastante comunes en la actualidad. Algunos de los dispositivos SDR populares que pueden utilizarse para la emulación y experimentación de redes LTE incluyen:

- USRP: La serie de dispositivos USRP es muy conocida en el campo de la SDR y se puede utilizar para implementar sistemas LTE.
- LimeSDR: Es otro dispositivo SDR ampliamente utilizado que ofrece soporte para aplicaciones LTE. Viene en diferentes versiones, como LimeSDR Mini y LimeSDR USB.
- BladeRF: Es una plataforma SDR que proporciona soporte para aplicaciones LTE. Ofrece una amplia gama de frecuencias y ancho de banda.

- HackRF One: es un SDR de bajo costo que se puede utilizar para experimentos LTE, aunque su ancho de banda es más limitado en comparación con otros dispositivos.

2.7.4 Software

La programación y el control de dispositivos SDR se logran a través de software que se ejecuta en estaciones de trabajo u ordenadores. Existen diversas aplicaciones disponibles para controlar estos dispositivos SDR. Para utilizar estas aplicaciones, se requiere primero la instalación de los controladores específicos del dispositivo SDR, su función es traducir las selecciones y operaciones realizadas por el usuario en comandos específicos para programar y controlar el dispositivo. Se pueden encontrar numerosas aplicaciones para dispositivos SDR. En la Tabla 6 se observan las aplicaciones más destacadas relacionadas al análisis del espectro RF y a redes de comunicaciones móviles 4G.

Tabla 6

Aplicaciones destacadas de SDR

Campo	Aplicación	
Análisis del espectro RF	- GNU Radio - Airspy SDR	- Gqrx - Matlab
Comunicaciones Móviles 4G	- OpenAirInterface - OpenLTE 100	- srsLTE - AMARI LTE

Nota. Aplicaciones como GNU Radio, o Matlab permiten realizar aplicaciones en muchos más campos. Elaboración propia.

2.8 OpenAirInterface

OpenAirInterface (OAI) es una tecnología de software abierto para redes celulares inalámbricas, desarrollada por la Alianza de Software OpenAirInterface (OSA). La OSA

es un consorcio sin fines de lucro que se dedica a fomentar un ecosistema de desarrollo de software y hardware de código abierto en las redes celulares 3GPP, con un enfoque particular en la red central (EPC) y la red de acceso (EUTRAN). OpenAirInterface es la piedra angular de este ecosistema, ya que se centra en la construcción de tecnologías de red de acceso por radio (RAN) y red central (CN) (OpenAirInterface, 2023a).

2.8.1 EURECOM

EURECOM es una destacada institución de investigación en comunicaciones, desempeñó un papel fundamental en la fundación de la OpenAirInterface Software Alliance (OSA). Como miembro fundador, EURECOM ha sido clave en la creación y promoción del software libre en el ámbito de los sistemas de comunicación, con un enfoque particular en las tecnologías 4G, 5G y más avanzadas. La colaboración de EURECOM con la OSA ha permitido impulsar el desarrollo y la adopción de soluciones de software abierto en el sector de las comunicaciones, beneficiando a la comunidad global de investigadores, desarrolladores y empresas que trabajan en el campo de las redes celulares (Eurecom, 2022).

2.8.2 OpenAirInterface5G

OpenAirInterface5G proporciona una solución de software integral para el despliegue eficiente de estaciones base (eNodeB) y la emulación de terminales de usuario (UE) en una red celular. El software proporcionado permite configurar y controlar de manera efectiva las funciones clave de una estación base, como el acceso al medio, la gestión de la conectividad con los dispositivos móviles, la asignación de recursos y la optimización del rendimiento.

2.8.3 OpenAir-CN

OpenAir Core Network se centra en la implementación de la red central (EPC) de una red celular. OpenAir-CN proporciona las funcionalidades necesarias para la gestión

y el control de la red central, incluyendo funciones como la autenticación de usuarios, la asignación de direcciones IP, el enrutamiento de datos y la administración de la movilidad de los dispositivos móviles. OpenAir-CN es una implementación que cumple con las especificaciones 3GPP para redes de núcleo de paquetes evolucionados. Esto implica que incluye la implementación de los siguientes componentes de la red:

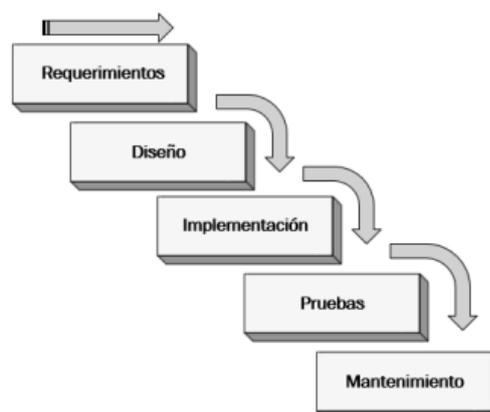
- MME
- HSS
- S-GW+P-GW (OpenAirInterface, 2022).

2.9 Metodología

La metodología Cascada se fundamenta en un ciclo de vida predictivo para la gestión de proyectos, en la Figura 17 se observa las cinco fases fundamentales: Requerimientos, Diseño, Implementación, Pruebas y Mantenimiento. Estas etapas son esenciales para la implementación del modelo, pero también es posible agregar fases y subfases adicionales para una mayor especificación del trabajo a realizar, la ejecución de cada fase del proyecto comienza una vez que se ha completado la fase anterior. Esto conduce a una planificación secuencial en cascada que facilita el desarrollo ordenado del proyecto (Navia, 2019).

Figura 17

Procesos Metodología en Cascada



Nota. Flujo de proceso de metodología en Cascada. Tomado de Dirección y *Gestión de Proyectos Inmobiliarios basado en la guía PMBOK y el uso metodologías ágiles*, por (Navia, 2019)

CAPITULO III

Diseño Del Emulador

En este capítulo, se proporciona una visión detallada de la planificación y diseño del proyecto llevado a cabo. Se abordan los requisitos técnicos necesarios para su implementación, así como las herramientas y recursos asociados a la construcción del emulador. Además, se presenta en detalle el diseño del emulador, describiendo la arquitectura general y los componentes clave del sistema, entre ellos, la configuración de la red, la emulación de los nodos LTE y la interconexión de esta.

3.1 Etapas de la metodología implementada

La metodología utilizada sigue el enfoque del modelo en cascada, que permite una secuencia estructurada de las diferentes etapas del proyecto. A continuación, se describe las etapas principales.

- **Análisis de requisitos:** En esta etapa se lleva a cabo un análisis de los requisitos del Emulador LTE. Se identifican y comprenden las funcionalidades y características necesarias para su desarrollo.
- **Diseño:** Se define la arquitectura general del sistema, identificando los componentes clave y sus interfaces. Asimismo, se diseña la configuración de la red LTE, considerando la topología, los nodos y los protocolos de comunicación necesarios.
- **Implementación:** En esta etapa, se procede a la configuración de los nodos LTE. Se establecen los parámetros de comunicación necesarios y se generan las señales

requeridas. Además, se desarrollan prácticas de laboratorio específicas que permiten realizar pruebas en el emulador LTE. Esta etapa es fundamental para asegurar el funcionamiento adecuado del emulador y para habilitar un entorno de pruebas controlado.

- **Pruebas y validación:** En esta etapa, se llevan a cabo pruebas exhaustivas de los laboratorios de LTE para garantizar su correcto funcionamiento y verificar que se cumplan los objetivos de aprendizaje establecidos. Se realizan ajustes y correcciones necesarias basadas en los hallazgos de las pruebas.
- **Documentación y entrega:** En la etapa final del desarrollo, se elabora una documentación técnica completa que describe los laboratorios de LTE. Esta documentación incluye guías de uso, manuales de experimentos y se prepara la entrega final de los laboratorios, asegurando que se cumplan todos los requisitos y estándares establecidos.

3.2 Análisis de requisitos

En este proceso, se establece las funciones, limitaciones y condiciones necesarias para el desarrollo del proyecto. Se han considerado tanto los requerimientos del sistema, requerimientos de stakeholders y requerimientos para operar la plataforma OpenAirInterface. Estos elementos son fundamentales para guiar la implementación del proyecto y asegurar que cumpla con los estándares y necesidades específicas establecidas.

Para poder trabajar de una forma ordenada estos requerimientos se identifican mediante abreviaturas, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Abreviatura de los requerimientos

Requerimiento	Abreviatura
---------------	-------------

Requerimientos del sistema	SySR
Requerimientos de Stakeholders	StSR
Requerimientos de arquitectura	SRSR

Nota. Abreviaturas de los requerimientos principales para realizar el proyecto.

Elaboración propia.

3.2.1 *Requerimientos del sistema*

Los requerimientos de la red LTE se establecen de acuerdo con las especificaciones de necesarias, para que un sistema se clasifique como emulador 4G. En la Tabla 8 se puede observar estos requerimientos catalogados con un nivel de prioridad.

Tabla 8

Requerimientos del sistema

SySR				
#	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
Requerimientos de interfaz				
SySR1	Debe permitir realizar la configuración del emulador	X		
SySR2	Interactividad intuitiva con capacidad de emulación en tiempo real	X		
SySR3	Seguridad para la gestión y protección de los parámetros de emulación.		X	
SySR4	Soporte para la configuración de parámetros SDR a través de la interfaz		X	
SySR5	Conexión de UE comercial, o teléfono móvil	X		
Requerimientos de modo y estado				
SySR6	Modo emulación de una red LTE de extremo a extremo		X	
SySR7	Modo de configuración para diferentes anchos de banda	X		
SySR8	Modo de evaluación de rendimiento para analizar el comportamiento del sistema	X		
Requerimientos de uso				

SySR9	Compatibilidad con diferentes dispositivos SDR para flexibilidad de implementación		X
SySR10	Soporte para dispositivos de entrada/salida externos para pruebas específicas	X	
Requerimientos de rendimiento			
SySR11	Rendimiento de procesamiento de señal SDR optimizado para una emulación eficiente		X
SySR12	Dispositivo UE capaz de realizar pruebas LTE	X	
SySR13	Salida de datos con calidad de señal comparable a una red LTE real	X	
Requerimientos Físicos			
SySR14	Estructura robusta para la protección y colocación de componentes		X
SySR15	Ventilación eficiente para mantener la temperatura operativa de los componentes		X
SySR16	Alimentación eléctrica estable para el funcionamiento continuo del sistema	X	
SySR17	Conexión a internet estable para acceso a recursos externos	X	

Nota Detalle de requerimientos del sistema. Elaboración propia.

3.2.2 *Requerimientos de Stakeholders*

El enfoque principal del proyecto se centra en un sistema de aprendizaje de comunicación móvil 4G. Para cumplir con su propósito, el sistema debe llevar a cabo diversas funciones que refuerzan el conocimiento teórico de esta tecnología. Estos requisitos se observan en Tabla 9

Tabla 9

Requerimientos de Stakeholders

StSR					
#	Requerimiento	Prioridad			
		Alta	Media	Baja	
Requerimientos operacionales					
StSR1	El sistema cumplirá con los requisitos de una red LTE específicas en el Release 8 de 3GPP	X			
StSR2	El sistema tendrá la capacidad para gestionar eficientemente todos los elementos de una red LTE	X			

StSR3	El sistema tendrá la habilidad para realizar un análisis del protocolo LTE, comprendiendo su estructura técnica	X
StSR4	Capacidad para evaluar el rendimiento de la red LTE, incluyendo velocidad, latencia y calidad	X
StSR5	El sistema debe ser compatible con dispositivo SDR, para el uso de la interfaz de radio	X
StSR6	Habilidad para identificar y evaluar las frecuencias utilizadas y su ocupación en el espectro electromagnético	X
Requerimientos de usuario		
StSR7	La visualización de señales y valores de capa física y Mac	X
StSR8	Visualización de conexión de eNBs y Ue en la red LTE	X

Nota. En la tabla se observa los requerimientos para comprender la red LTE. Elaboración propia.

Los requisitos mencionados anteriormente son cubiertos por la plataforma OpenAirInterface, es esencial realizar un análisis completo de la plataforma para maximizar su potencial en el desarrollo del sistema de comunicación móvil 4G.

3.2.3 *Requerimientos de arquitectura*

Es crucial realizar un análisis detallado de los requisitos de hardware y software necesarios para aprovechar plenamente la plataforma OpenAirInterface. En términos de requisitos de hardware, se consideran elementos como las especificaciones técnicas de las computadoras, además, se evalúa la compatibilidad de los dispositivos SDR. Por otro lado, en cuanto a los requisitos de software, se considera el sistema operativo necesario, verificando la compatibilidad con OpenAirInterface y sus dependencias. Asimismo, se asegura de contar con las bibliotecas y herramientas de software SDR adecuadas. En la Tabla 10 se observa los requerimientos de arquitectura con la relación de prioridad.

Tabla 10

Requerimientos de arquitectura

SRSH				
#	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
Requerimientos de diseño				
SRSH1	El sistema debe tener los componentes de una red LTE (EPC, eNB y UE)	X		
SRSH2	El sistema debe contar con Ue comercial	X		
SRSH3	El sistema debe poseer un SDR externo a la red para visualizar la señal transmitida	X		
SRSH4	Debe ser de bajo costo		X	
SRSH5	El sistema debe ser compacto		X	
Requerimientos de Hardware				
SRSH6	El PC debe tener CPU Intel con 8 GB de RAM, 4 núcleos, 2.7 GHz o más, USB3 y Ethernet 1 GB/10 GB	X		
SRSH7	Los SDR deben ser dispositivos USRP B210, EURECOM EXPRESSMIMO2 RF, LimeSDR y BladeRF	X		
SRSH8	Utilizar cables SMA-SMA para conexiones efectivas dentro del sistema	X		
SRSH9	El sistema debe usar antenas diseñada para 2.3-2.7 GHz / 3.3-3.9 GHz garantiza transmisión óptima de señales LTE.		X	
SRSH10	El UE debe proporcionar conectividad a la tecnología 4G	X		
Requerimientos de Software				
SRSH11	Implementación de software OpenAirInterface	X		
SRSH12	Sistema Operativo Ubuntu 14.04 LTS kernel 3.19 o superior	X		
SRSH13	Paquetes Ubuntu de compilación, desarrollo, depuración librerías	X		
SRSH14	Implementación de protocolos para componentes EPC	X		
SRSH15	Bibliotecas de software SDR para el control uso y manejo de dispositivos SDR: UHD (USRP Hardware Driver), EXPRESSMIMO2 Library, Lime Suite, libbladeRF	X		
Requerimientos eléctricos				

SRSH16	El sistema tendrá alimentación eléctrica mediante una fuente conectada a la luz	X
SRSH17	La alimentación de dispositivos SDR será realizada desde el PC.	X
SRSH18	Ventilador cuya alimentación sea desde el PC	X

Nota. Requerimientos para llevar a cabo la arquitectura del sistema LTE. Elaboración propia.

3.3 Diseño

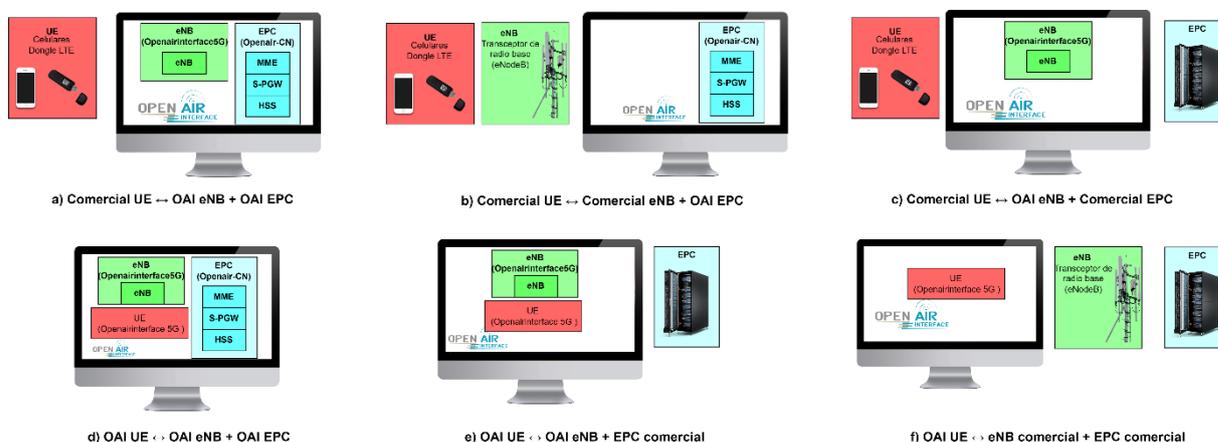
En la fase inicial del diseño del sistema, se siguieron los siguientes pasos: selección de una configuración compatible con OAI, elección de los componentes del sistema en base a los requisitos de hardware y software, y definición de la arquitectura de red.

3.3.1 Componentes del sistema

De acuerdo a OpenAirInterface (2023) la plataforma OAI ofrece flexibilidad en su utilización, permitiendo configuraciones diversas que involucran componentes comerciales en distintos niveles. Como se puede observar en la Figura 18 estas configuraciones incluyen:

Figura 18

Configuraciones OpenAirInterface



Nota. En la figura se observa las diferentes configuraciones con los componentes principales de la red LTE. Elaboración propia.

En este proyecto se ha seleccionado el primer escenario como enfoque principal por la falta de componentes comerciales. Esta elección se basa en la intención de facilitar la introducción a la plataforma y simplificar su manejo.

Una vez seleccionado el tipo de configuración ofrecido por OpenAirInterface, se han elegido los componentes necesarios para establecer la red LTE. Para realizar la selección se ha desarrollado una tabla comparativa para identificar si el componente cumple con los requisitos establecidos, la evaluación se ha realizado asignando un valor de 1 si la alternativa cumple con el requisito y 0 si no lo cumple.

3.3.1.1 Selección de Hardware

- Selección PC

En la Tabla 11 se puede identificar una comparativa de los requerimientos entre 2 mini pc, ya que estas presentan un tamaño óptimo para poder montar el escenario de pruebas.

Tabla 11

Elección PC

Selección PC								
Hardware				Requerimientos				Valor total
				SRSH4	SRSH5	SRSH6	SRSH12	
HP	EliteDesk	800-G3	Mini	1	1	0	1	3
Business PC								
Mini	pc	Intel	NUC 8	1	1	1	1	4
NUC8i7HVK								

“1” Cumple “0” No cumple

Nota. Se realiza la comparación con Mini PC por ser compacta. Elaboración propia.

Se ha seleccionado la Mini pc Intel NUC 8 NUC8i7HVK para llevar a cabo el proyecto por cumplir con los requerimientos necesarios. A continuación, en la Tabla 12 se muestran las características que posee este componente.

Tabla 12

Características mini PC Intel NUC 8 NUC8i7HVK

Característica	Descripción
Procesador	Intel Core i7-8809G Quad-Core (8MB Cache, hasta 4.2 GHz)
Gráficos Integrados	Gráficos Radeon™ RX Vega M GH
Memoria RAM	Soporte para DDR4-2400 SO-DIMM, 2 ranuras, hasta 32GB
Almacenamiento	Ranura M.2 para SSD (PCIe x4)
Puertos USB	USB Type-C con soporte para Thunderbolt 3 4 x USB 3.0
Salidas de Video	2 x HDMI 2.0a (4K a 60Hz) 2 x mini-DisplayPort 1.2 (4K a 60Hz)
Red	Gigabit Ethernet (RJ45)
Dimensiones	221 mm x 142 mm x 39 mm
Sistema Operativo	No incluido (listo para instalar sistema operativo)

Nota. Se observa las características del mini PC. Elaboración propia.

- **Selección del dispositivo SDR**

A continuación, se presenta la Tabla 13 con las especificaciones de distintos dispositivos SDR:

Tabla 13

Características SDR

Plataforma	USRP B210	ExpressMIMO2	BladeRF	Lime SDR
Conexión de Datos	USB3	USB3	USB3	USB3
Adquisición de Datos	20MHz o 120MHz	2x2 MIMO	10MHz	20MHz

Capacidad MIMO	2x2 MIMO	2x2 MIMO	1x1 SISO	2x2 MIMO
Ancho de Banda	20MHz	10MHz	10MHz	20MHz
Chip RF	AD9361	LMS6002D(x4)	LMS6002D	LMS7002M
Frecuencia	70MHz - 6GHz	300MHz-6GHz	3.8GHz	3.8GHz
Precio	\$1.130	\$3.000	\$860	\$415
Duplexación	FDD o TDD	FDD o TDD	FDD	FDD o TDD
Potencia de Salida	10 dBm @ 2.6GHz	0 dBm	6dBm	10dBm @ 700MHz

Nota. Especificaciones módulos SDR. Elaboración propia.

Tabla 14

Elección SDR

Hardware	Selección modulo SDR						Valor total
	Requerimientos						
	SRSH3	SRSH4	SRSH5	SRSH6	SRSH7	SRSH8	
USRP B210	1	1	0	1	1	1	5
ExpressMIMO2	0	0	0	1	0	1	2
BladeRF	0	1	0	1	1	1	4
Lime SDR	1	1	1	1	1	1	6

“1” Cumple “0” No cumple

Nota. En la tabla se puede observar la elección de microcontrolador. Autoría propia.

La Tabla 14 muestra que el dispositivo Lime SDR es la opción que mejor cumplen con los requisitos.

- **Selección equipo de usuario (UE) comercial**

La Tabla 15 muestra que el dongle USB LTE Huawei E3372 es la mejor opción por lo que se utiliza esta para el desarrollo del proyecto.

Tabla 15*Elección UE comercial*

Selección UE comercial					
Hardware	Requerimientos				Valor total
	SRSH2	SRSH4	SRSH5	SRSH10	
Huawei E398u-1	1	1	1	0	3
Huawei E3372	1	1	1	1	4
Dongle Bandrich C50	1	0	1	1	3
		“1” Cumple	“0” No cumple		

Nota. Requerimientos de hardware para la selección de UE comercial. Elaboración propia.

3.3.1.2 Selección de software

El software principal para llevar a cabo este proyecto es OpenAirInterface, es de código abierto ofrece implementaciones de software para diferentes componentes de la red móvil, incluyendo estaciones base (eNodeB), estaciones móviles (UE) y elementos de la red central (EPC).

- **Sistema operativo**

Eurecom recomienda el uso de Ubuntu Linux como sistema operativo para lograr un rendimiento óptimo al ejecutar OAI. Esto se debe a que requiere la instalación de varios paquetes. Para la compatibilidad de software, se instaló el sistema operativo base Linux Ubuntu 16.04 LTS ya que permite trabajar con la rama develop necesaria para llevar a cabo el proyecto.

- **Software SDR.**

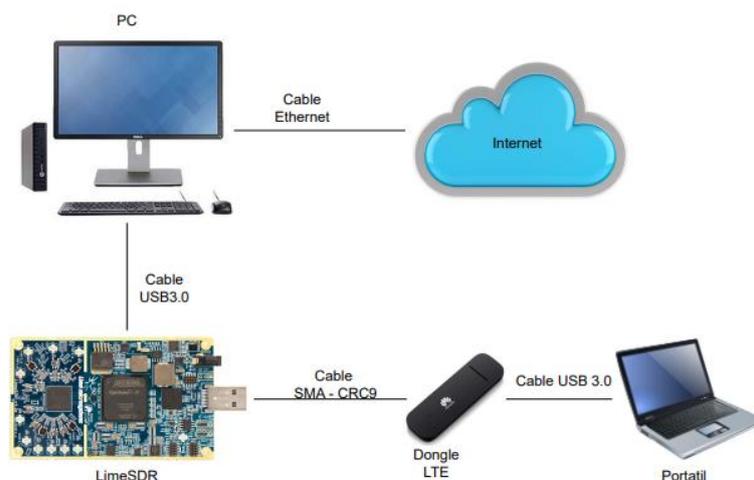
Para hacer uso del módulo LimeSDR en el entorno de Ubuntu, se debe llevar a cabo la instalación de SoapySDR y Lime Suite como software de control.

3.3.2 Definición de la arquitectura de red

En el despliegue de la red, se ha tomado la decisión de utilizar una única máquina que albergará tanto el CN como el eNB. Además, se ha incorporado un dispositivo LimeSDR como plataforma de radio para la transmisión y recepción de señales y un USB dongle LTE que desempeña la función del UE. Esta configuración permite la implementación y evaluación del sistema LTE en un entorno controlado. La Figura 19 muestra una representación visual del escenario montado.

Figura 19

Escenario emulador LTE



Nota. Se conecta el Dongle LTE a un portátil para verificar la conexión con la red.

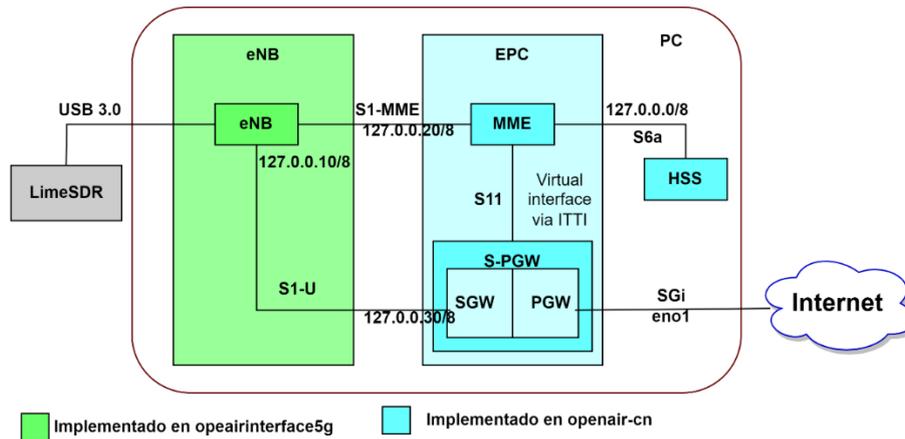
Elaboración Propia.

En el proyecto, se ha optado por utilizar la interfaz de bucle local (loopback) que permite ejecutar la red de manera autónoma, sin depender de dispositivos externos ni conexiones físicas. Esta interfaz simula una comunicación completa dentro del entorno local, lo que facilita las pruebas y el desarrollo del proyecto. En la Figura 20 se puede

observar el diseño de la arquitectura de la red, donde se identifican los componentes lógicos e interfaces.

Figura 20

Diagrama de red



Nota. Se observa la configuración de interfaces en los componentes lógicos. Elaboración propia.

A continuación, se muestra la Tabla 16, el cual presenta las direcciones IP correspondientes a cada interfaz de los componentes de la red, lo cual proporciona una referencia clara para la configuración y la comunicación interna de la red.

Tabla 16

Direccionamiento de las interfaces de la red

Componente	Interfaz	Dirección IP
eNB	S1-U	127.0.0.10/8
	S1-MME	127.0.0.10/8
MME	S1-MME	127.0.0.20/8
	S11	127.0.0.20/8
	S6a	127.0.0.0/8
HSS	S6a	127.0.0.1
S-GW	S11	127.0.0.30/8
	S1-U	127.0.0.30/8

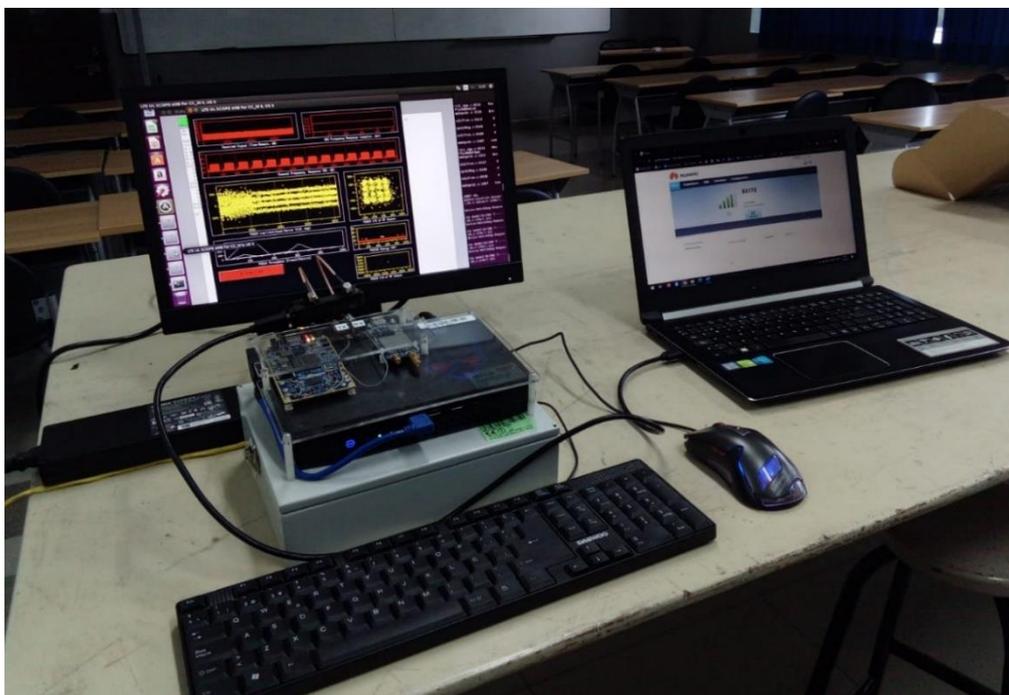
P-GW	SGi	eno1
-------------	------------	-------------

Nota. La interfaz SGi se le asigna el nombre de la interfaz de la maquina real que permite el acceso a internet en este caso “eno1”. Elaboración propia.

A continuación, se puede observar en la Figura 21 el montaje del sistema emulador LTE dentro del laboratorio, cuya característica importante es el tamaño reducido que ocupada permitiendo llevar a cabo las practicas más cómodamente.

Figura 21

Sistema emulador LTE armado en el laboratorio



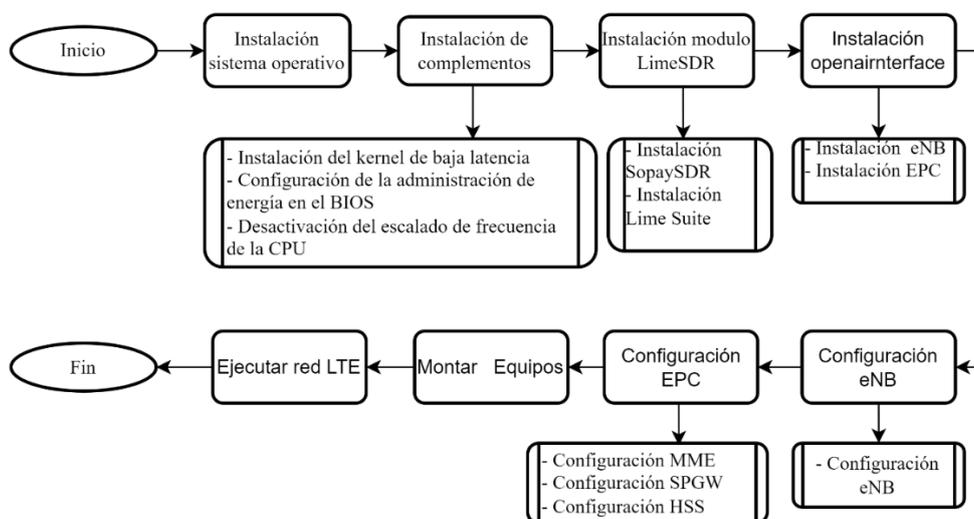
Nota. El sistema LTE es compacto. Elaboración propia.

3.4 Implementación

Para iniciar la implementación del proyecto, es necesario seguir una serie de pasos que garantizarán un proceso adecuado y eficiente, en la Figura 22 se detallan los pasos a seguir.

Figura 22

Diagrama de flujo del proceso de implementación



Nota. En la figura se puede observar el diagrama de flujo del proceso de implementación.

Elaboración propia.

3.4.1 Instalación sistema operativo

Se instaló el sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS en el mini PC Intel NUC 8 NUC8i7HVK. Los pasos del proceso de instalación se encuentran en el Anexo A.

3.4.2 Instalación de complementos

Para garantizar el funcionamiento de OAI, se realizan medidas que aseguran la compatibilidad del software. Estas medidas incluyen la instalación del kernel de baja latencia, la configuración de la administración de energía en el BIOS y la desactivación del escalado de frecuencia de la CPU. Estas acciones son fundamentales para optimizar el rendimiento, la estabilidad y la compatibilidad de OAI en el entorno de emulación LTE.

- **Instalación del kernel de baja latencia**

La instalación del kernel de baja latencia es un proceso fundamental para mejorar el rendimiento y la capacidad de respuesta del sistema. Su objetivo principal radica en

reducir los retrasos en la comunicación y el procesamiento de datos, esto contribuye a ofrecer servicios de alta calidad y mejorar la experiencia del usuario, así como a maximizar la eficiencia y el potencial de la red. En el ANEXO B, apartado 1, se proporcionan los pasos detallados para realizar la instalación del kernel de baja latencia. Se recomienda realizar las directrices específicas para el sistema operativo utilizado.

- **Configuración de la administración de energía en el BIOS**

La configuración de la administración de energía en el BIOS es fundamental en la optimización del consumo de energía del sistema. En el ANEXO B, apartado 2 se detallan los pasos necesarios para llevar a cabo la configuración de la administración de energía en el BIOS, con el propósito de establecer políticas y ajustes que permitan un uso eficiente de la energía. Esto es especialmente relevante en redes que involucran dispositivos SDR. La configuración adecuada de la administración de energía en el BIOS garantiza un rendimiento óptimo del sistema, minimizando posibles interferencias y problemas ocasionados por fluctuaciones en el suministro de energía.

- **Desactivación del escalado de frecuencia de la CPU**

Cuando se desactiva el escalado de frecuencia de la CPU, se evita que el procesador ajuste automáticamente su velocidad de reloj en función de la carga de trabajo. Esto es especialmente relevante en entornos de tiempo real, donde se requiere una respuesta rápida y predecible.

Al desactivar el escalado de frecuencia de la CPU, se establece la frecuencia de la CPU en un valor fijo, lo que proporciona una base constante y estable para el procesamiento de datos en tiempo real. Esto ayuda a minimizar los tiempos de latencia y garantiza un rendimiento consistente del sistema. Los pasos detallados para desactivar el escalado de frecuencia de la CPU se encuentran en el ANEXO B, apartado 3.

3.4.3 Instalación modulo LimeSDR

Para hacer uso del módulo SDR en el entorno de Ubuntu, se debe llevar a cabo la instalación de SoapySDR, ya que proporciona una interfaz común para interactuar con dispositivos SDR. Además, se requiere la instalación de los controladores y herramientas de Lime Suite, indispensables para el manejo del dispositivo LimeSDR. Los pasos detallados para la instalación se encuentran en el ANEXO C.

En el ANEXO C, apartado 1, se describe el proceso de instalación de SoapySDR. Los pasos detallados en el anexo proporcionan las directrices necesarias para llevar a cabo una instalación correcta y asegurar la funcionalidad adecuada de SoapySDR en el entorno de Ubuntu. Además, en el ANEXO C, apartado 2, se encuentra la instalación de los controladores y herramientas de Lime Suite.

3.4.4 Instalación OpenAirInterface

La instalación de OAI se llevó a cabo a través de dos módulos de software: `openairinterface5g`, que implementa la red de acceso de radio LTE (E-UTRAN) y proporciona los ejecutables para la instalación y ejecución de un eNodeB, y `openair-cn`, que implementa el núcleo de red LTE (EPC) y proporciona los ejecutables de instalación y ejecución de los componentes del EPC de LTE implementados por OAI, como HSS, MME y S-PGW.

3.4.4.1 Instalación eNodeB

Para realizar el proceso de instalación de eNodeB se realizó los siguientes pasos. Primero se clonó el repositorio de OpenAirInterface 5G desde su fuente original, lo que permite tener la última versión disponible. Sin embargo, es necesario realizar un reinicio completo para volver a la versión desarrollada específicamente para trabajar con LTE “Release” 8.6 y 10. A continuación, se instaló la dependencia “`libelf-dev`” la cual permite utilizar los ejecutables necesarios para la instalación del eNodeB. Posteriormente, se

configuró el entorno de desarrollo para establecer las variables necesarias para la compilación y ejecución de OpenAirInterface.

Finalmente se llevó a cabo el proceso de instalación de los componentes y dependencias especificando las siguientes opciones:

- "Instalación y construcción limpia de OpenAirInterface": Se utiliza la opción "-I" para realizar una instalación desde cero, asegurando una configuración limpia del software.
- "Compilación completa para el funcionamiento de eNB": Se utiliza la opción "-c" para compilar todos los componentes necesarios para el funcionamiento del eNodeB.
- "Instalación de controladores para la plataforma SDR a utilizar": Se utiliza la opción "-w LMSSDR" para instalar los controladores específicos de la plataforma SDR que se utilizará, en este caso, LimeSDR.
- "Establecer el modo de funcionamiento del sistema como eNB": Se utiliza la opción "-eNB" para configurar el sistema en modo estación base LTE.
- "Habilitar el modo de funcionamiento eNB": Se utiliza la opción "-x" para habilitar el modo de funcionamiento eNB, lo que asegura que el software esté configurado y compilado para funcionar correctamente como una estación base LTE.

Estos pasos permiten realizar la instalación adecuada del eNodeB, asegurando un entorno óptimo para su funcionamiento. Los detalles completos sobre el proceso de instalación se encuentran en el ANEXO D, apartado 1.

3.4.4.2 Instalación EPC

La instalación del EPC se llevó a cabo utilizando software de terceros, es importante destacar que este módulo de software está escrito principalmente bajo la licencia FreeBSD de Eurecom, la cual promueve la libertad de uso y modificación del software, siempre y cuando se mantengan las condiciones de la licencia original. Para iniciar el proceso de instalación, se realizó la clonación del repositorio remoto de OpenAir-CN desde la siguiente dirección: "<https://gitlab.com/chunyeow/openair-cn>". Una vez descargado todo el código fuente, se procedió a cambiar a la rama "develop", la cual permite trabajar con la versión de desarrollo del proyecto. A continuación, se realizó la descarga de los módulos necesarios para parchear el sistema de núcleo de red desde <https://open-cells.com/index.php/blog/>. Después de descargarlos, se descomprimió la carpeta y se copió el archivo "EPC.patch" en el directorio "openair-cn". Se aplicó el parche al código fuente del EPC. Este parche contiene cambios específicos que deben realizarse en el código existente para incorporar las modificaciones del parche.

Posteriormente, en el directorio "openair-cn" se cargó las variables de entorno y configuraciones específicas de desarrollo de OAI, como son las rutas de búsqueda de bibliotecas y ejecutables. Finalmente se accedió al directorio "openair-cn/scripts" donde se compiló e instaló los componentes HSS, MME y SPGW del sistema EPC de manera individual utilizando el argumento "-i" para realizar una instalación completa interactiva y sin dicho argumento para realizar la compilación de los archivos.

Durante la ejecución de los scripts de instalación de los componentes del EPC, se instalan algunos softwares adicionales, requeridos para el correcto funcionamiento del sistema. Para obtener información detallada sobre el proceso completo de instalación del EPC, se puede consultar el ANEXO D, específicamente el apartado 3, donde se brinda un desglose completo de los pasos y requisitos necesarios.

3.4.5 Configuración eNB

Para realizar la configuración del eNodeB, se utiliza un archivo de texto que contiene los parámetros necesarios. En la plataforma OAI, se proporcionan varias plantillas de configuración que se encuentran en el directorio "~/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/". Como guía, se ha utilizado la plantilla "enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf", la cual está adaptada específicamente para la plataforma Lime Suite. Algunas de las configuraciones que posee el archivo son:

- Parámetros de identificación
 - Active_eNBs: Indica las estaciones base eNB activas en la red.
 - eNB_name: Nombre asignado a una estación base eNB.
 - tracking_area_code: Código que identifica un área de seguimiento en una red LTE.
 - mobile_country_code: Código de país móvil utilizado en la identificación de una red móvil.
 - mobile_network_code: Código de red móvil utilizado en la identificación de una red móvil.
- Parámetros de nivel físico:
 - frame_type: especifica el tipo de trama utilizado en la transmisión (FTT o TDD).
 - eutra_band: Banda de frecuencia EUTRA utilizada para la comunicación inalámbrica LTE.
 - downlink_frequency: Frecuencia de enlace descendente para la transmisión de datos en la red LTE.

- `uplink_frequency_offset`: Desplazamiento de frecuencia de enlace ascendente en relación con la frecuencia de enlace descendente.
- `Nid_cell`: Identificador de celda utilizado para identificar una celda específica.
- `N_RB_DL`: Número de recursos de bloque de frecuencia descendente en una celda.
- `nb_antennas_tx`: Número de antenas de transmisión utilizadas en una estación base eNB.
- `nb_antennas_rx`: Número de antenas de recepción utilizadas en una estación base eNB.
- `tx_gain`: Ganancia de transmisión para la potencia de salida de una estación base.
- `rx_gain`: Ganancia de recepción para la sensibilidad de recepción de una estación base.
- Parámetros de MME:
 - `mme_ip_address`: Dirección IP asignada al Mobility Management Entity (MME).
- Parámetros de red:
 - `ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME`: Nombre de la interfaz utilizada para la comunicación entre la estación base eNB y el MME.
 - `ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME`: Dirección IPv4 asignada a la interfaz utilizada para la comunicación entre la estación base eNB y el MME.

- ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U: Nombre de la interfaz utilizada para la comunicación de datos entre la estación base eNB y el Serving Gateway (SGW)
- ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U: Dirección IPv4 asignada a la interfaz utilizada para la comunicación de datos entre la estación base eNB y el SGW.

Se utilizan estos parámetros para establecer y ajustar elementos fundamentales, como la identificación de la estación base, la configuración de frecuencia y ganancia, la comunicación con componentes de la red, como el MME y el SGW. Cada parámetro juega un papel vital en la configuración y funcionamiento óptimo de la red. Para obtener más detalles sobre la configuración completa de estos parámetros, se puede consultar el Anexo D, apartado 2.

3.4.6 Configuración EPC

La configuración del EPC se realiza de forma individual para cada componente a través de archivos de texto. Durante la instalación del EPC, se proporcionan plantillas de configuración específicas para cada componente. Asimismo, en el archivo de parcheo del EPC se incluyen estas plantillas, lo que facilita la configuración inicial de cada componente y garantiza la correcta integración en el sistema global.

A continuación, se realiza la configuración de los diferentes componentes.

3.4.6.1 Configuración MME

La configuración del MME requiere el uso de dos archivos de texto distintos. El primero de ellos, llamado "mme.conf", se encuentra en el directorio "/usr/local/etc/oai/" y se encarga de la configuración general del MME. Por otro lado, el segundo archivo, denominado "mme_fd.conf", se localiza en el directorio

"/usr/local/etc/oai/freeDiameter/" y se utiliza para configurar el protocolo FreeDiameter que el MME utiliza.

El archivo mme.conf contiene varios valores de configuración importantes para el componente MME. Algunos de los valores más relevantes incluyen:

- REALM: Identifica y asocia el MME con otros componentes de la red.
- S6A_CONF: Especifica la ruta del fichero de configuración de FreeDiameter que utiliza el MME.
- HSS_HOSTNAME: Indica el nombre del host del HSS.
- GUMMEI_LIST: Contiene una lista de los identificadores GUMMEI (Global Unique MME Identifier) que se utilizarán en el MME.
- TAI_LIST: Especifica una lista de Identificadores de Área de Tráfico (TAI) que se utilizarán en el MME.
- MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME: Define el nombre de la interfaz utilizada por el MME para la comunicación a través de la interfaz S1-MME.
- MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME: Especifica la dirección IPv4 utilizada por el MME para la comunicación a través de la interfaz S1-MME.
- MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME: Define el nombre de la interfaz utilizada por el MME para la comunicación a través de la interfaz S11-MME.
- MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME: Especifica la dirección IPv4 utilizada por el MME para la comunicación a través de la interfaz S11-MME.
- SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11: Indica la dirección IPv4 utilizada por el SGW para la comunicación a través de la interfaz S11.

En el archivo mme_fd.conf los parámetros de configuración más importantes son:

- Identity: Identifica de manera única a un suscriptor o usuario en la red.

- Realm: Define el dominio o reino en el que se encuentra un componente de la red.
- ConnectPeer: Establece la conexión con otro nodo o entidad en la red.

La configuración completa de estos archivos está en el Anexo D, apartado 4.

3.4.6.2 Configuración HSS

Para realizar la configuración del componente HSS, es necesario utilizar dos archivos. El primero de ellos es el archivo "hss.conf", el cual se encuentra ubicado en el directorio "/usr/local/etc/oai/". El segundo archivo, llamado "hss_fd.conf", se localiza en el directorio "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/".

En el archivo "hss.conf", se encuentran los parámetros más relevantes para la configuración del HSS:

- MYSQL server: Especifica la dirección IP del servidor MySQL donde se aloja la base de datos del HSS.
- MYSQL user: Establece el usuario utilizado para la autenticación en el servidor MySQL.
- MYSQL pass: Indica la contraseña utilizada para la autenticación en el servidor MySQL.
- MYSQL db: Especifica la base de datos utilizada por el HSS de OpenAirInterface.
- OPERATOR KEY: Establece la clave OP (Operator Key) del HSS.
- FD_conf: Especifica la ruta del archivo de configuración del HSS para el protocolo FreeDiameter.

En el archivo "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss_fd.conf", los parámetros más importantes son:

- Identity: Especifica el FQDN (Fully Qualified Domain Name) del HSS.
- Realm: Define el dominio del FQDN.

La configuración de estos parámetros se encuentra detallada en el ANEXO D, apartado 5.

3.4.6.3 Configuración SPGW

La configuración del SPGW se lleva a cabo mediante el archivo "spgw.conf", el cual se encuentra en el directorio "/usr/local/etc/oai/". Este archivo desempeña un papel crucial al definir aspectos fundamentales como las direcciones IP, los puertos de comunicación y las políticas de enrutamiento utilizadas por el SPGW. Algunos de los parámetros más importantes que se pueden configurar en este archivo son:

Las variables mencionadas son esenciales en la configuración del sistema de red LTE:

- SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11: Define el nombre de la interfaz de comunicación entre SGW y MME en el plano de control.
- SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11: Especifica la dirección IP del SGW en la interfaz S11.
- SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP: Define el nombre de la interfaz de comunicación entre SGW y eNB en los planos de usuario y control.
- SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP: Especifica la dirección IP del SGW en las interfaces S1-U, S12 y S4-UP.
- PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI: Define el nombre de la interfaz de comunicación entre PGW y SGW en el plano de usuario (SGi).
- PGW_MASQUERADE_SGI: Indica si el PGW debe utilizar la técnica de masquerading en la interfaz SGi.
- `IPV4_LIST`: Especifica una lista de direcciones IP utilizadas en la configuración de los componentes de la red LTE.

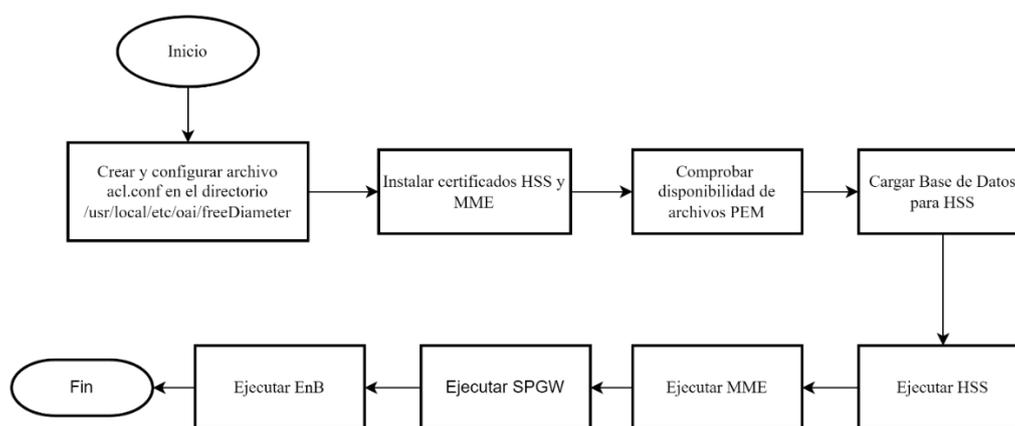
La configuración de estos parámetros se encuentra detallada en el ANEXO D, apartado 6.

3.4.7 *Compilación y puesta en marcha*

Una vez completada la configuración, se lleva a cabo la compilación de los componentes de la red y se procede a su ejecución. A continuación, en la Figura 23 se presenta un diagrama que ilustra los pasos necesarios para ejecutar los componentes de OpenAirInterface de manera adecuada y efectiva.

Figura 23

Diagrama de flujo compilación y puesta de marcha del emulador



Nota. Se observa el proceso para ejecutar el emulador de la red LTE. Elaboración propia.

3.5 Pruebas y validación

En la validación y pruebas de la red LTE, se han hecho prácticas en el entorno de laboratorio. Estas prácticas pretenden asegurar que la configuración de los elementos de la red esté correctamente implementada y validada. Se realizan pruebas para verificar el funcionamiento de los protocolos, analizar el comportamiento del espectro y evaluar el rendimiento global de la red. El propósito fundamental de estas pruebas es garantizar que la red cumpla con los estándares establecidos y pueda dar un rendimiento óptimo en cuanto a calidad de servicio y eficiencia.

El detalle completo de las prácticas realizadas se encuentra en el Capítulo 4 y 5, donde se presenta un análisis detallado de los procedimientos de prueba, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de estas pruebas de validación en el entorno de laboratorio. Estas prácticas proporcionan una comprensión más profunda de la funcionalidad y el rendimiento de la red LTE implementada, brindando información valiosa para su optimización y mejoramiento continuo.

3.6 Documentación y entrega

En esta fase se llevó a cabo la recopilación, organización y presentación de la información generada durante la evolución del proyecto. Específicamente, se crea y entrega un documento que incorpora guías destinadas a los estudiantes, soluciones detalladas diseñadas para los docentes, manuales destinados a simplificar el uso eficiente del sistema. Este documento se puede observar en el ANEXO D.

CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICAS DE LABORATORIO

En este capítulo, se implementan prácticas de laboratorio diseñadas para verificar el buen funcionamiento de la red LTE, y se hace un estudio sobre la tecnología móvil. Dentro de este contexto, se abordan temas como la selección de los temas a tratar en los laboratorios, la creación de guías correspondientes y posteriormente, la ejecución de dichas prácticas.

4.1 Definición de temas de laboratorio

Para definir los temas de laboratorio, se ha llevado a cabo un análisis del programa de estudios correspondiente a la materia de redes móviles. Esta materia, se enfoca en el estudio detallado de las arquitecturas móviles, así como de sus componentes, funcionamiento e implementación. Un enfoque particular se centra en el sistema de comunicación móvil LTE, cuyo propósito es explorar la transición que implica la evolución a un sistema 4G-LTE en la telefonía celular, mediante el aprendizaje teórico y la realización de prácticas de laboratorio para profundizar en este campo de estudio.

Se consideraron aspectos teóricos fundamentales y prácticos esenciales que permitirían a los estudiantes comprender el funcionamiento de las redes móviles 4G-LTE. Se buscó establecer una conexión sólida entre la teoría y la aplicación práctica, permitiendo a los alumnos no solo adquirir conocimientos conceptuales, sino también desarrollar habilidades concretas en la configuración y optimización de un sistema móvil 4G. Este proceso culminó en la identificación de los seis laboratorios propuestos a continuación, diseñados para proporcionar una experiencia de aprendizaje comprehensiva en el campo de la tecnología 4G-LTE.

- **Practica 1: Configuración e Implementación de Elementos LTE:** Esta práctica se centra en la configuración y puesta en marcha de los componentes clave de una red LTE, como estaciones base, red central y dispositivos de usuario.
- **Practica 2: Análisis del Espectro LTE:** En esta práctica, se estudia el espectro de frecuencias utilizado por la tecnología LTE para la transmisión de datos móviles. Los estudiantes examinarán la asignación de frecuencias, las bandas de operación.
- **Practica 3: Análisis del Protocolo LTE:** Aquí, se profundiza en los protocolos de comunicación utilizados por LTE. Los estudiantes estudiarán los procedimientos de señalización, control de acceso, autenticación.
- **Practica 4: Evaluación del Rendimiento de la Red LTE:** Este tema se enfoca en la medición y optimización del rendimiento de una red LTE. Los estudiantes aprenderán a realizar pruebas de calidad de servicio, analizar la capacidad de la red y aplicar ajustes para mejorar la eficiencia y la experiencia del usuario en una red LTE.
- **Practica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional:** Este laboratorio se enfoca en las estructuras de trama y ranura de la transmisión de enlace descendente FDD-LTE, el estudiante analizará cómo afectan el desplazamiento de tiempo y el desplazamiento de frecuencia portadora a la demodulación OFDM.
- **Practica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda:** En esta práctica se aplicarán técnicas de detección eficientes a señales de enlace descendente FDD-LTE para identificar la celda en la capa física.

4.2 Hojas guías de prácticas de laboratorio

En esta sección, se proporcionarán las hojas guías correspondientes a cada práctica, las cuales se han diseñado para servir como recursos esenciales durante la realización de los experimentos. Cada hoja guía contiene información fundamental para el proceso de aprendizaje. Esto incluye el tema específico de la práctica, una introducción que contextualiza el experimento, los objetivos a alcanzar, fundamentación teórica necesaria para realizar la práctica, los materiales y equipos necesarios, el desarrollo del experimento y finalmente, la interpretación de los resultados obtenidos.

4.2.1 Práctica 1: Configuración e implementación de elementos LTE

Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de configurar los componentes clave de una red LTE utilizando OpenAirInterface (OAI), incluyendo el eNB y el EPC (MME - HSS - SPGW). Además, se les guiará en la conexión de un dispositivo comercial de usuario final (UE), lo que les permitirá acceder a Internet y experimentar con los servicios y aplicaciones en un entorno de red LTE real. A lo largo de la práctica, los estudiantes adquirirán conocimientos prácticos sobre la configuración y el funcionamiento de una red LTE.

Objetivos

- Comprender los fundamentos de la emulación de redes LTE utilizando la plataforma OpenAirInterface (OAI).
- Configurar y poner en funcionamiento los componentes eNB y EPC utilizando OAI para establecer una red LTE, junto con la integración de dispositivos comerciales de usuario (COTS UE).
- Realizar mediciones y análisis de la red LTE implementada.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre redes LTE, incluyendo la arquitectura de la red, los componentes clave eNB, EPC, MME, HSS, SGW, PGW, además investigar sobre los valores RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

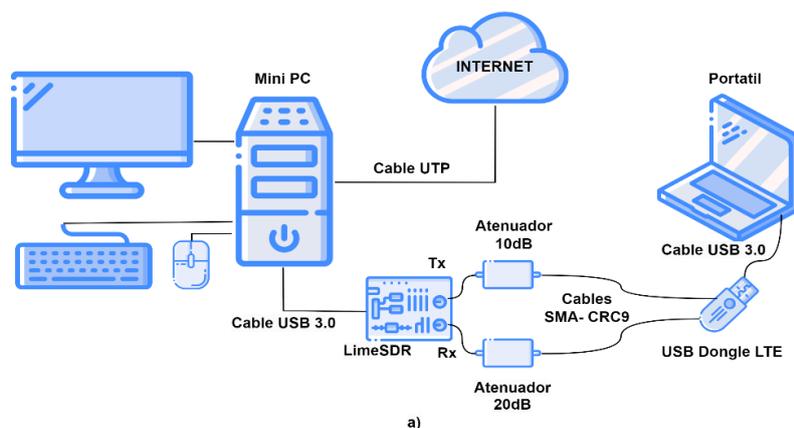
- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR.
- USB Dongle LTE.
- Portátil.
- 2 cables SMA(m) a CRC9.
- 2 cables USB (m) a USB (h).
- Atenuador 10dB y 20dB.
- Cable UTP.

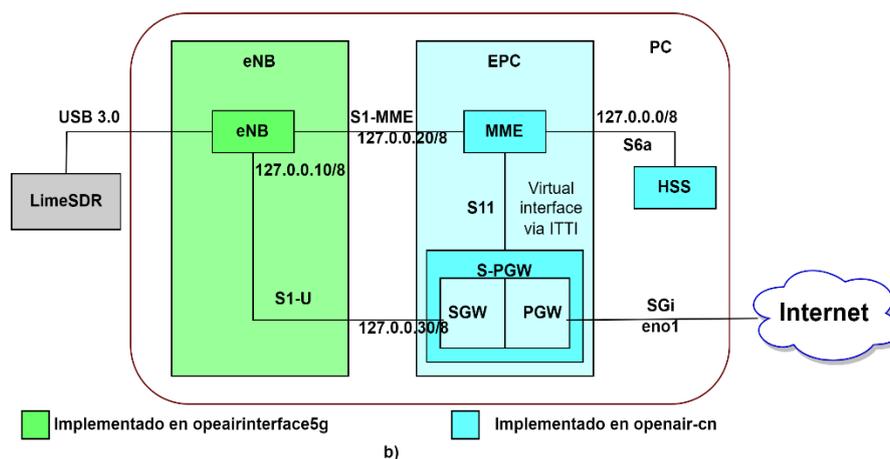
Diagrama de la topología

La Figura 24 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 24

Diagrama de conexión y topología de red





Nota. No conectar el USB dongle al portátil hasta recibir la instrucción. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1: Establecer la configuración global del sistema LTE.
 - Conectar los componentes de la red.
 - Verificar la conexión.
 - Verificar la red LTE.
 - Preparar componentes para iniciar las practica.
- Tarea 2: Configurar eNB.
 - Configurar banda 7 a 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.
- Tarea 3: Configurar EPC
 - Configurar HSS
 - Configurar MME
 - Configurar SPGW
- Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE
 - Activar certificados HSS y MME
 - Comprobar la disponibilidad de archivos PEM
 - Cargar base de datos para el HSS

- Ejecutar HSS
- Ejecutar MME
- Ejecutar SPGW
- Ejecutar eNB
- Tarea 5: Configurar USB dongle LTE
 - Instalar dongle USB LTE
 - Establecer conexión para Dongle USB LTE

Interpretación de resultados

- Realizar pruebas de velocidad, repetir la prueba 3 veces y registrar los resultados.
- Evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en ambos sentidos. Registrar los valores mínimos y máximos.
- Registrar los valores de RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

4.2.2 Práctica 2: Análisis del espectro LTE

Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes examinarán el espectro LTE, explorando sus características y propiedades. Además, podrán visualizar las señales de sincronización transmitidas en el contexto de esta tecnología. Este ejercicio práctico permitirá a los estudiantes adquirir una comprensión más profunda de los aspectos técnicos y operativos asociados con la red LTE.

Objetivos

- Analizar las variaciones y patrones de las señales dentro del espectro LTE.
- Profundizar la comprensión del proceso técnico de sincronización en el funcionamiento de las señales LTE.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre: GNU Radio, bandas LTE, uso de bandas pareadas para LTE, señal de sincronización a una red LTE.

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

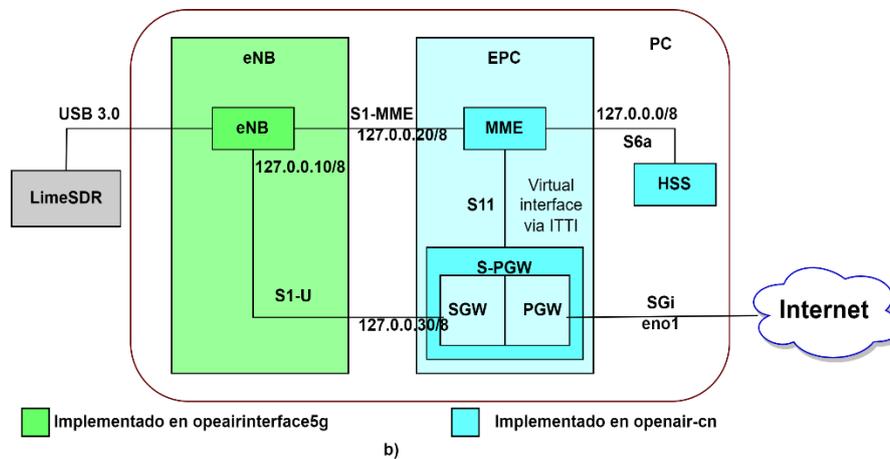
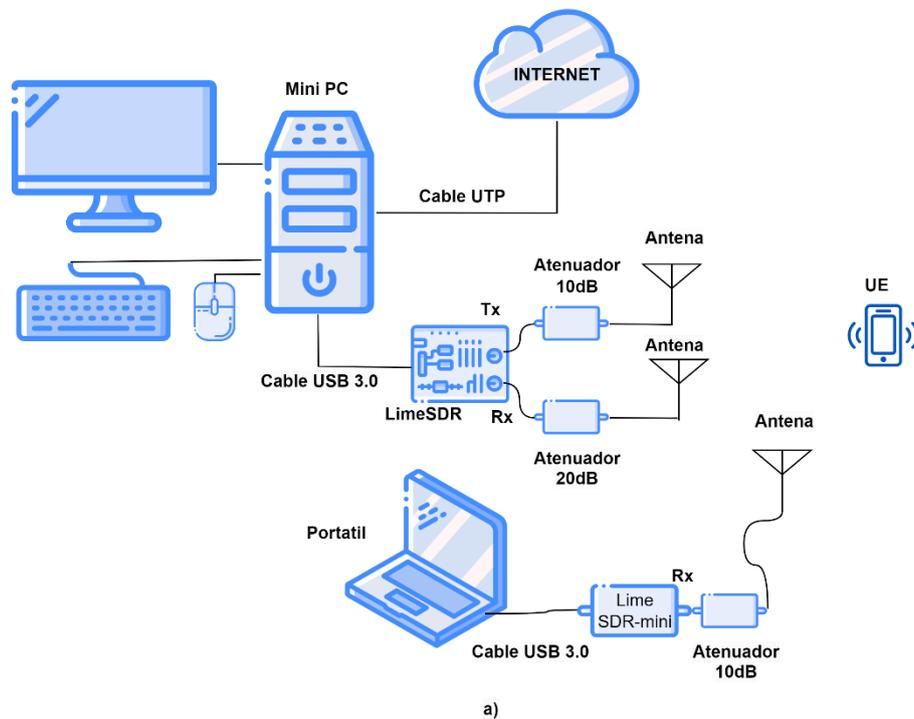
- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR y limeSDR mini.
- 2 cables USB 3.0.
- Cable SMA(m) a SMA(m).
- Cable UTP.
- 2 atenuadores 10dB.
- Atenuador 20 dB
- Portátil.
- Celular.
- 3 antenas.

Diagrama de la topología

La Figura 25 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 25

Diagrama de conexión y topología de red practica 2



Nota. Configuración de la red para la práctica de laboratorio 2. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1 : Establecer configuración global del sistema LTE.
 - o Conectar los componentes de la red.
 - o Configurar dispositivo celular.
- Tarea 2: Crear analizador de espectros GNU radio.

- Instalar GNU Radio.
- Crear y configurar analizador de espectro.
- Ejecutar analizador de espectro.
- Tarea 3: Ejecutar red LTE.
 - Activar certificados HSS y MME.
 - Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
 - Cargar base de datos para el HSS.
 - Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.
 - Conectar UE.

Interpretación de resultados

- Identificar las frecuencias y el ancho de banda para cada configuración 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.
- Identificar la señal de sincronización LTE.
- Identificar el uso del ancho de banda al realizar pruebas de velocidad.

4.2.3 Práctica 3: Análisis del protocolo LTE

Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de aprender a utilizar Wireshark para capturar, filtrar e inspeccionar los paquetes de datos que se transmiten en la red LTE. Wireshark es una herramienta de análisis de protocolos de red de código abierto que nos permite obtener una visión detallada del tráfico de la red en tiempo real. Con esta práctica, los estudiantes adquirirán habilidades para examinar y comprender la comunicación entre los diferentes componentes de la red LTE, fundamental para el diagnóstico de problemas y optimizar el rendimiento de la red.

Objetivos

- Verificar el comportamiento del tráfico de una red LTE.
- Analizar el protocolo de conexión inicial de un equipo de usuario en la red LTE.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre:

- Los protocolos de señalización AS (Access Stratum) y NAS (Non-Access Stratum).
- Proceso de adquisición de celdas.
- Procedimiento de acceso aleatorio basado en la contención.
- Proceso de conexión entre un UE y MME.

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

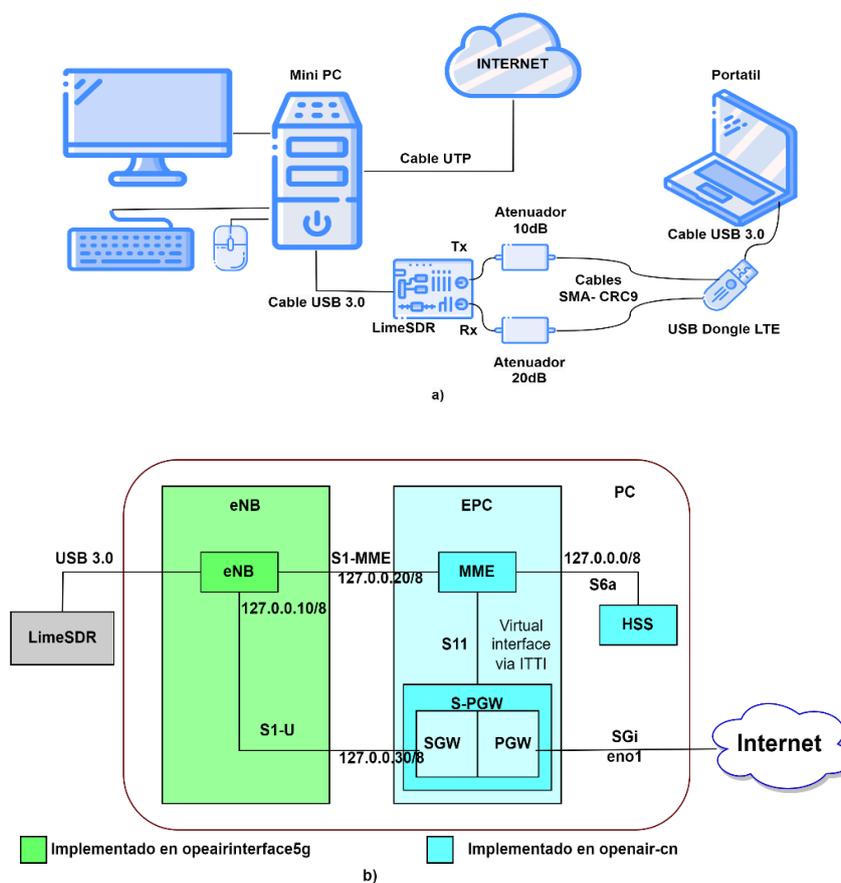
- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| - Mini PC con OpenAirInterface. | - 2 cables SMA(m) a CRC9. |
| - LimeSDR | - USB Dongle LTE. |
| - 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | - Cable UTP. |
| - Atenuador 10dB y 20dB. | - Portátil. |

Diagrama de la topología

La Figura 26 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 26

Diagrama de conexión y topología de red práctica 3



Nota. No conectar el USB dongle al portátil hasta recibir la instrucción. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1: Requisitos previos.
 - Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
 - Configurar software OAI.
 - Instalar Wireshark.
- Tarea 2: Configurar Wireshark.
 - Activar subdirectores heurísticos.
 - Habilitar protocolos lte.
- Tarea 3: Ejecutar red LTE

- Activar certificados HSS y MME.
- Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
- Cargar base de datos para el HSS.
- Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.
- Tarea 4: Capturar, filtrar paquetes de la red LTE.
 - Capturar paquetes con Wireshark.
 - Filtrar paquetes SystemInformationBlockType1 (SIB1).
 - Inspeccionar detalles SIB1.
 - Filtrar paquetes SystemInformation (SI)
- Tarea 5: Analizar procedimiento de acceso aleatorio
 - Conectar UE.
 - Localizar paquetes del procedimiento de acceso aleatorio.
 - Verificar parámetros Msg.
- Tarea 6: Analizar proceso de conexión de UE.
 - Verificar proceso de registro de un UE en MME.
 - Verificar proceso de autenticación.

Interpretación de resultados

- Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformationBlockType1” (SIB1) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.
- Realice una tabla del paquete SIB1 que contenga datos y una descripción de los siguientes campos.
 - plmn-Identity
 - trackingAreaCode

- cellIdentity
- cellBarred
- cellReservedForOperatorUser
- freqBanIndicator
- Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformation” (SI) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.
- Registre los valores de respuesta de acceso aleatorio (RAR) en función del Msg2 Capturados.
 - RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary ID)
 - RAPID (Random Access Preamble ID)
 - TA (Timing Advance)
 - UL Grant
 - Temp C-RNTI (Temporary Cell-RNTI)
- Registre los valores de solicitud de conexión RRC en función de Msg3.
 - C-RNTI
 - Ue-Identity (randomValue)
- Registre los valores capturados para Msg4.
 - C-RNTI
 - UE Contention Resolution Identity
- Identifique el protocolo utilizado y la información enviada en los siguientes paquetes/mensajes en el proceso de conexión.
 - RRC connection request (attach request)
 - Initial UE message (attach request)

- Initial UE message (attach accept)
- RRC connection reconfiguration (attach accept)
- RRC connection reconfiguration (attach complete)
- UL NAS transport (attach complete)

Identifique la respuesta de autenticación-información (AIA) en los paquetes capturados y registre el valor de los siguientes parámetros.

- RAND
- XRES
- AUTN
- KASME

4.2.4 Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE

Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes podrán evaluar los tres indicadores principales del rendimiento de la red LTE: rendimiento, pérdida de paquetes y latencia. Analizando la interacción en los flujos de tráfico del protocolo de control de transmisión TCP y del protocolo de datagramas de usuario UDP.

Objetivos

- Medir y analizar el rendimiento TCP
- Medir y analizar el rendimiento UDP
- Medir y analizar la latencia de la red LTE.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre rendimiento TCP, UDP, latencia en una red LTE.

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

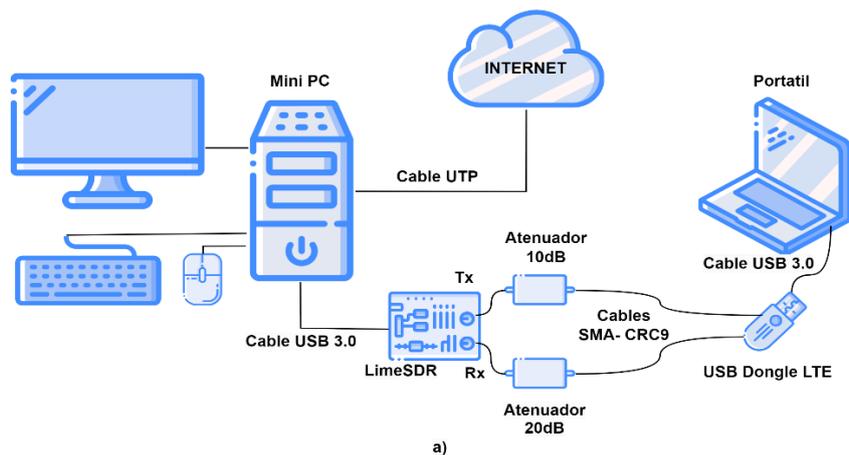
- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR
- 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h).
- Atenuador 10dB y 20dB.
- 2 cables SMA(m) a CRC9.
- USB Dongle LTE.
- Cable UTP.
- Portátil.

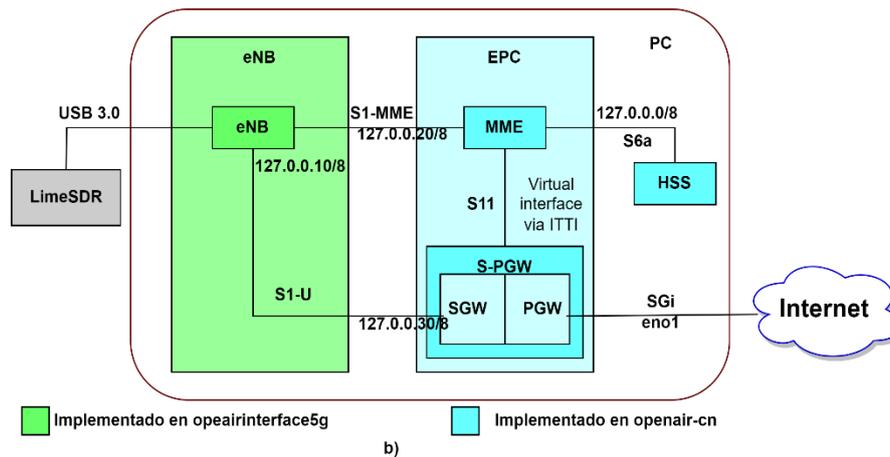
Diagrama de la topología

La Figura 27 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 27

Diagrama de conexión y topología de red práctica 4





Nota. Configuración de la red para la práctica de laboratorio 4. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1: Requisitos previos.
 - Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
 - Configurar software OAI.
- Tarea 2: Instalar iperf3
 - Verificar iperf 3 en mini pc.
 - Descargar iperf3 en portátil (Windows).
- Tarea 3: Ejecutar red LTE
 - Activar certificados HSS y MME.
 - Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
 - Cargar base de datos para el HSS.
 - Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.
- Tarea 4: Verificar rendimiento TCP de enlace ascendente y descendente.
 - Verificar dirección IP del EPC.
 - Ejecutar iperf3 en el host local
 - Ejecutar iperf3 en el pc portátil.
 - Verificar rendimiento TCP en Wireshark.

- Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.
- Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.
- Tarea 6: Verificar rendimiento UDP de enlace ascendente y descendente.
 - Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.
 - Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.
 - Configurar el ancho de banda objetivo.
 - Realizar prueba de rendimiento de UDP.
- Tarea 7: Verificar latencia de red LTE.
 - Realizar prueba de ruta.
 - Realizar prueba de ping.

Interpretación de resultados

- Realizar pruebas de rendimiento TCP para un número creciente de flujos paralelos de 5,10,20,30 para el enlace ascendente y descendente.
- Realizar pruebas de rendimiento UDP para el enlace ascendente y descendente utilizando un ancho de banda objetivo de 5,10,15,20 Mbps, Registrar el rendimiento, jitter y la tasa de pérdida de datagramas.
- Realizar una prueba de ping para medir el RTT promedio hacia el dongle LTE, EPC y un servidor externo.

4.2.5 Práctica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.

Introducción

En esta práctica de laboratorio, inicialmente se analizará el efecto del desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación

OFDM. A continuación, se llevará a cabo la aplicación de la estimación y compensación CFO para una señal FDD-LTE capturada en tiempo real.

Objetivos

- Analizar el efecto de desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación OFDM.
- Realizar ajustes para compensar el desplazamiento temporal y frecuencia fraccional para una señal FDD-LTE de enlace descendente.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre modulación y demodulación OFDM para una señal FDD LTE, estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML), compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de desplazamiento de frecuencia portadora (CFO).

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

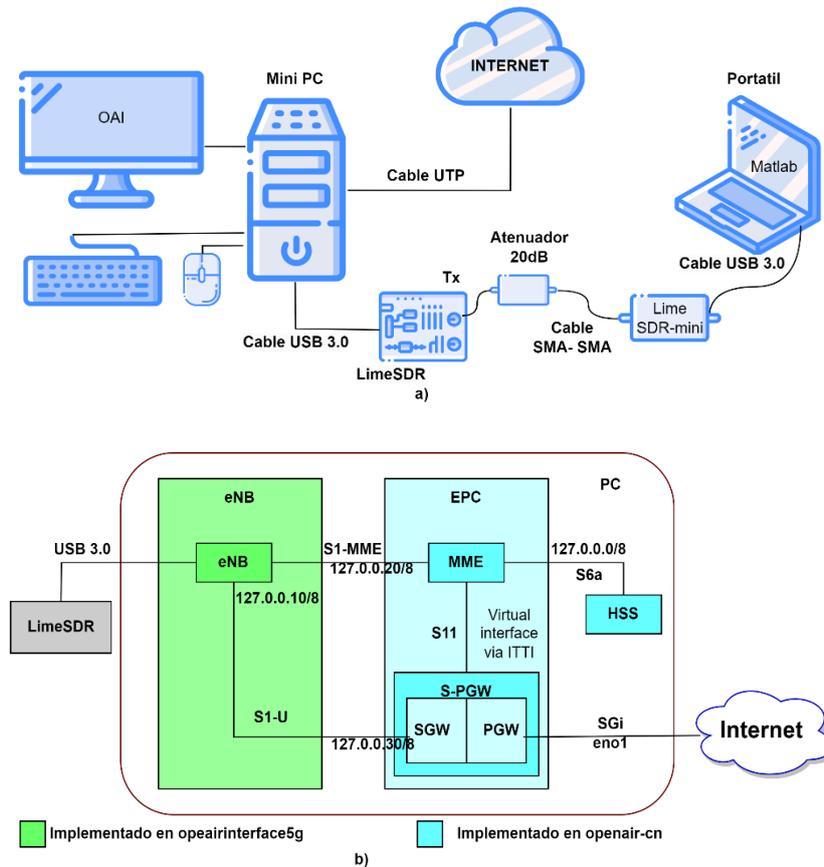
- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| - Mini PC con OpenAirInterface. | - Cable SMA(m) a SMA(m). |
| - LimeSDR. | - LimeSDR mini. |
| - 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | - Portátil. |
| - Atenuador 20dB. | - Matlab. |
| - Cable UTP. | |

Diagrama de la topología

La Figura 28 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 28

Diagrama de conexión y topología de red practica 5



Nota. Configuración de la red para la práctica de laboratorio 5. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1: Impacto del desplazamiento de temporización y CFO en la demodulación OFDM.
 - o Generar un código en Matlab que simule el proceso de modulación y demodulación de símbolos utilizando la modulación OFDM.

- Generar un código en Matlab para considerar el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia en 3 casos.
 - Sin corrección de tiempo y CFO.
 - Solo con corrección de tiempo.
 - Con corrección de tiempo y corrección de CFO.
- Tarea 2: Compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de CFO.
 - Generar un código en Matlab que permita calcular la estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML).
 - Generar un código en Matlab para identificar los efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP) en los siguientes casos:
 - Longitud CP0 real y longitud CP1 asumido.
 - Longitud CP1 real y longitud CP0 asumido.
- Tarea 3: Capturar señal del enlace descendente LTE.
 - Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
 - Configurar software OAI.
 - Iniciar la red LTE.
 - Capturar señal LTE.
- Tarea 4: Compensación de temporización y estimación de CFO en señal LTE.
 - Transferir la captura de señal a Matlab.
 - Importar muestras y trazar espectro de potencia y función objetivo.
 - Generar un código de Matlab para la temporización de ML y la estimación y compensación de CFO.

Interpretación de resultados

- Realice un comparativa entre los diferentes casos realizados sobre el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia.
- Realice una comparativa entre los diferentes casos realizados de efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP).
- Determine la estructura de símbolos OFDM de la señal LTE capturada.
- Realice un análisis de la función objetiva de la estimación temporal en la señal LTE capturada.

4.2.6 Práctica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda

Introducción

En esta práctica se comprenderá la secuencia Zadoff-Chu y la secuencia de longitud máxima utilizadas en PSS y SSS para el proceso de detección de ID de celda para una señal LTE.

Objetivos

- Detectar el ID de celda de sector utilizando la señal de sincronización primaria.
- Detectar el ID de celda y temporización de tramas, empleando la señal de sincronización secundaria.

Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre el proceso de sincronización de enlace descendente en la red LTE para obtener la identificación de la celda y la sincronización de tramas (PSS, SSS).

Materiales y equipos

En la siguiente lista, se detallan todos los materiales y equipos utilizados durante la práctica.

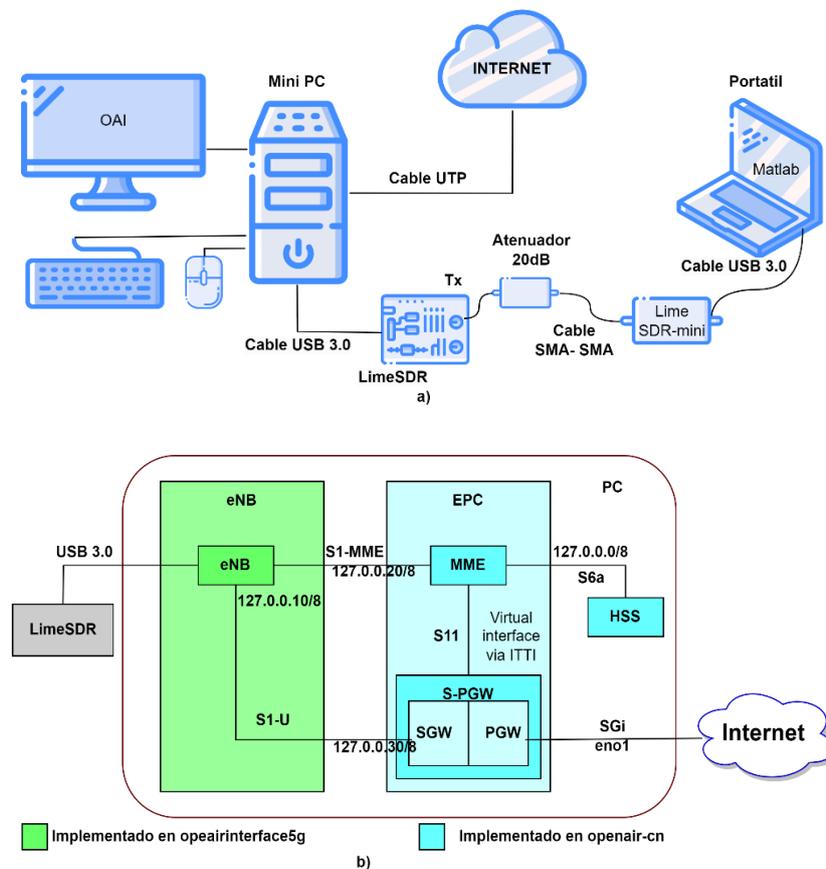
- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR.
- 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h).
- Atenuador 20dB.
- Cable UTP.
- Cable SMA(m) a SMA(m).
- LimeSDR mini
- Portátil.
- Matlab.

Diagrama de la topología

La Figura 29 muestra, en la sección a) el diagrama de conexión de los componentes físicos de la red y la sección b) se representa la topología de la red en términos de configuración lógica.

Figura 29

Diagrama de conexión y topología de red practica 6



Nota. Configuración de la red para la práctica de laboratorio 6. Elaboración propia.

Desarrollo

- Tarea 1: Capturar señal del enlace descendente LTE.
 - Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
 - Configurar software OAI.
 - Iniciar la red LTE.
 - Capturar señal LTE.
 - Transferir la captura de señal a Matlab
- Tarea 2: Detección de CFO e ID de celda mediante señal de sincronización primaria
 - Desarrollar un programa en Matlab que permita generar y trazar el PSS para un valor de raíz específico.
 - Desarrollar un código en Matlab que permita generar la función de autocorrelación de la secuencia de Zadoff-Chu.
 - Desarrollar un código en Matlab que permita simular las salidas de correlación cruzada para escenarios de secuencia Zadoff-Chu emparejados y no coincidentes.
 - Desarrollar un programa en Matlab que permita la sincronización de símbolos y recuperación del CFO e ID de celda de una señal LTE.
- Tarea 3: Detección del grupo de ID de celda y la temporización de tramas mediante señal de sincronización secundaria.
 - Generar un código en Matlab que permita generar los SSS
 - Generar un código en Matlab que permita identificar los resultados de correlación cruzada.
 - Generar un código en Matlab que permita detectar y recuperar la temporización de la trama de radio de una señal LTE.

Interpretación de resultados

- Compare la magnitud y fase del PSS con un valor de índice de raíz de 25,29 y 34.
- Compare la función de autocorrelación y correlación cruzada para las secuencias de Zadoff-Chu con índice de raíz 25, 29 y 34.
- Compare las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada.
- Compare las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada.

4.3 Desarrollo de prácticas.

En esta sección, se llevó a cabo la resolución del proceso de desarrollo de cada práctica de laboratorio.

4.3.1 Práctica 1: Configuración e implementación de elementos LTE

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 1.

Tarea 1: Establecer la configuración global del sistema LTE

○ Conectar los componentes de la red

Para llevar a cabo esta actividad, se realizaron las conexiones acordes a la topología. Es importante destacar que el USB dongle no debe conectarse al portátil en este punto.

○ Verificar conexión

Para validar la integridad de las conexiones, se realizó la verificación de la conexión a internet a través del cable Ethernet utilizando el comando “ifconfig” en el

terminal, para validar la conexión del dispositivo LimeSDR se utilizan los siguientes comandos:

```
$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
$ LimeUtil -find
```

Los resultados esperados de estos comandos se observan en la Figura 30.

Figura 30

Resultados comandos de verificación interfaz de red y SDR

```
lte@lte-desktop:~$ ifconfig
enp0s3 Link encap:Ethernet Hwaddr 08:00:27:0f:f6:ae
       inet addr:192.168.200.20 Bcast:192.168.200.255 Mask:255.255.255
       inet6 addr: fe80::d00c:fd07:11a9:5c95/64 Scope:Link
       UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
       RX packets:235 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
       TX packets:191 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
       collisions:0 txqueuelen:1000
       RX bytes:289420 (289.4 KB) TX bytes:18187 (18.1 KB)

lte@lte-desktop:~$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
#####
## Soapy SDR -- the SDR abstraction library ##
#####
Found device 0
  addr = 1d50:6108
  driver = lime
  label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 90726074F2F28
  media = USB 3.0
  module = STREAM
  name = LimeSDR-USB
  serial = 00090726074F2F28

lte@lte-desktop:~$ LimeUtil --find
* [LimeSDR-USB, media=USB 3.0, module=STREAM, addr=1d50:6108, serial=00090726074F2F28]
```

Nota. En la imagen se observa la conexión correcta para el servicio de internet y uso del dispositivo SDR. Elaboración propia.

- **Verificar la red LTE**

Para verificar la red LTE se crearon los scripts que se muestran en la Figura 31, diseñados para optimizar las configuraciones y permisos del sistema para una ejecución más rápida y eficaz.

Figura 31

Scripts de ejecución rápida de la red lte

```
#!/bin/bash
echo "Load eNB configurations..."
sudo cp /home/lte/LTEconfigs/Lab2cfg/eNB/*.conf /home/lte/
openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/

echo "Load EPC configurations..."
sudo cp /home/lte/LTEconfigs/Lab2cfg/EPC/*.conf /usr/local/etc/oai/

echo "Installing HSS and MME certificate..."
cd /home/lte/openair-cn
source oaienv
cd /home/lte/openair-cn/scripts
./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
hss.OpenAir5G.Alliance
./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
mme.OpenAir5G.Alliance

echo "Listing PEM files..."
ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem

echo "Loading HSS database..."
/home/lte/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte
oai_db /home/lte/epc/hss-database/hss_db.sql
```

```
#!/bin/bash
nmcli radio wifi off
echo "Running HSS..."
gnome-terminal -e /home/lte/LTEconfigs/hss
sleep 6
echo "Running MME..."
gnome-terminal -e /home/lte/LTEconfigs/mme
sleep 6
echo "Running SPGW..."
gnome-terminal -e /home/lte/LTEconfigs/spgw
sleep 6
echo "Running LTE base station..."
sudo |gnome-terminal -e /home/lte/LTEconfigs/lte_12
```

Nota. Los comandos ejecutan los componentes en una terminal individual. Elaboración propia.

Al ejecutar estos scripts en el terminal mediante los siguientes comandos, se activan los elementos de la red, para utilizar el comando “sudo” y acceder como superusuario se utiliza la contraseña asignada a este. Al final del proceso la red se encuentra lista para operar se muestran las ventanas del Soft Scope, tal como se visualiza en la Figura 32.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./12cfg.sh
$ sudo ./startLTE_12.sh
```

Figura 32

Software de visualización de OAI



Nota. OAI Soft Scope presenta información de la capa física. Elaboración propia.

○ Preparar componentes para iniciar las practica

Después de confirmar que el sistema LTE está operando correctamente, se carga los archivos originales tanto del eNB como del EPC. Este proceso se lleva a cabo mediante la ejecución de los siguientes comandos:

```
$ cd eNB
$ sudo cp * ~/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/

$ cd..
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/hss.conf /usr/local/etc/oai/hss.conf
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/mme.conf /usr/local/etc/oai/mme.conf
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/spgw.conf /usr/local/etc/oai/spgw.conf
```

Tarea 2: Configurar eNB

○ Configurar banda 7 a 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB

Para cumplir con esta tarea se ingresa al fichero eNB y se modifica los archivos de configuración:

- enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
- enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
- enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf.

Este proceso se lo realiza mediante los siguientes comandos:

```
$ cd ~/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/
$ sudo nano "nombre del archivo"
```

Las configuraciones que se realizan son el nombre del eNB, el código de país móvil (MCC), el código de red móvil (MNC).

```
Active_eNBs = ( "eNB_LTEBox");
eNB_name = "eNB_LTEBox";

mobile_country_code = "901";
mobile_network_code = "70";
```

De acuerdo con la topología de la red se configuran la dirección IP MME, las direcciones IP de las interfaces S1-MME y S1-U.

```
////////// MME parameters:
mme_ip_address = ( {
    IPv4 = "127.0.0.20";
    IPv6 = "192:168:30::17";
    active = "yes";
    preference = "IPv4";
    }
);

NETWORK_INTERFACES :
{
  ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME      = "1o";
  ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME        = "127.0.0.10/8";

  ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U         = "1o";
  ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U           = "127.0.0.10/8";
  ENB_PORT_FOR_S1U                   = 2152; # Spec 2152
```

Tarea 3: Configurar EPC

Para configurar los componentes del EPC se abren los archivos hss.conf, mme.conf y spgw.conf, los cuales se encuentran en el fichero "/usr/local/etc/oai". Para realizar este proceso se utilizan los siguientes comandos.

```
$ cd /usr/local/etc/oai
$ sudo nano hss.conf
$ sudo nano mme.conf
$ sudo nano spgw.conf
```

Una vez finalizado la configuración en cada archivo se guarda y se sale del mismo mediante la combinación de teclas “Ctrl+x”. Las configuraciones que se realizan para cada componente se muestran a continuación.

o Configurar HSS

Dentro del HSS se configura el usuario, contraseña del servidor MYSQL y llave de operador.

```

MYSQL_server      = "127.0.0.1";      # HSS S6a bind address
MYSQL_user        = "root";
MYSQL_pass        = "lte";
MYSQL_db          = "oai_db";        # Your database name

## HSS options
OPERATOR_key = "";
#OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3"; # OP key ...

```

o Configurar MME

Las configuraciones que se realizan en el MME son el identificador de dominio, el código de país móvil (MCC), el código de red móvil (MNC).

```

MME :
{
    REALM                = "OpenAir5G.Alliance";
    ...
}

GUMMEI_LIST = (
    {MCC="901" ; MNC="70" ; MME_GID="4" ; MME_CODE="1" ; }
);

TAI_LIST = (
    {MCC="901" ; MNC="70" ; TAC = "1" ; }
);

```

También se configura las direcciones IP de las interfaces de red acorde a la topología.

```

NETWORK_INTERFACES :
{
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME           = "lo";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME             = "127.0.0.20/8";

    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME          = "lo";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME            = "127.0.0.20/8";
    MME_PORT_FOR_S11_MME                     = 2123;
};

```

```

S-GW :
{
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11                 = "127.0.0.30/8";
};

```

o Configurar SPGW

Las configuraciones que se realizan en el SPGW son las direcciones IP de las interfaces de red para S-GW y para P-GW de la siguiente manera:

```

S-GW :
{
    NETWORK_INTERFACES :
    {
        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11           = "lo";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11             = "127.0.0.30/8";

        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "lo";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP   = "127.0.0.30/8";
        SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP      = 2152;

        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP      = "none";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP        = "0.0.0.0/24";
    };
};

```

```

NETWORK_INTERFACES :
{
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8             = "none";
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI               = "eno1";
    PGW_MASQUERADE_SGI                       = "yes";
    UE_TCP_MSS_CLAMPING                      = "no";
};

```

- Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE

o Activar certificados HSS y MME

Para activar los certificados HSS y MEE se usan los siguientes comandos.

```

$ cd ~/openair-cn
$ source oaienv
$ cd scripts
$ ./check_hss_s6a_certificate
/usr/local/etc/oai/freeDiameter hss.OpenAir5G.Alliance

```

```
$ ./check_mme_s6a_certificate
/usr/local/etc/oai/freeDiameter mme.OpenAir5G.Alliance
```

En la Figura 33 se observa el mensaje de validación de los certificados.

Figura 33

Validación de certificados HSS y MME

```
HSS S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
MME S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
```

Nota. Los 2 certificados deben ser validados para el correcto funcionamiento del sistema.

Elaboración propia.

- **Comprobar la disponibilidad de archivos PEM**

Los archivos “.pem” permiten utilizar los archivos de certificados y llaves del hss y mme. para ver la disponibilidad de los archivos PEM se utiliza el siguiente comando.

```
$ ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem
```

En la Figura 34 se observa el resultado de este paso.

Figura 34

Disponibilidad de archivos PEM

```
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.key.pem
```

Nota. Los permisos permiten leer y escribir los archivos. Elaboración propia.

- **Cargar la base de datos para el HSS**

Para ejecutar la base de datos se utiliza el siguiente comando.

```
$ ~/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte
oai_db ~/epc/hss-database/hss_db.sql
```

El comando crea e importa datos para la BDD, si el proceso fue el correcto se mostrará mediante mensajes como se puede observar en la Figura 35.

Figura 35

Creación de base de datos

```
mysqladmin: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
Database "oai_db" dropped
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db creation succeeded
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db import succeeded
```

Nota. Mensaje de éxito del proceso de creación de BDD. Elaboración propia.

- **Ejecutar HSS**

el HSS se ejecuta en un terminal nuevo mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra

en la Figura 36.

Figura 36

Estado de conexión MME

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

Nota. Estado de conexión MEE en HSS. Elaboración propia.

- **Ejecutar MME**

Para ejecutar el MME se abre una nueva terminal y se utiliza el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra en la Figura 37.

Figura 37

Tabla de estadísticas MME

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0              | 0                          | 0                          |
Connected UEs  | 0              | 0                          | 0                          |
Default Bearers | 0              | 0                          | 0                          |
S1-U Bearers   | 0              | 0                          | 0                          |
===== STATISTICS =====

```

Nota. La tabla marca la conexión de eNBs, UEs entre otros. Elaboración propia.

o Ejecutar SPGW

Para ejecutar el SPGW se abre un nuevo terminal y se ejecuta mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E
./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje: “-Initializing SPGW-APP task interface: DONE”.

o Ejecutar eNB

El eNB se ejecuta en una nueva terminal mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O <archivo de
configuración eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -d -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-
LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHZ_1v4.ini
```

Al finalizar aparece las ventanas Soft Scope.

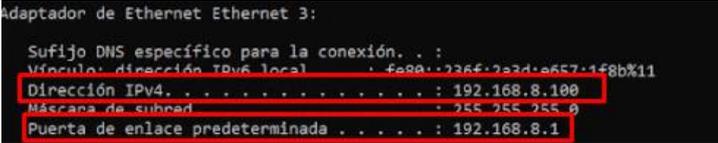
- Tarea 5: Configurar USB dongle LTE

o Instalar dongle USB LTE

Se Conecta el dongle USB LTE al portátil. Al hacerlo, se crea una interfaz adicional con la dirección IP 192.168.8.100. Para verificar la conexión, se abre la ventana del "Símbolo del sistema" y se ejecuta el comando "ipconfig". En la Figura 38 Se puede observar la presencia de la interfaz adicional correspondiente al dongle LTE en la lista de interfaces y su respectiva dirección IP. Esto asegura que el dongle LTE está correctamente conectado y configurado en el sistema.

Figura 38

Interfaz de red USB dongle LTE



```
Adaptador de Ethernet Ethernet 3:
Sufrido DNS específico para la conexión. . . :
Vínculo: dirección IPv6 local . . . : fe80::226f:2a2d:a657:1f8b%11
Dirección IPv4. . . . . : 192.168.8.100
Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada . . . . : 192.168.8.1
```

Nota. La puerta de enlace corresponde a la dirección de configuración del USB Dongle.

Elaboración propia.

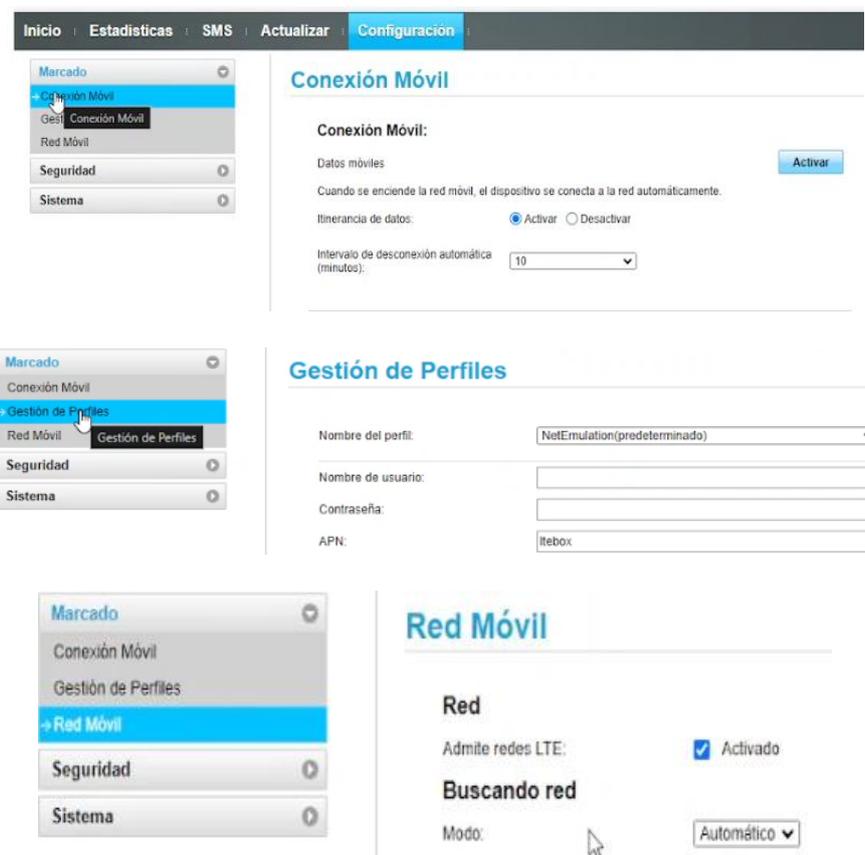
Al conectar el Dongle USB LTE, el navegador web abre automáticamente y muestra una página web con la dirección 192.168.8.1. Si esto no sucede, se puede ingresar manualmente dicha dirección en la barra de direcciones del navegador. Si al cargar la página, se observa el estado "Sin servicio", significa que el dispositivo UE aún no está conectado a la red LTE. Esto indica que es necesario establecer una conexión para acceder a los servicios y funcionalidades de la red.

○ **Establecer conexión para Dongle USB LTE**

En la Figura 39 se observa la configuración del dongle LTE donde se activa la opción “Datos móviles”. Luego, se crea un nuevo perfil, utilizando el nombre APN como "Itebox". A continuación, se habilita la opción "Admitir redes LTE".

Figura 39

Configuración USB dongle LTE



Una vez realizados estos pasos, el portátil se encuentra conectado a la red LTE como se muestra en la Figura 40 .

Figura 40

Conexión de UE a red LTE



Nota. En la imagen se observa la conexión a la red LTE. Elaboración propia.

4.3.2 Práctica 2: Análisis del espectro LTE

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 2.

- **Tarea 1 : Establecer configuración global del sistema LTE.**
 - **Conectar los componentes de la red.**
- Para cumplir con esta actividad se conecta los componentes conforme a la topología de la red.
 - **Configurar dispositivo celular.**

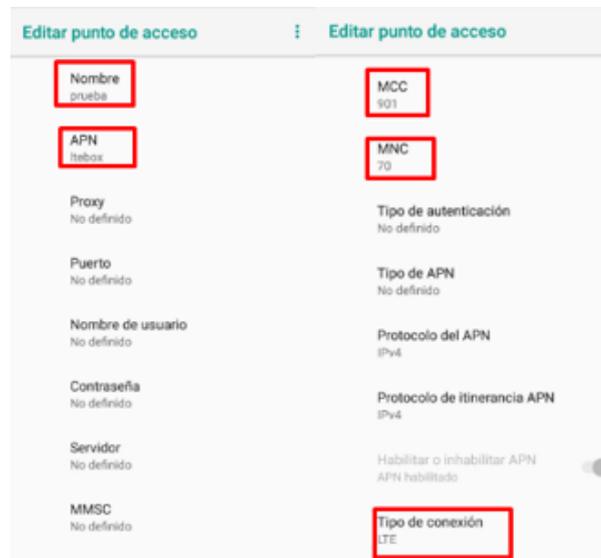
Para utilizar un celular dentro de la red se retira el chip del Dongle LTE y se utiliza en el celular, las configuraciones que se realizan en el móvil son en ajustes de la red móvil como se muestra en la Figura 41.

- **Nombre:** puede ser cualquier valor
- **APN:** debe coincidir con el valor del campo apn de la tabla pdn en este caso “ltebox”.
- **MCC y MNC:** debe coincidir con el valor de la red “901 y 70” respectivamente.

- **Tipo de conexión:** debe tener el valor LTE.

Figura 41

Configuración celular



Nota. No modificar nada que no esté especificado. Elaboración propia.

- **Tarea 2: Crear analizador de espectros GNU radio.**
 - o **Instalar GNU Radio.**

Para utilizar el dispositivo SDR y GNU Radio se debe instalar los controladores Lime Suite, el primer paso es instalar Python en su versión 2.7.16, el siguiente enlace “<https://www.python.org/downloads/release/python-2716/>” dirige a la página oficial de Python donde se selecciona la versión para Windows como se observa en la Figura 42.

Figura 42

Descarga Phyton

Python 2.7.16

Release Date: March 4, 2019

Python 2.7.16 is a bugfix release in the Python 2.7 series.

Note:
Attention macOS users: As of 2.7.16, all current python.org macOS installers ship with builtin copies of OpenSSL and Tcl/Tk 8.6. See the installer README for more

[Full Changelog](#)

Files

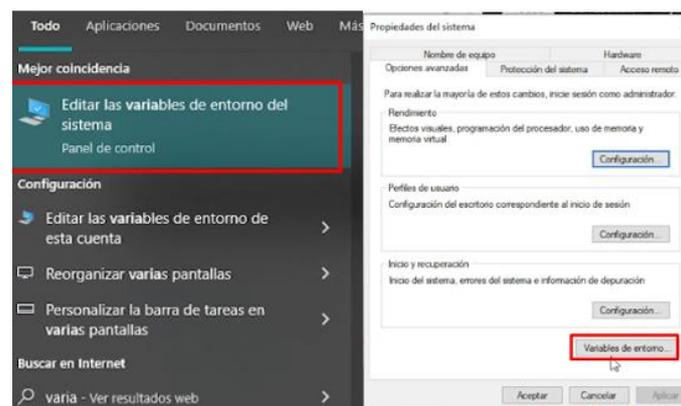
Version	Operating System	Description	MD5 Sum
Gzipped source tarball	Source release		f1a2ace631068444831d01485466ece0
XZ compressed source tarball	Source release		30157d85a2c0479c09ea2cbe61f2aaf5
macOS 64-bit/32-bit installer	macOS	for Mac OS X 10.6 and later	70b0f58eba7b78b174056369b076c085
macOS 64-bit installer	macOS	for OS X 10.9 and later	a3af70c13c654276d66c3c1cb1772dc7
Windows debug information files	Windows		f94e90edbbf58b10bfd718badc08b1f8
Windows debug information files for 64-bit binaries	Windows		4292c4db30c27fedbbe8544967b6452
Windows help file	Windows		3bbf29b6712b231d2dff9211f7b21e2
Windows x86-64 MSI installer	Windows	for AMD64/EM64T/x64	2fe86194bb4027be75b29852027f1a79
Windows x86 MSI installer	Windows		912438345b7e0428544ec4edcdf70286

Nota. La versión utilizada corresponde a las características del portátil. Elaboración propia.

A continuación, se agrega la ruta del sistema mediante las variables de entorno, En la Figura 43 se observa como acceder a estas variables.

Figura 43

Ingreso a variables de entorno del sistema



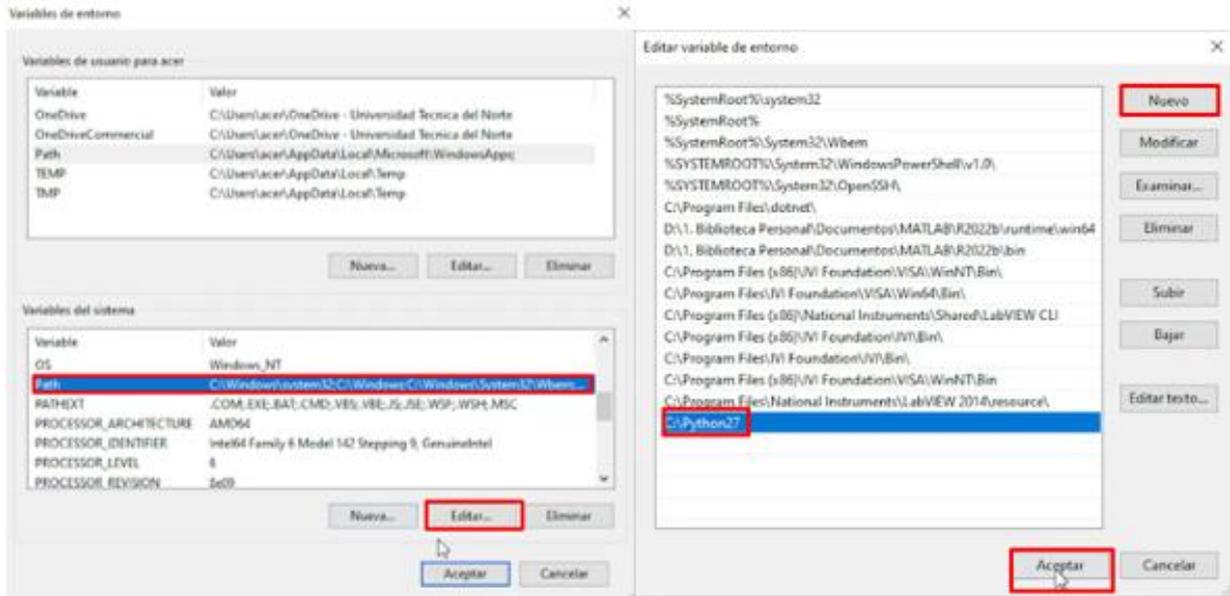
Nota. Elaboración propia.

Una vez accedido a las variables de entorno, se busca y selecciona las variables de ruta, se da clic en la opción editar y dentro de la ventana que se despliega se crea una nueva

variable de entorno, finalmente se da en aceptar, este proceso se puede observar en la Figura 44.

Figura 44

Agregar ruta de entorno para Python

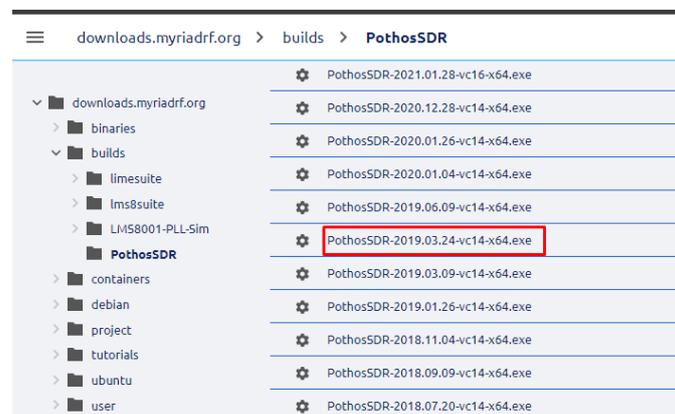


Nota. Elaboración propia.

A continuación, se instala el entorno PothosSDR desde el siguiente enlace: “<https://downloads.myriardf.org/builds/PothosSDR/>” el instalador debe ser PothosSDR-2019.03.24-vc14-x64.exe como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Descarga controlador PothosSDR



Nota. Elaboración propia.

Una vez descargado se procede a instalar el entorno, en el cual se acepta los términos de licencia, se añade el programa para todos los usuarios, se selecciona el directorio donde se va a instalar, la carpeta del menú de inicio donde va a contener el archivo y en la selección de componentes se realiza una instalación completa, este proceso se observa en la Figura 46.

Figura 46

Instalación Pothos SDR

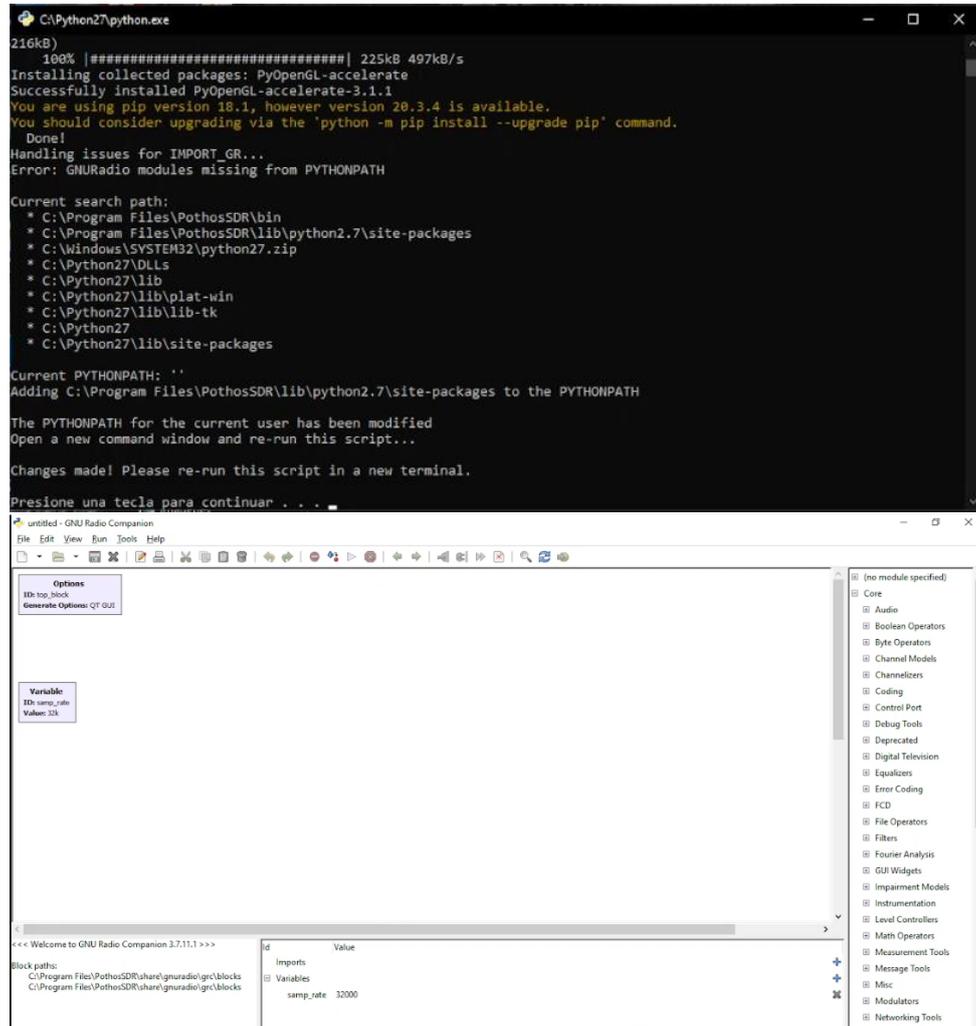


Nota. En la imagen se excluyen pasos, en los cuales debe dar en siguiente. Elaboración propia.

Finalmente se ejecuta GNU Radio el cual realiza una verificación de la instalación y procede a ejecutar su entorno como se observa en la Figura 47.

Figura 47

Ejecución GNU Radio



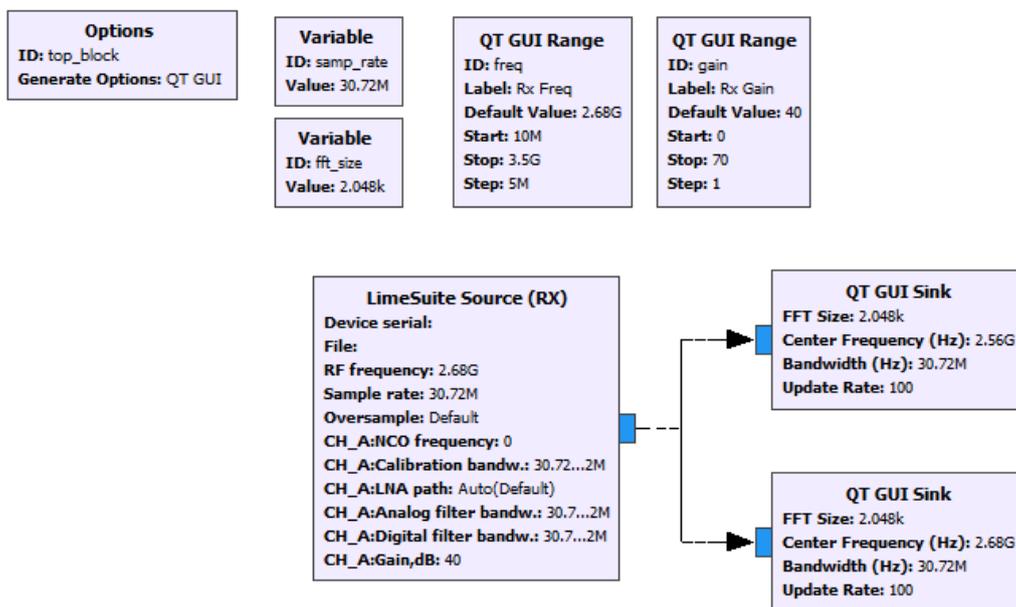
Nota. Debe presionar cualquier tecla para ejecutar el entorno de GNU Radio. Elaboración propia.

- **Crear y configurar analizador de espectro.**

En GNU Radio se crea el analizador de espectro utilizando los bloques que se observan en la Figura 48.

Figura 48

Diagrama de bloques analizador de espectro



Nota. Se utiliza 2 bloques QT GUI Sink para captar la señal ascendente y descendente.

Elaboración propia.

Las configuraciones que se realizan para el bloque “LimeSuite Source (RX)” son:

- “RF frequency” con la variable freq.
- “Sample rate” con la variable samp_rate.
- Para las opciones "Calibration bandw.", "Analog filter bandw." y "Digital filter bandw." en la pestaña CH_A se cambian el valor a samp_rate.

Al utilizar la red el modo FDD se utiliza 2 bloques “QT GUI Sink” que permiten visualizar la transmisión para el enlace ascendente y descendente.

Las configuraciones de estos bloques son:

- “FTT Size” con la variable fft_zise.
- “Center Frequency” con un valor de 2.68 G para el enlace descendente y un valor de 2.56G para el enlace ascendente.

- “Bandwidth” con la variable samp_rate.
- “Update Rate” un valor de 100.

Para realizar pruebas con diferente PRB el "samp_rate" se configura a 30.72 MHz para señal de 20 MHz, para señales LTE de 5 y 10 MHz se usa frecuencias de muestreo de 7.68 MHz y 15.36 MHz, respectivamente.

- **Ejecutar analizador de espectro.**

Para ejecutar el diagrama se da clic en el icono de reproducir como se muestra en la Figura 49

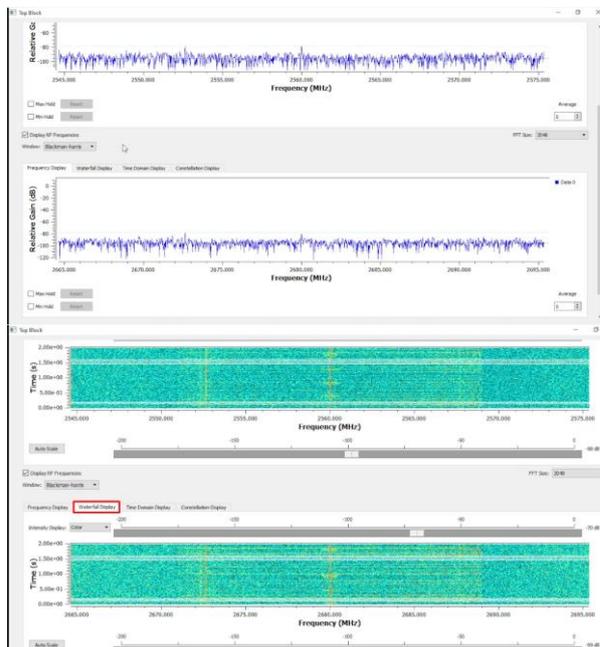
Figura 49

Ejecución diagrama de flujo



Nota. Elaboración propia.

Se despliega una nueva ventana como se puede observar en la Figura 50, en el cual se puede observar el analizador de espectro para las dos frecuencias utilizadas por la red LTE, también permite identificar la señal mediante la visualización de ventana.

Figura 50*Ejecución del analizador de espectro*

Nota. La imagen derecha corresponde a una vista en cascada. Elaboración propia.

- **Tarea 3: Ejecutar red LTE.**
 - **Activar certificados HSS y MME.**
 - **Comprobar disponibilidad de archivos PEM.**
 - **Cargar base de datos para el HSS.**
 - **Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.**

Para cumplir con esta tarea se repite el proceso de la Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE de la práctica de laboratorio 1.

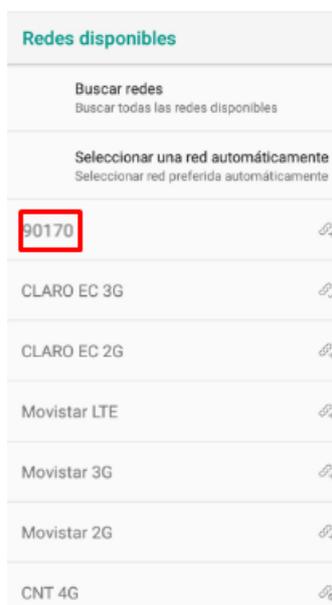
Una vez que la red está en funcionamiento se podrá identificar en el analizador de espectro el ancho de banda utilizado por la red.

- **Conectar UE.**

Para conectar el UE se debe buscar la red 90170 como se observa en la Figura 51.

Figura 51

Buscar redes disponibles desde el celular



Nota. El nombre de la red corresponde al PLMN (Public Land Mobile Network) .

Elaboración propia.

4.3.3 Práctica 3: Análisis del protocolo LTE

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 3.

- **Tarea 1: Requisitos previos.**
 - **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**

Para cumplir con esta actividad se conecta los componentes conforme a la topología de la red. Es importante destacar que el USB dongle no debe conectarse al portátil en este punto.

- **Configurar software OAI.**

Para la configuración del software se utiliza los scripts creados para configurar y ejecutar la red LTE, ingresar la contraseña “lte” para ejecutar como superusuario.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
```

- **Instalar Wireshark.**

La instalación Wireshark en el host de OAI se realizó mediante los siguientes comandos

```
$sudo add-apt-repository ppa:wireshark-dev/stable
$sudo apt-get update
$sudo apt-get install wireshark
$sudo chmod +x /usr/bin/dumpcap
```

La instalación también se realiza en el portátil para Windows se utiliza el ejecutable proporcionado en el sitio oficial “<https://www.wireshark.org/download.html>”.

- **Tarea 2: Configurar Wireshark.**

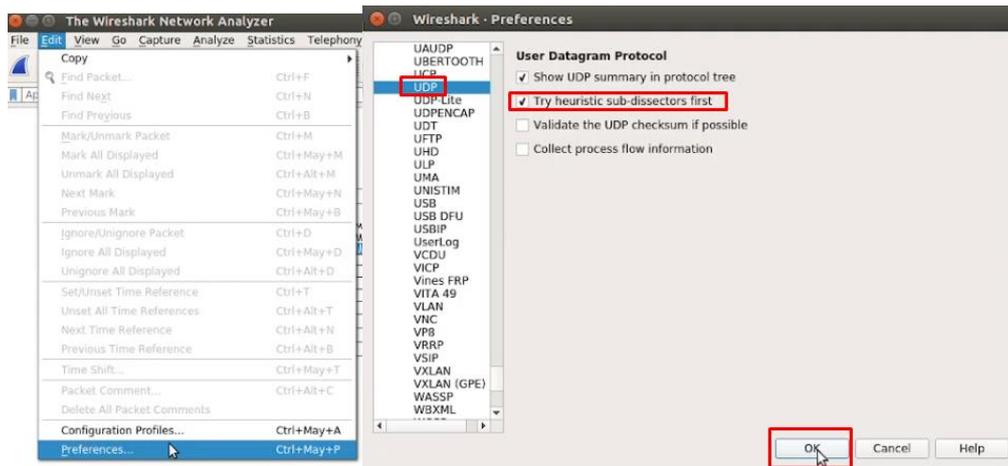
Wireshark permite inspeccionar los paquetes S1AP, GTP, para no necesita una configuración, pero para inspeccionar la interfaz MAC con sockets UDP hay que realizar configuraciones previas para desglosar esa capa en MAC, RLC, PDCP y RRC.

- **Activar subdirectores heurísticos.**

Para activar los subdirectores heurísticos se ejecuta Wireshark, se accede a opción “Edit” en la barra del menú y clic en preferencias, en la ventana desplegada se busca el protocolo UDP y se activa la opción “Pruebe primero los sub-disectores heurísticos” tal como se muestra en la Figura 52 .

Figura 52

Activación subdirectores heurísticos



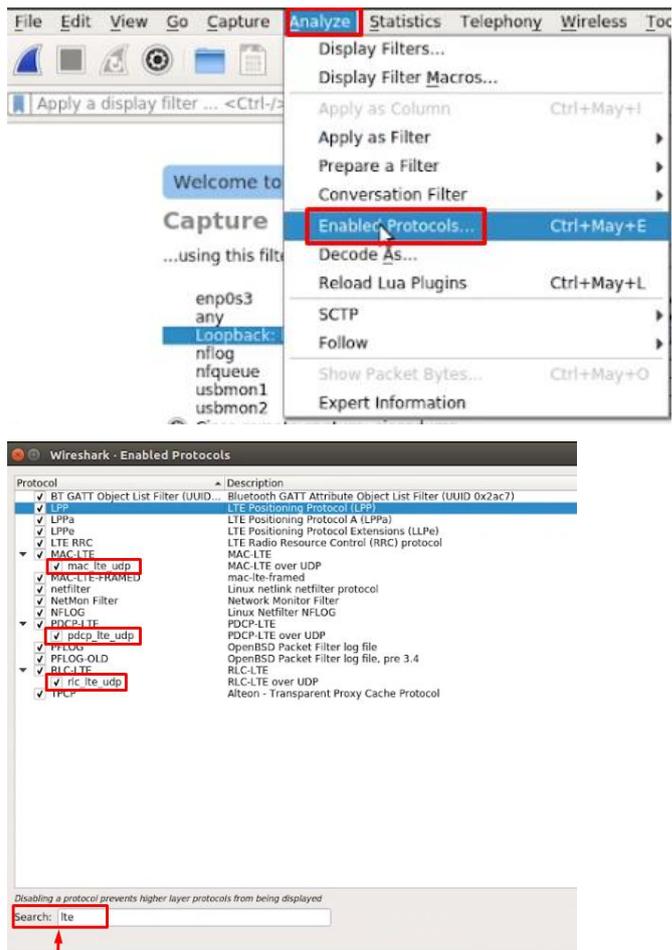
Nota. Se debe dar clic en la opción protocolos para desplegarlos. Elaboración propia.

- **Habilitar protocolos LTE.**

Para habilitar los protocolos LTE como mac, pdcip y rlc lte se ingresa la opción Analizar en la barra de menú y seleccionar Protocolos habilitados, en la ventana que se despliega Buscar lte y habilitar “mac_lte_udp”, “pdcip_lte_udp” y “rlc_lte_udp” tal como se muestra en la Figura 53.

Figura 53

Activación de protocolos LTE



Nota. Utilizar el buscador para filtrar solo los protocolos relacionados con LTE.

Elaboración propia.

- Tarea 3: Ejecutar red LTE

Para ejecutar la red LTE se repite el proceso de la Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE de la práctica de laboratorio 1 el cual consiste en activar certificados HSS y MME, comprobar disponibilidad de archivos PEM, cargar la base de datos para el HSS y ejecutar los componentes del EPC (HSS,MME, SPGW) y eNB.

Se realizan ajustes en la ejecución del eNB para permitir la integración de la herramienta Wireshark. Esto facilita desglosar el protocolo de la capa 2, abarcando las capas PDCP, RLC y MAC a través de la opción "-W". Esta opción activa los mensajes de la capa 2 para Wireshark en el host local.

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -w -O <archivo de
configuración eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHZ_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -w -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-
LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHZ_1v4.ini
```

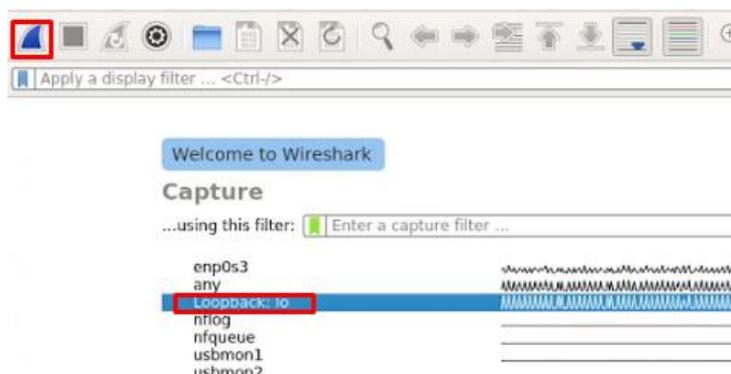
- Tarea 4: Capturar, filtrar paquetes de la red LTE.

o Capturar paquetes con Wireshark.

Para capturar paquetes se selecciona la interfaz "Loopback: lo" en Wireshark iniciando automáticamente la captura de paquetes. También, se puede iniciar manualmente haciendo clic en el botón azul como se muestra en la Figura 54 .

Figura 54

Inicio de capturas Wireshark



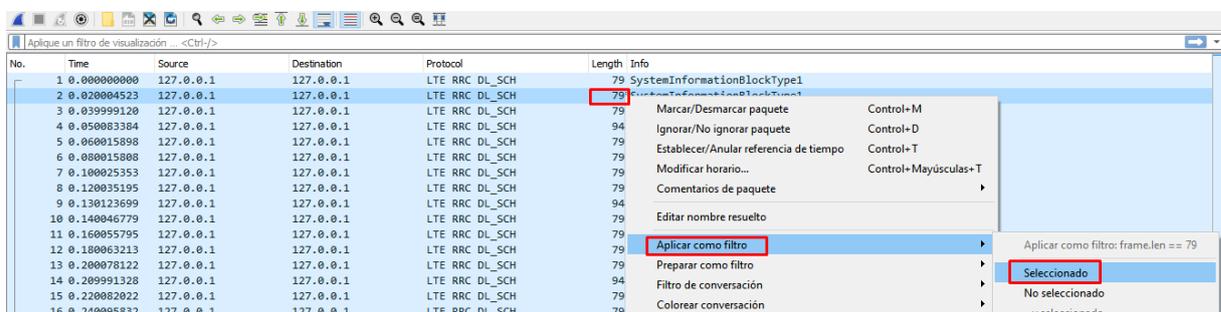
Nota. Seleccionar la interfaz y capturar con el botón azul. Elaboración propia.

○ **Filtrar paquetes SystemInformationBlockType1 (SIB1).**

Para filtrar los paquetes del tipo SystemInformationBlockType1 (SIB1). Se realiza un filtro moviendo el cursor sobre la columna de longitud de uno de los paquetes SIB1, haciendo clic derecho y seleccionando "aplicar como filtro seleccionado" tal como se observa en la Figura 55.

Figura 55

Filtrar paquetes SIB1

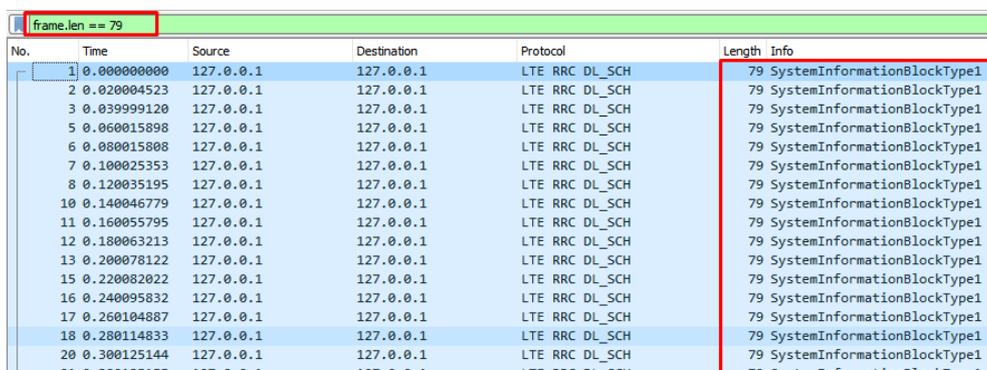


Nota. Filtrado por longitud de paquete. Elaboración propia.

En la Figura 56 se verifica que el campo de entrada del filtro muestra la condición "frame.len == 79", asegurando que solo se visualizan los paquetes correspondientes a SIB1.

Figura 56

Filtro de SIB1 realizado por longitud de paquetes



Nota. Solo se observan paquetes SIB1. Elaboración propia.

- **Inspeccionar detalles SIB1.**

Al seleccionar un paquete SIB1 se despliegan los detalles en el panel correspondiente. Se identifica los valores de plmn-Identity, trackingAreaCode, cellIdentity, cellBarred, cellReservedForOperatorUser, y freqBandIndicator. Los cuales son necesarios para la interpretación de resultados tal como se muestra en la Figura 57.

Figura 57

Detalles del paquete SIB1

```

6 0.080015808 127.0.0.1 127.0.0.1 LTE RRC DL SCH
<
> Frame 6: 79 bytes on wire (632 bits), 79 bytes captured (632 bits) on interfac
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:0
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
> MAC-LTE BCH PDU 15 bytes, on DL-SCH transport)
  > [Context (RNTI=65535)]
  [Transport channel: DL-SCH (4)]
  > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    > BCCH-DL-SCH-Message
      > message: c1 (0)
        > c1: systemInformationBlockType1 (1)
          > systemInformationBlockType1
            > cellAccessRelatedInfo
              > plmn-IdentityList: 1 item
                > trackingAreaCode: 0001 [bit length 16, 0000 0000 0000 000
                  > cellIdentity: 0000e000 [bit length 28, 4 LSB pad bits, 000
                    > cellBarred: notBarred (1)
                      > intraFreqReselection: notAllowed (1)
                        ... ..0. csg-Indication: False
              > cellSelectionInfo
                > q-RxLevMin: -130dBm (-65)
                  > freqBandIndicator: 7
                > schedulingInfoList: 1 item
                  si-WindowLength: ms20 (5)
                  systemInfoValueTag: 0
  
```

Nota. Desplegar los campos de detalles de MAC-LTE BCH PDU. Elaboración propia.

- **Filtrar paquetes SystemInformation (SI)**

Se elimina el filtro anterior. Luego, moviendo el cursor sobre la columna de longitud de uno de los paquetes SI, se realiza un filtrado con la opción "aplicar como filtro seleccionado". El campo de entrada del filtro ahora muestra la condición "frame.len == 94", asegurando la visualización exclusiva de los paquetes relacionados con SystemInformation tal como se muestra en la .

Figura 58

Filtrado de paquetes SI

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4	0.050083384	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
9	0.130123699	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
14	0.209991328	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
19	0.290036882	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
24	0.370068410	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
29	0.450115766	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
34	0.529981269	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
39	0.610024299	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
44	0.690064926	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
49	0.770105154	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
54	0.850020346	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
59	0.930016350	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
64	1.010061079	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
69	1.090114535	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
74	1.170168379	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
79	1.250021002	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
84	1.330046336	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]

Nota. Solo se observa los paquetes SI. Elaboración propia.

- Tarea 5: Analizar procedimiento de acceso aleatorio

- Conectar UE.

Se conecta el dongle LTE al portátil y se espera a que se complete el proceso de conexión.

- Localizar paquetes del procedimiento de acceso aleatorio.

Para realizar el filtro excluyendo los paquetes SI y SIB1, se utiliza la expresión “!(mac-lte.bch.pdu)”. Posteriormente, se procede a buscar el primer paquete del procedimiento de acceso aleatorio. En la Figura 59, se identifican los paquetes 1721, 1723 y 1725 como Msg2, Msg3 y Msg4 del procedimiento de acceso aleatorio.

Figura 59

Paquetes Msg

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1129	17.860143126	127.0.0.1	127.0.0.20	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
1721	27.324998380	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	71	RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)
1723	27.335079544	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_CCCCH	185	RRCConnectionRequest
1725	27.340015647	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	89	DL_SCH: (SFID=778, SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25 bytes) (Pa-
1726	27.352965583	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	71	[UL] [AR] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..

Nota. El paquete Msg1 no es capturado durante el proceso. Elaboración propia.

- Verificar parámetros Msg.

Se procede a seleccionar el paquete asociado a Msg2 y se verifica los parámetros de respuesta de acceso aleatorio (RAR) como se muestra en la Figura 60.

Figura 60

Parámetros Msg2

```

1721 27.324990380 127.0.0.1 127.0.0.1 MAC-LTE 71 RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)
> Frame 1721: 71 bytes on wire (568 bits), 71 bytes captured (568 bits) on interface lo, id 0
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
> MAC-LTE RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)

```

Nota. Mensaje enviado desde el eNB al UE .Elaboración propia.

Posteriormente, se elige el paquete correspondiente a Msg3 para examinar los parámetros de solicitud de conexión RRC, desplegando todos los detalles disponibles. Se presta especial atención a la validación del mensaje UL-CCH como se observa en la Figura 61.

Figura 61

Parámetros Msg3

```

1723 27.335079544 127.0.0.1 127.0.0.1 LTE RRC_UL_CCH 105 RRCConnectionRequest
> Frame 1723: 105 bytes on wire (840 bits), 105 bytes captured (840 bits) on interface lo, id 0
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
> MAC-LTE UL-SCH: (SFN=777, SF=6) UEID=0 (Short BSR) (CCCH:6 bytes) (Padding:remainder)
  > [Context (RNTI=37860)]
  > MAC PDU Header (Short BSR) (CCCH:6) (Padding:remainder) [3 subheaders]
  > Short BSR (lcid=0 BS = 0)
  > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    Padding data: 000220f6ab48a1defefccf828e94138040902e4edc21c317ef3f1327fe
    [Padding length: 30]

```



```

> Frame 1723: 105 bytes on wire (840 bits), 105 bytes 0000 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), 0010 00 5b 6c cb 40 00 40 11 cf c4 7f
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 12 0020 00 01 94 7a 27 0f 00 47 fe 5a 6d
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9 0030 65 01 00 03 02 93 e4 03 00 00 04
  > MAC-LTE UL-SCH: (SFN=777, SF=6) UEID=0 (Short BSR) 0040 3d 20 06 1f 00 5b 36 26 0f 33 76
    > [Context (RNTI=37860)] 0050 48 a1 de fe fc cf 84 8e 24 13 80
    > MAC PDU Header (Short BSR) (CCCH:6) (Padding:rema 0060 dc 21 c3 17 ef 3f 13 27 fe
    > Short BSR (lcid=0 BS = 0)
    > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
      > UL-CCCH-Message
        Padding data: 000220f6ab48a1defefccf828e941380409
        [Padding length: 30]

```

Nota. Mensaje de control en enlace ascendente. Elaboración propia.

Finalmente, se selecciona el paquete correspondiente a Msg4 con el objetivo de verificar los parámetros de resolución de contención, desplegando de igual manera todos los detalles como se observa en la Figura 62.

Figura 62

Parámetros Msg4

```

1725 27.340015647 127.0.0.1 127.0.0.1 MAC-LTE 89 DL-SCH: (SFN=778 , SF=5) UEID=0 (UE Contention Resolution Identity)
  > Frame 1725: 89 bytes on wire (712 bits), 89 bytes captured (712 bits) on interface lo, ...
  > Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
  > Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
  > User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
  > MAC-LTE DL-SCH: (SFN=778 , SF=5) UEID=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25)
    [Context (BNTI=37860)]
    MAC PDU Header (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25) (Padding:remainder) [
      > Sub-header (Lcid=UE Contention Resolution Identity)
      > Sub-header (Lcid=CCCH, length=25)
      > Sub-header (Lcid=Padding, length is remainder)
    ]
    Contention Resolution (matches Msg3 from frame 1723, 4ms ago)
      UE Contention Resolution Identity: 5b36260f3376
      [Msg3: 1723]
      [Time since Msg3: 4]
      [UE Contention Resolution Matches Msg3: True]
  
```

Nota. Mensaje de confirmación de acceso aleatorio. Elaboración propia.

- **Tarea 6: Analizar proceso de conexión de UE.**
 - o **Verificar proceso de registro de un UE en MME.**

El procedimiento de conexión se finaliza cuando el UE completa el envío de un mensaje de registro al MME de la red LTE. En la Figura 63, se destaca específicamente el paquete 1728, el cual corresponde al mensaje de solicitud de conexión RRC, siendo un elemento relevante en el análisis de los paquetes capturados en Wireshark durante el proceso de registro y conexión.

Figura 63

Conexión RRC

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1724	27.339998313	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
1725	27.340015647	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	89	DL-SCH: (SFN=778 , SF=5) UEID=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH)
1726	27.352965583	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	71	[UL] [AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..]
1727	27.360057217	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
1728	27.360948684	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	193	RRCConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request
1729	27.360989757	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	75	[DL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2

Nota. Chatura de un paquete del proceso de registro del UE. Elaboración propia.

- o **Verificar proceso de autenticación.**

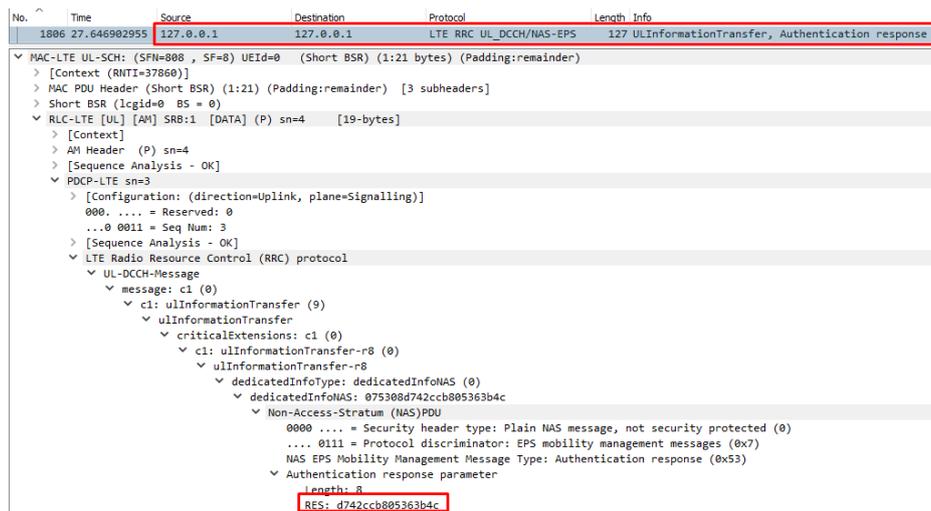
Cada vector de autenticación incluye cuatro parámetros esenciales: un número aleatorio (RAND), el token de autenticación (AUTN), la respuesta esperada del usuario (XRES), y la clave de entidad de administración de seguridad de acceso intermedio

Nota. Estos valores son iguales con los parámetros de AIA. Elaboración propia.

Asimismo, se busca el RES en el mensaje de respuesta de autenticación en los paquetes capturados, como se muestra en la Figura 66.

Figura 66

Respuesta de autenticación



Nota. El RES es igual al XRES en el AIA. Elaboración propia.

4.3.4 Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 4.

- Tarea 1: Requisitos previos.

Para llevar a cabo las actividades asignadas en esta tarea, se procede a conectar los componentes según la topología de la red. Para la configuración del software, se emplean los scripts diseñados para establecer y operar la red LTE, requiriendo la contraseña "lte" para la ejecución con privilegios de superusuario.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
```

```
$ sudo ./startLTE_12.sh
```

- Tarea 2: Instalar iperf3

La instalación de iperf3 se realizó en el host local (Mini-PC), mediante los siguientes comandos.

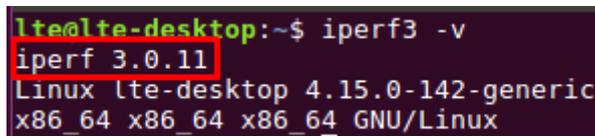
```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install iperf3
```

○ Verificar iperf 3 en mini pc.

Para verificar la versión instalada en el host local Ubuntu se utiliza el comando “iperf3 -v” en el terminal, en la Figura 67 se observa la versión 3.0.11 esta es importante para la instalación en Windows.

Figura 67

Versión iperf3



```
lte@lte-desktop:~$ iperf3 -v
iperf 3.0.11
Linux lte-desktop 4.15.0-142-generic
x86_64 x86_64 x86_64 GNU/Linux
```

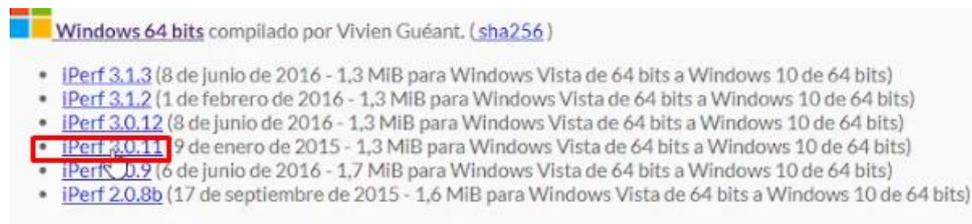
Nota. En la imagen se observa la versión 3.0.11 de iperf. Elaboración propia.

○ Descargar iperf3 en portátil (Windows).

Para obtener iperf3 en Windows, como se observa en la Figura 68 se descarga desde su sitio oficial: “<https://iperf.fr/iperf-download.php>.” Se opta por la misma versión instalada en el host local.

Figura 68

Iperf3 para Windows



Nota. En la imagen se observa las versiones disponibles de iPerf para Windows.

Elaboración propia.

- Tarea 3: Ejecutar red LTE

Para iniciar la red LTE, se replica el procedimiento de la Tarea 4: Iniciar el sistema LTE de la práctica de laboratorio 1. Esto implica activar los certificados HSS y MME, verificar la disponibilidad de archivos PEM, cargar la base de datos para el HSS y ejecutar los componentes del EPC (HSS, MME, SPGW) y eNB.

- Tarea 4: Verificar rendimiento TCP de enlace ascendente y descendente.

o Verificar dirección IP del EPC.

Para verificar la dirección del EPC, en una nueva terminal se utiliza el comando “`ifconfig gtp0`” tal como se muestra en la Figura 69

Figura 69

Dirección IP EPC

```
lte@lte-desktop:~$ ifconfig gtp0
gtp0      Link encap:UNSPEC   HWaddr 00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
          inet addr:172.16.0.1   P-t-P:172.16.0.1   Mask:255.240.0.0
          inet6 addr: fe80::55b8:f8f4:6caa:1948/64 Scope:Link
          UP POINTOPOINT RUNNING NOARP MULTICAST MTU:1500 Metric:1
          RX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:0 errors:4 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
```

Nota. La dirección del EPC corresponde a la interfaz gtp0 .Elaboración propia.

o Ejecutar iperf3 en el host local

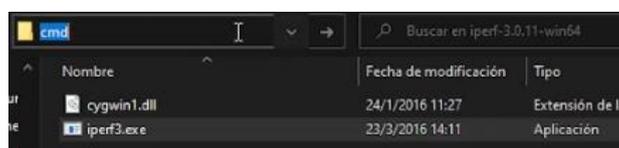
Par ejecutar iperf3 en el modo servidor se utiliza el comando “iperf3 -s” en el host local.

- **Ejecutar iperf3 en el pc portátil.**

Para ejecutar el iperf3 en modo cliente desde el pc portátil (Windows), Como se muestra en la Figura 70 se dirige a la carpeta donde se encuentra el ejecutable del mismo, en la barra de nombre se ingresa “cmd” y se presiona el botón “enter”.

Figura 70

Ejecución iperf3 en Windows



Nota. Se ejecuta el “cmd” desde la ubicación de iperf3. Elaboración propia.

- **Verificar rendimiento TCP en Wireshark.**
- **Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.**

Para llevar a cabo estas actividades se inicia Wireshark en el pc con Windows y se captura los paquetes de la interfaz de red LTE cuando se realiza la transmisión de datos entre cliente- servidor y viceversa. En la Figura 71 se puede identificar la interfaz que corresponde a la red LTE.

Figura 71

Interfaz de red LTE



Nota. La dirección IP corresponde a la asignada para el UE. Elaboración propia.

Para realizar la transmisión de datos en la ventana del símbolo de sistema se inicia el cliente TCP con la dirección IP del servidor como parámetro, utilizando el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1
```

Comenzará a transmitir datos desde el cliente al servidor tal como se muestra en la Figura 72.

Figura 72

Transmisión de datos desde el cliente al servidor

```
D:\> iperf3 -c 172.16.0.1
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 55158 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00    sec    896 KBytes    7.32 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.01    sec    1.00 MBytes    8.33 Mbits/sec
[ 4] 2.01-3.00    sec    896 KBytes    7.39 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.01    sec    1.00 MBytes    8.30 Mbits/sec
[ 4] 4.01-5.01    sec    1.00 MBytes    8.39 Mbits/sec
[ 4] 5.01-6.01    sec    1.00 MBytes    8.44 Mbits/sec
[ 4] 6.01-7.00    sec    1.00 MBytes    8.42 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.01    sec    896 KBytes    7.28 Mbits/sec
[ 4] 8.01-9.01    sec    1.00 MBytes    8.39 Mbits/sec
[ 4] 9.01-10.00   sec    1.00 MBytes    8.44 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-10.00   sec    9.62 MBytes    8.07 Mbits/sec
[ 4] 0.00-10.00   sec    9.62 MBytes    8.07 Mbits/sec
Sender
Receiver
```

Nota. Envió de paquetes TCP desde el cliente Windows al host local . Elaboración propia.

Después de completar el envío de paquetes, se interrumpe la captura en Wireshark y se aplica un filtro específico ("tcp.port==5201") para examinar los paquetes relevantes. Es esencial identificar las direcciones IP y los números de puerto del servidor y el cliente, que pueden variar.

Al revisar la lista de paquetes, se localizó el envío del cliente al servidor con el número de puerto utilizado para la prueba iperf3, 55158 para el cliente y 5201 para el servidor. A continuación, en la Figura 73 se muestra el paquete de interés.

Figura 73

Filtrado de paquetes TCP por puerto

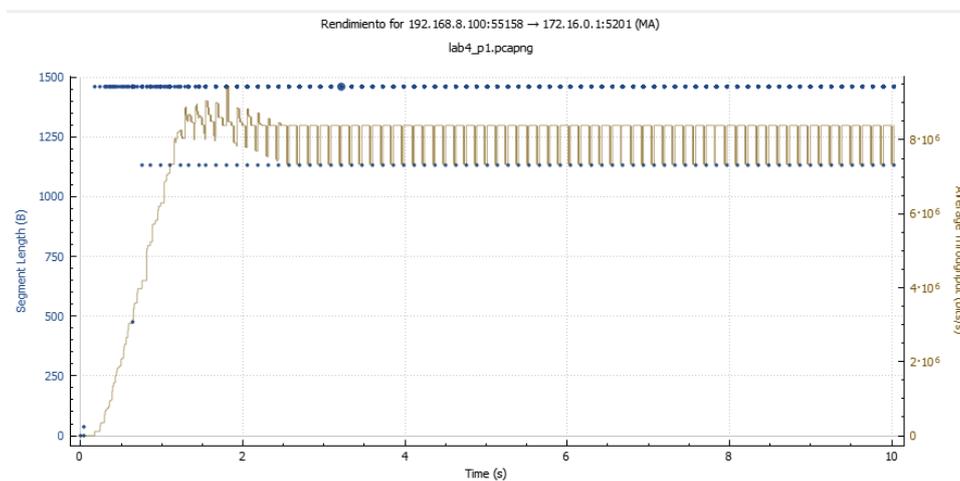
No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
345	32.176992	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	54	55157 → 5201 [ACK] Seq=99 Ack=4...
346	32.221132	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	55	5201 → 55157 [PSH, ACK] Seq=4 A...
347	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=38 Ack=1...
348	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=1498 Ack...
349	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=2958 Ack...
350	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=4418 Ack...
351	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=5878 Ack...
352	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=7338 Ack...
353	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=8798 Ack...
354	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=10258 Ac...
355	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=11718 Ac...
356	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=13178 Ac...
357	32.270474	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	54	55157 → 5201 [ACK] Seq=99 Ack=5...
358	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=14...
359	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=29...
360	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=44...
361	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=58...

Nota. Paquetes TCP enviado desde puerto 55158 hacia puerto 5201. Elaboración propia.

Para identificar el rendimiento TCP se selecciona este paquete, luego se ingresa a la opción Estadísticas>Gráficos de flujo TCP>Rendimiento. Aparecerá un gráfico para el rendimiento de TCP similar a la Figura 74.

Figura 74

Rendimiento TCP desde cliente a servidor



Nota. Inicio de TCP lento durante 1.5 segundos. Elaboración propia.

TCP presenta un inicio lento como estrategia de control de congestión, al inicio del envío de los datos por lo que se puede usar la opción “-O” para omitir este periodo lento y obtener resultados más precisos utilizando el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -O 2
```

En la Figura 75 se puede observar el envío de los paquetes omitiendo los 2 primeros segundos, además se observa que esta omisión favorece al proceso obteniendo un mejor resultado en la velocidad de datos.

Figura 75

Envío de paquetes omitiendo el periodo lento

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -O 2
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 55215 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00    sec 896 KBytes  7.32 Mbits/sec (omitted)
[ 4] 1.00-2.01    sec 1.00 MBytes  8.29 Mbits/sec (omitted)
[ 4] 0.00-1.01    sec 1.00 MBytes  8.30 Mbits/sec
[ 4] 1.01-2.00    sec 1.00 MBytes  8.42 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00    sec 896 KBytes  7.39 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.01    sec 1.00 MBytes  8.27 Mbits/sec
[ 4] 4.01-5.01    sec 1.00 MBytes  8.42 Mbits/sec
[ 4] 5.01-6.00    sec 1.00 MBytes  8.41 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00    sec 1.00 MBytes  8.43 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.01    sec 896 KBytes  7.28 Mbits/sec
[ 4] 8.01-9.01    sec 1.00 MBytes  8.38 Mbits/sec
[ 4] 9.01-9.99    sec 1.00 MBytes  8.52 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-9.99    sec 9.75 MBytes  8.18 Mbits/sec sender
[ 4] 0.00-9.99    sec 9.97 MBytes  8.37 Mbits/sec receiver
```

Nota. Primeros 2 segundos omitidos. Elaboración propia.

- **Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.**

Para realizar la transmisión de datos en el enlace descendente en modo inverso, el servidor envía y el cliente recibe, se usa la opción “-R” en el sistema del cliente como se muestra a continuación:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -R -t 20 -O 2
```

Figura 76

Envío de paquetes TCP desde el servidor al cliente

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 172.16.0.2, port 62565
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.2 port 62566
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth    Retr  Cwnd
[ 5]  0.00-1.00  sec  2.37 MBytes  19.9 Mbits/sec  1   85.5 KBytes (omitted)
[ 5]  1.00-2.00  sec  2.51 MBytes  21.1 Mbits/sec  0   128 KBytes (omitted)
[ 5]  0.00-1.00  sec  2.29 MBytes  19.2 Mbits/sec  0   155 KBytes
[ 5]  1.00-2.00  sec  2.53 MBytes  21.2 Mbits/sec  18  89.8 KBytes
[ 5]  2.00-3.00  sec  2.21 MBytes  18.5 Mbits/sec  0   108 KBytes
[ 5]  3.00-4.00  sec  2.36 MBytes  19.8 Mbits/sec  0   124 KBytes
[ 5]  4.00-5.00  sec  2.37 MBytes  19.9 Mbits/sec  7   98.4 KBytes
[ 5]  5.00-6.00  sec  2.44 MBytes  20.5 Mbits/sec  0   120 KBytes
[ 5]  6.00-7.00  sec  2.44 MBytes  20.5 Mbits/sec  0   130 KBytes
[ 5]  7.00-8.00  sec  2.22 MBytes  18.7 Mbits/sec  20  97.0 KBytes
[ 5]  8.00-9.00  sec  2.33 MBytes  19.6 Mbits/sec  3   85.5 KBytes
[ 5]  9.00-10.00 sec  2.23 MBytes  18.7 Mbits/sec  14  72.7 KBytes
[ 5] 10.00-11.00 sec  1.93 MBytes  16.2 Mbits/sec  2   62.7 KBytes
[ 5] 11.00-12.00 sec  1.92 MBytes  16.1 Mbits/sec  0   82.7 KBytes
[ 5] 12.00-13.00 sec  2.10 MBytes  17.6 Mbits/sec  8   72.7 KBytes
[ 5] 13.00-14.00 sec  1.94 MBytes  16.3 Mbits/sec  0   88.4 KBytes
[ 5] 14.00-15.00 sec  1.98 MBytes  16.6 Mbits/sec  6   75.6 KBytes
[ 5] 15.00-16.00 sec  1.59 MBytes  13.4 Mbits/sec  4   69.9 KBytes
[ 5] 16.00-17.00 sec  2.30 MBytes  19.3 Mbits/sec  0   92.7 KBytes
[ 5] 17.00-18.00 sec  2.20 MBytes  18.4 Mbits/sec  0   110 KBytes
[ 5] 18.00-19.00 sec  2.23 MBytes  18.7 Mbits/sec  0   124 KBytes
[ 5] 19.00-20.00 sec  2.39 MBytes  20.1 Mbits/sec  0   138 KBytes
[ 5] 20.00-20.04 sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec  0   138 KBytes
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth    Retr
[ 5]  0.00-20.04  sec  44.0 MBytes  18.4 Mbits/sec  82
[ 5]  0.00-20.04  sec  44.2 MBytes  18.5 Mbits/sec
sender
receiver
```

Nota. Ventana de iperf3 del servidor. Elaboración propia.

En la Figura 76 se observa, que el rendimiento medido para el servicio LTE de 20 MHz es bajo, debido a la pérdida de paquetes y limitación de la ventana de congestión (Cwnd). Para solucionar este error y medir correctamente el rendimiento TCP es necesario transmitir más datos a través del enlace para llenar la canalización de datos, este proceso se lo hace mediante la opción “-P” mediante el siguiente comando:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -R -t 20 -o 2 -P 10
```

Figura 77

Envío de paquetes TCP DL con flujos paralelos

[15]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	1	5.70	KBytes
[17]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	2	8.55	KBytes
[19]	20.00-20.06	sec	22.8	KBytes	3.22	Mbits/sec	0	18.5	KBytes
[21]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	7.13	KBytes
[23]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	4	5.70	KBytes
[25]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	3	5.70	KBytes
[27]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	15.7	KBytes
[29]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	24.2	KBytes
[31]	20.00-20.06	sec	22.8	KBytes	3.22	Mbits/sec	0	12.8	KBytes
[33]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	17.1	KBytes
[SUM]	20.00-20.06	sec	45.6	KBytes	6.43	Mbits/sec	24		

[ID]	Interval	Transfer	Bandwidth	Retr	
[5]	0.00-20.06	sec 3.63 MBytes	1.52 Mbits/sec	150	sender
[5]	0.00-20.06	sec 3.65 MBytes	1.53 Mbits/sec		receiver
[7]	0.00-20.06	sec 4.64 MBytes	1.94 Mbits/sec	149	sender
[7]	0.00-20.06	sec 4.64 MBytes	1.94 Mbits/sec		receiver
[9]	0.00-20.06	sec 3.24 MBytes	1.36 Mbits/sec	114	sender
[9]	0.00-20.06	sec 3.24 MBytes	1.36 Mbits/sec		receiver
[11]	0.00-20.06	sec 3.63 MBytes	1.52 Mbits/sec	127	sender
[11]	0.00-20.06	sec 3.63 MBytes	1.52 Mbits/sec		receiver
[13]	0.00-20.06	sec 3.71 MBytes	1.55 Mbits/sec	155	sender
[13]	0.00-20.06	sec 3.75 MBytes	1.57 Mbits/sec		receiver
[15]	0.00-20.06	sec 4.89 MBytes	2.04 Mbits/sec	126	sender
[15]	0.00-20.06	sec 4.88 MBytes	2.04 Mbits/sec		receiver
[17]	0.00-20.06	sec 4.04 MBytes	1.69 Mbits/sec	163	sender
[17]	0.00-20.06	sec 3.99 MBytes	1.67 Mbits/sec		receiver
[19]	0.00-20.06	sec 3.59 MBytes	1.50 Mbits/sec	127	sender
[19]	0.00-20.06	sec 3.62 MBytes	1.51 Mbits/sec		receiver
[21]	0.00-20.06	sec 3.66 MBytes	1.53 Mbits/sec	163	sender
[21]	0.00-20.06	sec 3.63 MBytes	1.52 Mbits/sec		receiver
[23]	0.00-20.06	sec 4.44 MBytes	1.86 Mbits/sec	128	sender
[23]	0.00-20.06	sec 4.41 MBytes	1.85 Mbits/sec		receiver
[25]	0.00-20.06	sec 4.00 MBytes	1.67 Mbits/sec	137	sender
[25]	0.00-20.06	sec 3.95 MBytes	1.65 Mbits/sec		receiver
[27]	0.00-20.06	sec 3.74 MBytes	1.57 Mbits/sec	158	sender
[27]	0.00-20.06	sec 3.71 MBytes	1.55 Mbits/sec		receiver
[29]	0.00-20.06	sec 4.85 MBytes	2.03 Mbits/sec	112	sender
[29]	0.00-20.06	sec 4.82 MBytes	2.02 Mbits/sec		receiver
[31]	0.00-20.06	sec 3.17 MBytes	1.32 Mbits/sec	156	sender
[31]	0.00-20.06	sec 3.13 MBytes	1.31 Mbits/sec		receiver
[33]	0.00-20.06	sec 4.18 MBytes	1.75 Mbits/sec	158	sender
[33]	0.00-20.06	sec 4.13 MBytes	1.73 Mbits/sec		receiver
[SUM]	0.00-20.06	sec 59.4 MBytes	24.8 Mbits/sec	2123	sender
[SUM]	0.00-20.06	sec 59.2 MBytes	24.7 Mbits/sec		receiver

Nota. Solo se observa el resultado final. Elaboración propia.

En la Figura 77 se observa en la parte superior el envío de los flujos paralelos y en la parte inferior se encuentra el resultado final de la prueba donde se puede identificar que el rendimiento mejora en comparación a la prueba anterior.

- **Tarea 6: Verificar rendimiento UDP de enlace ascendente y descendente.**
 - o **Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.**

Para realizar la transmisión de datos UDP se usa el siguiente código en el terminal iperf3 del cliente.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u
```

En la Figura 78 se observa el envío de paquetes UDP realizados los cuales están limitados a 1Mbps, sin embargo, el cliente no verifica la cantidad de datos que recibe del servidor.

Figura 78

Prueba de rendimiento UDP

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -u
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 61447 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.00 sec      120 KBytes   980 Kbits/sec    15
[ 4] 1.00-2.01 sec      128 KBytes   1.04 Mbits/sec   16
[ 4] 2.01-3.00 sec      128 KBytes   1.06 Mbits/sec   16
[ 4] 3.00-4.01 sec      128 KBytes   1.04 Mbits/sec   16
[ 4] 4.01-5.01 sec      128 KBytes   1.05 Mbits/sec   16
[ 4] 5.01-6.01 sec      128 KBytes   1.05 Mbits/sec   16
[ 4] 6.01-7.01 sec      128 KBytes   1.05 Mbits/sec   16
[ 4] 7.01-8.01 sec      128 KBytes   1.05 Mbits/sec   16
[ 4] 8.01-9.02 sec      128 KBytes   1.04 Mbits/sec   16
[ 4] 9.02-10.01 sec     128 KBytes   1.05 Mbits/sec   16
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.01 sec     1.24 MBytes  1.04 Mbits/sec  8.615 ms  0/159 (0%)
[ 4] Sent 159 datagrams
```

Nota. El resultado no muestra el retraso de paquetes. Elaboración propia.

Es importante verificar los resultados en el extremo del servidor por lo que se debe utilizar el siguiente comando:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u --get-server-output
```

En la Figura 79 se observa dos parámetros nuevos el jitter es una demora que existe entre el envío y recepción de paquetes, y la cantidad de datagramas perdidos, para mantener una buena calidad de enlace, esta pérdida no debe ser superior al 1%. Los resultados generales se puede observar también el servidor como se muestra en la Figura 80.

Figura 79

Envío de paquetes UDP desde el extremo del servidor

```

[ 4] 5.00-6.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 6.00-7.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 7.00-8.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 8.00-9.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 9.00-10.01 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16

[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.01 sec 1.24 MBytes  1.04 Mbits/sec 11.373 ms  1/159 (0.63%)
[ 4] Sent 159 datagrams

Server output:
-----
Accepted connection from 172.16.0.6, port 65130
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.6 port 64567
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec 112 KBytes  917 Kbits/sec  7.578 ms  0/14 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 112 KBytes  917 Kbits/sec 10.293 ms  1/15 (6.7%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 7.163 ms  0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 144 KBytes  1.18 Mbits/sec 6.962 ms  0/18 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 112 KBytes  915 Kbits/sec 12.279 ms  0/14 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 9.387 ms  0/16 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 6.337 ms  0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 9.517 ms  0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 136 KBytes  1.11 Mbits/sec 11.790 ms  0/17 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 120 KBytes  983 Kbits/sec 8.717 ms  0/15 (0%)

```

Nota. La salida del servidor presenta el valor de jitter y los datagramas perdidos.

Elaboración propia.

Figura 80

Envío de paquetes UDP visto desde el servidor

```

Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 172.16.0.6, port 65130
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.6 port 64567
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec 112 KBytes  917 Kbits/sec  7.578 ms  0/14 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 112 KBytes  917 Kbits/sec 10.293 ms  1/15 (6.7%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 7.163 ms  0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 144 KBytes  1.18 Mbits/sec 6.962 ms  0/18 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 112 KBytes  915 Kbits/sec 12.279 ms  0/14 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 9.387 ms  0/16 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 6.337 ms  0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec 9.517 ms  0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 136 KBytes  1.11 Mbits/sec 11.790 ms  0/17 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 120 KBytes  983 Kbits/sec 8.717 ms  0/15 (0%)
[ 5] 10.00-10.08 sec 16.0 KBytes  1.65 Mbits/sec 11.373 ms  0/2 (0%)

[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.08 sec 1.24 MBytes  1.03 Mbits/sec 11.373 ms  1/159 (0.63%)

```

Nota. Los valores generales se recalcan en el cuadro rojo. Elaboración propia.

- **Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.**

Para medir el rendimiento de UDP para el enlace descendente, se puede usar la opción “-R” como se observa a continuación.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -R
```

Si la prueba produce resultados inusuales, se reduce la longitud de los datos (búfer), ya que la longitud de datos predeterminada es de 8 kB para UDP.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -R -l 1K
```

- **Configurar el ancho de banda objetivo.**

Para configurar el ancho de banda objetivo para la prueba de rendimiento de UDP, se usa la opción `-b` como se observa a continuación el código indica que el ancho de banda debe ser 5 Mbps .

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b - R 5M
```

- **Realizar prueba de rendimiento de UDP.**

La primera línea corresponde a la prueba del envío de paquetes UDP desde el servidor al cliente y la segunda línea corresponde al envío de paquetes UDP desde el cliente al servidor utilizando todos los parámetros necesarios para mejorar los resultados de las pruebas.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b 5M -R -l 1k
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
```

Figura 81

Envío de paquetes UDP con ancho de bando objeto

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 59086 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.01 sec  553 KBytes    4.48 Mbits/sec  553
[ 4] 1.01-2.01 sec  630 KBytes    5.17 Mbits/sec  630
[ 4] 2.01-3.01 sec  610 KBytes    5.00 Mbits/sec  610
[ 4] 3.01-4.00 sec  604 KBytes    4.97 Mbits/sec  604
[ 4] 4.00-5.01 sec  608 KBytes    4.93 Mbits/sec  608
[ 4] 5.01-6.01 sec  608 KBytes    4.99 Mbits/sec  608
[ 4] 6.01-7.01 sec  611 KBytes    5.01 Mbits/sec  611
[ 4] 7.01-8.01 sec  619 KBytes    5.10 Mbits/sec  619
[ 4] 8.01-9.01 sec  611 KBytes    5.01 Mbits/sec  611
[ 4] 9.01-10.00 sec 611 KBytes    5.02 Mbits/sec  611
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.00 sec 5.92 MBytes    4.97 Mbits/sec  0.945 ms  0/6065 (0%)
[ 4] Sent 6065 datagrams
```

Nota. Prueba de paquetes con ancho de banda objetivo de 5Mbps. Elaboración propia.

- **Tarea 7: Verificar latencia de red LTE.**

- Realizar prueba de ruta.
- Realizar prueba de ping.

Para verificar la latencia de la red LTE se realiza la prueba de ruta ingresando al símbolo de sistema del cliente, mediante el uso del comando “tracert” el cual determina la ruta de destino haciendo uso de RTT (tiempo de ida y vuelta).

Para medir el RTT de una mejor forma se utiliza el comando “ping”. El cual nos brinda información de los tiempos RTT mínimos, máximos y un valor medio. En la Figura 82 se observa el uso de estos comandos:

Figura 82

Medición de RTT

```
C:\Users\acer>tracert 8.8.8.8

Traza a la dirección dns.google [8.8.8.8]
sobre un máximo de 30 saltos:

  1  24 ms   26 ms   26 ms  hi.link [192.168.8.1]
  2  59 ms   47 ms   53 ms  172.16.0.1
  3  59 ms   46 ms   55 ms  192.168.32.1
  4  62 ms   44 ms   57 ms  10.24.8.1
  5  66 ms   31 ms   50 ms  192.100.198.2
  6  *        33 ms   19 ms  10.119.0.52
  7  45 ms   36 ms   26 ms  corp-190-12-7-250.uio.puntonet.ec [190.12.7.250]
  8  28 ms   27 ms   48 ms  corp-190-12-7-249.uio.puntonet.ec [190.12.7.249]
  9  105 ms  139 ms  106 ms  72.14.222.160
 10  119 ms  128 ms  105 ms  108.170.253.209
 11  111 ms  111 ms  116 ms  142.250.210.119
 12  120 ms  122 ms  106 ms  dns.google [8.8.8.8]

Traza completa.

C:\Users\acer>ping 192.168.8.1

Haciendo ping a 192.168.8.1 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.8.1: bytes=32 tiempo=24ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.8.1: bytes=32 tiempo=18ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.8.1: bytes=32 tiempo=12ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.8.1: bytes=32 tiempo=16ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.8.1:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
              (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 12ms, Máximo = 24ms, Media = 17ms
```

Nota. Los valores de RTT permiten identificar la latencia de la red. Elaboración propia.

4.3.5 *Practica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional:*

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 5.

- **Tarea 1: Impacto del desplazamiento de temporización y CFO en la demodulación OFDM.**
 - o **Generar un código en Matlab que simule el proceso de modulación y demodulación de símbolos utilizando la modulación OFDM.**

Para llevar a cabo esta actividad se genera los símbolos OFDM mediante un bucle de 3 iteraciones. En cada iteración, se genera un vector de datos aleatorios con valores entre 0 y 15, estos datos se modulan utilizando 16QAM. Posteriormente, se aplica la transformada inversa de Fourier (IFFT) para obtener el símbolo OFDM. A continuación, se añade un prefijo cíclico al símbolo OFDM en cada iteración.

En el proceso de demodulación se obtiene el símbolo OFDM transmitido, se elimina el prefijo cíclico y se recupera el símbolo demodulado en función de la frecuencia. A continuación, se presenta el código desarrollado para cumplir con esta actividad.

```

%MODULACION Y DEMODULACION DE SIMBOLOS OFDM

N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada
medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 0; % desplazamiento de tiempo
eps = 0; % desplazamiento de frecuencia
L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
num_simbolos = 3;
sk = []; % Inicialización del vector para almacenar los datos
for n = 1:num_simbolos
    data = randi([0 15], N, 1); % Generar vector de datos
    s = qammod(data, 16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
    sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
    if n == 2
        symb = [sf(N - L + 1:N); sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
    else
        symb = [sf(N - LCP1 + 1:N); sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
    end
end

```

```

end
sk = [sk; symb];
end

datos_demodulados = []; % Inicialización del vector para almacenar los datos demodulados
% Demodulación de la señal OFDM
for i = 1:num_simbolos
    % Obtener el símbolo OFDM recibido
    simbolo_rx = sk((i - 1) * (N + LCP1) + 1 : i * (N + LCP1));
    % Eliminar el prefijo cíclico
    simbolo_sin_prefijo = simbolo_rx(LCP1 + 1 : end);
    % FFT para convertir al dominio de la frecuencia
    simbolo_demodulado = fft(simbolo_sin_prefijo);
end
scatterplot(simbolo_demodulado);
scatterplot(R1); % diagrama de constelación

```

- **Generar un código en Matlab para considerar el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia en 3 casos.**
 - **Sin corrección de tiempo y CFO.**
 - **Solo con corrección de tiempo.**
 - **Con corrección de tiempo y corrección de CFO.**

Para cumplir con esta actividad se modificó el código anterior que permite simular la modulación y demodulación de símbolos OFDM ahora basándose en el modelo de señal recibida $r(k)$ en un canal sin dispersión y afectado por ruido gaussiano blanco aditivo, el cual se describe mediante la siguiente ecuación (1).

$$r(k) = s(k - \tau) \cdot e^{\frac{j2\pi\epsilon k}{N}} + n(k) \quad k = 0, 1, \dots \quad (1)$$

Donde:

- τ es el tiempo de llegada desconocido de un símbolo.
- ϵ denota el desplazamiento de frecuencia.
- $\mathbf{n(k)}$ es el ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN).

A continuación, se presenta el código desarrollado para identificar los 3 tipos de casos propuestos. Empleando la generación de retraso temporal y CFO en la transmisión y para la recepción de los símbolos dependiendo de cada caso se corrige el tiempo o el CFO, finalmente se hace uso de un gráfico de dispersión para visualizar los resultados.

```

N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada
medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso
y CFO

% Caso (I)
rc1 = r(1:N+L); % Sin tiempo y corrección CFO
R1 = fft(rc1(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R1); % diagrama de constelación

% Caso (II)
rc2 = r(tau+1:tau+N+L); % Corrección de tiempo
R2 = fft(rc2(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R2);% diagrama de constelación

% Caso (III)
rc3 = rc2.*exp(-1i*2*pi*eps*(tau+1:tau+N+L)'/N); % corrección de CFO
R3 = fft(rc3(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R3);% diagrama de constelación

```

- **Tarea 2: Compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de CFO.**

- **Generar un código en Matlab que permita calcular la estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML).**

Para cumplir esta actividad, se utiliza el código de la segunda actividad de la tarea 1, hasta la generación de observaciones con retraso y CFO tal como se muestra a continuación.

```

N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada
medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y
CFO

```

La estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML) permite encontrar el retardo temporal óptimo y el desplazamiento de frecuencia, utilizado para maximizar una métrica específica que evalúa la calidad de la señal o su relación con respecto al ruido e interferencia mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{\tau}_{ML} = \arg \frac{\max}{\tau} \{J(\tau)\} = \arg \frac{\max}{\tau} \{|\gamma(\tau)| - \rho\phi(\tau)\} \quad (2)$$

$$\hat{\varepsilon}_{ML} = -\frac{1}{2\pi} \angle \gamma(\hat{\tau}_{ML}) \quad (3)$$

El código que se presenta a continuación es una función que permite calcular la función objetivo para la estimación del retardo temporal y del desplazamiento de frecuencia haciendo uso de las ecuaciones (2) y (3).

```
function [t,e] = MLObjFun(r,N,L)
% r: Señal recibida
% N: tamaño de muestras
% L: Longitud del prefijo cíclico

% Inicialización de variables para almacenar métricas
gamma = zeros(1,N+1);
phi = zeros(1,N+1);
rho = 0.98;
for theta=1:N+1
    for k = theta:theta+L-1
% Cálculo de gamma y phi basado en la señal recibida r
        gamma(theta) = gamma(theta) + r(k)*conj(r(k+N));
        phi(theta) = phi(theta) + 0.5*(abs(r(k))^2 + abs(r(k+N))^2);
    end
end
% Cálculo de la función objetivo t (retardo temporal)
t = abs(gamma)-rho*phi;
% Cálculo de la estimación de desplazamiento de frecuencia e
e = -1/(2*pi)*angle(gamma);
```

Para utilizar la función se hace el llamado en el código principal de la actividad, además se creó figuras que permiten identificar la estimación conjunta de máxima verosimilitud.

```
%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[té] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');
figure; plot(0:N,e); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');
```

- **Generar un código en Matlab para identificar los efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP) en los siguientes casos:**
 - **Longitud CP0 real y longitud CP1 asumido.**
 - **Longitud CP1 real y longitud CP0 asumido.**

Para cumplir con esta actividad se utiliza el código anterior y se realizan modificaciones que permitan trabajar con los diferentes casos propuestos a continuación se muestra el código que se utilizó para cada uno.

```

%Caso 1: LCP0 real, LCP1 asumido
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada
medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP0; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP0+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO correcto
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP0-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso
y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Tiempo (samples)');

% Generar observaciones con retraso y CFO (CP incorrecto)
L2 = LCP1; % de longitud de CP incorrecta
k = (0:2*N+L2-1)';
st = N+LCP0-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L2)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso
y CFO
%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L2);
hold on; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Tiempo (samples)');
legend('CP correcto', 'CP incorrecto');

```

Los cambios que se realizan son básicamente el valor que tiene cada prefijo cíclico dentro de los símbolos generados para la transmisión y como afecta tener un CP incorrecto en la etapa de recepción mediante la función objetivo ML.

```

%Caso 2: LCP1 real, LCP0 asumido
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada
medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO correcto
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso
y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');

% Generar observaciones con retraso y CFO (CP incorrecto)
L2 = LCP0; % de longitud de CP incorrecta
k = (0:2*N+L2-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L2)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso
y CFO
%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L2);
hold on; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');
legend('CP correcto', 'CP incorrecto');

```

- **Tarea 3: Capturar señal del enlace descendente LTE.**
 - **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**
- Para cumplir con esta actividad se conecta los componentes de la red acorde a lo topología proporcionada para el laboratorio.
 - **Configurar software OAI.**
 - **Iniciar la red LTE.**

Para cumplir con estas actividades se hace uso de los procesos, de las tareas 2 a 4 de la práctica de laboratorio 1 el cual consiste en la configuración y activación de los componentes de la red.

- **Capturar señal LTE.**

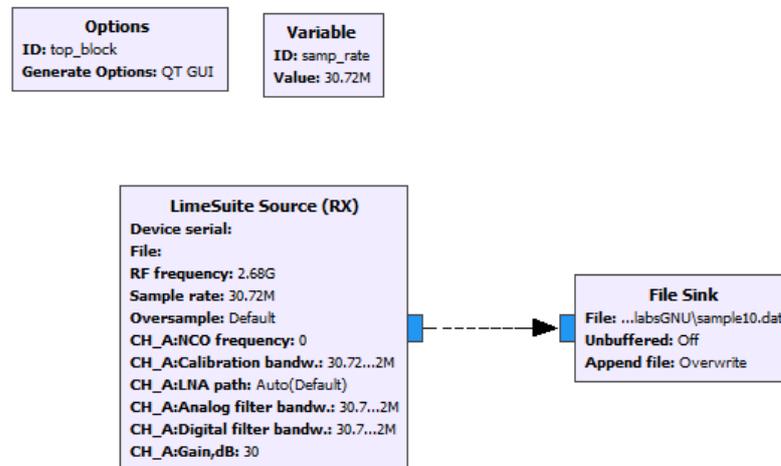
Se utiliza GNU Radio en el ordenador portátil para capturar las señales del enlace descendente LTE en vivo.

En la Figura 83 se observa los bloques utilizados para llevar a cabo la captura de la señal LTE, las configuraciones que se realizan son:

- "samp_rate" a 30.72 MHz para la señal LTE estándar de 20 MHz. Para señales LTE de 5 y 10 MHz se usa frecuencias de muestreo de 7.68 MHz y 15.36 MHz, respectivamente.
- En el bloque "LimeSuite Source", se configura la "frecuencia de RF" en la frecuencia de transmisión de enlace descendente LTE 2.68 GHz.
- La "Ganancia" se ajusta a un valor adecuado para evitar el recorte.
- Las opciones "Calibration bandw.", "Analog filter bandw." y "Filtro digital bandw." en la pestaña CH_A se cambian el valor a samp_rate.
- En el bloque "File Sink", se elige una carpeta y nombre de archivo (.dat) para almacenar las muestras capturadas.

Figura 83

Bloques de procesamiento para la captura de señal LTE



Nota. La configuración corresponde a una señal de 20 MHz. Elaboración propia.

Finalmente se reproduce el flujo, y se lo detiene inmediatamente para evitar archivos de gran tamaño.

- **Tarea 4: Compensación de temporización y estimación de CFO en señal LTE.**
 - o **Transferir la captura de señal a Matlab.**

Para transferir los datos capturados se importa el archivo generado a Matlab, se creó una función en la que se abre el archivo y devuelve el contenido como vector, tratándolos como números complejos de 32 bits. A continuación, se presenta el código realizado.

```
function v = read_complex_binary (filename, count)
% Función para leer datos complejos desde un archivo binario
% Parámetros:
% - filename: Nombre del archivo binario a leer
% - count: Número opcional de elementos a leer

% Comprobar el número de argumentos de entrada
m = narginchk (1,2,nargin);

if (m)
    usage (m);
end

% Establecer el valor predeterminado para count si no se proporciona
```

```

if (nargin < 2)
    count = Inf;
end

% Abrir el archivo en modo lectura binaria
f = fopen (filename, 'rb');

% Verificar si la apertura del archivo fue exitosa
if (f < 0)
    v = 0; % Si falla, establecer el resultado en 0
else
    % Leer datos del archivo en formato de matriz 2xcount de números de
    punto flotante de 32 bits
    t = fread (f, [2, count], 'float');

    % Cerrar el archivo después de la lectura
    fclose (f);

    % Crear un vector de números complejos combinando partes real e
    imaginaria
    v = t(1,:) + t(2,:)*1i;

    % Obtener dimensiones y transponer el vector
    [r, c] = size (v);
    v = reshape (v, c, r);
end

```

- **Importar muestras y trazar espectro de potencia y función objetivo.**

Para importar las muestras y visualizar su espectro de potencia y función objetivo, se implementó un código que emplea la función previamente creada, “read_complex_binary”, para importar datos desde un archivo binario. Posteriormente, se utilizó la función “periodogram” para calcular el espectro de potencia de las muestras y se generaron gráficos para las partes real e imaginaria en el dominio temporal.

A continuación, al usuario se le solicita ingresar el índice de inicio basado en la figura del componente I. Luego, las muestras fueron recortadas desde el índice de inicio proporcionado. Se implementó un bucle para calcular y graficar la función objetivo de máxima verosimilitud (ML) para 10 símbolos OFDM, asumiendo diferentes longitudes de prefijo cíclico (LCP0 y LCP1). Los resultados de la función objetivo se representaron en una nueva figura. El siguiente código ejecuta cada uno de los pasos mencionados anteriormente.

```

% Configuración de parámetros
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs*20e-3; % Número de muestras (20ms)

% Lectura de muestras complejas desde un archivo binario
v = read_complex_binary ('sample.dat', count);

% Gráfico del espectro de potencia de las muestras
figure, periodogram(v,[],'centered',count,fs,'power');
title('Espectro de Potencia'); % Título del gráfico
xlabel('Frecuencia (MHz)'); % Etiqueta del eje x
ylabel('Potencia Espectral (dB)'); % Etiqueta del eje y

% Gráfico de las partes real e imaginaria en el dominio temporal
figure;
subplot(2,1,1); plot(real(v));
axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)'); title('Componente I');
subplot(2,1,2); plot(imag(v));
axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)'); title('Componente Q');

% Configuración de parámetros adicionales
N = 2048; % Tamaño de la FFT
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1

% Solicitar al usuario el índice de la muestra de inicio
prompt = 'Ingrese el índice de la muestra de inicio: ';
st = input(prompt);

% Recortar el vector de muestras desde el índice de inicio
v = v(st:end);

% Gráfico de 10 símbolos OFDM con prefijos cíclicos de diferentes
longitudes
figure;
for symb = 1:10 % Número de símbolos OFDM
    % Asumir prefijo cíclico LCP0
    r = v((N+LCP0)*(symb-1)+1:(N+LCP0)*(symb-1)+(2*N+LCP0));
    [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP0);
    plot((N+LCP0)*(symb-1):(N+LCP0)*(symb-1)+N,t, 'b'); hold on;

    % Asumir prefijo cíclico LCP1
    r = v((N+LCP1)*(symb-1)+1:(N+LCP1)*(symb-1)+(2*N+LCP1));
    [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP1);
    plot((N+LCP1)*(symb-1):(N+LCP1)*(symb-1)+N,t, 'r'); hold on;
end
axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)');

```

- Generar un código de Matlab para la temporización de ML y la estimación y compensación de CFO.

Para llevar a cabo esta actividad, se emplean los códigos previamente desarrollados en actividades anteriores. El procedimiento se inicia con la configuración de parámetros, seguido por la importación de muestras desde un archivo binario. Es esencial especificar el índice de inicio de la muestra durante este proceso. Posteriormente, se procesa los primeros tres símbolos OFDM. En esta etapa, se realiza la estimación del retardo y del Error de Frecuencia de Portadora (CFO), se elimina el Prefijo Cíclico (CP) y se efectúan gráficas de constelación y del espectro de potencia. A continuación, se presenta el código que ejecuta este proceso detallado.

```

% Configuración de parámetros
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs*20e-3; % Número de muestras (20ms)

% Importar muestras desde el archivo binario 'sample.dat'
v = read_complex_binary ('sample.dat', count);

% Configuración adicional
N = 2048; % Tamaño de la FFT
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1

% Solicitar al usuario el índice de inicio
prompt = 'Ingrese el índice de la muestra de inicio: ';
st = input(prompt);

% Bucle para procesar 3 símbolos OFDM
for symb = 1:3
    % Verificar si el símbolo es el primero de cada grupo de 7
    if mod(symb,7)==1
        % Procesar con LCP0
        r = v(st:st+(2*N+LCP0)-1);
        [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP0);
        [~,tau] = max(t); % Estimar el retardo
        eps = e(tau); % Estimar el CFO
        rc = r(tau:tau+(N+LCP0)-1).*exp(-1i*2*pi*eps*(st+tau-
1:st+tau+N+LCP0-2).'/N); % Corrección de tiempo y CFO
        R = fft(rc(LCP0+1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
        scatterplot(R(2:end)); % Excluir DC y trazar la constelación
        figure, periodogram(rc(LCP0+1:end),[], 'centered',N,fs, 'power'); %
Graficar el espectro de potencia
        st = st+tau+N+LCP0-1-1000; % Actualizar el índice de inicio
    else
        % Procesar con LCP1
        r = v(st:st+(2*N+LCP1)-1);
        [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP1);
        [~,tau] = max(t); % Estimar el retardo
        eps = e(tau); % Estimar el CFO
        rc = r(tau:tau+(N+LCP1)-1).*exp(-1i*2*pi*eps*(st+tau-
1:st+tau+N+LCP1-2).'/N); % Corrección de tiempo y CFO
    end
end

```

```

R = fft(rc(LCP1+1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R(2:end)); % Excluir DC y trazar la constelación
figure, periodogram(rc(LCP1+1:end),[], 'centered',N,fs, 'power'); %
Graficar el espectro de potencia
st = st+tau+N+LCP1-1-1000; % Actualizar el índice de inicio
end
end

```

4.3.6 Practica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda

A continuación, se presenta la resolución de las tareas y actividades propuestas para el desarrollo de la practica 6.

- **Tarea 1: Capturar señal del enlace descendente LTE.**
 - **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**
 - **Configurar software OAI.**
 - **Iniciar la red LTE.**
 - **Capturar señal LTE.**
 - **Transferir la captura de señal a Matlab**

Para cumplir con esta tarea se hace uso del proceso de la tarea 3 del laboratorio 5 juntamente con la función “read_complex_binary” la cual importa los datos capturados a Matlab.

- **Tarea 2: Detección de CFO e ID de celda mediante señal de sincronización primaria**
 - **Desarrollar un programa en Matlab que permita generar y trazar el PSS para un valor de raíz específico.**

Para desarrollar este programa se hace uso de la secuencia Zadoff-Chu la cual modula las subportadoras PSS en el dominio de la frecuencia, mediante la siguiente ecuación:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{\frac{-j\pi un(n+1)}{63}} & n = 0,1, \dots, 30 \\ e^{\frac{j\pi u(n+1)(n+2)}{63}} & n = 31,32, \dots, 61 \end{cases} \quad (4)$$

El código que se presenta a continuación es la función creada utilizando la ecuación (4).

```
function seq = zadoffchu(u)
% zadoffchu: Genera un vector Zadoff-Chu con el índice de raíz 'u'.
% u: Índice de raíz (25, 29 o 34).

% Inicializar el vector Zadoff-Chu como una matriz de ceros.
seq = zeros(62,1);

% Primer rango de índices (n de 0 a 30).
n = 0:30;
seq(1:31) = exp(-1i*pi*u*n.*(n+1)/63);

% Segundo rango de índices (n de 31 a 61).
n = 31:61;
seq(32:62) = exp(-1i*pi*u*(n+1).*(n+2)/63);
```

A continuación, se presenta el código que realiza el llamado de la función “zadoffchu”, construye la secuencia PSS y grafica su señal en magnitud y fase.

```
% Configuración del índice de raíz 'u' para el vector Zadoff-Chu
u = 25;
% Generar la secuencia Zadoff-Chu usando la función zadoffchu
seq = zadoffchu(u);
% Construir la secuencia PSS (Primary Synchronization Signal)
pss = [zeros(5,1); seq(1:31); 0; seq(32:62); zeros(5,1)]; % Incluir ceros
% Graficar la magnitud y la fase de la señal PSS
figure;
stem(abs(pss));
xlabel('subportadora');
ylabel('magnitud');

figure;
plot(unwrap(angle(pss)));
xlabel('subportadora');
ylabel('fase');
```

- **Desarrollar un código en Matlab que permita generar la función de autocorrelación de la secuencia de Zadoff-Chu.**

Para cumplir con esta actividad se utiliza la función “zadoffchu” luego, mediante la función “xcorr” se calcula la autocorrelación para retardos en el rango de -61 a 61, y el resultado se normaliza dividiendo por la longitud de la secuencia. La visualización resultante muestra la forma de onda de la función de autocorrelación, que es útil para el análisis de sincronización y detección de secuencias. El código empleado se muestra a continuación:

```
% Generar una secuencia Zadoff-Chu con índice de raíz '25'
seq25 = zadoffchu(25);

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación
figure;
plot(-61:61, abs(xcorr(seq25)./62)); % Función de autocorrelación
xlabel('Retardo');
ylabel('Autocorrelación');
```

- **Desarrollar un código en Matlab que permita simular las salidas de correlación cruzada para escenarios de secuencia Zadoff-Chu emparejados y no coincidentes.**

Para realizar esta actividad se crea un código función que permite implementar el cálculo de correlación cruzada, mediante dos variables de entrada que son el símbolo OFDM y la secuencia Zadoff-Chu.

```
function [v, y] = corrdif(symb, d)
% symb: Secuencia de símbolos OFDM.
% d: Secuencia de referencia.
% v: Vector de desplazamiento.
% y: Resultado de la correlación cruzada

% Eliminar la componente DC y reorganizar las subportadoras
Z = [symb(2048-599:2048), symb(2:601)];

% Inicializar variables
v = (-20:20);
y = zeros(1, length(v));

% Calcular la correlación cruzada para cada desplazamiento en 'v'
for c = 1:length(v)
    v2 = v(c)+600;
    temp1 = 0;
    temp2 = 0;
```

```

% Calcular la primera suma acumulativa
for k1 =-30:-1
    temp1 = temp1 + (Z(k1+1+v2) * conj(Z(k1+v2))) * conj(d(k1+32) *
conj(d(k1+31)));
end

% Calcular la segunda suma acumulativa
for k2 = 2:31
    temp2 = temp2 + (Z(k2+v2) * conj(Z(k2+v2-1))) * conj(d(k2+31) *
conj(d(k2+30)));
end

% Calcular el resultado de la correlación cruzada
y(c) = temp1 + temp2;
end

```

A continuación, se presenta el código principal creado para cumplir la actividad a su totalidad, el cual genera secuencias Zadoff-Chu con índices de raíz 25, 29 y 34. Luego, construye dos símbolos OFDM utilizando seq25 y datos aleatorios. Posteriormente, calcula y traza la correlación cruzada de la diferencia de fase entre el símbolo OFDM generado y cada secuencia Zadoff-Chu. Realiza una gráfica resultante que compara las correlaciones cruzadas para diferentes secuencias.

```

% Generar secuencias Zadoff-Chu
seq25 = zadoffchu(25);
seq29 = zadoffchu(29);
seq34 = zadoffchu(34);

% Construir un símbolo OFDM con seq25
symb = zeros(1, 2048);
symb(2:32) = seq25(32:62);
symb(end-30:end) = seq25(1:31);

% Construir un símbolo OFDM con datos aleatorios
symb2 = zeros(1, 2048);
data = randi([0 15], 1, 1200); % Generar vector de datos aleatorios
s = qammod(data, 16) / sqrt(10); % Generar símbolos de datos 16-QAM
symb2(2:601) = s(601:end);
symb2(end-599:end) = s(1:600);

% Calcular y trazar la correlación cruzada de la diferencia de fase
[v, y] = corrdif(symb, seq25);
figure, plot(v, abs(y)); hold on;
[v, y2] = corrdif(symb, seq29);
plot(v, abs(y2), 'r'); hold on;
[v, y3] = corrdif(symb, seq34);
plot(v, abs(y3), 'g'); hold on;
[v, y4] = corrdif(symb2, seq25);
plot(v, abs(y4), 'k');

```

```
ylabel('|\\Omega(u,v)|');
xlabel('v');
legend('ID de celda coincidente (u=25)', 'ID de celda no coincidente
(u=29)', 'ID de celda no coincidente (u=34)', 'Datos aleatorios (u=25)');
```

- **Desarrollar un programa en Matlab que permita la sincronización de símbolos y recuperación del CFO e ID de celda de una señal LTE.**

Se establecen los parámetros iniciales esenciales. Las muestras se leen desde la señal lte capturada. A continuación, se definen parámetros como el número de símbolos OFDM y las longitudes de los prefijos cíclicos (LCP0 y LCP1). También se genera una secuencia Zadoff-Chu (seq) con un parámetro específico.

El bucle principal del código se encarga de procesar cada símbolo OFDM. Se inicializan variables de salida y una matriz para almacenar los símbolos OFDM corregidos. Dentro del bucle, se realiza una corrección de tiempo y frecuencia para cada símbolo, eliminando el prefijo cíclico y aplicando una Transformada Rápida de Fourier (FFT). Además, se detecta conjuntamente la ID de celda e ICFO. Los resultados se almacenan en matrices de salida.

Finalmente, se visualizan los resultados mediante gráficos. Se generan gráficos para mostrar los picos de magnitud y el CFO entero para cada símbolo. Además, se implementa una condición que analiza los símbolos con prefijo cíclico CP0 y CP1, generando un gráfico adicional y deteniendo el bucle si se supera un umbral específico. Finalmente, se guardan todos los símbolos corregidos en tiempo y CFO en un archivo “.mat”.

```
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs * 30e-3; % Número de muestras (30ms)
v = read_complex_binary('sample.dat', count); % Leer muestras
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nsymb = 70; % Número de símbolos OFDM
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1
seq = zadoffchu(25); % Secuencia Zadoff-Chu en consideración
```

```

st = 1; % Índice de inicio del símbolo con CP0 (modificar esto)
out = zeros(2, Nsymb);
ofdmsymb = zeros(N, Nsymb);

for symb = 1:Nsymb
    if mod(symb, 7) == 1 % Para símbolos con CP0
        r = v(st:st + (2*N + LCP0) - 1);
        [t, e] = MObjFun(r, N, LCP0);
        [~, tau] = max(t); % Estimar el retardo
        eps = e(tau); % Estimar el FCF0
        rc = r(tau:tau + (N + LCP0) - 1) .* exp(-1i * 2 * pi * eps * (st +
tau - 1:st + tau + N + LCP0 - 2).' / N); % Corrección de tiempo y FCF0
        R = fft(rc(LCP0 + 1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
        R(1) = 0; % Eliminar componente DC
        [ev, y] = corrdif(R.', seq); % Detección conjunta de ID de celda e
ICFO
        [out(1, symb), ind] = max(abs(y));
        out(2, symb) = ev(ind);
        st = st + tau + N + LCP0 - 1 - 1000;
        ofdmsymb(:, symb) = R;
    else
        r = v(st:st + (2*N + LCP1) - 1);
        [t, e] = MObjFun(r, N, LCP1);
        [~, tau] = max(t); % Estimar el retardo
        eps = e(tau); % Estimar el FCF0
        rc = r(tau:tau + (N + LCP1) - 1) .* exp(-1i * 2 * pi * eps * (st +
tau - 1:st + tau + N + LCP1 - 2).' / N); % Corrección de tiempo y FCF0
        R = fft(rc(LCP1 + 1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
        R(1) = 0; % Eliminar componente DC
        [ev, y] = corrdif(R.', seq); % Detección conjunta de ID de celda e
ICFO
        [out(1, symb), ind] = max(abs(y));
        out(2, symb) = ev(ind);

        % Plotear símbolo con PSS si supera un umbral específico
        if out(1, symb) > 1.5e4
            figure, plot(abs(fftshift(R)));
            axis('tight');
            xlabel('subcarrier'); ylabel('|Z(k)|');
            p = [R(end-30:end); R(2:32)];
            figure, plot(unwrap(angle(p)));
            hold on, plot(unwrap(angle(seq)), 'r');
            axis('tight'); xlabel('subcarrier'); ylabel('phase');
            legend('Recibido', 'Real');
            break;
        end

        st = st + tau + N + LCP1 - 1 - 1000;
        ofdmsymb(:, symb) = R;
    end
end

% Plotear resultados
figure; plot(out(1, :)); xlabel('símbolo'); ylabel('pico |\Omega(u,v)|');
figure; plot(out(2, :)); xlabel('símbolo'); ylabel('CFO entero');
save('ofdmsymb.mat', 'ofdmsymb'); % Guardar todos los símbolos corregidos
en tiempo y CFO

```

- **Tarea 3: Detección del grupo de ID de celda y la temporización de tramas mediante señal de sincronización secundaria.**

- **Generar un código en Matlab que permita generar los SSS**

Para cumplir con esta actividad se identificó como está constituido la señal de sincronización secundaria (SSS). La cual se encuentra en el símbolo OFDM anterior al símbolo que contiene la PSS. SSS es una concatenación intercalada de 2 secuencias binarias de longitud 31, SSS_1 en la subtrama 0 y SSS_2 en la subtrama 5.

A continuación, se presenta la ecuación (5) utilizada para llevar a cabo la actividad, la cual define el SSS como la combinación de 2 secuencias de longitud 31 que varían entre subtramas y secuencias para índices pares e impares.

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n)c_0(n) & \text{en subtrama 0} \\ s_1^{(m_1)}(n)c_0(n) & \text{en subtrama 5} \end{cases} \quad (5)$$

$$d(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n)c_1(n)z_1^{(m_0)}(n) & \text{en subtrama 0} \\ s_0^{(m_0)}(n)c_1(n)z_1^{(m_1)}(n) & \text{en subtrama 5} \end{cases}$$

Donde:

- $s_0^{(m_0)}(n)$ y $s_1^{(m_1)}(n)$: son secuencias de símbolos modulados.
- $c_0(n)$ y $c_1(n)$: son secuencias de los símbolos de portadora común.
- $z_1^{(m_0)}(n)$ y $z_1^{(m_1)}(n)$: son secuencias de los símbolos de portadora de referencia.
- $0 \leq n \leq 30$.

Los índices m_0 y m_1 se presentan en la ecuación (6) los cuales se derivan del grupo de identidad celular de la capa física de acuerdo con $N_{ID}^{(1)}$.

$$m_0 = m' \text{ mod } 31 \quad (6)$$

$$m_1 = \left(m_0 + \left\lceil \frac{m'}{31} \right\rceil + 1 \right) \text{mod } 31$$

$$m' = N_{ID}^{(1)} + \frac{q(q+1)}{2}, q = \left\lceil \frac{N_{ID}^{(1)} + q' \left(\frac{q+1}{2} \right)}{30} \right\rceil, q'$$

$$= \left\lceil \frac{N_{ID}^{(1)}}{30} \right\rceil$$

Donde: $0 \leq N_{ID}^{(1)} \leq 167$.

La ecuación (7) presenta las 2 secuencias $s_0^{(m_0)}(n)$ y $s_1^{(m_1)}(n)$.

$$s_0^{(m_0)}(n) = \tilde{s}[(n + m_0) \text{mod } 31] \quad (7)$$

$$s_1^{(m_1)}(n) = \tilde{s}[(n + m_1) \text{mod } 31]$$

Donde: $\tilde{s}(n) = 1 - 2x(n)$ para $0 \leq n \leq 30$. Definida por la ecuación (8).

Con condiciones iniciales $x(0) = x(1) = x(2) = x(3) = 0$ y $x(4) = 1$.

$$x(i + 5) = [x(i + 2) + x(i)] \text{mod } 2, 0 \leq i \leq 25 \quad (8)$$

Las secuencias de aleatorización $c_0(n)$ y $c_1(n)$ dependen del PSS y están definidas por desplazamientos cíclicos diferentes de la secuencia $\tilde{c}(n)$ de acuerdo con la ecuación (9).

$$c_0(n) = \tilde{c} \left[\left(n + N_{ID}^{(2)} \right) \text{mod } 31 \right] \quad (9)$$

$$c_1(n) = \tilde{c} \left[\left(n + N_{ID}^{(2)} + 3 \right) \text{mod } 31 \right]$$

Donde $N_{ID}^{(2)} \in \{0,1,2\}$ es el Id de celda de sector dentro del grupo de identidad de celda de capa física y $\tilde{c}(n) = 1 - 2x(n)$ para $0 \leq n \leq 30$. La cual se genera mediante la ecuación (10).

$$x(i + 5) = [x(i + 3) + x(i)] \text{mod } 2, 0 \leq i \leq 25 \quad (10)$$

Para $z_1^{(m_0)}(n)$ y $z_1^{(m_1)}(n)$ se definen por un desplazamiento cíclico de la secuencia $m \tilde{z}(n)$ conforme a la ecuación (11).

$$\begin{aligned} z_1^{(m_0)}(n) &= \tilde{z}[(n + (m_0 \bmod 8)) \bmod 31] \\ z_1^{(m_1)}(n) &= \tilde{z}[(n + (m_1 \bmod 8)) \bmod 31] \end{aligned} \quad (11)$$

Define $\tilde{z}(n) = 1 - 2x(n)$, $0 \leq n \leq 30$ con condiciones iniciales de $x(0) = x(1) = x(2) = x(3) = 0$ y $x(4) = 1$. Generado mediante la ecuación (12).

$$\begin{aligned} x(i + 5) &= [x(i + 4)x(i + 2) + x(i + 1) \\ &\quad + x(i)] \bmod 2, \\ 0 &\leq i \leq 25 \end{aligned} \quad (12)$$

Las secuencias m tienen la propiedad útil donde el pico de correlación ocurre solo cuando las 2 secuencias están perfectamente alineadas. A continuación, se presenta el código utilizado para generar señales de referencia SSS.

```
function [d0, d5] = sss(Nid1, Nid2)
% Función para generar señales de referencia primarias (SSS) para LTE.

% Calcular m0 y m1 [Eq.(6)]
q_prime = floor(Nid1/30);
q = floor(((Nid1+q_prime*(q_prime+1)/2))/30);
m_prime = Nid1 + q*(q+1)/2;
m0 = mod(m_prime, 31);
m1 = mod(m0 + floor(m_prime/31) + 1, 31);

% Generar s0m0 y s1m1 [Eq.(7)&(8)]
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+2) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
s_tilde = 1 - 2 * x;
s0m0 = zeros(1, 31);
s1m1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    s0m0(n+1) = s_tilde(mod((n+m0), 31)+1); % s_tilde[(n+m0) mod 31]
    s1m1(n+1) = s_tilde(mod((n+m1), 31)+1); % s_tilde[(n+m1) mod 31]
end

% Generar c0 y c1 [Eq.(9)&(10)]
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
```

```

for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+3) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
c_tilde = 1 - 2 * x;
c0 = zeros(1, 31);
c1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    c0(n+1) = c_tilde(mod((n+Nid2), 31)+1); % c_tilde[(n+Nid2) mod 31]
    c1(n+1) = c_tilde(mod((n+Nid2+3), 31)+1); % c_tilde[(n+Nid2+3) mod 31]
end

% Generar z1m0 y z1m1 [Eq. (11)&(12)]
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+4) + x(i+2) + x(i+1) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
z_tilde = 1 - 2 * x;
z1m0 = zeros(1, 31);
z1m1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    z1m0(n+1) = z_tilde(mod((n+mod(m0, 8)), 31)+1); % z_tilde[(n+(m0 mod 8))
mod 31]
    z1m1(n+1) = z_tilde(mod((n+mod(m1, 8)), 31)+1); % z_tilde[(n+(m1 mod 8))
mod 31]
end

% Construir SSS de subtrama 0
d0_even = s0m0 .* c0;
d0_odd = s1m1 .* c1 .* z1m0;
d0 = zeros(1, 62);
d0(1:2:62) = d0_even;
d0(2:2:62) = d0_odd;

% Construir SSS de subtrama 5
d5_even = s1m1 .* c0;
d5_odd = s0m0 .* c1 .* z1m1;
d5 = zeros(1, 62);
d5(1:2:62) = d5_even;
d5(2:2:62) = d5_odd;

```

Una vez hecho el código función se realiza el código de ejecución que se presenta a continuación:

```

% Configuración de parámetros para la generación de SSS
Nid1 = 67; % Identificador de grupo de celda
Nid2 = 1; % Identificador de celda del sector
% Generación de SSS para subtrama 0 y subtrama 5
[d0, d5] = sss(Nid1, Nid2);
% Creación de un gráfico para visualizar los SSS generados
figure;
% Subgráfico para SSS en la subtrama 0
subplot(2,1,1); stem(d0); xlim([1 62]); title('Subtrama 0');
% Subgráfico para SSS en la subtrama 5
hold on; subplot(2,1,2); stem(d5); xlim([1 62]); title('Subtrama 5');

```

- **Generar un código en Matlab que permita identificar los resultados de correlación cruzada.**

Para identificar la correlación cruzada el código debe tener parámetros específicos, es decir se utiliza el identificador de grupo de celda y el identificador de celda del sector con los siguientes valores $N_{ID}^{(1)} = 67$ y $N_{ID}^{(2)} = 1$.

El código genera los SSS utilizando la función realizada en la actividad anterior, separa los componentes pares e impares, luego calcula la correlación cruzada con todas las posibles SSS y finalmente presenta los resultados para las subtramas 0 y 5.

```
% Configuración de los identificadores de celda
Nid1 = 67; % ID de grupo de celda
Nid2 = 1; % ID de celda del sector

% Generación de las señales de referencia primarias (SSS) para subtrama 0 y 5
[d0, d5] = sss(Nid1, Nid2);

% Separación de componentes pares e impares de la subtrama 0
d0_even = d0(1:2:62); % componentes pares de la subtrama 0
d0_odd = d0(2:2:62); % componentes impares de la subtrama 0

% Inicialización de variables para almacenar resultados de correlación
out1_e = zeros(1, 168);
out1_o = zeros(1, 168);
out2_e = zeros(1, 168);
out2_o = zeros(1, 168);

% Bucle para calcular correlaciones con todas las posibles SSS
for id = 0:167
    [d0_t, d5_t] = sss(id, Nid2); % Generar todas las SSS posibles (se
    % asume que Nid2 es conocido)
    d0_t_even = d0_t(1:2:62);
    d0_t_odd = d0_t(2:2:62);
    d5_t_even = d5_t(1:2:62);
    d5_t_odd = d5_t(2:2:62);
    out1_e(id+1) = sum(d0_even .* d0_t_even);
    out1_o(id+1) = sum(d0_odd .* d0_t_odd);
    out2_e(id+1) = sum(d0_even .* d5_t_even);
    out2_o(id+1) = sum(d0_odd .* d5_t_odd);
end

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out1_e)), max(abs(out1_o)));

% Crear figura y subgráficos para resultados de correlación de subtrama 0
% (componentes pares e impares)
figure;
```

```

subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out1_e));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out1_o));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out2_e)), max(abs(out2_o)));

% Crear figura y subgráficos para resultados de correlación de subtrama 5
(componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1);stem(0:167, abs(out2_e));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out2_o));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');

```

- **Generar un código en Matlab que permita detectar y recuperar la temporización de la trama de radio de una señal LTE.**

Para realizar este código se utiliza los símbolos corregidos en tiempo y CFO guardados en la actividad 4 de la tarea 2, específicamente en el archivo “ofdmsymb.mat”. El primer paso es cargar la matriz de símbolos OFDM desde el archivo “ofdmsymb.mat”, configurar los parámetros, en este caso $N_{ID}^{(2)}$ correspondiente al ID de celda del sector el cual se identificó en la Tarea 2 como 0 y el símbolo OFDM que contiene la SSS, que es el anterior al símbolo PSS en este caso identificado en el símbolo 5.

A continuación, se extrae los SSS del símbolo OFDM y se organiza las subportadoras, extrayendo los componentes pares e impares, luego se inicializan las variables para almacenar los resultados de la correlación mediante un bucle que calcula la correlación cruzada con todas las posibles SSS. Finalmente se presenta los resultados de correlación para los componentes pares e impares de las subtramas 0 y 5.

```

% Cargar datos del archivo 'ofdmsymb.mat'
load('ofdmsymb.mat');

% Configuración de parámetros
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nid2 = 0; % ID de celda del sector
R = ofdmsymb(:,5).'; % Símbolo OFDM que contiene SSS (modificar según sea necesario)

% Procesamiento del símbolo OFDM para obtener la SSS
sss_t = [R(N-30:N), R(2:32)]; % Eliminar la subportadora de DC y reorganizar
sss_t = real(sss_t); % Toma solo la parte con valores reales
sss_t_even = sss_t(1:2:62);
sss_t_odd = sss_t(2:2:62);

% Inicialización de variables para almacenar resultados de correlación
out1_e = zeros(1, 168);
out1_o = zeros(1, 168);
out2_e = zeros(1, 168);
out2_o = zeros(1, 168);

% Bucle para calcular correlaciones con todas las posibles SSS
for id = 0:167
    [d0_t, d5_t] = sss(id, Nid2); % Generar todas las posibles SSS
    d0_t_even = d0_t(1:2:62);
    d0_t_odd = d0_t(2:2:62);
    out1_e(id+1) = sum(sss_t_even .* d0_t_even);
    out1_o(id+1) = sum(sss_t_odd .* d0_t_odd);
    d5_t_even = d5_t(1:2:62);
    d5_t_odd = d5_t(2:2:62);
    out2_e(id+1) = sum(sss_t_even .* d5_t_even);
    out2_o(id+1) = sum(sss_t_odd .* d5_t_odd);
end

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out1_e)), max(abs(out1_o)));
% Gráficos para Subtrama 0 (componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out1_e)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out1_o)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out2_e)), max(abs(out2_o)));
% Gráficos para Subtrama 5 (componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out2_e)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out2_o)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');

```

CAPITULO V

RESULTADOS

En este capítulo, se analizan los resultados derivados de cada práctica de laboratorio realizada. Este segmento es crucial para comprender y evaluar el impacto del proyecto, proporcionando una visión profunda de los datos recopilados durante cada fase experimental.

5.1 Resultados Práctica 1: Configuración e implementación de elementos LTE

Para cumplir con el primer resultado se realizó varias pruebas de velocidad de la red utilizando “speedtest”, se utilizó diferentes PRBs y se registró los resultados obtenidos en la Tabla 17.

Tabla 17

Medición de la velocidad de red

PRBs	25	50	100
	Velocidad de descarga		
Prueba 1 (Mbps)	4.87	7.05	30.62
Prueba 2 (Mbps)	5.34	7.02	29.56
Prueba 3 (Mbps)	4.77	7.30	25.35
Promedio	4.99	7.12	28.51
	Velocidad de carga		
Prueba 1 (Mbps)	7.84	18.3	18.45
Prueba 2 (Mbps)	7.88	18.31	18.48
Prueba 3 (Mbps)	8.18	18.07	18.38
Promedio	7.96	18.22	18.43

Nota. A mayor PRB mayor velocidad de datos. Elaboración propia.

Para la segunda actividad que consiste en evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en ambos sentidos se hace uso de la ventana "Stat", donde se puede observar los índices de Modulación y Codificación (MCS) tanto para la descarga (DL MCS) como para la carga (UL MCS). Esto permite evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en

ambos sentidos. El registro de estos valores mínimos y máximos son presentados en la Tabla 18.

Tabla 18

Índices de modulación y codificación

PRBs	25	50	100
DL MCS (max.)	28	25	13
DL MCS (min)	12	8	6
UL MCS (max)	20	20	20
UL MCS (min)	3	3	2

Nota. Un MCS alto indica un mejor proceso de modulación y codificación. Elaboración propia.

El MSC en la descarga disminuye a medida que aumenta el número de PRBs, mientras que para la carga el MCS se mantiene constante.

Para registrar los valores de RSRQ, RSRP, RSSI y SINR se abre una pestaña en el navegador, se ingresa a la siguiente dirección “ <http://192.168.8.1/api/device/signal> ” al hacer clic derecho en la página y seleccionar “Ver código fuente de la página” se observa las mediciones relacionadas con el UE. Estos valores son registrados en la Tabla 19.

Tabla 19

Mediciones relacionadas con UE

PRBs	25	50	100
RSRQ	-10 db	-3db	-4db
RSRP	-44dbm	-81dbm	-45dbm
RSSI	-51dbm	-67dbm	-51dbm
SINR	6db	21db	23db

Nota. Valores más altos de RSRQ, RSRP y SINR representan una mejor calidad de señal.

Elaboración propia.

Al realizar una comparación entre los diferentes Bloques de Recursos Físicos (PRBs), se evidencia que a medida que se asignan más PRBs, se dispone de un mayor ancho de banda. Se observa una tendencia a reducir la Modulación y Codificación (MCS) para mejorar la robustez de la transmisión. Esta estrategia se adopta para contrarrestar posibles interferencias y condiciones desafiantes del canal, lo que contribuye a una transmisión más confiable, aunque a expensas de una menor velocidad de datos.

La disminución del MCS se interpreta como una decisión consciente de priorizar la confiabilidad de la comunicación sobre la velocidad de transferencia de datos. Esto se debe a que el uso de un MCS más alto en un entorno no ideal podría resultar en errores de transmisión, afectando la integridad de los datos enviados.

En relación con las medidas de calidad de señal, se destaca que con 50 PRBs se experimentan pérdidas significativas, lo que impacta negativamente en el rendimiento de la red. Por otro lado, la configuración con 100 PRBs se identifica como la opción óptima en términos de calidad de señal. Este hallazgo sugiere que asignar un mayor número de PRBs contribuye a mejorar la calidad de la señal en la red evaluada.

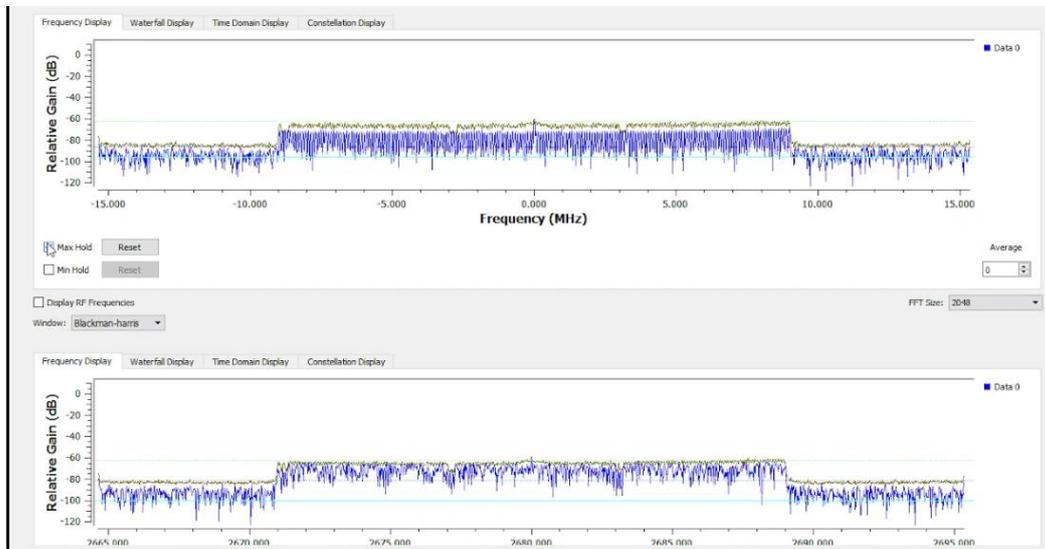
5.2 Resultados Práctica 2: Análisis del espectro LTE

En la Figura 84 se observa el ancho de banda para la configuración de la red LTE con 25 PRB, en esta se puede observar que el ancho de banda corresponde a 5 MHz, en la Figura 85 se observa que el ancho de banda para 50 PRBs corresponde a 10 MHz aproximadamente y en la Figura 86 se observa que el ancho de banda para 100 PRBs corresponde aproximadamente a 20 MHz. El número de PRB está directamente relacionado con el ancho de banda y la capacidad de la red.

Figura 84*Ancho de banda 25 PRB**Nota. Elaboración propia.***Figura 85***Ancho de banda 50 PRB**Nota. Elaboración propia.*

Figura 86

Ancho de banda 100 PRB



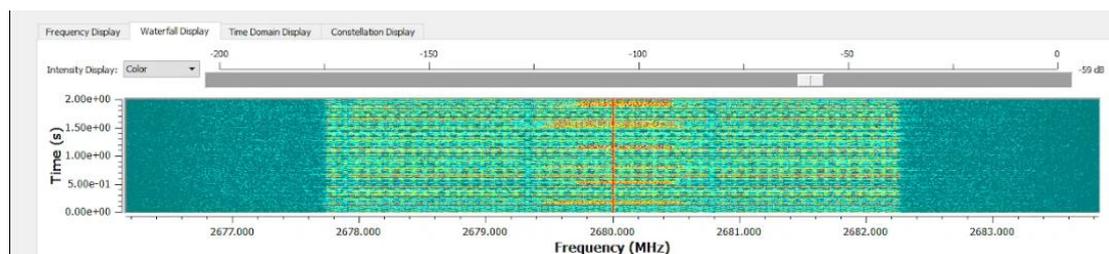
Nota. Elaboración propia.

Un bloque de recursos (RB) es la unidad más pequeña que se puede asignar para la transmisión. Físicamente, un RB abarca 0,5 ms (equivalente a 1 ranura) en el dominio del tiempo y 180 kHz en el dominio de la frecuencia. Al multiplicar el tamaño de un RB por el número total de PRBs se tiene el ancho de banda de la transmisión, sería de 4.5 MHz para 25 PRBs, 9 MHz para 50 PRBs y 18 MHz para 100 PRBs.

Para identificar la señal de sincronización se utiliza la visualización de cascada como se puede observar en las Figura 87, Figura 88 y Figura 89.

Figura 87

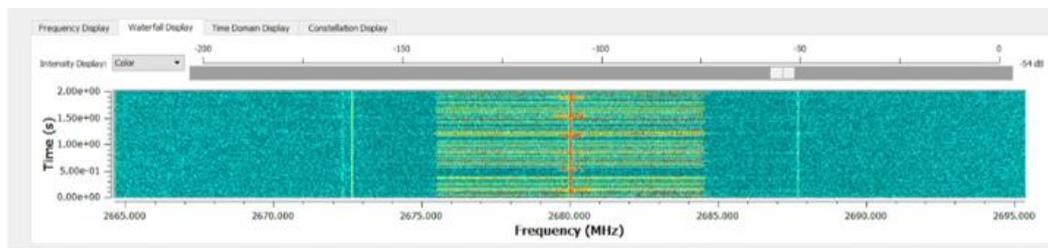
Señal de sincronización 25 PRB



Nota. Elaboración propia.

Figura 88

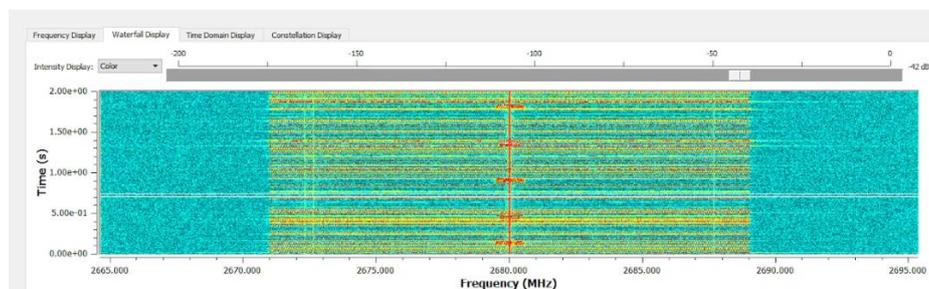
Señal de sincronización 50 PRB



Nota. Elaboración propia.

Figura 89

Señal de sincronización 100 PRB



Nota. Elaboración propia.

la señal FDD LTE se transmite en tramas de 10 ms, y cada trama se compone de 20 ranuras de 0,5 ms cada una. la señal de sincronización primaria (PSS) y la señal de sincronización secundaria (SSS) se transmiten en cada portadora del componente de enlace descendente para ayudar en la búsqueda de celdas. Se transmiten dos veces por trama de radio de 10 ms.

En las Figura 90, Figura 91 y Figura 92 se observa como el ancho de banda se ocupa en su totalidad al realizar pruebas de velocidad, ya que el servicio o aplicación utilizado intenta utilizar la mayor cantidad del ancho de banda disponible para obtener una medición precisa de la velocidad de conexión en ese momento, si el resultado de la prueba es bajo se puede identificar que el ancho de banda no es ocupado en su totalidad tal como se muestra en la Figura 93.

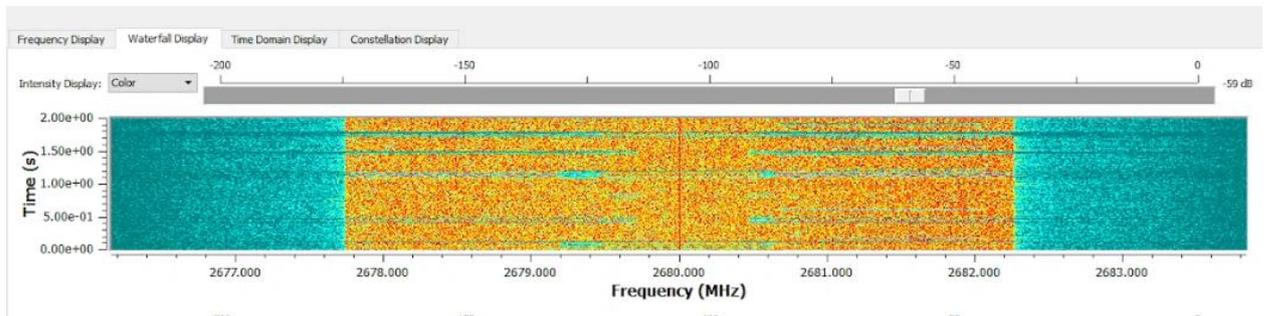
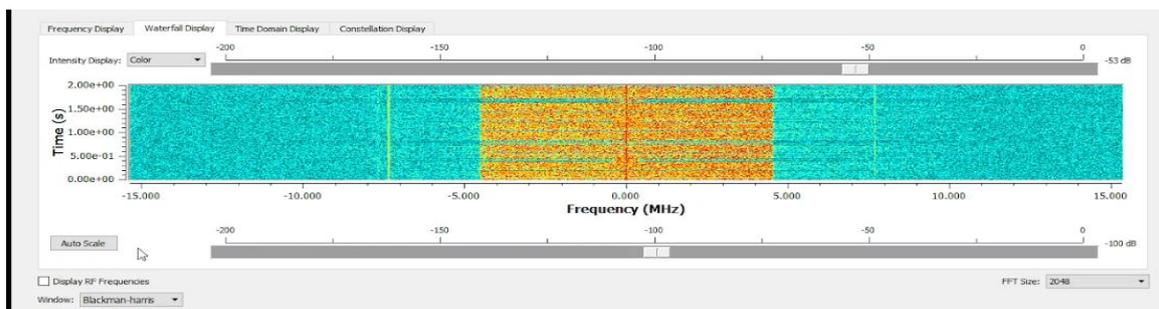
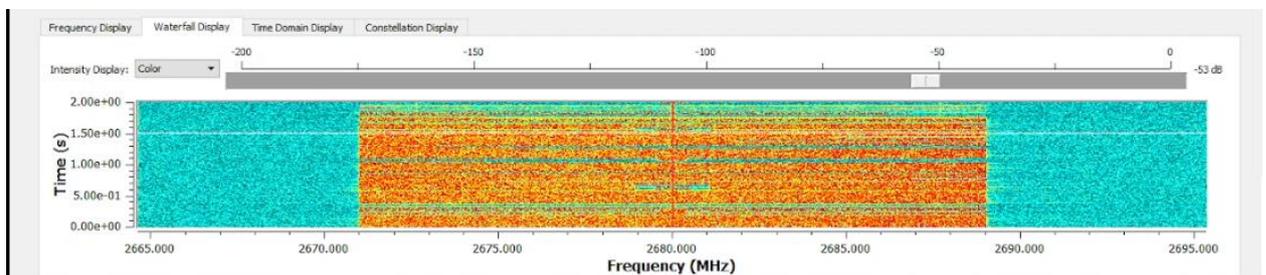
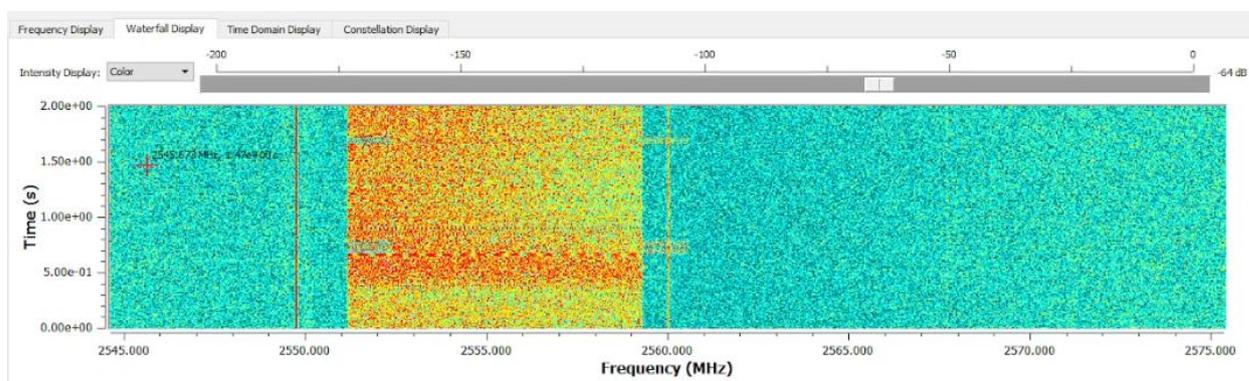
Figura 90*Uso del ancho de banda para 25 PRB**Nota. Elaboración propia.***Figura 91***Uso del ancho de banda para 50 PRB**Nota. Elaboración propia.***Figura 92***Uso del ancho de banda para 100 PRB**Nota. Elaboración propia.*

Figura 93

Uso del ancho de banda prueba de velocidad baja



Nota. Se observa una parte del ancho de banda total utilizado en la transferencia de datos para la prueba de velocidad. Elaboración propia.

5.3 Resultados Práctica 3: Análisis del protocolo LTE

El primer resultado que se obtiene en esta práctica son los valores de tiempo para los SIB1 y el intervalo entre estos como se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 20

Tiempo de paquetes SIB1

Paquetes (SIB1)	Hora	Intervalo (ms)
1	0.00000	--
2	0.02000	20.00
3	0.03999	19.99
4	0.06001	20.02
5	0.08001	20.00
6	0.10002	20.01
7	0.12003	20.01
8	0.14004	20.01
9	0.16005	20.01
10	0.18006	20.01
Promedio		20.00

Nota. El valor entre un paquete SIB1 es de 20 (ms). Elaboración propia.

Se comprueba que los paquetes SIB1 son enviados es un intervalo de tiempo promedio de 20.00 (ms) lo que corresponde a su valor de periodicidad constante, esta estabilidad es un indicador de la consistencia en la transmisión y recepción de datos.

A continuación, en la Tabla 21, se registra los detalles del paquete SIB1, junto con una breve descripción de cada campo, el paquete SIB1 brinda información sobre la configuración u estado de una celda en la red móvil, incluyendo detalles sobre la identificación de la red, la ubicación geográfica, identidad única de la celda, restricciones de acceso y la banda de frecuencia utilizada.

Tabla 21

Detalles paquete SIB1

Campo (SIB1)	Datos	Descripción
plmn-Identity	MCC = 901 MNC = 70	Identificación del país (MCC) y del operador (MNC) de la red móvil.
trackingAreaCode	1	Código de área que identifica un área geográfica.
cellIdentity	3584	Identidad única de la celda en la red.
cellBarred	notBarred	Indica si la celda está prohibida o no para el acceso de dispositivos.
cellReservedForOperatorUser	notReserved	Indica si la celda está reservada o no para el uso exclusivo del operador.
freqBandIndicator	7	Indicador de la banda de frecuencia utilizada por la celda.

Nota. Información enviada en paquetes SIB1. Elaboración propia.

El Registro del tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformation” (SI) capturados se lo realiza en la Tabla 22.

Tabla 22

Tiempo de paquetes SI

Paquetes SI	Hora	Intervalo (ms)
--------------------	-------------	-----------------------

1	0.05008	--
2	0.13012	80.04
3	0.20999	79.87
4	0.29003	80.04
5	0.37006	80.03
6	0.45011	80.05
7	0.52998	79.87
8	0.61002	80.04
9	0.69006	80.04
10	0.77010	80.04
Promedio		80.00

Nota. El intervalo entre paquetes SI es de 80 (ms). Elaboración propia.

Los paquetes se reciben en un intervalo promedio de 80 (ms), presentando una regularidad en los paquetes que respalda la consistencia de la estabilidad en la transmisión o recepción de datos.

Se registra en la Tabla 23 los valores de respuesta de acceso aleatorio (RAR) en función del Msg2.

Tabla 23

Valores de respuesta de acceso aleatorio

Parámetro RAR	Valor
RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary ID)	1
RAPID (Random Access Preamble ID)	0
TA (Timing Advance)	2
UL Grant Temp	13644
C-RNTI (Temporary Cell-RNTI)	37860

Nota. Los parámetros RAR corresponden a Msg2. Elaboración propia.

Los valores enviados en Msg2 contienen información necesaria para que el eNB pueda identificar y comunicarse con el UE que está intentando acceder a la red. Entre los datos se tiene el Timing Advance (TA) que indica al UE cuando debe comenzar a transmitir, el C-RNTI es una identificación temporal asignada al UE, el RA-RNTI se utiliza para identificar el dispositivo durante el proceso de acceso aleatorio.

El registro de los valores de solicitud de conexión RRC en función de Msg3 se realiza en la Tabla 24 y los valores capturados para Msg4 se muestran en la Tabla 25.

Tabla 24

Valores en Msg3

Parámetro RRCConnectionRequest	Valor
C-RNTI	37860
ue-Identity (randomValue)	b36260f337

Nota. El C-RNTI corresponde al valor dado en el RAR. Elaboración propia.

El Msg3 es enviado por el UE después de recibir el RAR obteniendo la identificación temporal asociada a la celda, además envía la identidad del usuario el cual es un valor aleatorio que sirve para la configuración de la conexión RRC.

Tabla 25

Valores Msg4

Parámetro RAR	Valor
C-RNTI	37860
UE Conetetion Resolucion Identity	5b36260f3376

Nota. La identidad de conexión del UE es única para este. Elaboración propia.

Finalmente, los valores enviados por Msg4 son la respuesta al Msg3 enviado por el UE el cual confirma la recepción exitosa y autoriza al UE para continuar con la configuración para la conexión.

Para identificar el proceso de conexión de UE se identifican los mensajes de este proceso y se documentan en la Tabla 26.

Tabla 26

Proceso de conexión

Mensaje	Nº de paquete	Hora	Protocolo	Información
RRC connection request (attach request)	1728	27.36094	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	RRConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request
Initial UE message (attach request)	1730	27.36112	S1AP/NAS-EPS	InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request
Initial UE message (attach accept)	1832	27.67306	S1AP/NAS-EPS	InitialContextSetupRequest, Attach accept, Activate default EPS bearer context request
RRC connection reconfiguration (attach accept)	1844	27.71792	LTE RRC DL_DCCH/NAS-EPS	RRConnectionReconfiguration, Attach accept, Activate default EPS bearer context request
RRC connection reconfiguration (attach complete)	1847	27.73710	LTE RRC UL_DCCH	[UL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=7 , RRConnectionReconfigurationComplete
UL NAS transport (attach complete)	1851	27.76503	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	ULInformationTransfer, Attach complete, Activate default EPS bearer context accept

Nota. El envío de estos paquetes se encuentra separado por varios paquetes. Elaboración propia.

Se observa la secuencia detallada de mensajes y eventos relacionados con el proceso de conexión de un Usuario (UE) a una red LTE. Inicia con la solicitud de conexión RRC del UE, seguida por respuestas e intercambios de mensajes que indican la aceptación de la solicitud, la reconfiguración de la conexión RRC, y la activación del contexto de portador EPS. El proceso culmina con mensajes que confirman la conclusión exitosa del procedimiento de conexión, marcando el establecimiento efectivo de la conexión del UE a la red LTE. Los diferentes protocolos, como LTE RRC, S1AP y NAS-EPS, son empleados en este proceso, demostrando la complejidad y la diversidad de intercambios de información necesarios para una conexión exitosa en una red LTE.

Los datos de respuesta de autenticación-información (AIA) se registran en la Tabla 27 .

Tabla 27

Parámetros de AIA

Parámetro AIA	Valor
RAND	605a563990db604483436b1cff683f51
XRES	d742ccb805363b4c
AUTN	b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
KASME	08ade7a93d6d958561d7879bfd0015aa43fe18fe2d2404d4b538de4b36250642

Nota. Los valores de RAND, AUTN y XRES deben ser verificados y autenticados por la red. Elaboración propia.

el RAND y el AUTN en el mensaje de solicitud de autenticación y el RES en el mensaje de respuesta de autenticación en los paquetes capturados son idénticos a los datos de respuesta de autenticación- información como se puede observar en la Figura 94.

Figura 94

Solicitud de autenticación y respuesta de autenticación.

```

Non-Access-Stratum (NAS)PDU
  0000 .... = Security header type: Plain NAS message,
  .... 0111 = Protocol discriminator: EPS mobility man
  NAS EPS Mobility Management Message Type: Authentica
  0000 .... = Spare half octet: 0
  .... 0... = Type of security context flag (TSC): Nat
  .... .000 = NAS key set identifier: (0) ASME
  Authentication Parameter RAND - EPS challenge
    RAND value: 605a563990db604483436b1cff683f51
  Authentication Parameter AUTN (UMTS and EPS authenti
    Length: 16
    AUTN value: b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
  Authentication response parameter
    Length: 8
    RES: d742ccb805363b4c

```

Nota. Los valores en el recuadro son idénticos a los datos AIA. Elaboración propia.

5.4 Resultados Práctica 4: Evaluación del rendimiento de la red LTE

El registro de pruebas realizadas del rendimiento TCP para un número creciente de flujos paralelos de 5,10,20,30 para el enlace ascendente y descendente se muestra en la Tabla 28, el comando que se utilizó respectivamente para cada enlace se muestra a continuación con el cambio del tamaño del flujo paralelo es decir la opción “-P “.

```

> iperf3 -c 172.16.0.1 -t 20 -O 2 -P 5
> iperf3 -c 172.16.0.1 -R -t 20 -O 2 -P 5

```

Tabla 28

Resultados prueba TCP con flujos paralelos

Flujos paralelos	Enlace ascendente Mbits/sec	Enlace descendente Mbits/sec
25PRB		
5	8.29	5.00
10	7.87	6.04
20	7.77	6.77
30	7.46	7.67
50PRB		
5	18.5	6.50
10	18.4	7.76
20	18.2	8.64
30	18.5	9.52
100PRB		
5	18.06	23.3
10	18.5	23.8

20	18.7	27.3
30	18.8	26.7

Nota. Resultados de prueba TCP en red LTE a diferentes PRB. Elaboración propia.

Para 25PRB a medida que aumenta el número de flujos paralelos la tasa de transferencia del enlace ascendente disminuye, mientras que para el enlace descendente tiende a mejorar. Para 50 PRB en el enlace ascendente este se encuentra cercano a su valor máximo de prueba, es decir no presenta un cambio significativo en su resultado, mientras que para el enlace descendente este tiene una mejora a mayor número de flujos paralelos finalmente para 100 PRB en el enlace ascendente se encuentra una leve mejora que se aproxima a su valor máximo de rendimiento, para el enlace descendente este presenta un mejor rendimiento a mayor número de flujos paralelos.

El resultado de las pruebas de rendimiento UDP para el enlace ascendente y descendente utilizando un ancho de banda objetivo de 5,10,15,20 Mbps se encuentra en la Tabla 29 cuyos resultados fueron obtenidos haciendo uso de los siguientes comandos respectivamente para cada enlace modificando el ancho de banda objetivo es decir la opción “-b”.

```
> -c 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
> -c 172.16.0.1 -u -b 5M -R -l 1k
```

Tabla 29

Resultados prueba de rendimiento UDP

BW (Mbps)	Rendimiento UDP (Mbps)	Jitter UL (ms)	Tasa de perdida de datagramas UL (%)	Rendimiento UDP (Mbps)	Jitter DL (ms)	Tasa de perdida de datagramas DL (%)
25 PRBs						
5	4.96	1.766	0.017	5.00	4.711	0
10	9.92	0.891	14	8	3.709	0.41
15	14.9	0.919	40			
20	19.8	0.910	55			

50 PRBs						
5	4.96	1.609	0	5.00	2.067	0
10	9.92	0.607	0	10.1	1.975	0.47
15	14.9	0.443	0	14	1.682	0.72
20	19.8	0.445	4			
100 PRBs						
5	4.97	0.634	0	5	0.287	0
10	9.91	0.470	0	10	0.612	0.06
15	14.9	0.461	0	15	0.159	3.8
20	19.8	0.459	7	20	0.399	5.1

Nota. Pruebas de rendimiento UDP para diferentes PRBs. Elaboración propia.

Para 25 y 50 PRBs no se puede realizar pruebas de un ancho de banda objetivo mayor al alcanzado por esta configuración. Para cada prueba se puede notar que se alcanza el ancho de banda objetivo y presenta una disminución de jitter, sin embargo, a mayor ancho de banda objetivo la tasa de datagramas perdidos es mayor.

Los resultados de las pruebas de ping para medir el RTT promedio hacia el dongle LTE, EPC y un servidor externo se observan en la Tabla 30, obteniendo una consistencia en los valores promedio de RTT en diferente PRB para cada destino indicando una estabilidad de conexión.

Tabla 30

Prueba de rendimiento RTT

PRBS	RTT medio (ms)	RTT medio (ms)	RTT medio (ms)
	192.168.8.1	172.16.0.1	8.8.8.8
25	23	34	97
50	24	33	97
100	24	34	96

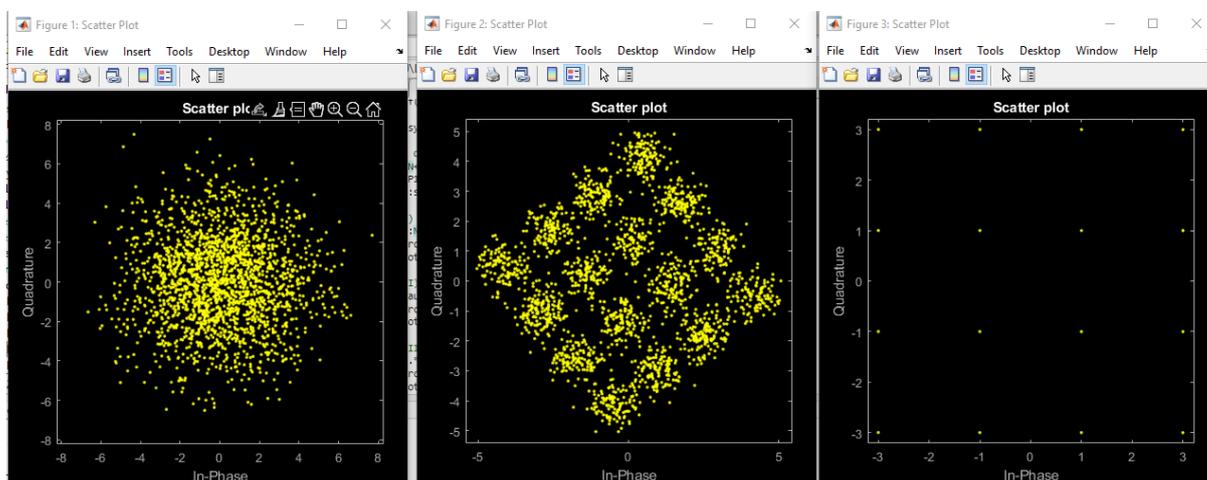
Nota. Prueba de ping a diferentes destinos. Elaboración propia.

5.5 Resultados Práctica 5: Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.

El proceso de recuperación de datos se ve vinculado a la comprensión del tiempo asociado con el símbolo y la corrección del CFO. Aunque se logre una sincronización de muestra impecable, la presencia del CFO agrega rotación y dispersión de los símbolos de datos, lo que resulta en errores significativos en la detección de símbolos. Sin embargo, a medida que se aborda y corrige el CFO en el tiempo, se consigue una recuperación óptima de los símbolos de datos, disminuyendo así los problemas mencionados. Este proceso de corrección gradual del CFO se traduce en una mejora sustancial en la precisión de la recuperación de datos como se observa en la Figura 95.

Figura 95

Pruebas de desplazamiento de tiempo y frecuencia



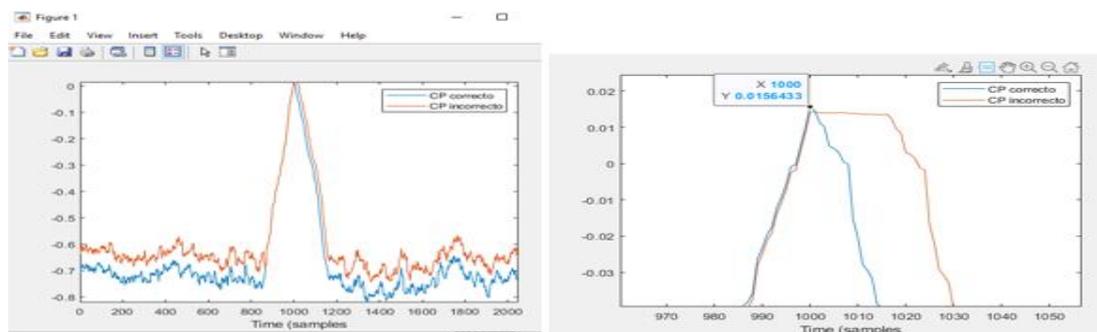
Nota. De izquierda a derecha se corrige el desplazamiento de tiempo y frecuencia.

Elaboración propia.

La Figura 96 corresponde al primer caso de efecto de error en la longitud del prefijo cíclico (CP), donde la Longitud CP0 es real y la Longitud CP1, al realizar un acercamiento a la gráfica se observa que los picos más altos tanto para el CP correcto como incorrecto son cercanos

Figura 96

Efecto de error de LCP0 real y LCP1 asumido

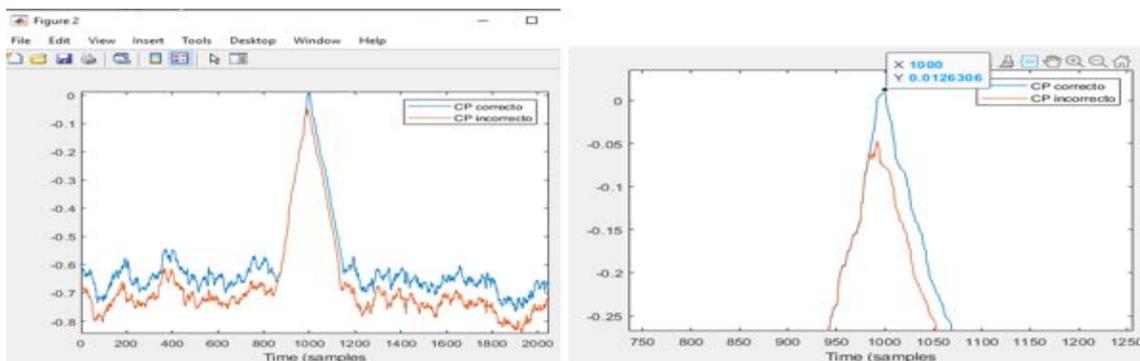


Nota. El pico mas alto se obtiene en la muestra 1000. Elaboracion propia.

La Figura 97 representa el segundo caso de efecto de error en la longitud del prefijo cíclico (CP), donde la Longitud CP1 es real y longitud CP0 es asumido, al realizar el acercamiento se observa que el pico de la señal incorrecta no alcanza al pico de la señal correcta.

Figura 97

Efecto de error de LCP1 real y LCP0 asumido



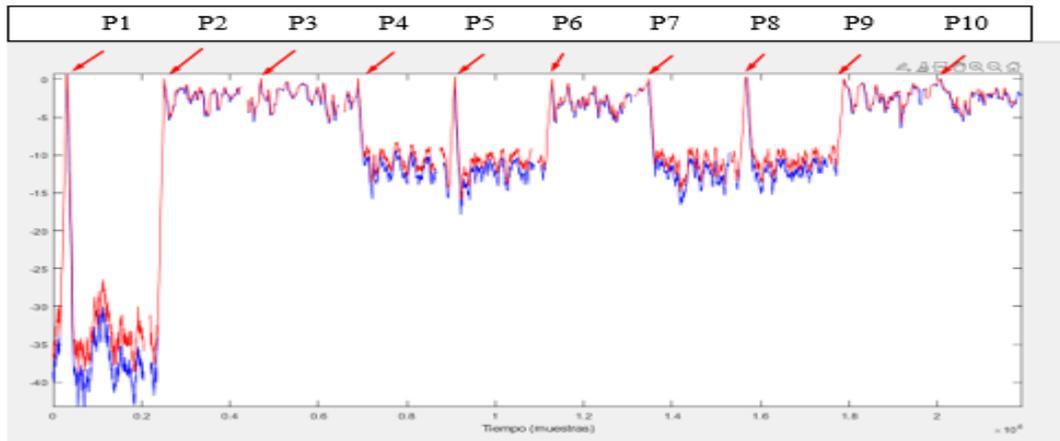
Nota. EL pico mas alto se alcanza el la muestra 1000. Elaboracion propia.

Se asume que si la longitud real del prefijo cíclico (CP) es LCP0, los picos obtenidos son aproximadamente iguales. No obstante, esta afirmación no es correcta cuando la longitud real del CP es LCP1.

Para determinar la estructura de símbolos OFDM se realiza un acercamiento a cada pico de la señal obtenida, en la Figura 98 la línea roja es para la salida asumiendo una longitud CP de 160, mientras que la línea azul es para una longitud CP 144.

Figura 98

10 símbolos OFDM de señal LTE real.

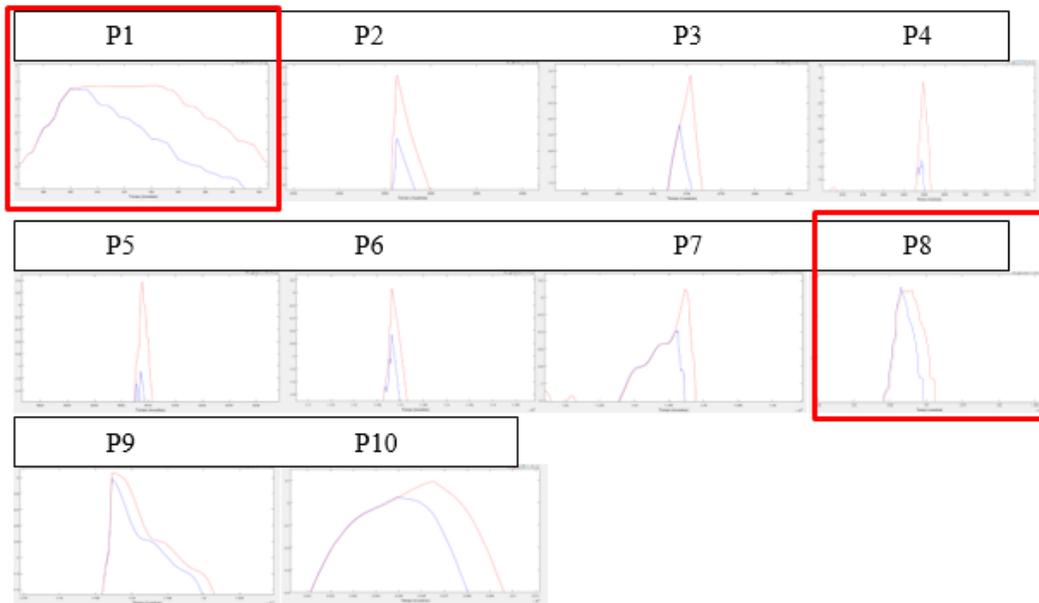


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 99 identificar que los picos 1 y picos 8 son casi exactamente los mismos esto demuestra que el CP real el $LCP0 = 160$, lo que concuerda con una estructura de símbolos ODM para el caso de prefijo cíclico normal, el cual está compuesto por 7 símbolos OFDM, el primer símbolo tiene un prefijo cíclico más largo de 160 muestras mientras que los siguientes 6 símbolos tienen una longitud de 144 muestras.

Figura 99

Acercamiento de picos señal LTE real

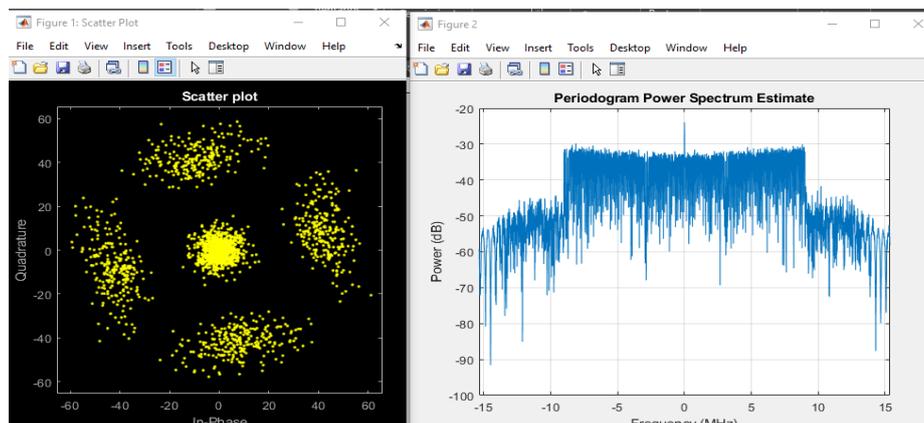


Nota. Elaboración propia.

Al ejecutar el programa de la función objetivo de la estación temporal en la señal LTE capturada, esta genera 6 figuras que deben ser agrupadas para identificar el espectro de potencia y el diagrama de constelación para cada símbolo. En la Figura 100 se observa que el diagrama de constelación muestra puntos dispersos y giratorios indicando problemas de ruido, interferencia, distorsión del canal y desplazamiento de frecuencia.

Figura 100

Función objetivo de la estación temporal símbolo 1

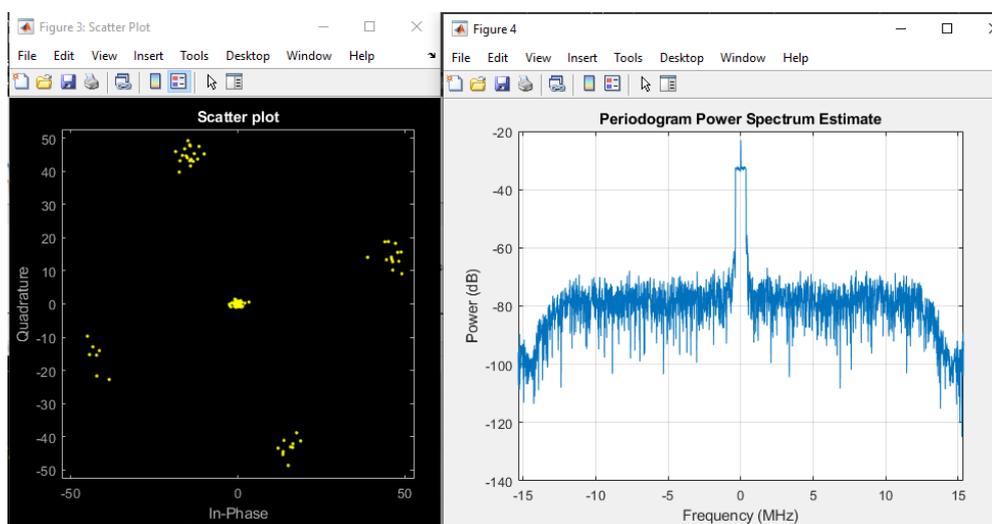


Nota. Presencia de ruido en la seña. Elaboración propia.

En las Figura 101 y Figura 102 se muestra los puntos del diagrama de constelación más agrupados sin embargo siguen siendo rotatorios, esto indica que ha mejorado la transmisión y esta menos afectada por interferencia o ruido sin embargo aun no presenta una sincronización completa.

Figura 101

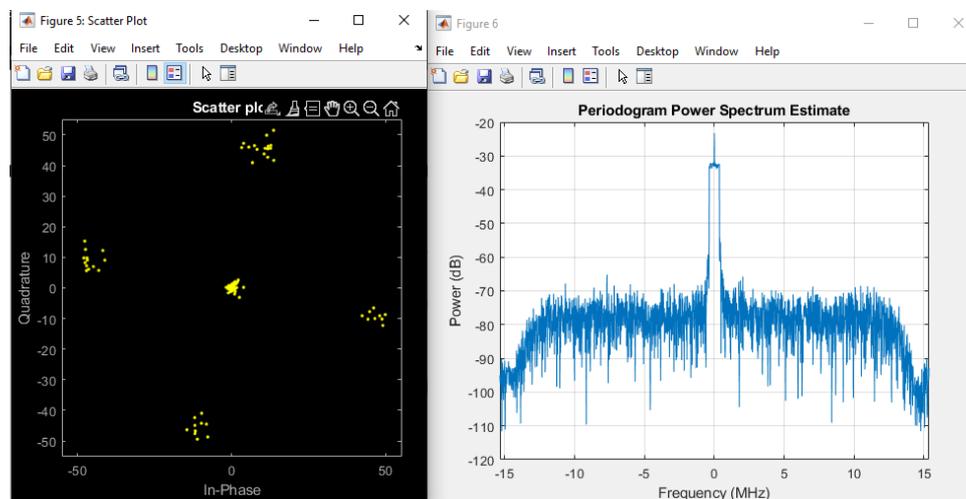
Función objetivo de la estación temporal símbolo 2



Nota. Corrección de ruido. Elaboración propia.

Figura 102

Función objetivo de la estación temporal símbolo 3



Nota. Corrección de desplazamiento de frecuencia y ruido .Elaboración propia.

5.6 Resultados Práctica 6: Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda

Para comparar la magnitud y fase del PSS con un valor de índice de raíz de 25,29 y 34, se modificó el código de la actividad 1 de la tarea 2 para graficar la magnitud y fase de del PSS con un valor de índice de raíz diferente, A continuación, se muestra el código:

```

u1 = [25,29,34]; % índice de raíz
for i= 1:3
    u = u1(i);
    seq = zadoffchu(u); % Generador de Zadoff-Chu
    pss = [zeros(5,1);seq(1:31);0;seq(32:62);zeros(5,1)];
    % Incluir ceros

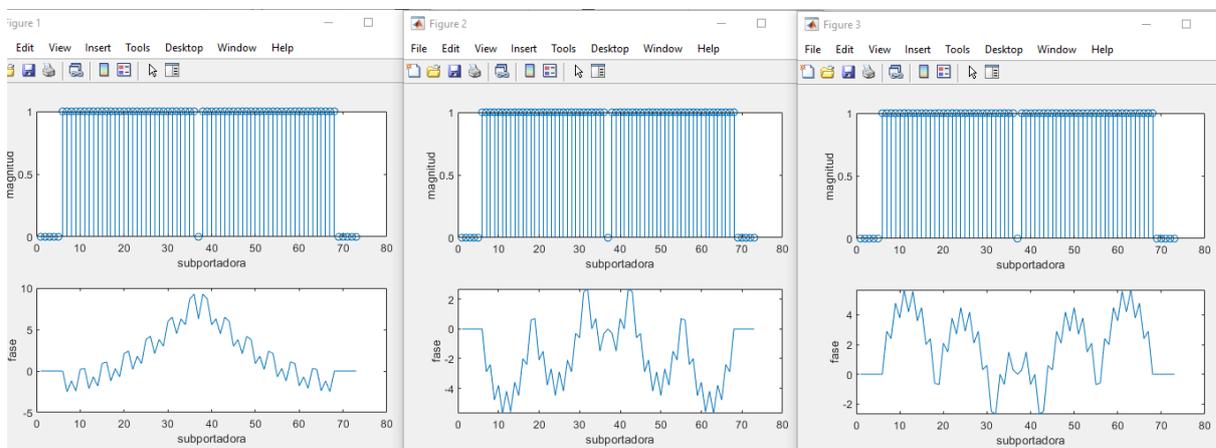
% Magnitud y fase de la gráfica del PSS
figure;
subplot(2,1,1);stem(abs(pss));
xlabel('subportadora'); ylabel('magnitud');
subplot(2,1,2);plot(unwrap(angle(pss)));
xlabel('subportadora'); ylabel('fase');
end

```

La Figura 103 muestra que la gráfica en magnitud es constante para todos los índices de raíz empleados, también se observa 5 subportadoras nulas en ambos extremos del PSS y la subportadora DC se establece en 0, sin embargo, la gráfica en función de la fase difiere para cada índice de raíz.

Figura 103

Magnitud y fase de PSS



Nota. DE izquierda a derecha se observa las figuras con índice de raíz 25,29 y 34 respectivamente. Elaboración propia.

Par comparar la función de autocorrelación y correlación cruzada para las secuencias de Zadoff-Chu con índice de raíz 25, 29 y 34, se modificó el código de la actividad 2 de la tarea 2 para graficar las funciones de autocorrelación y correlación cruzada como se muestra en el siguiente código.

```
% Generar una secuencia Zadoff-Chu con índice de raíz '25'
seq25 = zadoffchu(25);
seq29 = zadoffchu(29);
seq34 = zadoffchu(34);

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=25
figure;
subplot(1,3,1);plot(-61:61, abs(xcorr(seq25)./62)); % Función de
autocorrelación
title('u=25');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=29
subplot(1,3,2);plot(-61:61, abs(xcorr(seq29)./62)); % Función de
autocorrelación
title('u=29');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

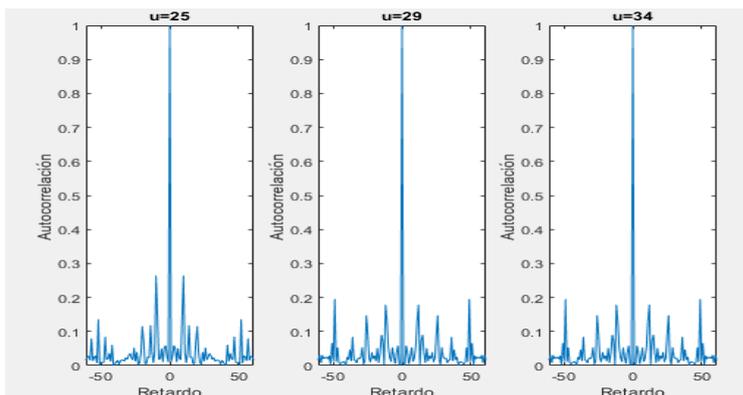
% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=34
subplot(1,3,3);plot(-61:61, abs(xcorr(seq34)./62)); % Función de
autocorrelación
title('u=34');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

% funcion de correlación cruzada (u=25)
figure;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25)./62)); hold on;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25,seq29)./62), 'g'); hold on;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25,seq34)./62), 'r'); hold on;
legend('u=25', 'u=25,u=29', 'u=25,u=34');
axis([-61 61 0 1]);
% funcion de correlación cruzada (u=29)
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29)./62)); hold on;
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29,seq25)./62), 'g'); hold on;
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29,seq34)./62), 'r'); hold on;
legend('u=29', 'u=29,u=25', 'u=29,u=34');
axis([-61 61 0 1]);
% funciones de correlación cruzada (u=34)
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34)./62)); hold on;
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34,seq25)./62), 'g'); hold on;
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34,seq29)./62), 'r'); hold on;
legend('u=34', 'u=34,u=25', 'u=34,u=29');
axis([-61 61 0 1]);
```

A continuación, en la Figura 104 se presenta las funciones de autocorrelación para secuencias de Zadoff-Chu. Cuando el índice de raíz presenta una correlación se tiene un pico alto en su magnitud.

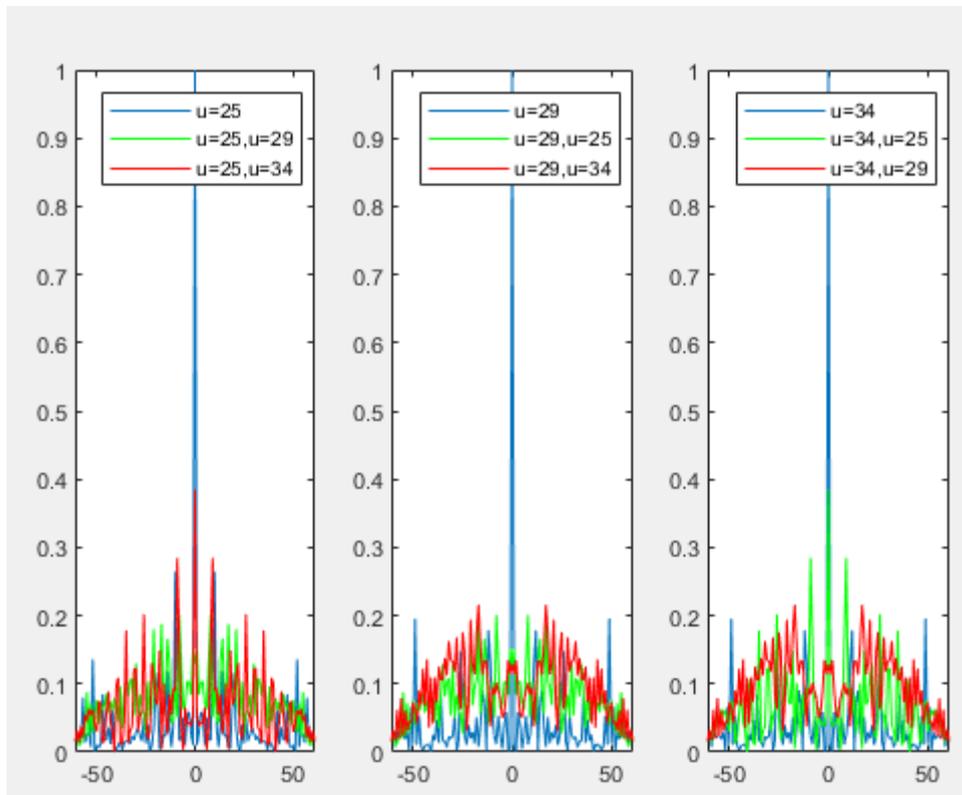
Figura 104

Autocorrelación para secuencias Zadoff-Chu



Nota. Autocorrelación para índices de raíz 25,29 y 64. Elaboración propia.

Cuando se analizan distintos pares de secuencias de Zadoff-Chu, en la Figura 105 se observa que los valores máximos de correlación cruzada son considerablemente inferiores a los valores máximos de autocorrelación obtenidos al considerar la misma secuencia. Estos resultados confirman que la secuencia de Zadoff-Chu exhibe las propiedades deseadas tanto en términos de correlación interna como externa.

Figura 105*Correlación cruzada y autocorrelación*

Nota. Correlación cruzada en pares. Elaboración propia.

Para comparar las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada. Se modifica el índice de raíz en el código de la actividad 4 tarea 2 para determinar los resultados como se observa en la Figura 106.

Figura 106*Modificación índice de raíz*

```

fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs * 30e-3; % Número de muestras (30ms)
v = read_complex_binary('sample25.dat', count); % Leer muestras
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nsymb = 70; % Número de símbolos OFDM
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1
seq = zadoffchu(25); % Secuencia Zadoff-Chu en consideración
st = 1; % Índice de inicio del símbolo con CP0 (modificar esto)
out = zeros(2, Nsymb);
ofdm_symb = zeros(N, Nsymb);

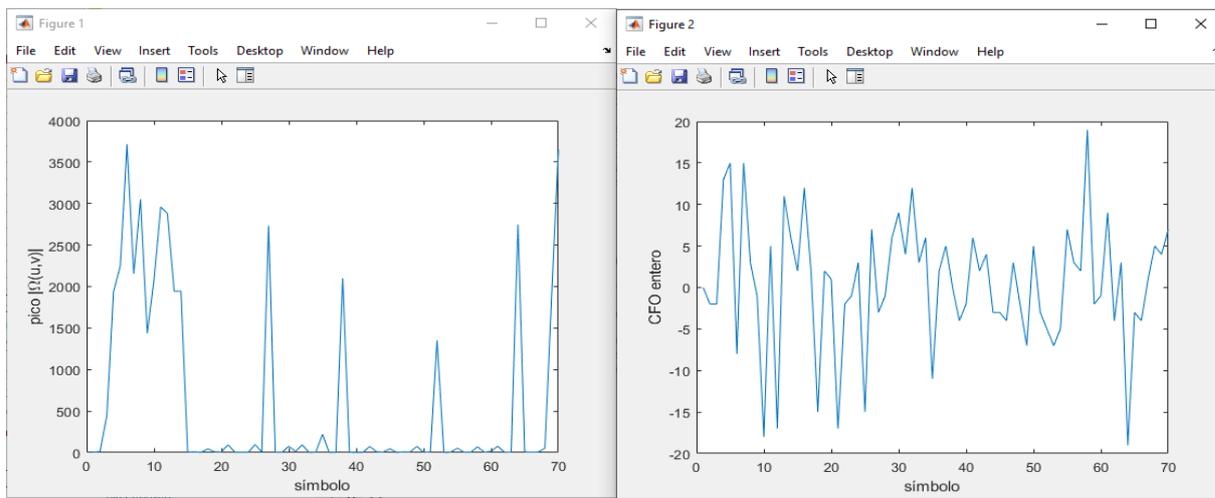
```

Nota. Se modifica el valor 25 por 29 y 34. Elaboración propia.

La Figura 107 representa la correlación cruzada para índice de raíz 29, se puede observar que los valores no superan el índice de valor del umbral $1.5e4$, ya que el índice de raíz no coincide, la magnitud máxima de correlación cruzada sigue siendo baja para todos los símbolos.

Figura 107

Correlación cruzada señal LTE con $u = 29$

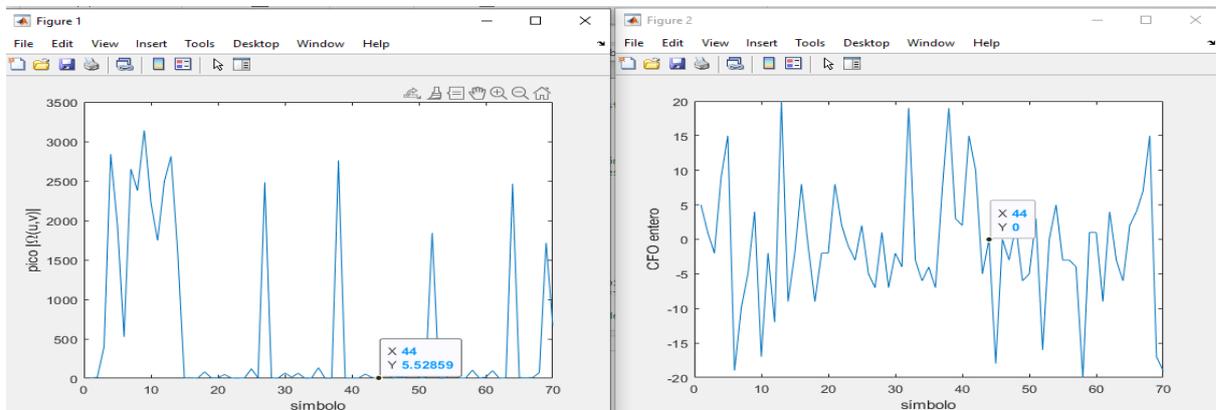


Nota. Valor del umbral es igual a 15000. Elaboración propia.

De igual forma la Figura 108 presenta la correlación cruzada para índice de raíz 34, donde se aprecia que los valores no superan el umbral $1.5e4$, indicando que al no coincidir con el índice de raíz esperado, la magnitud máxima de la correlación cruzada sigue siendo baja para todos los símbolos.

Figura 108

Correlación cruzada señal LTE con $u = 34$

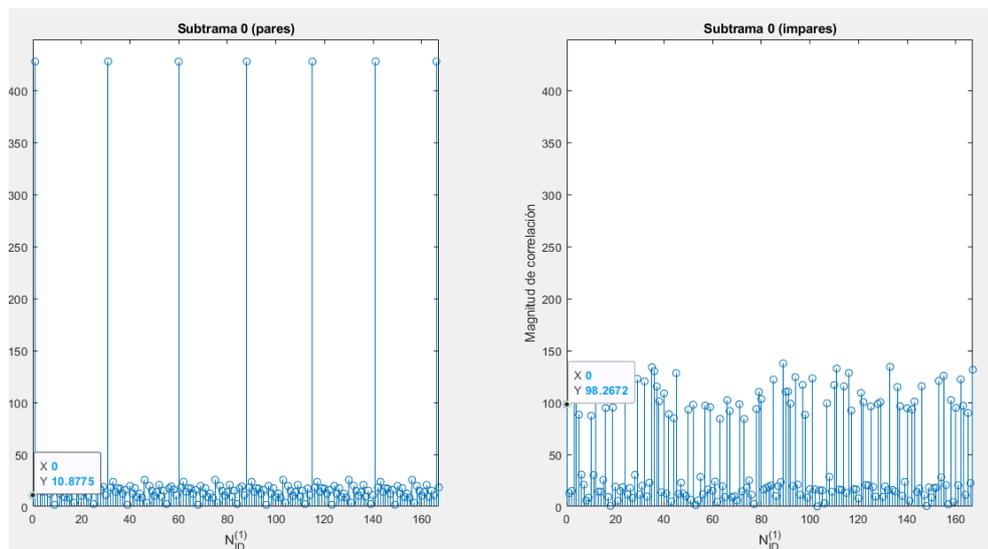


Nota. Las magnitudes no concuerdan. Elaboración propia.

La Figura 109 presenta las secuencias pares e impares del símbolo 5 de la señal Lte capturada en la subtrama 0, en esta se observa que el valor de $N_{ID}^{(1)}$ es diferente para la secuencia par e impar, por lo que se determina que SSS no se encuentra en esta subtrama.

Figura 109

Secuencias pares e impares para la señal LTE capturada en la subtrama 0

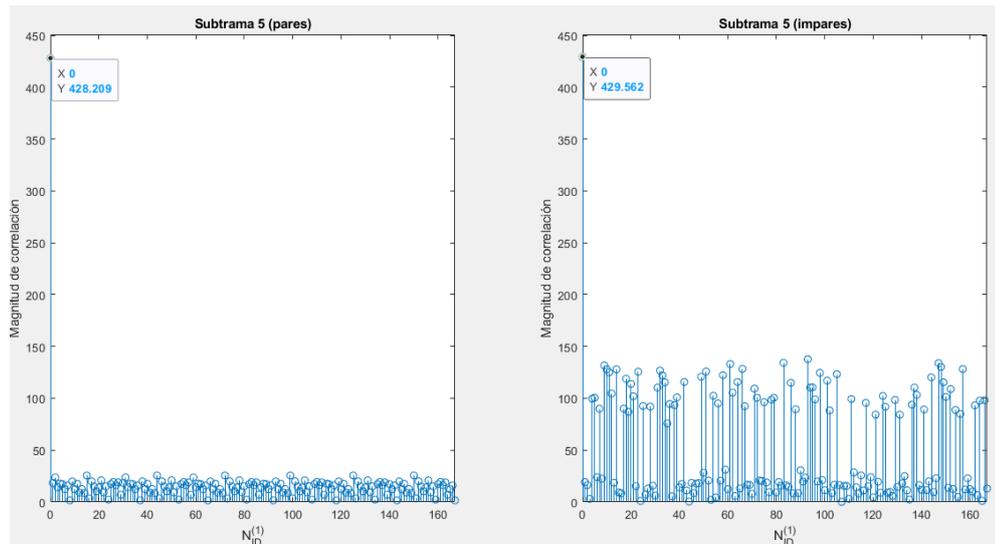


Nota. Valores diferentes de magnitud de secuencia para e impar. Elaboración propia.

En la Figura 110 se observa las secuencias pares e impares del símbolo 5 de la señal Lte capturada en la subtrama 5, en esta se observa que el valor de $N_{ID}^{(1)}$ es igual para la secuencia par e impar, por lo que se determina que SSS se encuentra en esta subtrama.

Figura 110

Secuencias pares e impares para la señal LTE capturada en la subtrama 5



Nota .Elaboración propia.

Se ha determinado que el SSS en el símbolo 5 se encuentra en la subtrama 5, con un valor $N_{ID}^{(1)}$ de 0. Al calcular el ID de celda de la capa física utilizando la formula $N_{ID}^{cell} = 3 N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}$, se obtiene un ID de celda de 0, coincidiendo con el valor programado. Se logra con éxito la recuperación de la sincronización temporal de la señal de radio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Mediante la investigación bibliográfica llevada a cabo en el presente trabajo de grado, se ha alcanzado una comprensión detallada del funcionamiento y operación de la tecnología de telefonía móvil 4G, junto con sus características principales. Además, se logró identificar qué tipo de hardware y software posibilitan la creación de un entorno emulado de una red 4G LTE.

Con relación, al diseño del entorno de una red móvil 4G se implementó la plataforma de código abierto OpenAirInterface (OAI), el cual permite ejecutar los componentes del EPC como son el HSS, MME y SPGW mediante el módulo Openair-cn y por otro lado la red de acceso de radio (E-UTRAN) mediante el módulo openairinterface5G, encargado de proporcionar software para el uso del eNB.

Además, la plataforma OAI proporciona flexibilidad al permitir trabajar con diversas configuraciones de sus componentes. La implementación del EPC y el eNB en un mismo ordenador simplifica el manejo de la plataforma, facilitando su introducción. Al mismo tiempo, la utilización de la interfaz de bucle local (loopback) posibilita la ejecución de la red de manera autónoma, prescindiendo de conexiones externas físicas. El empleo de esta interfaz simula una comunicación entre el eNB y el EPC dentro de un entorno local.

La emulación se presenta como una aproximación más cercana a la realidad de los sistemas de comunicación inalámbrica, al abarcar todas las capas del sistema, incluida la capa física. El uso del dispositivo LimeSDR como interfaz de radio permite tener el entorno emulado de la red 4G, ya que posibilita trabajar con la capa física, permitiendo pruebas específicas en condiciones controladas.

La implementación de las prácticas de laboratorio ofrece una valiosa oportunidad para integrar y aplicar los conocimientos teóricos en un entorno práctico, fortaleciendo así la comprensión y habilidades de los estudiantes en el campo de las tecnologías LTE. A través de las distintas prácticas, se realiza la configuración de la red LTE, se identifica el espectro de frecuencias, la evaluación del rendimiento y la aplicación de técnicas especializadas como la búsqueda de celdas LTE y la recuperación de temporización de símbolos.

La creación de un documento consolidado con la recopilación de las guías de laboratorio proporciona un recurso completo y organizado que facilitará a los estudiantes y profesores el acceso a la información detallada y estructurada sobre las distintas prácticas realizadas. Además, este documento sirve como referencia y apoyo para futuros entornos relacionados con la tecnología móvil 4G.

Recomendaciones

Para llevar a cabo el montaje de los componentes físicos de la red, es fundamental realizarlo con todas las precauciones necesarias. Una conexión incorrecta podría resultar en una ejecución deficiente del sistema. Por otro lado, una conexión adecuada no solo garantiza el rendimiento óptimo del sistema, sino que también contribuye a prolongar la vida útil de los componentes.

Utilizar las versiones específicas mencionadas durante la instalación, ya que el empleo de versiones distintas puede ocasionar fallos de compatibilidad. En particular, al instalar los componentes EPC y eNB de OAI para la tecnología LTE, es fundamental trabajar con las versiones asignadas (Release 8.6 y 10). Esto asegurará un desempeño

óptimo y evitará posibles inconvenientes derivados de incompatibilidades entre versiones.

Realizar diversas pruebas de rendimiento de la red para obtener resultados más precisos. Dado que el entorno es emulado, está sujeto a pérdidas de señal, ruido e interferencia. En este sentido, se aconseja realizar estas pruebas en un entorno controlado para garantizar la validez y la fiabilidad de los resultados.

Ampliar la red LTE mediante la implementación del eNB en otro ordenador, o incluso agregar varios eNBs, también se puede aumentar el número de equipos de usuario para emular y verificar como se la red respondería ante estos cambios realizados, este enfoque permitirá evaluar de manera más exhaustiva el rendimiento y la capacidad de la red ante una mayor carga de usuarios y la introducción de nuevos nodos eNB.

OpenAirInterface presenta software para la implementación de redes 5G, en caso de considerar la implementación de esta tecnología de comunicación móvil, se recomienda seguir un proceso paso a paso para donde se pueda explorar la transición hacia el uso de la telefonía móvil 5G, realizando un trabajo conjunto y asegurando una transición efectiva entre el estándar 4G y 5G.

BIBLIOGRAFIA

- 3GPP. (2010). *TS 36.300 Specification, Technical Radio, Group Network, Access Universal, Evolved Radio, Terrestrial Network, Access. 0*(Release 8).
- 3GPP. (2013a). *TS 23.002 Technical Specification Group Services and System Aspects; Network architecture. V12.2.0*(Release 8), 105.
- 3GPP. (2013b). *TS 36.211 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. V11.1.0*(Release 11), 117.
- 3GPP. (2013c). *TS 36.212 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding. V11.3.0*(Release 11), 84.
- 3GPP. (2014). *TS 24.301 Technical Specification Group Core Network and Terminals; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3. V10.15.0*(Release 10), 312.
- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). *LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES*. Fundación Vodafone España.
- Cox, C. (2014). *AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*.
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2016). *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G* (3rd ed.).
- Dahlman, E., Stefa, P., & Johan, S. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* (1st ed., Vol. 4, Issue 1, p. 431). Elsevier Ltd.

- Domínguez Pinar, I., & Fuentes Murillo, J. J. (2011). *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*. Universidad de Sevilla.
- Eurecom. (2022). *Présentation* / *EURECOM*.
<https://www.eurecom.fr/fr/eurecom/presentation>
- Ghosh, A., Zhang, J., Andrews, J., & Muhamed, R. (2011). *Fundamentals of LTE* (1st ed., pp. 236–237).
<https://books.google.com.ec/books?id=HjxmKq5MABcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Grayver, E. (2013). *Implementing Software Defined Radio*. Springer New York, NY.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9332-8>
- Huidobro, J. M. (2012). Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE. In *Alfaomega Grupo Editor, S.A.* (1st ed.).
- Korhonen, J. (2014). *Introduction to 4G Mobile Communications* (1st ed.). Artech House.
- Mishra, A. R. (2018). Overview of Mobile Networks. In *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G* (Second Edi, pp. 1–26).
- Navia, L. (2019). *Dirección y Gestión de Proyectos Inmobiliarios basado en la guía PMBOK y el uso metodologías ágiles*. 81. <https://hdl.handle.net/2454/33720>
- OpenAirInterface. (2022). *OPENAIR-CN An implementation of the Evolved Packet Core network*. <https://github.com/OPENAIRINTERFACE/openair-epc-fed/blob/master/README.md>
- OpenAirInterface. (2023a). *Acercas de OSA – OpenAirInterface*.
<https://openairinterface.org/about-us/>

OpenAirInterface. (2023b). *Towards Open Cellular Ecosystem – OpenAirInterface*.

<https://openairinterface.org/openairinterface-an-open-cellular-ecosystem/>

Rao, S., & Gajula, R. (2011). Protocol Signaling Procedures in LTE. *Radisys*, 11.

Sabry, F. (2022). *Radio Definida Por Software* (M. M. De Conocimientos (ed.)).

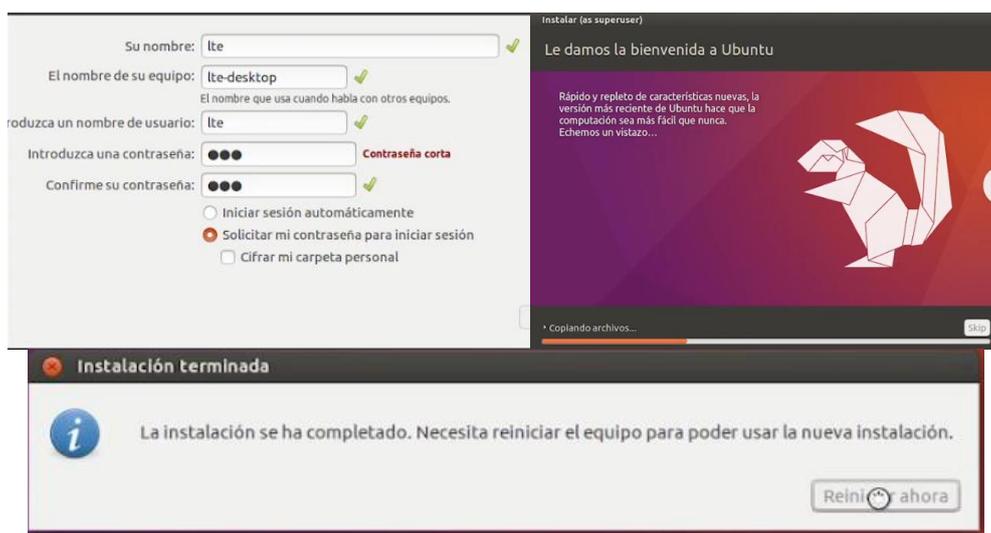
https://www.google.com.ec/books/edition/Radio_Definida_Por_Software/cv6TEAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Radio+definida+por+software&printsec=frontcover

Wang, R., Peng, Y., Qu, H., Li, W., Zhao, H., & Wu, B. (2014). OpenAirInterface-An

effective emulation platform for LTE and LTE-Advanced. *International Conference on Ubiquitous and Future Networks, ICUFN*, 127–132.

<https://doi.org/10.1109/ICUFN.2014.6876765>

ANEXO A Instalación del sistema operativo



ANEXO B: Detalles de la Instalación de Complementos

1. Instalación del kernel de baja latencia

Para la rama de Ubuntu 16.04, Eurecom recomienda trabajar con el kernel de baja latencia 4.4.0 o superior, para instalar este kernel en el sistema se utiliza el siguiente comando en el terminal.

```
$ sudo apt-get install linux-image-lowlatency linux-headers-lowlatency
```

2. Configuración de la administración de energía en el BIOS

Para configurar la administración de estados C de la BIOS, dirigirse a las opciones de arranque de Linux, específicamente al archivo “/etc/default/grub” donde se debe agregar la siguiente línea.

```
GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="quiet intel_pstate=disable"
```

También se puede incluir la siguiente línea de forma opcional.

```
processor.max_cstate=1 intel_idle.max_cstate=0 idle=poll"
```

Luego, se debe ejecutar el siguiente comando en el terminal.

```
$ sudo update-grub
```

Después, en el archivo “etc//modprobe.d/blacklist.conf” se agrega la siguiente línea. (en caso de no existir el archivo se debe crear)

```
blacklist intel powerclamp
```

Para llevar a cabo la verificación del estado de la CPU, se procede a la instalación de la herramienta i7z. La instalación y posteriormente el uso de dicha herramienta se realizará mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get install i7z
$ sudo i7z
```

3. Desactivación del escalado de frecuencia de la CPU

Se instala la herramienta cpufrequtils mediante el comando.

```
$ sudo apt-get install cpufrequtils
```

Ahora se edita el archivo “/etc/default/cpufrequtils”, en caso de que no exista se debe crearlo y se añade la siguiente línea.

```
GOVERNOR = " performance "
```

Finalmente se debe deshabilitar el demonio “ondemand”, para evitar que la configuración realizada sea sobrescrita después de reiniciar el sistema.

```
$ sudo update-rc.d ondemand disable
$ sudo /etc/init.d/cpufrequtils restart
```

La configuración realizada puede ser verificada utilizando el siguiente comando.

```
$ cpufreq-info
```

Este comando mostrará un bloque de información para cada núcleo del procesador. Se debe asegurar que todos los núcleos se encuentren en modo de rendimiento y funcionando a la velocidad máxima del procesador.

ANEXO C: Detalles de la Instalación del Módulo LimeSDR

1. Instalación Soapy SDR

Para dar inicio al proceso, es fundamental llevar a cabo la instalación de las dependencias requeridas para la correcta configuración de SoapySDR, este proceso se lo realiza mediante el siguiente comando:

```
$ sudo apt-get install cmake git g++ libpython-dev python-numpy swig
```

Se procede a realizar la clonación del código fuente del repositorio de SoapySDR. Se opta por instalar la versión 0.8.0, considerada como la versión estable, a través del siguiente comando:

```
$ git clone --branch soapy-sdr-0.8.0
https://github.com/pothosware/SoapySDR.git
```

A continuación, se compila, instala y configura la biblioteca SoapySDR en el sistema, permitiendo su uso en aplicaciones que requieren interactuar con dispositivos SDR compatibles mediante los siguientes comandos.

```
$ cd SoapySDR           # Cambia al directorio "SoapySDR"
$ mkdir build           # Crea una carpeta llamada "build"
$ cd build              # Ingresa al directorio "build"
$ cmake ..              # Inicia configuración del código fuente de
SoapySDR
$ make -j4              # Compila el código utilizando 4 hilos de
compilación
$ sudo make install     # Instala los archivos compilados en el sistema
$ sudo ldconfig         # Actualiza la caché de enlaces del sistema
```

2. Instalación LimeSuite

Para dar inicio al proceso, se instala las dependencias requeridas mediante el siguiente comando:

```
$ sudo apt-get install git g++ cmake libsqlite3-dev libi2c-dev libusb-
1.0-0-dev libwxgtk3.0-dev freeglut3-dev
```

Se procede a realizar la clonación del código fuente oficial. Se opta por instalar la versión 17.12.0, considerada como la versión estable, a través del siguiente comando:

```
$ git clone --branch v17.12.0
https://github.com/myriardf/LimeSuite.git
```

A continuación, se deben seguir los siguientes comandos para configurar, compilar el código, instalarlo en el sistema, actualizar la configuración de las bibliotecas compartidas y ejecutar un script de instalación adicional.

```
$ cd LimeSuite          # Cambia al directorio "LimeSuite"
$ cd build              # Entra al directorio "build"
$ cmake ..              # Configura el proyecto con CMake
$ make -j4              # Compila el código usando 4 hilos
$ sudo make install     # Instala el programa, como superusuario
$ sudo ldconfig         # Actualiza la configuración de las
bibliotecas compartidas
$ cd ../udev-rules/    # Cambia al directorio "../udev-rules/"
$ sudo ./install.sh    #Ejecuta el script "install.sh"                 superusuario
```

Se utiliza los siguientes comandos para verificar la configuración y la detección de dispositivos LimeSDR, así como para realizar actualizaciones de firmware y obtener información detallada sobre los dispositivos SDR disponibles en el sistema.

```
# Actualiza el firmware y el gateway de LimeSDR
$ sudo LimeUtil -update
# Proporciona información sobre el dispositivo LimeSDR
$ LimeUtil --info
# Busca dispositivos LimeSDR conectados
$ LimeUtil -find
# Proporciona información sobre los módulos y dispositivos disponibles
en SoapySDR
$ SoapySDRUtil -info
# Busca dispositivos LimeSDR utilizando el controlador de SoapySDR
$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
```

```

Version information:
  Library version:    v17.12.0-gfe53178a
  Build timestamp:   2023-05-21
  Interface version: v2017.12.0
  Binary interface:  17.12-1

System resources:
  Installation root: /usr/local
  User home directory: /home/lte
  App data directory: /home/lte/.local/share/LimeSuite
  Config directory:  /home/lte/.limesuite
  Image search paths:
    - /home/lte/.local/share/LimeSuite/images
    - /usr/local/share/LimeSuite/images

Supported connections:
  * PCIEXillybus
  * STREAM
  * uLimeSDR

#####
Lib Version: v0.8.0-gab626068
API Version: v0.8.0
ABI Version: v0.8
Install root: /usr/local
Search path:  /usr/local/lib/SoapySDR/modules0.8
Module found: /usr/local/lib/SoapySDR/modules0.8/libLMS7Support.so (17.12.0-fe53178)
Available factories... lime
Available converters...
- CF32 -> [CF32, CS16, CS8, CU16, CU8]
- CS16 -> [CF32, CS16, CS8, CU16, CU8]
- CS32 -> [CS32]
- CS8 -> [CF32, CS16, CS8, CU16, CU8]
- CU16 -> [CF32, CS16, CS8]
- CU8 -> [CF32, CS16, CS8]
- F32 -> [F32, S16, S8, U16, U8]
- S16 -> [F32, S16, S8, U16, U8]
- S32 -> [S32]
- S8 -> [F32, S16, S8, U16, U8]
- U16 -> [F32, S16, S8]
- U8 -> [F32, S16, S8]

lte@lte-desktop:~$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
#####
## Soapy SDR -- the SDR abstraction library ##
#####

Found device 0
  addr = 1d50:6108
  driver = lime
  label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 90726074F2F28
  media = USB 3.0
  module = STREAM
  name = LimeSDR-USB
  serial = 00090726074F2F28

lte@lte-desktop:~$ LimeUtil --find
* [LimeSDR-USB, media=USB 3.0, module=STREAM, addr=1d50:6108, serial=00090726074F2F28]

```

ANEXO D: Detalles de la Instalación de OpenAirInterface

1. Instalación eNodeB

Los pasos de instalación detallados para eNodeB de la plataforma OpenAirInterface y un se describen a continuación:

- 1) Clonar el repositorio principal de OpenAirInterface desde el repositorio en línea, para tener todos los archivos y directorios necesarios para la instalación, utilizando el siguiente comando:

```
# Clona el repositorio de OpenAirInterface desde la URL proporcionada
$ git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g.git
```

- 2) Navegar al directorio "openairinterface5g" utilizando el siguiente comando:

```
# Cambia al directorio "openairinterface5g"
$ cd openairinterface5g
```

- 3) Realizar un "hard reset" en el repositorio para asegurarse de que estamos en la versión específica estable del código fuente. Ejecutar el siguiente comando:

```
# Realiza un "hard reset" en el repositorio para regresar a un commit específico
$ git reset --hard ae0494b0bc431bf664e300b0b5a10f348d6b6757
```

- 4) Cambiar al directorio "openairinterface5g" en el directorio personal del usuario ejecutando el siguiente comando:

```
# Cambia al directorio "openairinterface5g"
$ cd ~/openairinterface5g
```

- 5) Instalar la biblioteca "libelf-dev" necesaria para la construcción y funcionamiento correcto de OpenAirInterface utilizando el siguiente comando:

```
# Instala la biblioteca "libelf-dev" en el sistema
$ sudo apt-get install libelf-dev
```

- 6) Activar el entorno de desarrollo necesario para la compilación y ejecución de OpenAirInterface utilizando el siguiente comando:

```
# Activar el entorno de OpenAirInterface
$ source oaienv
```

- 7) Iniciar el proceso de construcción de OpenAirInterface, este se encarga de compilar y construir los componentes básicos utilizando el siguiente comando:

```
# Inicia la construcción de OpenAirInterface con una instalación básica
$ ./cmake_targets/build_oai -I
```

- 8) Compilar y configura el eNodeB utilizando el dispositivo SDR ejecutando el siguiente comando:

```
# Construye un "eNodeB" utilizando el dispositivo LimeSDR
$ ./cmake_targets/build_oai -c -w LMSSDR --eNB -x
```

2. Instalación EPC

Para instalar EPC se clona el repositorio de OpenAir-CN, una vez descargado navegar al directorio creado “openair-cn” y cambiar a la rama “develop” utilizando los siguientes comandos:

```
# Clona el repositorio openair-cn desde la URL proporcionada
$ git clone https://gitlab.com/chunyeow/openair-cn
# Cambia al directorio openair-cn
$ cd openair-cn
# Cambia a la rama develop dentro del repositorio clonado
$ git checkout develop
```

Descargar los mods de <https://open-cells.com/opencells-mods-20190923.tgz> en el directorio principal del usuario, descomprimir la carpeta y realizar la copia del archivo “EPC.patch” en el directorio “openair-cn” finalmente aplicar el parche. Los comandos específicos, se encuentran a continuación.

```
# Cambiar al directorio principal del usuario
$ cd ~
# Extraer el contenido del archivo tar
$ tar -xvf epc.tar.git
# Copiar el archivo EPC.patch al directorio openair-cn
$ cp ~/epc/epc-patch/EPC.patch ~/openair-cn
# Cambiar al directorio openair-cn
$ cd ~/openair-cn
# Aplicar el parche EPC.patch al código fuente
$ git apply EPC.patch
```

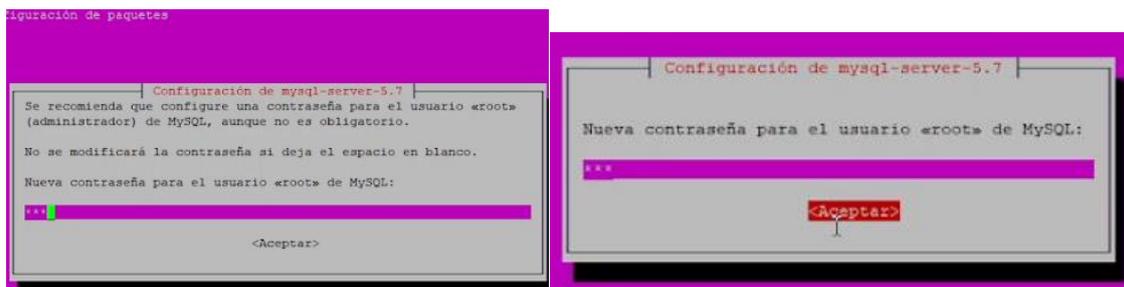
Dirigirse al directorio "openair-cn". Luego, ejecutar el script "oaienv" que inicializa el entorno de OpenAirInterface, estableciendo las variables de entorno necesarias para compilar y ejecutar el código. Luego, acceder al directorio "scripts" que contiene scripts para el funcionamiento y configuración del EPC.

```
cd ~/openair-cn # Cambia al directorio "openair-cn"
source oaienv # Ejecuta el script oaienv
cd scripts # Cambia al directorio "scripts"
```

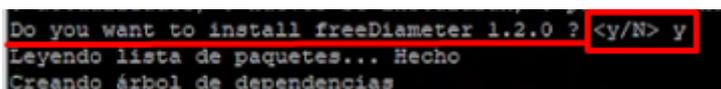
Compilar e instalar el componente HSS utilizando el siguiente comando:

```
# Compilar e instalar el componente HSS (Home Subscriber Server)
./build_hss -i
```

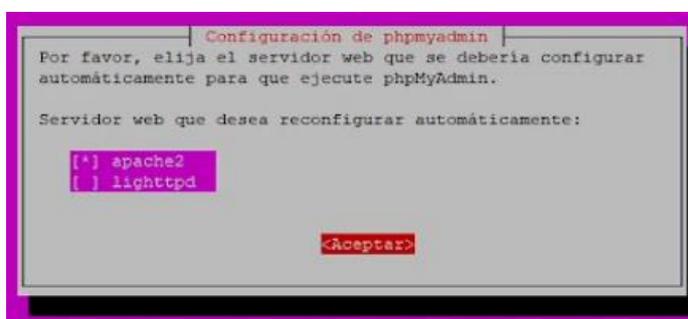
Cuando ejecute HSS se instalará Mysql-server, ingresar la contraseña para el usuario root y volver a confirmar.



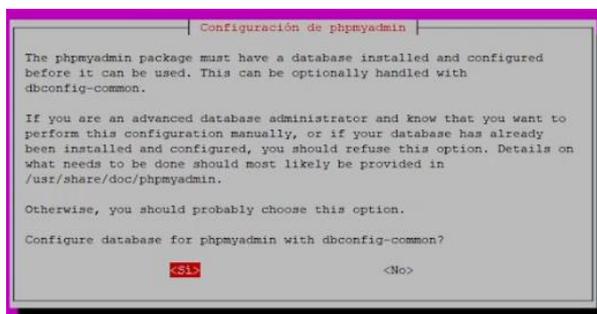
Dar si a la opción de instalar freeDiameter 1.2.0.



Seleccionar el servidor web apache2 con el botón espacio y clic en aceptar



Seleccionar si a configurar la base de datos para phpmyadmin con dbconfig-common.



Ingresar una contraseña para phpmyadmin y volver a confirmar la contraseña, se recomienda utilizar la contraseña utilizada para Mysql-server.



Seguir con la compilación e instalación del MME mediante el siguiente comando.

```
# Compilar e instalar el componente MME (Mobility Management Entity)
./build_mme -i
```

Seleccionar la opción “No” cuando pregunta si desea instalar freeDiameter 1.2.0.

```
Do you want to install freeDiameter 1.2.0 ? <y/N> n
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias... 50%
```

Seleccionar la opción “No” cuando pregunta si desea instalar asnlc, ya que este debió haberse instalado con el eNodeB.

```
Do you want to install asnlc rev 1516 patched? <y/N> n
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias... 50%
```

Seleccionar la opción “Si” cuando pregunta si desea instalar libgtpn1.

```
Do you want to install libgtpn1 ? <y/N> y
Downloading libgtpn1 archive
Clonar en «libgtpn1»...
```

Configurar los privilegios del uso de Wireshark a su preferencia.

```
Configuración de wireshark-common

Dumpcap se puede instalar de un modo que permite a los miembros del
grupo «wireshark» capturar paquetes. Se recomienda usar esto en lugar de
ejecutar Wireshark/Tshark directamente como administrador («root»),
porque se ejecutará menos código con privilegios de administración.

Para más información, vea el archivo
«/usr/share/doc/wireshark-common/README.Debian».

Activar esta funcionalidad puede ser un riesgo de seguridad, por lo que
de forma predeterminada está desactivada. En caso de duda, se recomienda
dejarla desactivada.

¿Los usuarios sin privilegios de administración deberían poder capturar
paquetes?

<Si> <No>
```

Compilar e instalar el SPGW mediante el siguiente comando.

```
# Compilar e instalar el componente SPGW (Serving Gateway)
./build_spgw -i
```

Seleccionar la opción “No” cuando pregunta si desea instalar libgtpn1.

```
Do you want to install libgtpn1 ? <y/N> n
SPGW not compiled, to compile it, see run build_spgw without -i option
```

Finalmente se compila cada componente con los siguientes comandos.

```
./build_hss # Compilar el componente HSS
./build_mme # Compilar el componente MME
./build_spgw # Compilar el componente SPGW
```

ANEXO E: DOCUMENTO GUIA DE LABORATORIOS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

“MANUAL DE GUÍAS DE PRACTICAS DE LABORATORIO

MÓVIL 4G”

IBARRA-ECUADOR

2024

Contenido

Guía de laboratorio del estudiante	3
1.1 Práctica 1:	3
1.2 Práctica 2.....	6
1.3 Práctica 3.....	9
1.4 Práctica 4:	13
1.5 Práctica 5:	16
1.6 Práctica 6:	19
Guía de laboratorio del profesor	22
2.1 Práctica 1:	22
2.2 Práctica 2:	33
2.3 Práctica 3	45
2.4 Práctica 4:	61
2.5 Práctica 5:	74
2.7 Práctica 6:	93
Guía de montaje.....	118

Guía de laboratorio del estudiante

1.1 Practica 1:

GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES

LABORATORIO N.º 1

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema

Configuración e implementación de elementos LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de configurar los componentes clave de una red LTE utilizando OpenAirInterface (OAI), incluyendo el eNB y el EPC (MME - HSS - SPGW). Además, se les guiará en la conexión de un dispositivo comercial de usuario final (UE), lo que les permitirá acceder a Internet y experimentar con los servicios y aplicaciones en un entorno de red LTE real. A lo largo de la práctica, los estudiantes adquirirán conocimientos prácticos sobre la configuración y el funcionamiento de una red LTE.

3. Objetivos

- Comprender los fundamentos de la emulación de redes LTE utilizando la plataforma OpenAirInterface (OAI).
- Configurar y poner en funcionamiento los componentes eNB y EPC utilizando OAI para establecer una red LTE, junto con la integración de dispositivos comerciales de usuario (COTS UE).
- Realizar mediciones y análisis de la red LTE implementada.

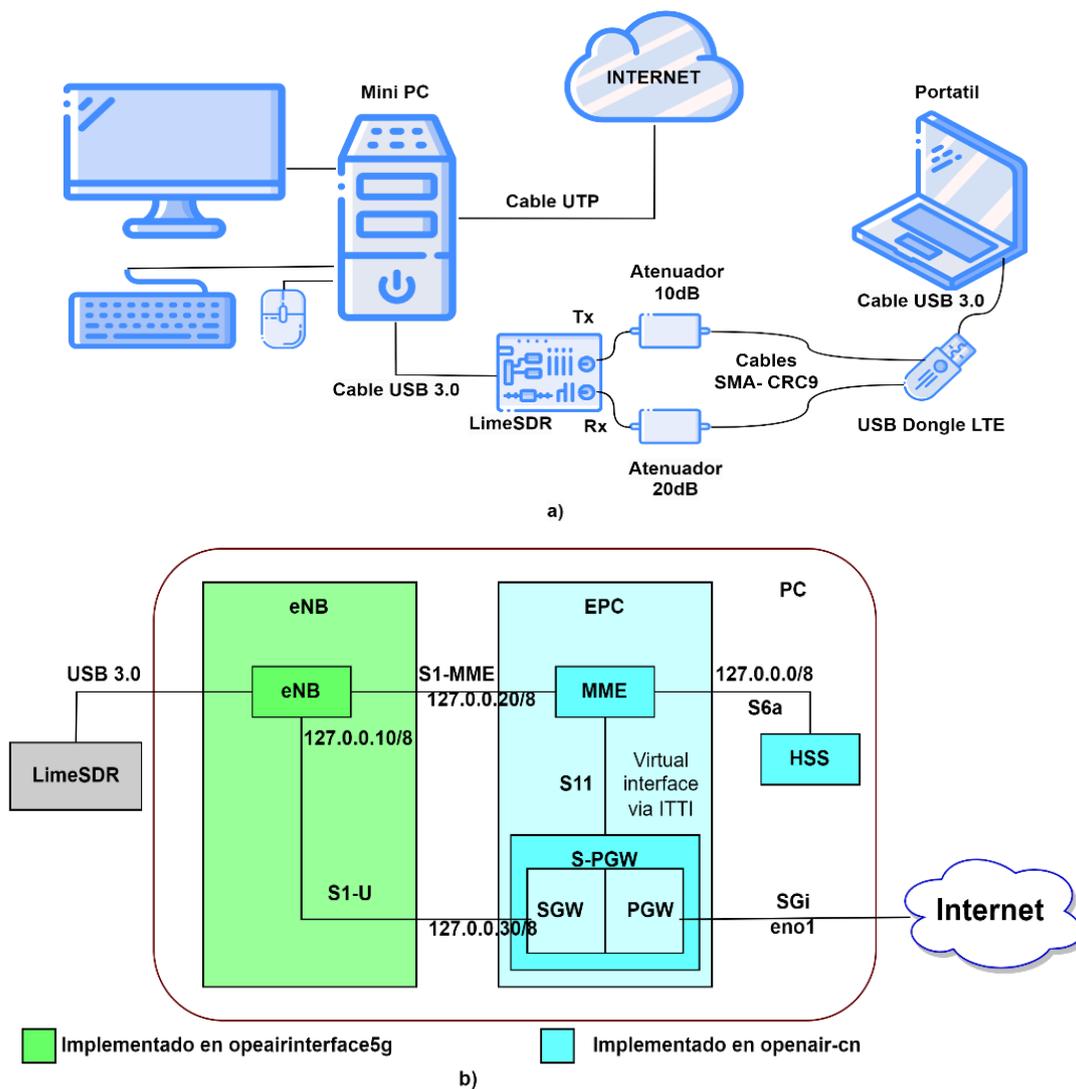
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre redes LTE, incluyendo la arquitectura de la red, los componentes clave eNB, EPC, MME, HSS, SGW, PGW, además investigar sobre los valores RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

5. Materiales y equipos

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mini PC con OpenAirInterface. • LimeSDR • USB Dongle LTE • Portátil. | <ul style="list-style-type: none"> • 2 cables SMA(m) a CRC9. • 2 cables USB (m) a USB (h). • Atenuador 10dB y 20dB. • Cable UTP. |
|---|--|

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Establecer la configuración global del sistema LTE.

- Conectar los componentes de la red.
- Verificar la conexión.
- Verificar la red LTE.
- Preparar componentes para iniciar las practica.

Tarea 2: Configurar eNB.

- Configurar banda 7 a 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.

Tarea 3: Configurar EPC

- Configurar HSS
- Configurar MME
- Configurar SPGW

Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE

- Activar certificados HSS y MME
- Comprobar la disponibilidad de archivos PEM
- Cargar base de datos para el HSS
- Ejecutar HSS
- Ejecutar MME
- Ejecutar SPGW
- Ejecutar eNB

Tarea 5: Configurar USB dongle LTE

- Instalar dongle USB LTE
- Establecer conexión para Dongle USB LTE

8. Interpretación de resultados

- Realizar pruebas de velocidad, repetir la prueba 3 veces y registrar los resultados.
- Evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en ambos sentidos. Registrar los valores mínimos y máximos.
- Registrar los valores de RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

1.2 Práctica 2

GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES

LABORATORIO N.º 2

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Análisis del espectro LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes examinarán el espectro LTE, explorando sus características y propiedades. Además, podrán visualizar las señales de sincronización transmitidas en el contexto de esta tecnología. Este ejercicio práctico permitirá a los estudiantes adquirir una comprensión más profunda de los aspectos técnicos y operativos asociados con la red LTE.

3. Objetivos

- Analizar las variaciones y patrones de las señales dentro del espectro LTE.
- Profundizar la comprensión del proceso técnico de sincronización en el funcionamiento de las señales LTE.

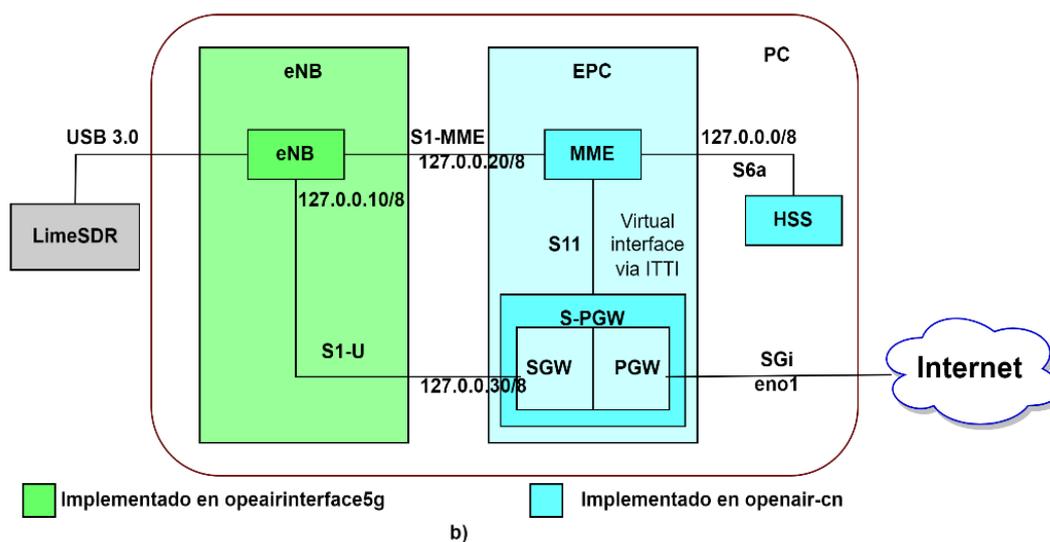
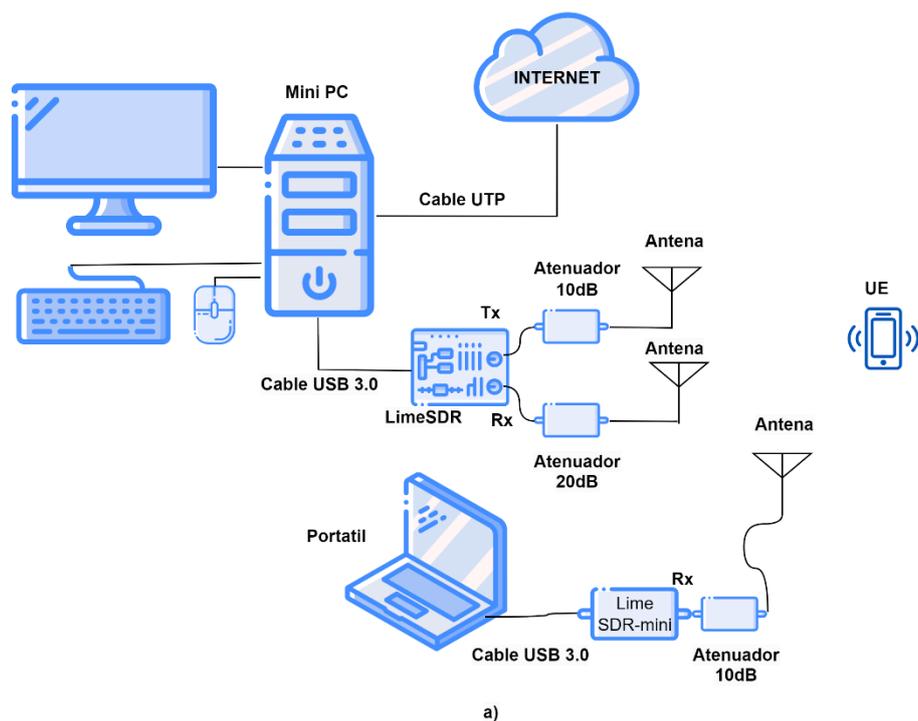
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre: GNU Radio, bandas LTE, uso de bandas pareadas para LTE, señal de sincronización a una red LTE.

5. Materiales y equipos

- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR y limeSDR mini.
- 2 cables USB 3.0.
- Cable SMA(m) a SMA(m).
- Cable UTP.
- 2 atenuadores 10dB.
- Atenuador 20 dB
- Portátil.
- Celular.
- 3 antenas.

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1 : Establecer configuración global del sistema LTE.

- Conectar los componentes de la red.
- Configurar dispositivo celular.

Tarea 2: Crear analizador de espectros GNU radio.

- Instalar GNU Radio.
- Crear y configurar analizador de espectro.
- Ejecutar analizador de espectro.

Tarea 3: Ejecutar red LTE.

- Activar certificados HSS y MME.
- Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
- Cargar base de datos para el HSS.
- Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.
- Conectar UE.

8. Interpretación de resultados

- Identificar las frecuencias y el ancho de banda para cada configuración 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.
- Identificar la señal de sincronización LTE.
- Identificar el uso del ancho de banda al realizar pruebas de velocidad.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

1.3 Práctica 3

GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES

LABORATORIO N.º 3

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Análisis del protocolo LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de aprender a utilizar Wireshark para capturar, filtrar e inspeccionar los paquetes de datos que se transmiten en la red LTE. Wireshark es una herramienta de análisis de protocolos de red de código abierto que nos permite obtener una visión detallada del tráfico de la red en tiempo real. Con esta práctica, los estudiantes adquirirán habilidades para examinar y comprender la comunicación entre los diferentes componentes de la red LTE, fundamental para el diagnóstico de problemas y optimizar el rendimiento de la red.

3. Objetivos

- Verificar el comportamiento del tráfico de una red LTE.
- Analizar el protocolo de conexión inicial de un equipo de usuario en la red LTE.

4. Preparatorio, fundamentación Teórica

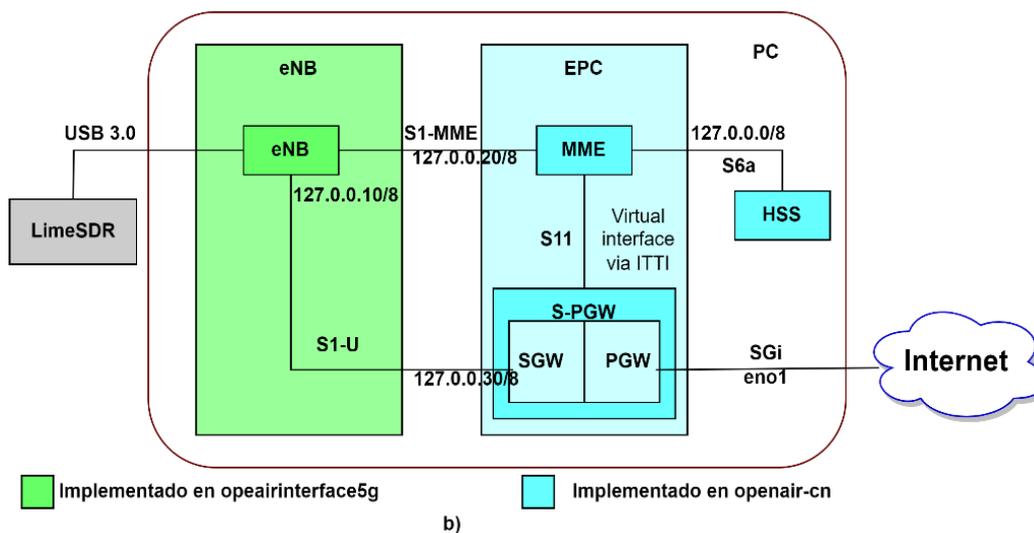
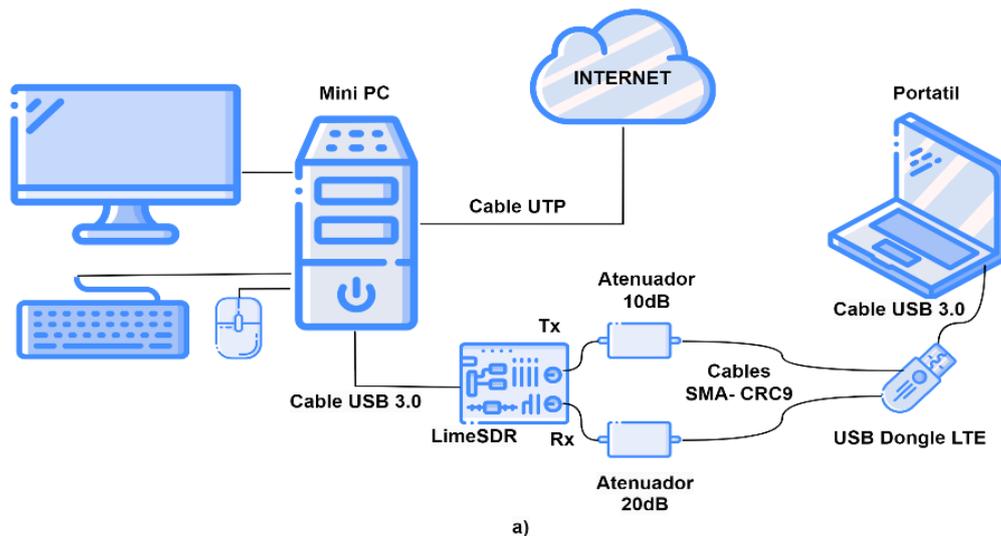
Realizar una consulta bibliográfica sobre:

- Los protocolos de señalización AS (Access Stratum) y NAS (Non-Access Stratum).
- Proceso de adquisición de celdas.
- Procedimiento de acceso aleatorio basado en la contención.
- Proceso de conexión entre un UE y MME.

5. Materiales y equipos

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| • Mini PC con OpenAirInterface. | • 2 cables SMA(m) a CRC9. |
| • LimeSDR | • USB Dongle LTE |
| • 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | • Cable UTP. |
| • Atenuador 10dB y 20dB. | • Portátil. |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Requisitos previos.

- Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
- Configurar software OAI.

Instalar Wireshark.

- Tarea 2: Configurar Wireshark.
- Activar subdirectores heurísticos.
- Habilitar protocolos lte.

Tarea 3: Ejecutar red LTE

- Activar certificados HSS y MME.
- Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
- Cargar base de datos para el HSS.
- Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.

Tarea 4: Capturar, filtrar paquetes de la red LTE.

- Capturar paquetes con Wireshark.

- Filtrar paquetes SystemInformationBlockType1 (SIB1).
- Inspeccionar detalles SIB1.
- Filtrar paquetes SystemInformation (SI)

Tarea 5: Analizar procedimiento de acceso aleatorio

- Conectar UE.
- Localizar paquetes del procedimiento de acceso aleatorio.
- Verificar parámetros Msg.

Tarea 6: Analizar proceso de conexión de UE.

- Verificar proceso de registro de un UE en MME.
- Verificar proceso de autenticación.

8. Interpretación de resultados

- Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformationBlockType1” (SIB1) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.
- Realice una tabla del paquete SIB1 que contenga datos y una descripción de los siguientes campos.
 - plmn-Identity
 - trackingAreaCode
 - cellIdentity
 - cellBarred
 - cellReservedForOperatorUser
 - freqBanIndicator
- Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformation” (SI) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.
- Registre los valores de respuesta de acceso aleatorio (RAR) en función del Msg2 Capturados.
 - RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary ID)
 - RAPID (Random Access Preamble ID)
 - TA (Timing Advance)
 - UL Grant
 - Temp C-RNTI (Temporary Cell-RNTI)
- Registre los valores de solicitud de conexión RRC en función de Msg3.
 - C-RNTI
 - Ue-Identity (randomValue)
- Registre los valores capturados para Msg4.
 - C-RNTI
 - UE Contention Resolution Identity
- Identifique el protocolo utilizado y la información enviada en los siguientes paquetes/mensajes en el proceso de conexión.
 - RRC connection request (attach request)
 - Initial UE message (attach request)
 - Initial UE message (attach accept)
 - RRC connection reconfiguration (attach accept)
 - RRC connection reconfiguration (attach complete)
 - UL NAS transport (attach complete)

- Identifique la respuesta de autenticación-información (AIA) en los paquetes capturados y registre el valor de los siguientes parámetros.
- RAND
- XRES
- AUTN
- KASME

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

1.4 Práctica 4:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 4**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Evaluación del rendimiento de la red LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes podrán evaluar los tres indicadores principales del rendimiento de la red LTE: rendimiento, pérdida de paquetes y latencia. Analizando la interacción en los flujos de tráfico del protocolo de control de transmisión TCP y del protocolo de datagramas de usuario UDP.

3. Objetivos

- Medir y analizar el rendimiento TCP
- Medir y analizar el rendimiento UDP
- Medir y analizar la latencia de la red LTE.

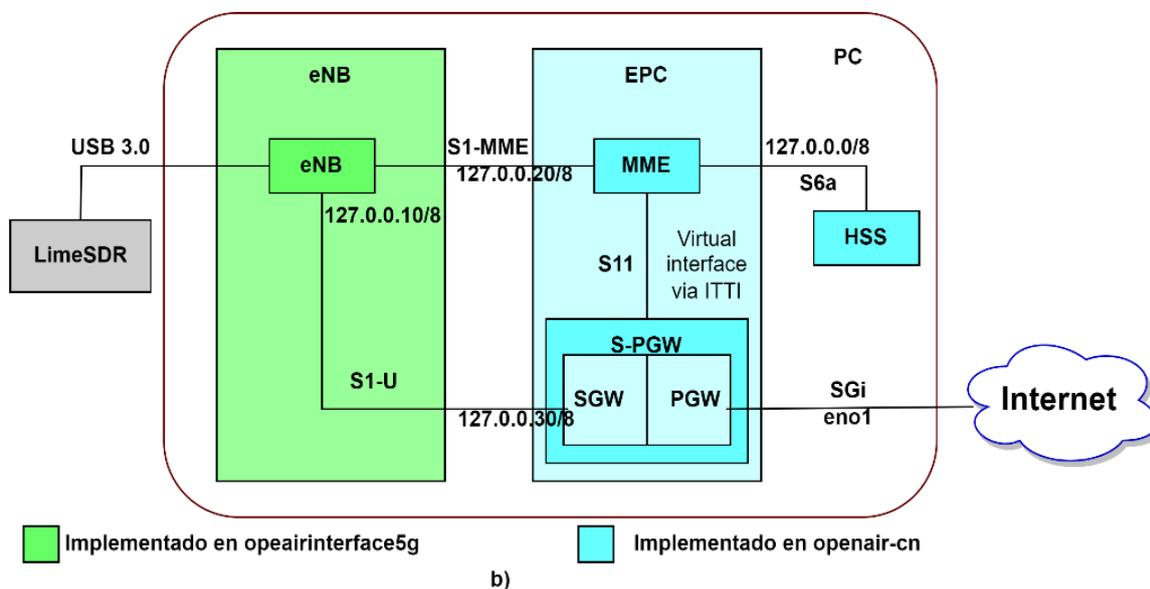
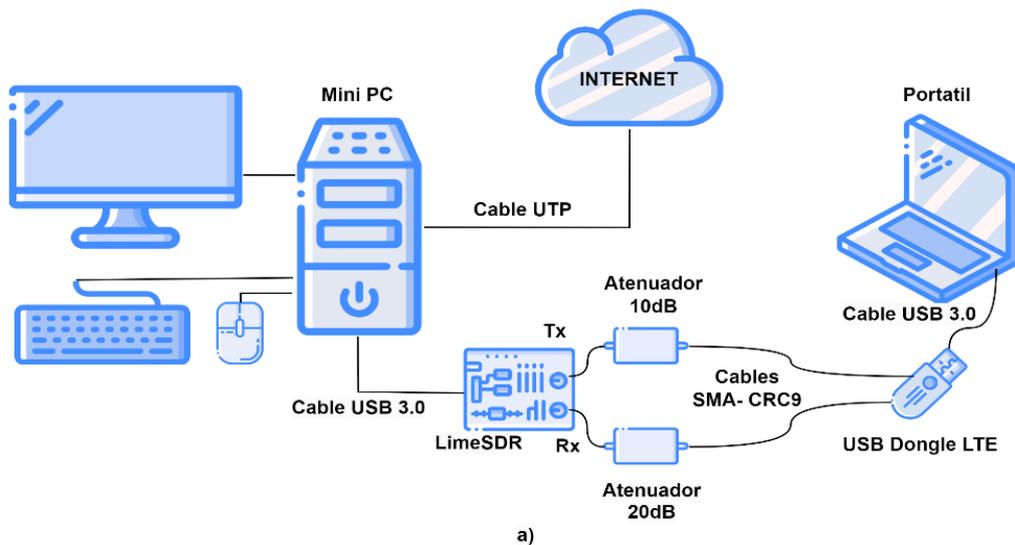
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre rendimiento TCP, UDP, latencia en una red LTE.

5. Materiales y equipos

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| • Mini PC con OpenAirInterface. | • 2 cables SMA(m) a CRC9. |
| • LimeSDR | • USB Dongle LTE |
| • 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | • Cable UTP. |
| • Atenuador 10dB y 20dB. | • Portátil. |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Requisitos previos.

- Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
- Configurar software OAI.

Tarea 2: Instalar iperf3

- Verificar iperf 3 en mini pc.
- Descargar iperf3 en portátil (Windows).

Tarea 3: Ejecutar red LTE

- Activar certificados HSS y MME.
- Comprobar disponibilidad de archivos PEM.
- Cargar base de datos para el HSS.
- Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.

Tarea 4: Verificar rendimiento TCP de enlace ascendente y descendente.

- Verificar dirección IP del EPC.
- Ejecutar iperf3 en el host local
- Ejecutar iperf3 en el pc portátil.
- Verificar rendimiento TCP en Wireshark.
- Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.
- Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.

Tarea 6: Verificar rendimiento UDP de enlaces ascendente y descendente.

- Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.
- Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.
- Configurar el ancho de banda objetivo.
- Realizar prueba de rendimiento de UDP.

Tarea 7: Verificar latencia de red LTE.

- Realizar prueba de ruta.
- Realizar prueba de ping.

8. Interpretación de resultados

- Realizar pruebas de rendimiento TCP para un número creciente de flujos paralelos de 5,10,20,30 para el enlace ascendente y descendente.
- Realizar pruebas de rendimiento UDP para el enlace ascendente y descendente utilizando un ancho de banda objetivo de 5,10,15,20 Mbps, Registrar el rendimiento, jitter y la tasa de pérdida de datagramas.
- Realizar una prueba de ping para medir el RTT promedio hacia el dongle LTE, EPC y un servidor externo.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

1.5 Práctica 5:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 5**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema

Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, inicialmente se analizará el efecto del desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación OFDM. A continuación, se llevará a cabo la aplicación de la estimación y compensación CFO para una señal FDD-LTE capturada en tiempo real.

3. Objetivos

- Analizar el efecto de desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación OFDM.
- Realizar ajustes para compensar el desplazamiento temporal y frecuencia fraccional para una señal FDD-LTE de enlace descendente.

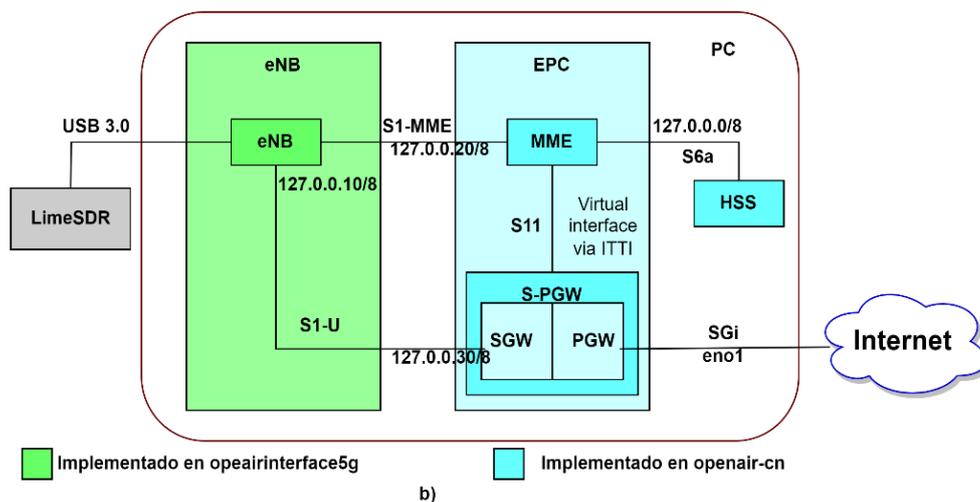
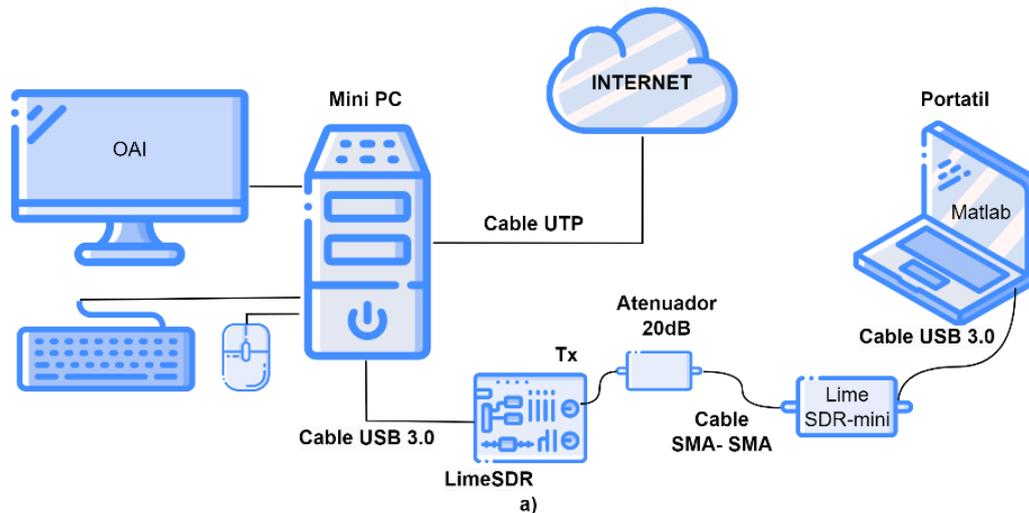
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre modulación y demodulación OFDM para una señal FDD LTE, estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML), compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de desplazamiento de frecuencia portadora (CFO).

5. Materiales y equipos

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| - Mini PC con OpenAirInterface. | - Cable SMA(m) a SMA(m). |
| - LimeSDR | - LimeSDR mini |
| - 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | - Portátil. |
| - Atenuador 20dB. | - Matlab. |
| - Cable UTP. | |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Impacto del desplazamiento de temporización y CFO en la demodulación OFDM.

- Generar un código en Matlab que simule el proceso de modulación y demodulación de símbolos utilizando la modulación OFDM.
- Generar un código en Matlab para considerar el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia en 3 casos.
 - Sin corrección de tiempo y CFO.
 - Solo con corrección de tiempo.
 - Con corrección de tiempo y corrección de CFO.

Tarea 2: Compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de CFO.

- Generar un código en Matlab que permita calcular la estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML).
- Generar un código en Matlab para identificar los efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP) en los siguientes casos:
 - Longitud CP0 real y longitud CP1 asumido.
 - Longitud CP1 real y longitud CP0 asumido.

Tarea 3: Capturar señal del enlace descendente LTE.

- Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
- Configurar software OAI.
- Iniciar la red LTE.
- Capturar señal LTE.

Tarea 4: Compensación de temporización y estimación de CFO en señal LTE.

- Transferir la captura de señal a Matlab.
- Importar muestras y trazar espectro de potencia y función objetivo.
- Generar un código de Matlab para la temporización de ML y la estimación y compensación de CFO.

8. Interpretación de resultados

- Realice una comparativa entre los diferentes casos realizados sobre el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia.
- Realice una comparativa entre los diferentes casos realizados de efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP).
- Determine la estructura de símbolos OFDM de la señal LTE capturada.
- Realice un análisis de la función objetivo de la estimación temporal en la señal LTE capturada.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

1.6 Práctica 6:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 6**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema

Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda

2. Introducción

En esta práctica se comprenderá la secuencia Zadoff-Chu y la secuencia de longitud máxima utilizadas en PSS y SSS para el proceso de detección de ID de celda para una señal LTE.

3. Objetivos

- Detectar el ID de celda de sector utilizando la señal de sincronización primaria.
- Detectar el ID de celda y temporización de tramas, empleando la señal de sincronización secundaria.

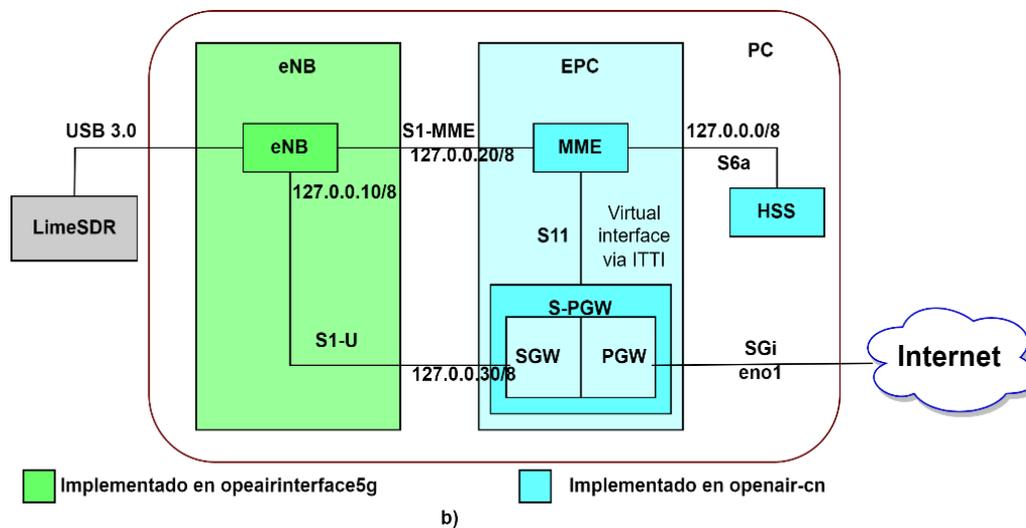
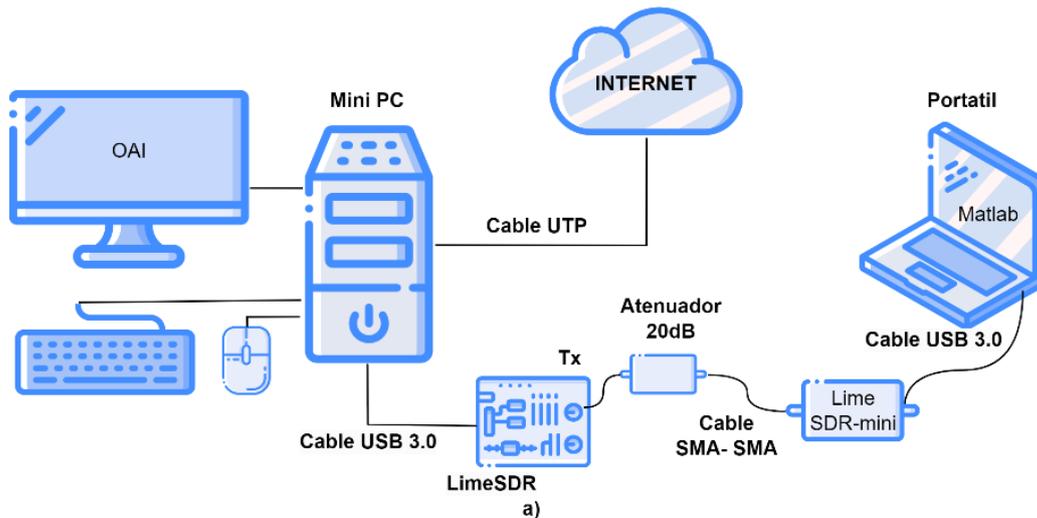
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre el proceso de sincronización de enlace descendente en la red LTE para obtener la identificación de la celda y la sincronización de tramas (PSS, SSS).

5. Materiales y equipos

- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR
- cables USB 3.0 (m) a USB (h).
- Atenuador 20dB.
- Cable UTP.
- Cable SMA(m) a SMA(m).
- LimeSDR mini
- Portátil.
- Matlab.

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Capturar señal del enlace descendente LTE.

- Conectar los componentes de la red acorde a la topología.
- Configurar software OAI.
- Iniciar la red LTE.
- Capturar señal LTE.
- Transferir la captura de señal a Matlab

Tarea 2: Detección de CFO e ID de celda mediante señal de sincronización primaria

- Desarrollar un programa en Matlab que permita generar y trazar el PSS para un valor de raíz específico.
- Desarrollar un código en Matlab que permita generar la función de autocorrelación de la secuencia de Zadoff-Chu.
- Desarrollar un código en Matlab que permita simular las salidas de correlación cruzada para escenarios de secuencia Zadoff-Chu emparejados y no coincidentes.
- Desarrollar un programa en Matlab que permita la sincronización de símbolos y recuperación del CFO e ID de celda de una señal LTE.

Tarea 3: Detección del grupo de ID de celda y la temporización de tramas mediante señal de sincronización secundaria.

- Generar un código en Matlab que permita generar los SSS
- Generar un código en Matlab que permita identificar los resultados de correlación cruzada.
- Generar un código en Matlab que permita detectar y recuperar la temporización de la trama de radio de una señal LTE.

8. Interpretación de resultados

- Compare la magnitud y fase del PSS con un valor de índice de raíz de 25,29 y 34.
- Compare la función de autocorrelación y correlación cruzada para las secuencias de Zadoff-Chu con índice de raíz 25, 29 y 34.
- Compare las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada.
- Compare las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

Guía de laboratorio del profesor

2.1 Practica 1:

GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES

LABORATORIO N.º 1

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema

Configuración e implementación de elementos LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de configurar los componentes clave de una red LTE utilizando OpenAirInterface (OAI), incluyendo el eNB y el EPC (MME - HSS - SPGW). Además, se les guiará en la conexión de un dispositivo comercial de usuario final (UE), lo que les permitirá acceder a Internet y experimentar con los servicios y aplicaciones en un entorno de red LTE real. A lo largo de la práctica, los estudiantes adquirirán conocimientos prácticos sobre la configuración y el funcionamiento de una red LTE.

3. Objetivos

- Comprender los fundamentos de la emulación de redes LTE utilizando la plataforma OpenAirInterface (OAI).
- Configurar y poner en funcionamiento los componentes eNB y EPC utilizando OAI para establecer una red LTE, junto con la integración de dispositivos comerciales de usuario (COTS UE).
- Realizar mediciones y análisis de la red LTE implementada.

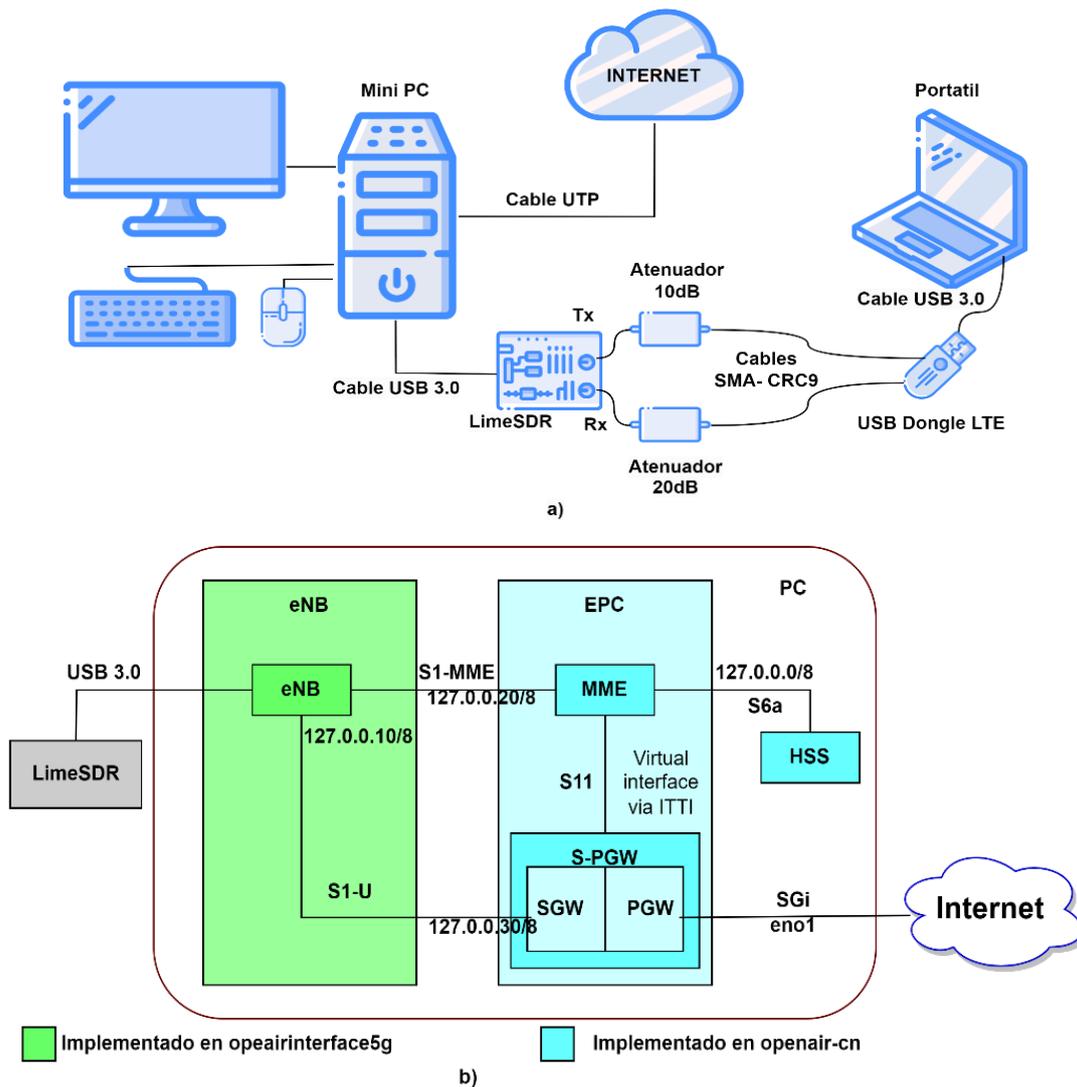
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre redes LTE, incluyendo la arquitectura de la red, los componentes clave eNB, EPC, MME, HSS, SGW, PGW, además investigar sobre los valores RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

5. Materiales y equipos

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mini PC con OpenAirInterface. • LimeSDR • USB Dongle LTE • Portátil. | <ul style="list-style-type: none"> • 2 cables SMA(m) a CRC9. • 2 cables USB (m) a USB (h). • Atenuador 10dB y 20dB. • Cable UTP. |
|---|--|

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Establecer la configuración global del sistema LTE.

- **Conectar los componentes de la red.**

Conecte la Mini-Pc con el hardware (monitor, teclado, mouse) necesario para su funcionamiento.

- Conecte el cable ethernet a un punto de acceso.
- Conecte el mini-Pc con cable USB 3.0 al LimeSDR.
- Conecte el atenuador 10 dB al Tx del LimeSDR
- Conecte el atenuador 20 dB al Rx del LimeSDR.
- Conecte cable SMA-CRC9 desde el atenuador 10 dB (Tx) al USB dongle Tx (lado del conector).
- Conecte cable SMA-CRC9 desde el atenuador 20 dB (Rx) al USB dongle Rx (lado de la curva)
- **No** conecte el USB dongle a Portátil.
- **Verificar la conexión.**

- Encienda la Mini-PC, la contraseña de inicio de sesión es “lte”.
- Verifique que esté conectado a internet a través del cable Ethernet.
- Verifique que LimeSDR esté conectado, abra un terminal nuevo y ejecute los siguientes comandos:

```
$ LimeUtil -find
$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
```

La máquina reconocerá el dispositivo SDR conectado, el resultado de estos comandos se observa en la siguiente figura.

```
lte@lte-desktop:~$ LimeUtil --find
* [LimeSDR-USB, media=USB 3.0, module=STREAM, addr=1d50:6108, serial=00090726074F2F28]

lte@lte-desktop:~$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"
#####
## Soapy SDR -- the SDR abstraction library ##
#####

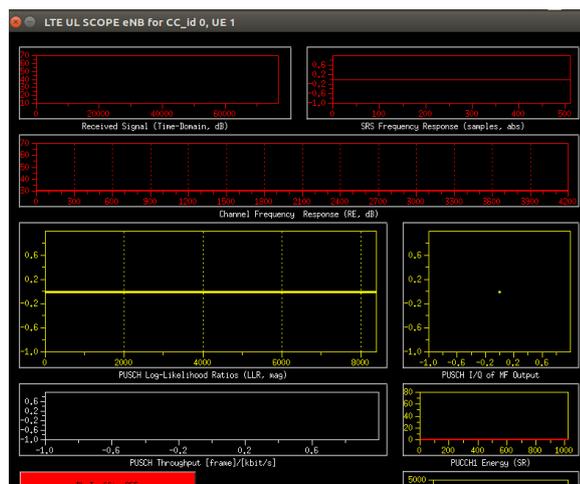
Found device 0
  addr = 1d50:6108
  driver = lime
  label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 90726074F2F28
  media = USB 3.0
  module = STREAM
  name = LimeSDR-USB
  serial = 00090726074F2F28
```

- **Verificar la red LTE.**

Ejecute los siguientes comandos para configurar y dar permisos iniciales del sistema LTE.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
$ sudo ./startLTE_l2.sh
```

Ingrese la contraseña “lte” para ejecutar como superusuario. A continuación, se ejecutarán los componentes de la red y finalmente se abrirán las ventanas del Soft Scope como se puede observar en la siguiente figura.



Finalice la emulación y cierre todas las ventanas.

- **Preparar componentes para iniciar las practica.**

Abra una nueva terminal y ejecute los siguientes comandos para cargar los archivos originales de eNB y EPC.

```
$ cd eNB
$ sudo cp * ~/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/

$ cd..
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/hss.conf /usr/local/etc/oai/hss.conf
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/mme.conf /usr/local/etc/oai/mme.conf
$ sudo cp ~/openair-cn/etc/spgw.conf /usr/local/etc/oai/spgw.conf
```

Tarea 2: Configurar eNB.

- **Configurar banda 7 a 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.**

Diríjase al fichero que contiene las configuraciones de eNB.

```
$ cd ~/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/
```

Abra el archivo de configuración correspondiente a la banda 7 a 25 PRB para LimeSDR.

```
$ sudo nano enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
```

Configure el archivo eNB como se muestra a continuación:

El nombre del eNB se modifica de la siguiente manera:

```
Active_eNBs = ( "eNB_LTEBox");
eNB_name = "eNB_LTEBox";
```

El código de país móvil (MCC) y el código de red móvil (MNC) se modifican de la siguiente manera:

```
mobile_country_code = "901";
mobile_network_code = "70";
```

De acuerdo con la topología de la red configure la dirección IP MME de la siguiente manera.

```
////////// MME parameters:
mme_ip_address = ( {
                                IPv4 = "127.0.0.20";
                                IPv6 = "192:168:30::17";
                                active = "yes";
                                preference = "IPv4";
                                }
);
```

Asigne las direcciones IP de las interfaces S1-MME y S1-U acorde a la topología de red:

```
NETWORK_INTERFACES :
{
ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME      = "lo";
ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME        = "127.0.0.10/8";

ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U         = "lo";
ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U           = "127.0.0.10/8";
ENB_PORT_FOR_S1U                   = 2152; # Spec 2152
};
```

Repita las mismas configuraciones para los archivos: enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf y enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf.

Tarea 3: Configurar EPC

- **Configurar HSS**

Diríjase a la carpeta de archivos de configuración EPC Y abra el archivo de configuración hss para editarlo.

```
$ cd /usr/local/etc/oai
$ sudo nano hss.conf
```

Cambie el archivo como se muestra a continuación:

```
MYSQL_server      = "127.0.0.1";      # HSS s6a bind address
MYSQL_user        = "root";
MYSQL_pass        = "lte";
MYSQL_db          = "oai_db";        # Your database name

## HSS options
OPERATOR_key = "";
#OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3"; # OP key ...
```

presione “Ctrl+x” guarde el archivo y salga.

- **Configurar MME**

Abra el archivo MME para editarlo mediante el siguiente comando.

```
$ sudo nano mme.conf
```

Configure el archivo como se muestra a continuación:

```
MME :
{
    REALM                = "OpenAir5G.Alliance";
    ...
}

GUMMEI_LIST = (
    {MCC="901" ; MNC="70" ; MME_GID="4" ; MME_CODE="1" ; }
);

TAI_LIST = (
    {MCC="901" ; MNC="70" ; TAC = "1" ; }
);
```

Configure las direcciones IP de las interfaces de red:

```
NETWORK_INTERFACES :
{
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME      = "lo";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME        = "127.0.0.20/8";

    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME     = "lo";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME       = "127.0.0.20/8";
    MME_PORT_FOR_S11_MME                = 2123;
};
```

Cambie la dirección IP del S-GW de la siguiente manera

```
S-GW :
{
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11           = "127.0.0.30/8";
};
```

- **Configurar SPGW**

Configure las direcciones IP de las interfaces de red para S-GW de la siguiente manera:

```
S-GW :
{
    NETWORK_INTERFACES :
    {
        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11           = "lo";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11           = "127.0.0.30/8";

        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "lo";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP = "127.0.0.30/8";
        SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP     = 2152;

        SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP     = "none";
        SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP       = "0.0.0.0/24";
    };
};
```

Cambie las direcciones IP de las interfaces de red para P-GW de la siguiente manera:

```
NETWORK_INTERFACES :
{
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8           = "none";
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI            = "eno1";
    PGW_MASQUERADE_SGI                     = "yes";
    UE_TCP_MSS_CLAMPING                     = "no";
};
```

Tarea 4: Poner en marcha el sistema LTE

- **Activar certificados HSS y MME**

Utilice los siguientes comandos para activar los certificados HSS y MEE.

```
$ cd ~/openair-cn
$ source oaienv
$ cd scripts
$ ./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
hss.OpenAir5G.Alliance
$ ./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
mme.OpenAir5G.Alliance
```

En la siguiente figura se observa el mensaje de validación de los certificados.

```
HSS S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
MME S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
```

- **Comprobar la disponibilidad de archivos PEM**

Utilice el siguiente comando para ver la disponibilidad de los archivos PEM.

```
$ ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem
```

Los archivos “.pem” permiten utilizar los archivos de certificados y llaves del hss y mme. En siguiente figura se observa el resultado de este paso.

```

-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.key.pem

```

- **Cargar base de datos para el HSS**

Utilice el siguiente comando para ejecutar la base de datos.

```
$ ~/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte oai_db
~/epc/hss-database/hss_db.sql
```

El comando crea e importa datos para la BDD, si el proceso fue el correcto se mostrará mediante mensajes como se puede observar en la siguiente figura.

```

mysqladmin: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
Database "oai_db" dropped
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db creation succeeded
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db import succeeded

```

- **Ejecutar HSS**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

- **Ejecutar MME**

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0              | 0                          | 0                            |
Connected UEs  | 0              | 0                          | 0                            |
Default Bearers | 0              | 0                          | 0                            |
S1-U Bearers   | 0              | 0                          | 0                            |
===== STATISTICS =====

```

- **Ejecutar SPGW**

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

```
- Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

- **Ejecutar eNB**

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

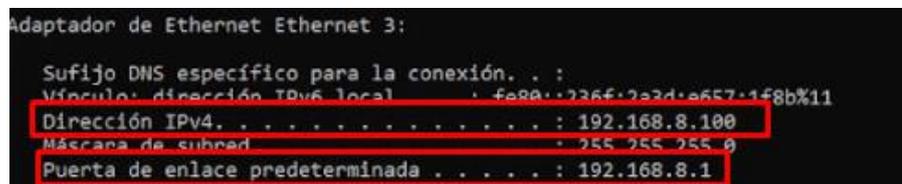
```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

Al finalizar y si todos los pasos fueron los correctos aparecerán las ventanas Soft Scope.

Tarea 5: Configurar USB dongle LTE

- **Instalar dongle USB LTE**

Conecte el dongle USB LTE al portátil. Al hacerlo, se creará una interfaz adicional con la dirección IP 192.168.8.100. Para verificar la conexión, abre la ventana del "Símbolo del sistema" y ejecuta el comando "ipconfig". Observarás la presencia de la interfaz adicional correspondiente al dongle LTE en la lista de interfaces y sus respectivas direcciones IP. Esto te asegurará que el dongle LTE está correctamente conectado y configurado en tu sistema.

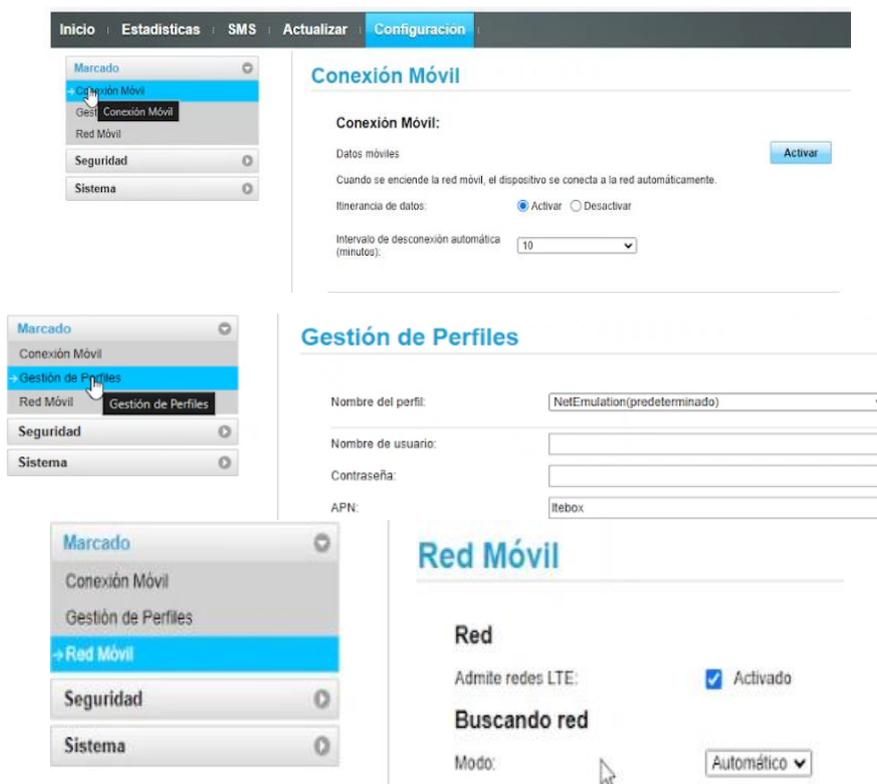


```
Adaptador de Ethernet Ethernet 3:
Sufijo DNS específico para la conexión. . . :
Vínculo dirección IPv6 local . . . . . : fe80::236f:2a3d:e657:1f8b%11
Dirección IPv4. . . . . : 192.168.8.100
Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.8.1
```

Al conectar el Dongle USB LTE, tu navegador web se abrirá automáticamente y mostrará una página web con la dirección 192.168.8.1. En caso de que esto no suceda, puedes ingresar manualmente dicha dirección en la barra de direcciones del navegador. Al cargar la página, se observa el estado "Sin servicio", significa que el dispositivo UE aún no está conectado a la red LTE. Esto indica que es necesario establecer una conexión para acceder a los servicios y funcionalidades de la red.

- **Establecer conexión para Dongle USB LTE**

Accede al menú "Configuración" en la página del dongle LTE y activa la opción "Datos móviles". Luego, se crea un nuevo perfil, utilizando el nombre APN como "ltebox". A continuación, se habilita la opción "Admitir redes LTE". Como se muestra a continuación.



Una vez realizados estos pasos, podrás navegar por Internet con el dongle LTE conectado a la red LTE.

8. Interpretación de resultados

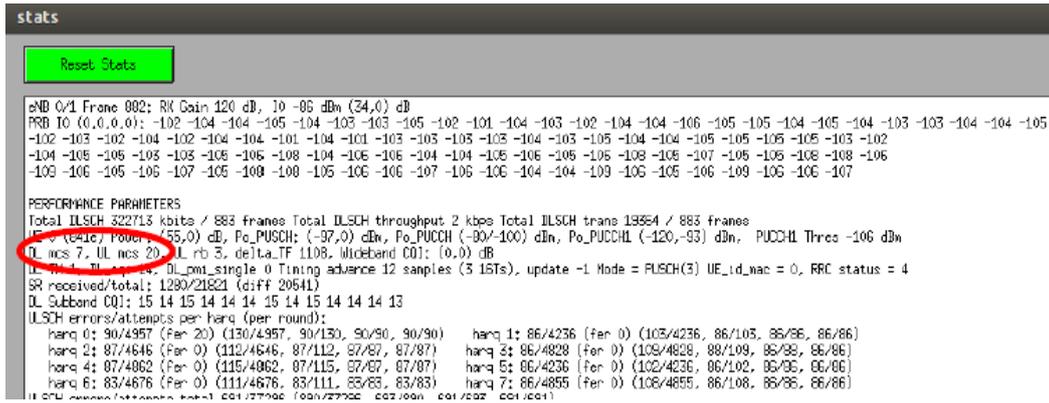
- **Realizar pruebas de velocidad, repetir la prueba 3 veces y registrar los resultados.**

Realice pruebas de velocidad de la red utilizando “speedtest”, con diferentes PRBs.

PRBs	25	50	100
Velocidad de descarga			
Prueba 1 (Mbps)	4.87	7.05	30.62
Prueba 2 (Mbps)	5.34	7.02	29.56
Prueba 3 (Mbps)	4.77	7.30	25.35
Promedio	4.99	7.12	28.51
Velocidad de carga			
Prueba 1 (Mbps)	7.84	18.3	18.45
Prueba 2 (Mbps)	7.88	18.31	18.48
Prueba 3 (Mbps)	8.18	18.07	18.38
Promedio	7.96	18.22	18.43

- **Evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en ambos sentidos. Registrar los valores mínimos y máximos.**

Utilice la ventana "Stat", donde puede observar los índices de Modulación y Codificación (MCS) tanto para la descarga (DL MCS) como para la carga (UL MCS).



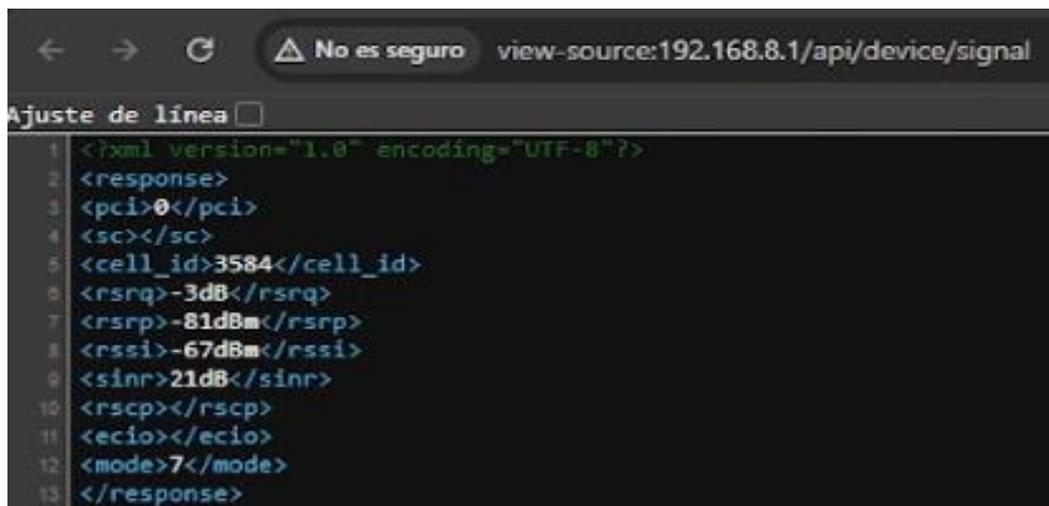
Esto permite evaluar la calidad y eficiencia de la transmisión en ambos sentidos. El registro de estos valores mínimos y máximos son presentados en la siguiente tabla.

PRBs	25	50	100
DL MCS (max.)	28	25	13
DL MCS (min)	12	8	6
UL MCS (max)	20	20	20
UL MCS (min)	3	3	2

El MSC en la descarga disminuye a medida que aumenta el número de PRBs, mientras que para la carga el MCS se mantiene constante.

- Registrar los valores de RSRQ, RSRP, RSSI y SINR.

Para registrar los valores de RSRQ, RSRP, RSSI y SINR, abra una pestaña en el navegador, ingrese a la siguiente dirección “ <http://192.168.8.1/api/device/signal> ” haga clic derecho en la página y seleccionar “Ver código fuente de la página” se observa las mediciones relacionadas.



PRBs	25	50	100
RSRQ	-10 db	-3db	-4db
RSRP	-44dbm	-81dbm	-45dbm
RSSI	-51dbm	-67dbm	-51dbm
SINR	6db	21db	23db

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

2.2 Practica 2:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 2**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Análisis del espectro LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes examinarán el espectro LTE, explorando sus características y propiedades. Además, podrán visualizar las señales de sincronización transmitidas en el contexto de esta tecnología. Este ejercicio práctico permitirá a los estudiantes adquirir una comprensión más profunda de los aspectos técnicos y operativos asociados con la red LTE

3. Objetivos

- Analizar las variaciones y patrones de las señales dentro del espectro LTE.
- Profundizar la comprensión del proceso técnico de sincronización en el funcionamiento de las señales LTE.

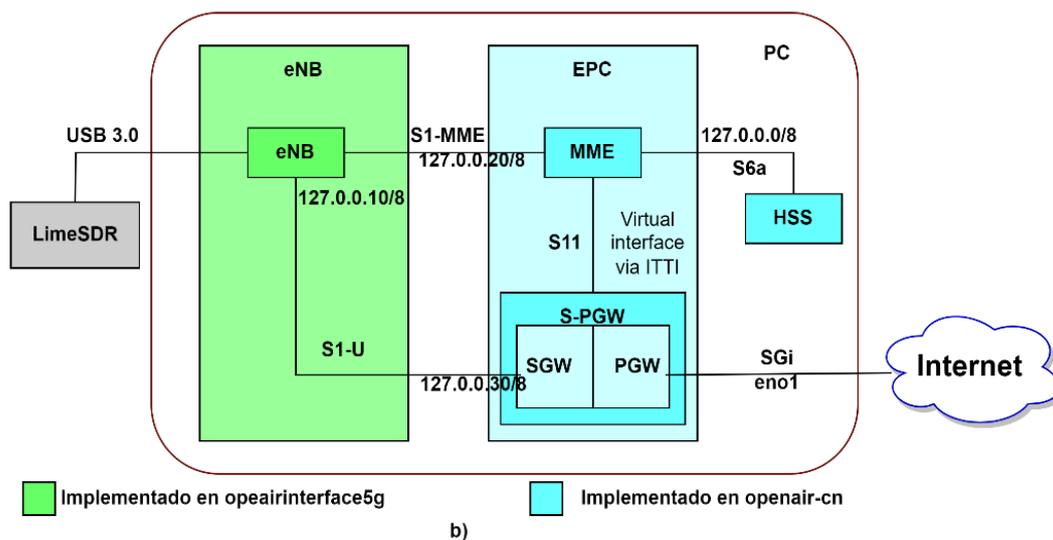
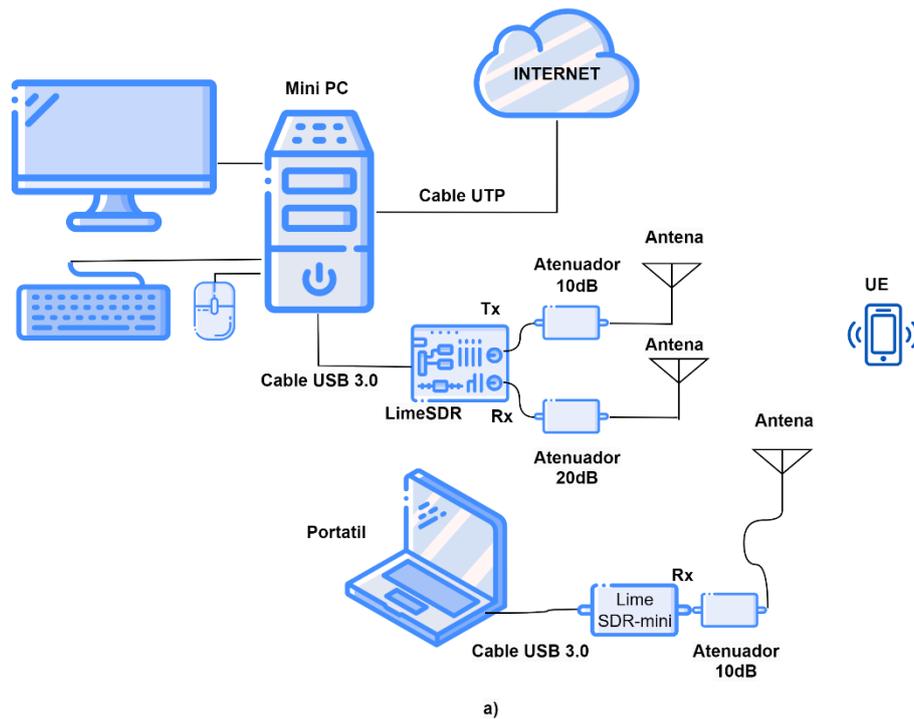
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre: GNU Radio, bandas LTE, uso de bandas pareadas para LTE, señal de sincronización a una red LTE.

5. Materiales y equipos

- | | |
|---------------------------------|-----------------------|
| • Mini PC con OpenAirInterface. | • 2 atenuadores 10dB. |
| • LimeSDR y limeSDR mini. | • Atenuador 20 dB |
| • 2 cables USB 3.0. | • Portátil. |
| • Cable SMA(m) a SMA(m). | • Celular. |
| • Cable UTP. | • 3 antenas. |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1 : Establecer configuración global del sistema LTE.

- **Conectar los componentes de la red.**

Conecte los componentes de la red tal como se muestra en el diagrama de la topología.

- **Configurar dispositivo celular.**

Retire el chip del Dongle LTE y colóquelo en el celular.

Realice las siguientes configuraciones en el celular, dentro de los ajustes de la red móvil

- **Nombre:** puede ser cualquier valor

- **APN:** debe coincidir con el valor del campo apn de la tabla pdn en este caso “ltebox”.
- **MCC y MNC:** debe coincidir con el valor de la red “901 y 70” respectivamente.
- **Tipo de conexión:** debe tener el valor LTE.

Tarea 2: Crear analizador de espectros GNU radio.

- **Instalar GNU Radio.**

Instale Python en su versión 2.7.16, desde el siguiente enlace “<https://www.python.org/downloads/release/python-2716/>”, seleccione la versión para Windows como se observa en la siguiente figura

Python 2.7.16

Release Date: March 4, 2019

Python 2.7.16 is a bugfix release in the Python 2.7 series.

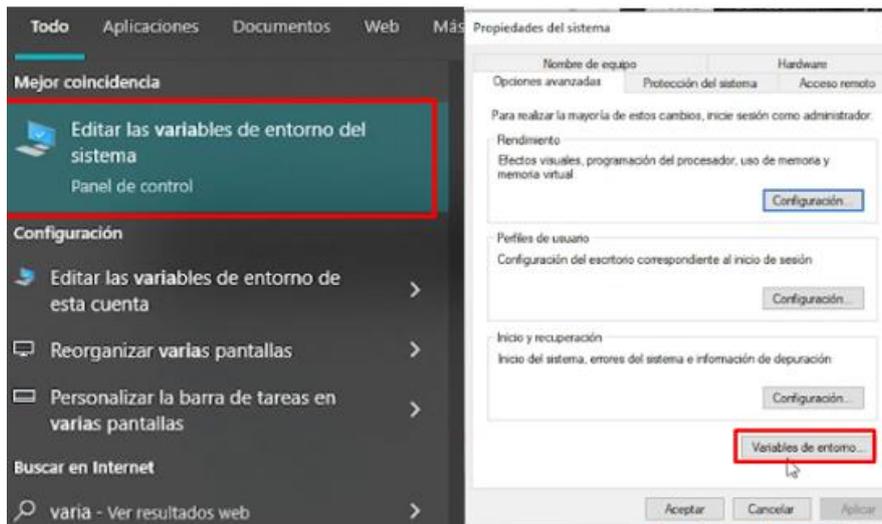
Note:
Attention macOS users: As of 2.7.16, all current python.org macOS installers ship with builtin copies of OpenSSL and Tcl/Tk 8.6. See the installer README for more

[Full Changelog](#)

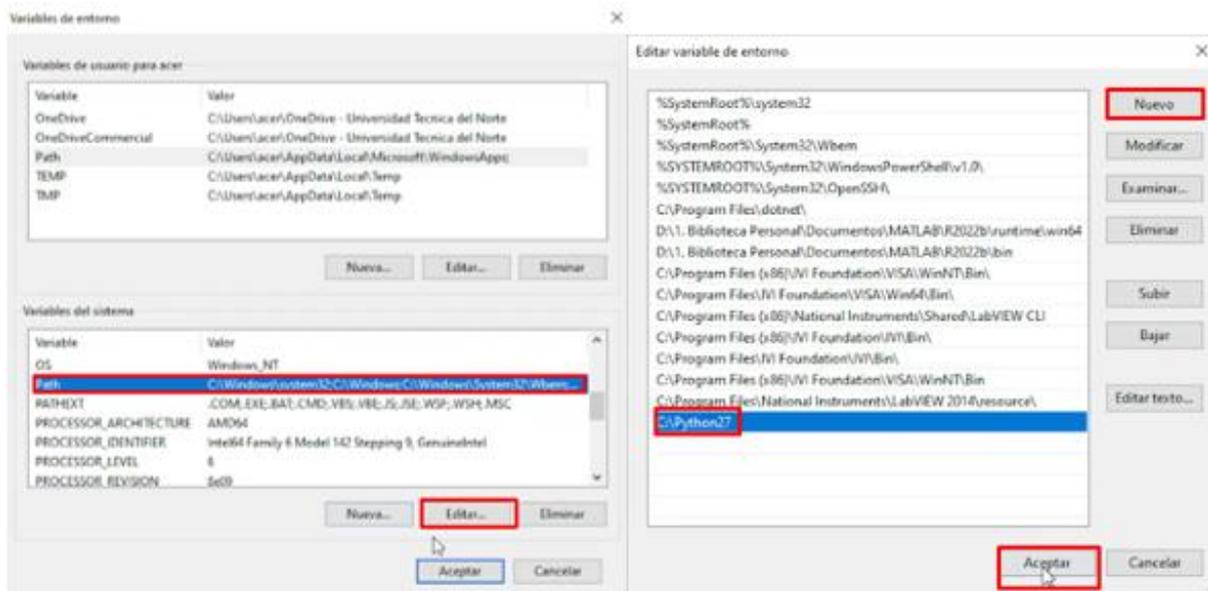
Files

Version	Operating System	Description	MD5 Sum
Gzipped source tarball	Source release		f1a2ace631068444831d01485466ece0
XZ compressed source tarball	Source release		30157d85a2c0479c09ea2cbe61f2aaf5
macOS 64-bit/32-bit installer	macOS	for Mac OS X 10.6 and later	70b0f58eba7b78b174056369b076c085
macOS 64-bit installer	macOS	for OS X 10.9 and later	a3af70c13c654276d66c3c1cb1772dc7
Windows debug information files	Windows		f94690edbbf58b10bfd718badc08b1f8
Windows debug information files for 64-bit binaries	Windows		4292c4db30c27fedbbe8544967b6452
Windows help file	Windows		3bbf29b6712b231d2dff9211fc7b21e2
Windows x86-64 MSI installer	Windows	for AMD64/EM64T/x64	2fe86194bb4027be75b29852027f1a79
Windows x86 MSI installer	Windows		912428345b7e0428544ec4edcdf70286

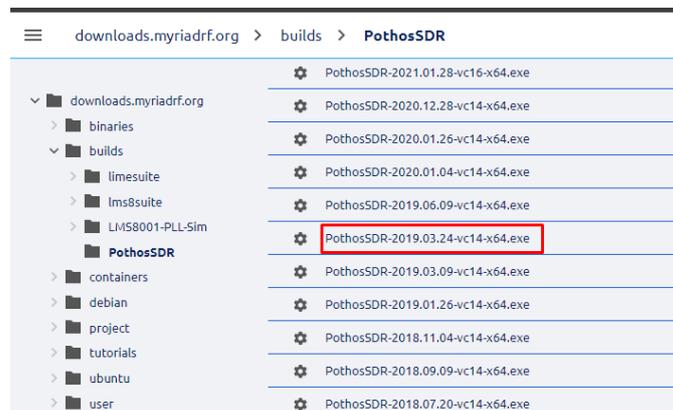
Agregue la ruta del sistema mediante las variables de entorno. Ingrese a Editar las variables de entorno del sistema, en la ventana que se despliega dar clic en variables de entorno.



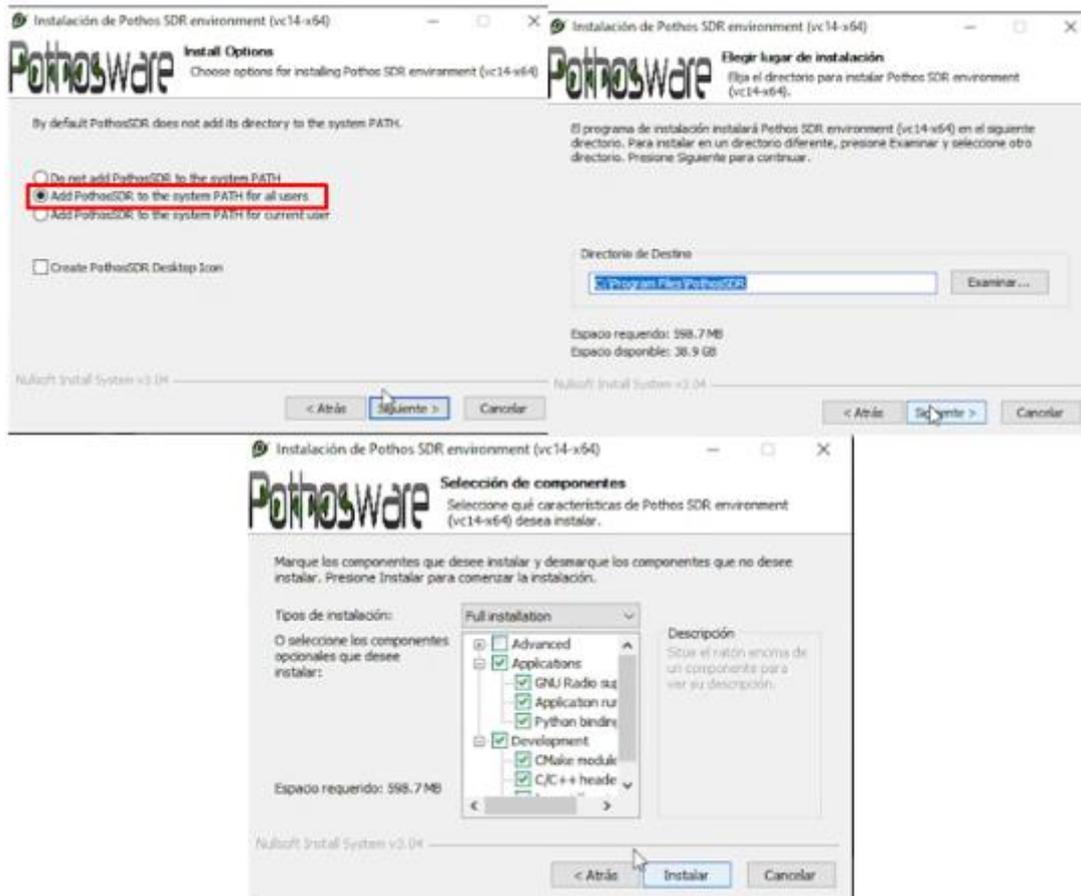
Una vez accedido a las variables de entorno, busque y selecciona las variables de ruta, haga clic en la opción editar, en la ventana que se despliega haga clic en nuevo y cree la variable de entorno “C:\Python27”, finalmente de en aceptar.



Instale el entorno PothosSDR desde el siguiente enlace: “<https://downloads.myriadrf.org/builds/PothosSDR/>” el instalador debe ser PothosSDR-2019.03.24-vc14-x64.exe.



Instale el entorno Photos SDR, acepte los términos de licencia, añada el programa para todos los usuarios, seleccione el directorio donde se va a instalar por defecto , la carpeta del menú de inicio donde va a contener el archivo y en la selección de componentes se realiza una instalación completa.



Ejecuté GNU Radio el cual realiza una verificación de la instalación, al finalizar presioné cualquier tecla para ejecutar la interfaz.

```

C:\Python27\python.exe
216kB)
100% |#####| 225kB 497kB/s
Installing collected packages: PyOpenGL-accelerate
Successfully installed PyOpenGL-accelerate-3.1.1
You are using pip version 18.1, however version 20.3.4 is available.
You should consider upgrading via the 'python -m pip install --upgrade pip' command.
Done!
Handling issues for IMPORT_GR...
Error: GNURadio modules missing from PYTHONPATH

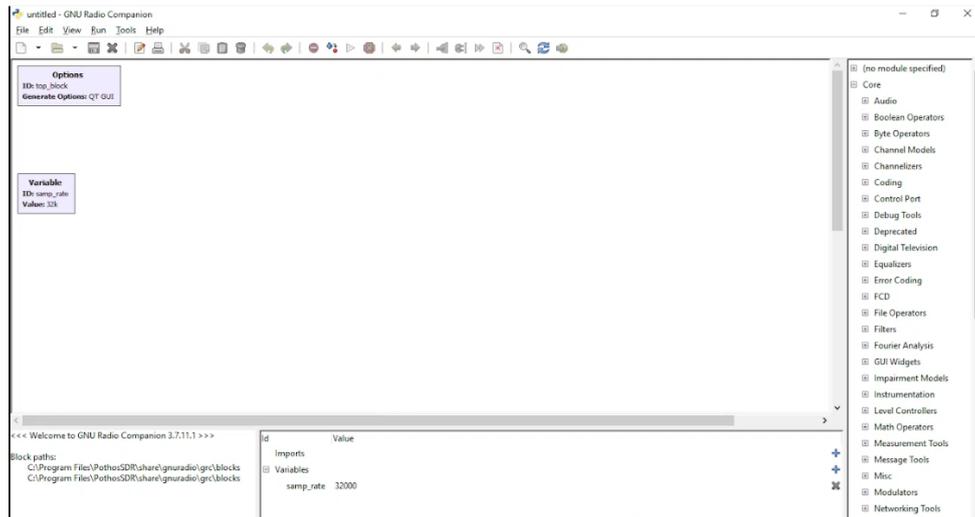
Current search path:
* C:\Program Files\PothosSDR\bin
* C:\Program Files\PothosSDR\lib\python2.7\site-packages
* C:\Windows\SYSTEM32\python27.zip
* C:\Python27\DLLs
* C:\Python27\lib
* C:\Python27\lib\plat-win
* C:\Python27\lib\lib-tk
* C:\Python27
* C:\Python27\lib\site-packages

Current PYTHONPATH: ''
Adding C:\Program Files\PothosSDR\lib\python2.7\site-packages to the PYTHONPATH

The PYTHONPATH for the current user has been modified
Open a new command window and re-run this script...

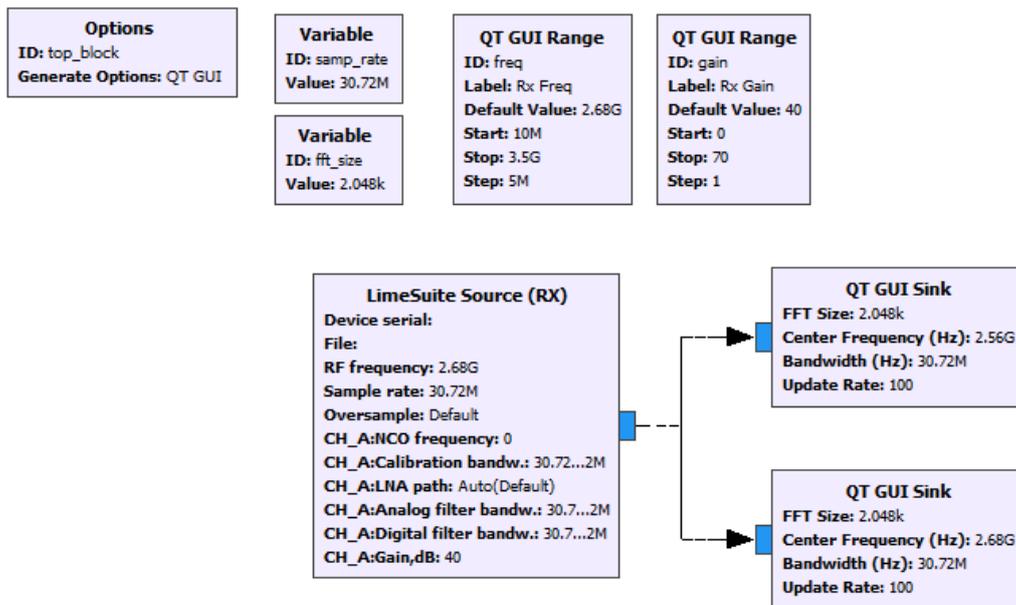
Changes made! Please re-run this script in a new terminal.
Presione una tecla para continuar . . .

```



- **Crear y configurar analizador de espectro.**

En GNU Radio cree el analizador de espectro utilizando los bloques que se observan a continuación.



Las configuraciones que se realizan para el bloque “LimeSuite Source (RX)” son:

- “RF frequency” con la variable freq.
- “Sample rate” con la variable samp_rate.
- Para las opciones "Calibration bandw.", "Analog filter bandw." y "Digital filter bandw." en la pestaña CH_A se cambian el valor a samp_rate.

Al utilizar la red el modo FDD se utiliza 2 bloques “QT GUI Sink” que permiten visualizar la transmisión para el enlace ascendente y descendente.

Las configuraciones de estos bloques son:

- “FTT Size” con la variable fft_zise.

- “Center Frequency” con un valor de 2.68 G para el enlace descendente y un valor de 2.56G para el enlace ascendente.
- “Bandwidth” con la variable samp_rate.
- “Update Rate” un valor de 100.

Para realizar pruebas con diferente PRB el "samp_rate" se configura a 30.72 MHz para señal de 20 MHz, para señales LTE de 5 y 10 MHz se usa frecuencias de muestreo de 7.68 MHz y 15.36 MHz, respectivamente.

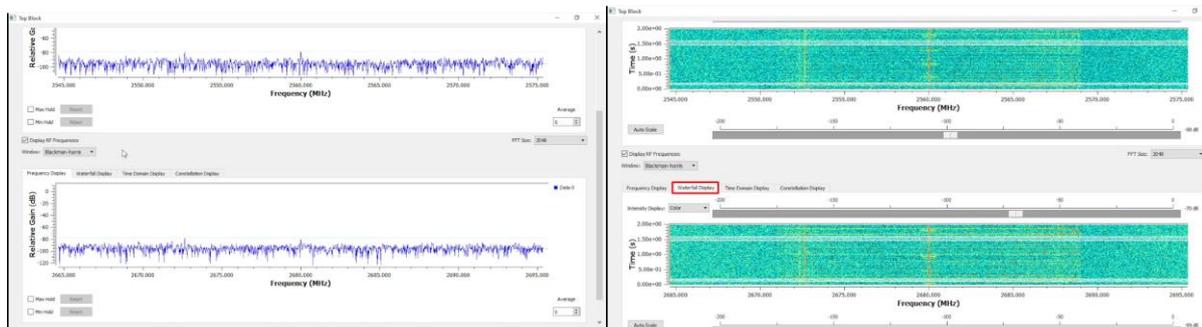
- **Ejecutar analizador de espectro.**

Para ejecutar el diagrama se da clic en el icono de reproducir.



Nota. Elaboración propia.

Se despliega una nueva ventana, en el cual se puede observar el analizador de espectro para las dos frecuencias utilizadas por la red LTE, también permite identificar la señal mediante la visualización de ventana.



Tarea 3: Ejecutar red LTE.

- **Activar certificados HSS y MME.**

Utilice los siguientes comandos para activar los certificados HSS y MEE.

```
$ cd ~/openair-cn
$ source oaienv
$ cd scripts
$ ./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
hss.OpenAir5G.Alliance
$ ./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
mme.OpenAir5G.Alliance
```

En la siguiente figura se observa el mensaje de validación de los certificados.

```
HSS S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
MME S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
```

- **Comprobar la disponibilidad de archivos PEM**

Utilice el siguiente comando para ver la disponibilidad de los archivos PEM.

```
$ ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem
```

Los archivos “.pem” permiten utilizar los archivos de certificados y llaves del hss y mme. En siguiente figura se observa el resultado de este paso.

```
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.key.pem
```

- **Cargar base de datos para el HSS**

Utilice el siguiente comando para ejecutar la base de datos.

```
$ ~/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte oai_db
~/epc/hss-database/hss_db.sql
```

El comando crea e importa datos para la BDD, si el proceso fue el correcto se mostrará mediante mensajes como se puede observar en la siguiente figura.

```
mysqladmin: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
Database "oai_db" dropped
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db creation succeeded
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db import succeeded
```

- **Ejecutar HSS**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

- **Ejecutar MME**

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```
===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0               | 0                         | 0                           |
Connected UEs  | 0               | 0                         | 0                           |
Default Bearers| 0               | 0                         | 0                           |
SI-U Bearers   | 0               | 0                         | 0                           |
===== STATISTICS =====
```

- **Ejecutar SPGW**

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

- Initializing SPGW-APP task interface: DONE

- **Ejecutar eNB**

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

Al finalizar y si todos los pasos fueron los correctos aparecerán las ventanas Soft Scope.

- **Conectar UE.**

Busque la red 90170 para conectar el móvil.

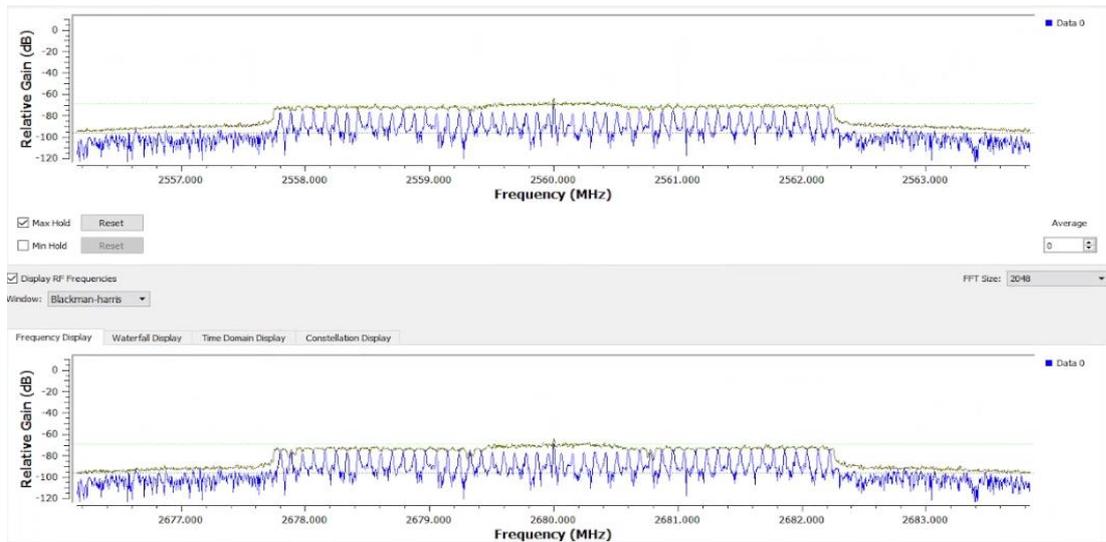


8. Interpretación de resultados

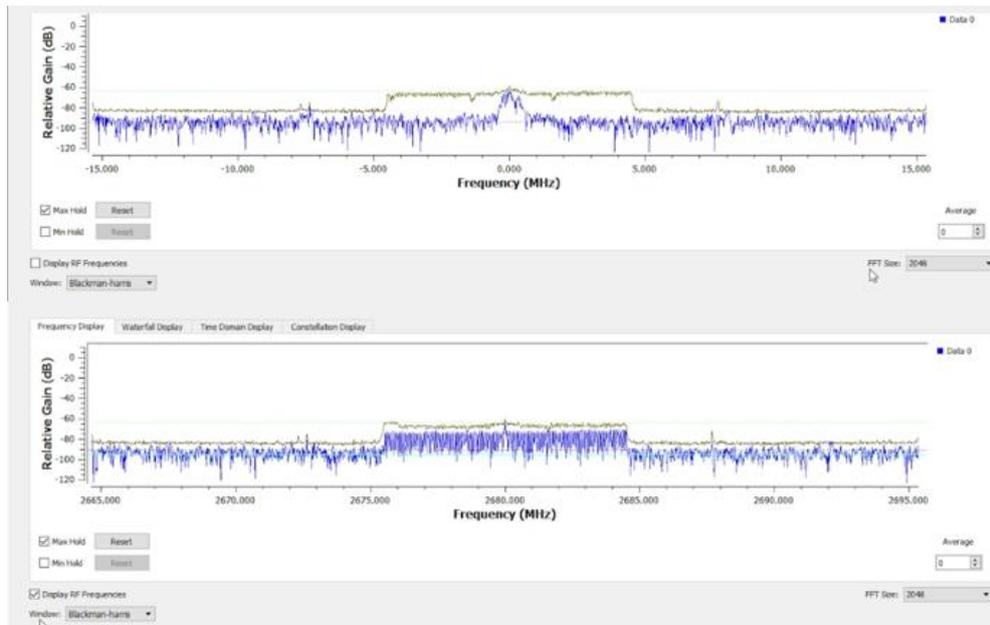
- **Identificar las frecuencias y el ancho de banda para cada configuración 25 PRB, 50 PRB y 100 PRB.**

Para la configuración de la red LTE con 25 PRB, puede observar que el ancho de banda corresponde a 5 MHz aproximadamente, el ancho de banda para 50 PRBs corresponde a 10 MHz aproximadamente y el ancho de banda para 100 PRBs corresponde aproximadamente a 20 MHz. El número de PRB está directamente relacionado con el ancho de banda y la capacidad de la red.

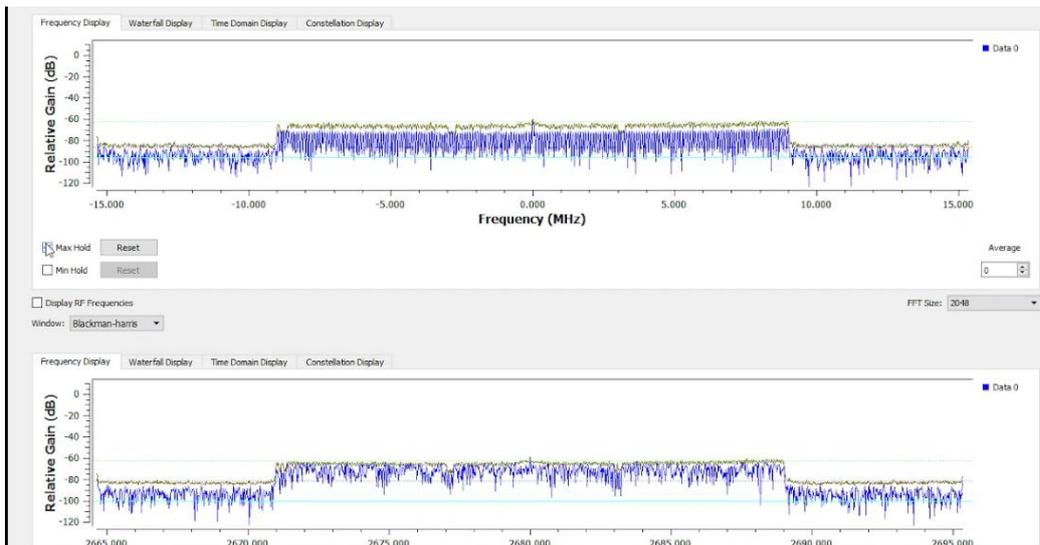
Ancho de banda 25 PRB



Ancho de banda 50 PRB



Ancho de banda 100 PRB

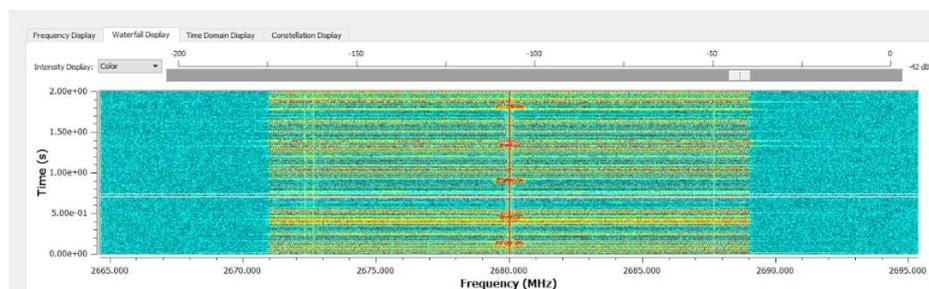


Un bloque de recursos (RB) es la unidad más pequeña que se puede asignar para la transmisión. Físicamente, un RB abarca 0,5 ms (equivalente a 1 ranura) en el dominio del tiempo y 180 kHz en el dominio de la frecuencia. Al multiplicar el tamaño de un RB por el número total de PRBs se tiene el ancho de banda de la transmisión, sería de 4.5 MHz para 25 PRBs, 9 MHz para 50 PRBs y 18 MHz para 100 PRBs.

- **Identificar la señal de sincronización LTE.**

Para identificar la señal de sincronización se utiliza la visualización de cascada como se puede observar a continuación.

Señal de sincronización 100 PRB

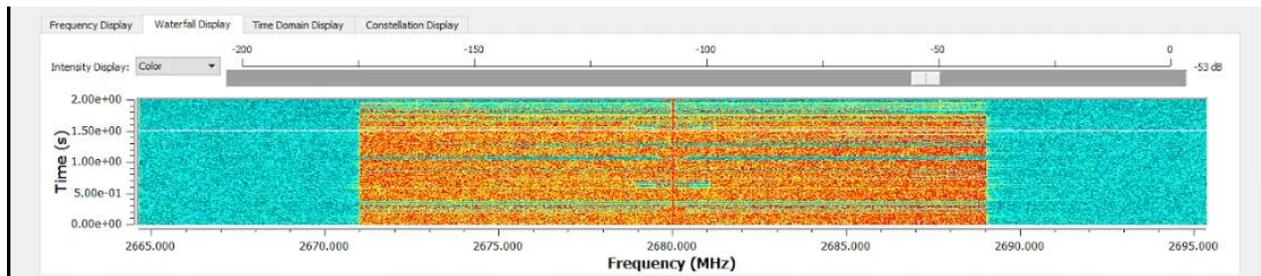


la señal FDD LTE se transmite en tramas de 10 ms, y cada trama se compone de 20 ranuras de 0,5 ms cada una. la señal de sincronización primaria (PSS) y la señal de sincronización secundaria (SSS) se transmiten en cada portadora del componente de enlace descendente para ayudar en la búsqueda de celdas. Se transmiten dos veces por trama de radio de 10 ms.

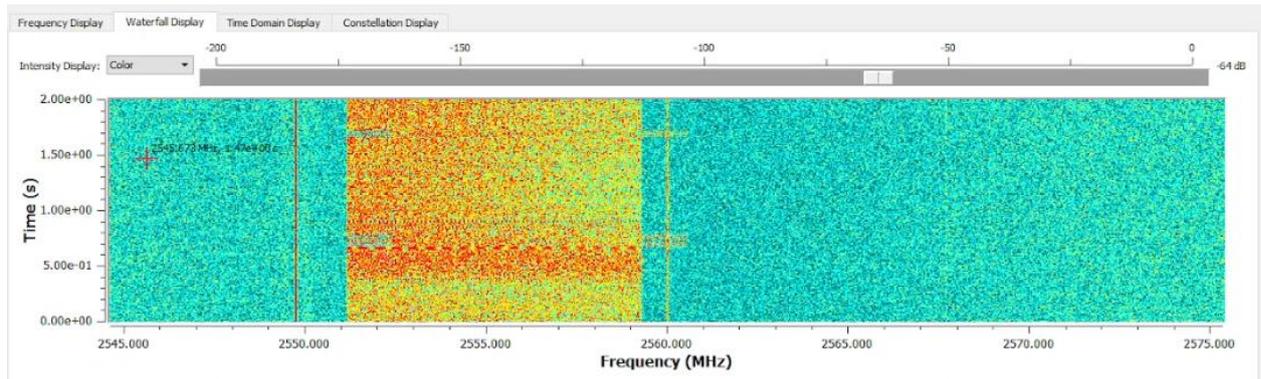
- **Identificar el uso del ancho de banda al realizar pruebas de velocidad.**

En la siguiente figura se observa como el ancho de banda se ocupa en su totalidad al realizar pruebas de velocidad, ya que el servicio o aplicación utilizado intenta utilizar la mayor cantidad del ancho de banda disponible para obtener una medición precisa de la velocidad de conexión en ese momento, si el resultado de la prueba es bajo se puede identificar que el ancho de banda no es ocupado en su totalidad.

Uso del ancho de banda para 100 PRB



Uso del ancho de banda prueba de velocidad baja



9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

2.3 Práctica 3

GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES

LABORATORIO N.º 3

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Análisis del protocolo LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de aprender a utilizar Wireshark para capturar, filtrar e inspeccionar los paquetes de datos que se transmiten en la red LTE. Wireshark es una herramienta de análisis de protocolos de red de código abierto que nos permite obtener una visión detallada del tráfico de la red en tiempo real. Con esta práctica, los estudiantes adquirirán habilidades para examinar y comprender la comunicación entre los diferentes componentes de la red LTE, fundamental para el diagnóstico de problemas y optimizar el rendimiento de la red.

3. Objetivos

- Verificar el comportamiento del tráfico de una red LTE.
- Analizar el protocolo de conexión inicial de un equipo de usuario en la red LTE.

4. Preparatorio, fundamentación Teórica

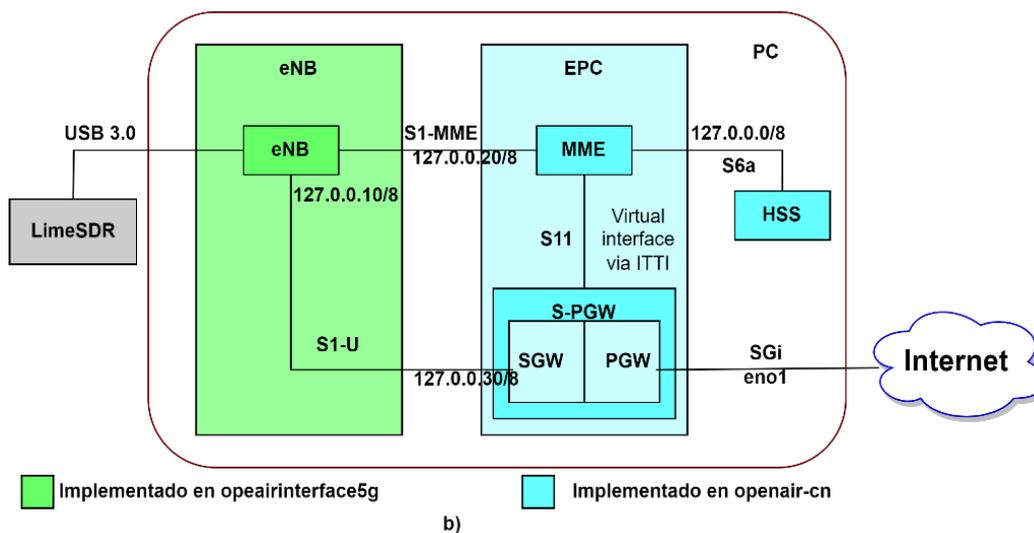
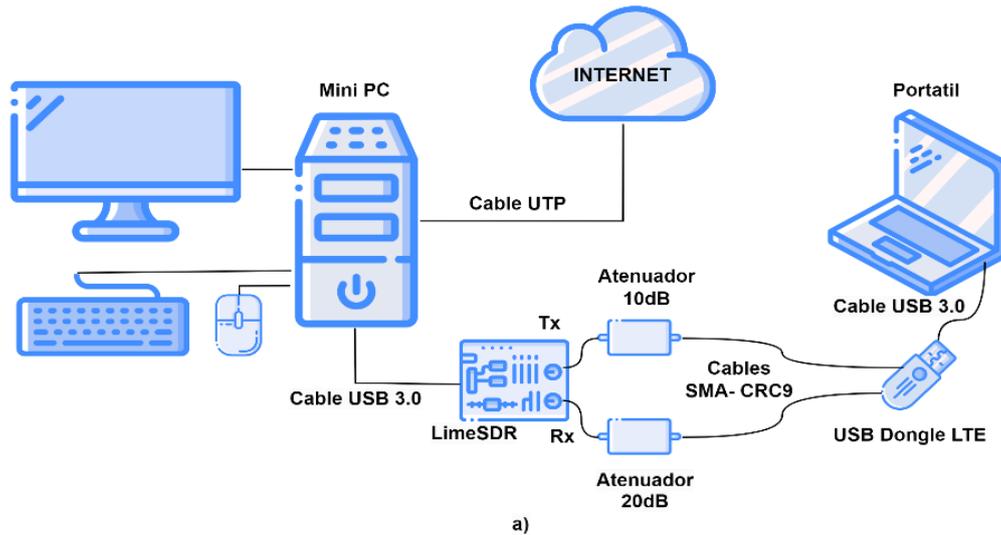
Realizar una consulta bibliográfica sobre:

- Los protocolos de señalización AS (Access Stratum) y NAS (Non-Access Stratum).
- Proceso de adquisición de celdas.
- Procedimiento de acceso aleatorio basado en la contención.
- Proceso de conexión entre un UE y MME.

5. Materiales y equipos

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| • Mini PC con OpenAirInterface. | • 2 cables SMA(m) a CRC9. |
| • LimeSDR | • USB Dongle LTE |
| • 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | • Cable UTP. |
| • Atenuador 10dB y 20dB. | • Portátil. |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Requisitos previos.

- **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**

Conecte los componentes de la red tal como se muestra en el diagrama de la topología, no conecte el dongle USB al ordenador portátil.

- **Configurar software OAI.**

Para llevar a cabo la práctica de laboratorio es necesario realizar la configuración de los componentes de la red, Utiliza la configuración del Laboratorio 1.

Carga los archivos ya configurados mediante los siguientes comandos.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./12cfg.sh
```

Ingrese la contraseña "lte" para ejecutar como superusuario.

```
$sudo ./startLTE_12.sh
```

Aparecerán ventanas nuevas, como el alcance suave y estadísticas L2 y L1. Una vez verificado cierre todas las ventanas abiertas.

Instalar Wireshark.

Realizar la instalación Wireshark en el portátil del estudiante, el programa ya se encuentra previamente instalado en el host de OAI.

- **Tarea 2: Configurar Wireshark.**

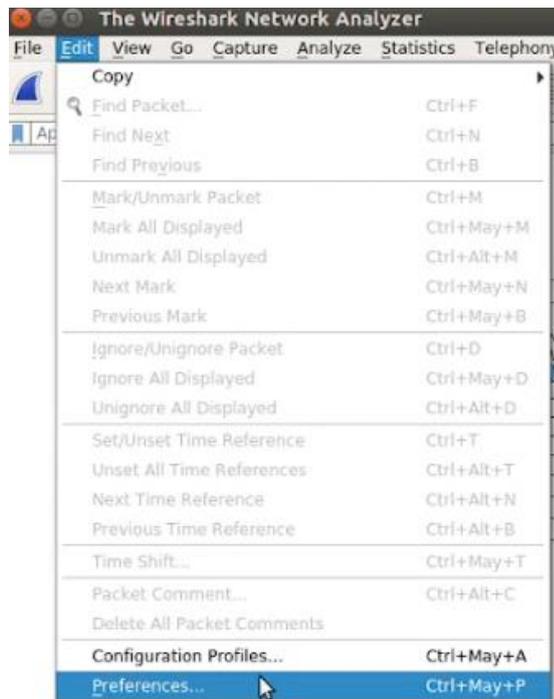
Wireshark permite inspeccionar los paquetes S1AP, GTP, para estos no se necesita una configuración, sin embargo, si vamos a inspeccionar la interfaz MAC utilizando sockets UDP es necesario realizar configuraciones previas que permitan desglosar dicha capa en MAC, RLC, PDCP y RRC.

Ejecute el software Wireshark desde el terminal utilizando el siguiente comando.

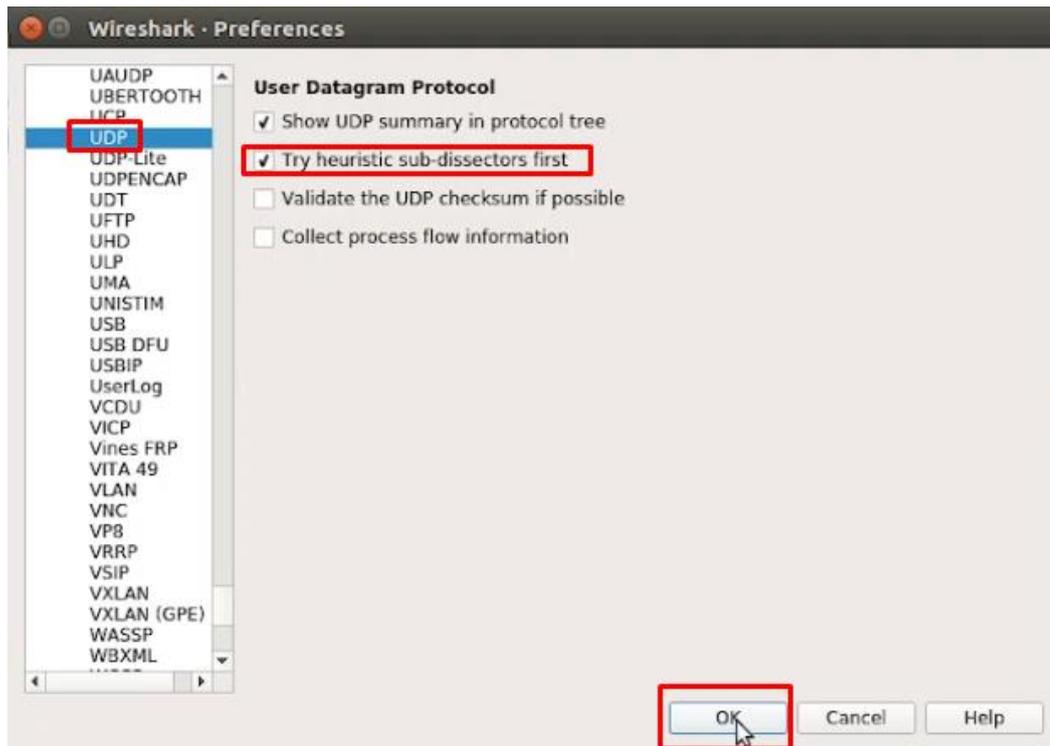
```
$sudo wireshark
```

- **Activar subdirectores heurísticos.**

En el menú haga clic en la opción “Edit” y seleccione la opción preferencias

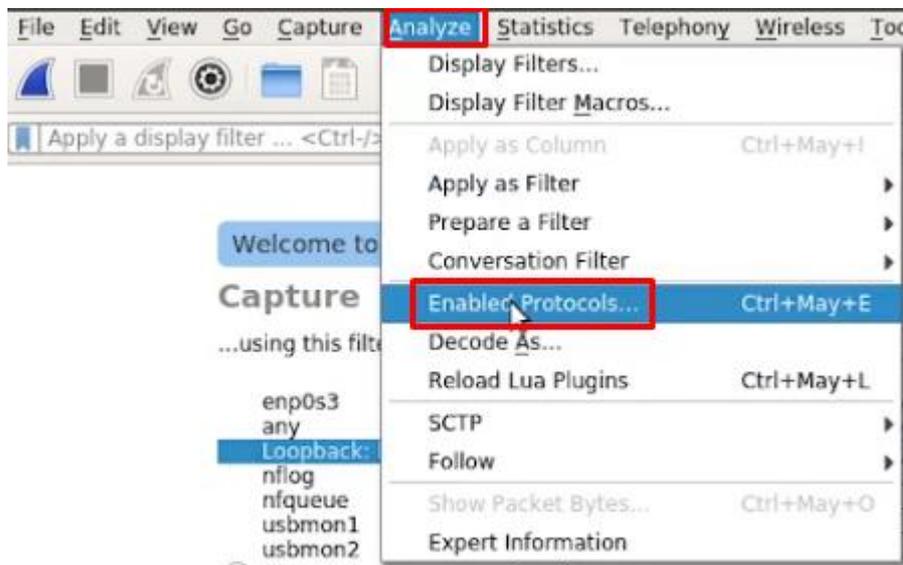


Desenrolle protocolo, vaya a UDP y active “Pruebe primero los sub-disectores heurísticos”.

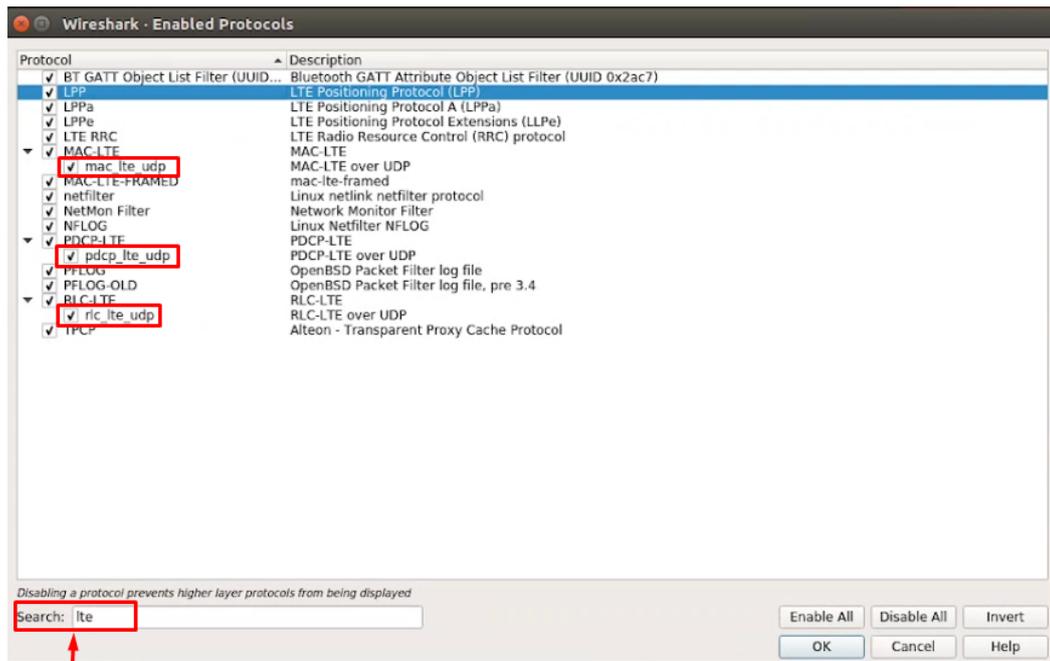


- **Habilitar protocolos lte.**

En el menú clic en Analizar y seleccionar Protocolos habilitados.



Busque lte y habilite “mac_lte-udp”, “pdcp_lte_udp” y “rlc_lte_udp”.



Tarea 3: Ejecutar red LTE

- **Activar certificados HSS y MME.**

Utilice los siguientes comandos para activar los certificados HSS y MEE.

```
$ cd ~/openair-cn
$ source oaienv
$ cd scripts
$ ./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
hss.OpenAir5G.Alliance
$ ./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
mme.OpenAir5G.Alliance
```

En la siguiente figura se observa el mensaje de validación de los certificados.

```
HSS S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
MME S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
```

- **Comprobar la disponibilidad de archivos PEM**

Utilice el siguiente comando para ver la disponibilidad de los archivos PEM.

```
$ ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem
```

Los archivos “.pem” permiten utilizar los archivos de certificados y llaves del hss y mme. En siguiente figura se observa el resultado de este paso.

```
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.key.pem
```

- **Cargar base de datos para el HSS**

Utilice el siguiente comando para ejecutar la base de datos.

```
$ ~/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte oai_db
~/epc/hss-database/hss_db.sql
```

El comando crea e importa datos para la BDD, si el proceso fue el correcto se mostrará mediante mensajes como se puede observar en la siguiente figura.

```
mysqladmin: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
Database "oai_db" dropped
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db creation succeeded
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db import succeeded
```

- **Ejecutar HSS, MME, SPGW, eNB.**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

- **Ejecutar MME**

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```
===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0              | 0                          | 0                          |
Connected UEs  | 0              | 0                          | 0                          |
Default Bearers | 0              | 0                          | 0                          |
S1-U Bearers  | 0              | 0                          | 0                          |
===== STATISTICS =====
```

- **Ejecutar SPGW**

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

```
- Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

- **Ejecutar eNB**

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -w -O <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHZ_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado. La opción "-W". Esta opción activa los mensajes de la capa 2 para Wireshark en el host local.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

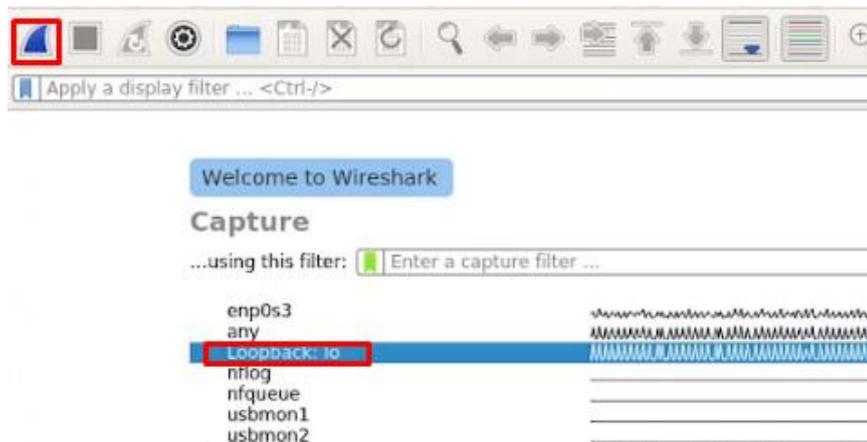
Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -w -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHZ_1v4.ini
```

Tarea 4: Capturar, filtrar paquetes de la red LTE.

- **Capturar paquetes con Wireshark.**

Seleccione la interfaz “Loopback: lo”. Wireshark comenzará a capturar paquetes de manera automática, caso contrario haga clic en el botón azul para comenzar a capturar paquetes.

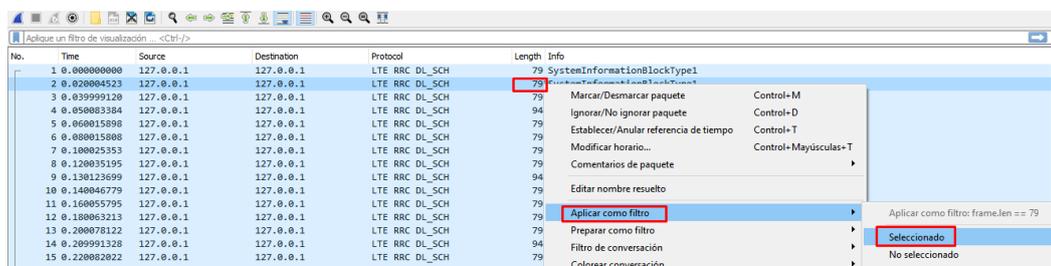


Detenga la captura, haga clic en el botón rojo.



- **Filtrar paquetes SystemInformationBlockType1 (SIB1).**

Mueva el cursor sobre la columna longitud de uno de los paquetes “SystemInformationBlockType1”. Presione clic derecho del ratón y seleccione aplicar como filtro seleccionado.



Se observa el campo de entrada de filtro con la condición “frame.len == 79” y los paquetes son actualizados únicamente a “SystemInformationBlockType1”

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
2	0.020004523	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
3	0.039999120	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
5	0.060015898	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
6	0.080015808	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
7	0.100025353	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
8	0.120035195	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
10	0.140046779	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
11	0.160055795	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
12	0.180063213	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
13	0.200078122	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
15	0.220082022	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
16	0.240095832	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
17	0.260104887	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
18	0.280114833	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
20	0.300125144	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
21	0.320135155	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1

- **Inspeccionar detalles SIB1.**

Selecciona un paquete tipo SIB1, despliega dentro del panel de detalles la opción MAC-LTE BCH PDU hasta encontrar los valores de plmn-Identity, trackingAreaCode, cellIdentity, cellBarred, cellReservedForOperatorUser, freqBandIndicator.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
6	0.080015808	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1

```

> Frame 6: 79 bytes on wire (632 bits), 79 bytes captured (632 bits) on interface
> Ethernet II, Src: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00:00:00:00
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
< MAC-LTE BCH PDU (15 bytes, on DL-SCH transport)
  [Context (RNTI=65535)]
  [Transport channel: DL-SCH (4)]
  LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    BCCH-DL-SCH-Message
      message: c1 (0)
        c1: systemInformationBlockType1 (1)
          systemInformationBlockType1
            cellAccessRelatedInfo
              plmn-IdentityList: 1 item
                trackingAreaCode: 0000 [bit length 16, 0000 0000 0000 0000
                cellIdentity: 0000e000 [bit length 28, 4 LSB pad bits, 000
                cellBarred: notBarred (1)
                intraFreqReselection: notAllowed (1)
                .... ..0. csg-Indication: False
            cellSelectionInfo
              q-RxLevMin: -130dBm (-65)
              freqBandIndicator: 7
          schedulingInfoList: 1 item
            si-WindowLength: ms20 (5)
            systemInfoValueTag: 0
  
```

- **Filtrar paquetes SystemInformation (SI)**

Elimine el filtro dando clic en el botón rojo.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
2	0.020004523	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
3	0.039999120	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
5	0.060015898	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
6	0.080015808	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
7	0.100025353	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
8	0.120035195	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
10	0.140046779	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
11	0.160055795	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
12	0.180063213	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
13	0.200078122	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
15	0.220082022	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
16	0.240095832	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
17	0.260104887	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
18	0.280114833	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
20	0.300125144	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
21	0.320135155	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1

Mueva el cursor sobre la columna longitud de uno de los paquetes “SystemInformation”. Presione clic derecho del ratón y seleccione aplicar como filtro seleccionado.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4	0.050083384	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
5	0.060015888	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
6	0.080015888	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
7	0.100025353	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
8	0.120035195	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
9	0.130123699	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
10	0.140046779	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
11	0.160057995	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
12	0.180063213	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
13	0.200078122	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
14	0.209991328	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
15	0.220002022	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
16	0.240095832	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
17	0.260104887	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
18	0.280114833	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
19	0.290036882	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]

Se observa el campo de entrada de filtro con la condición “frame.len == 94”, los paquetes son actualizados únicamente a “SystemInformation”

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4	0.050083384	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
9	0.130123699	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
14	0.209991328	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
19	0.290036882	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
24	0.370068410	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
29	0.450115766	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
34	0.529981269	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
39	0.610024299	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
44	0.690064926	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
49	0.770105154	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
54	0.850020346	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
59	0.930016350	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
64	1.010061079	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
69	1.090114535	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
74	1.170168379	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
79	1.250021002	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
84	1.330046336	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]

Tarea 5: Analizar procedimiento de acceso aleatorio

Navegue a la ventana de Wireshark he inicie la captura de paquetes para la interfaz “Loopback: lo”.

- **Conectar UE.**

Conecte el dongle LTE al ordenador y espere que se complete el proceso de conexión.

Detenga la captura de paquetes de Wireshark cuando el ordenador muestre que el UE esté conectado y que el servicio de internet esté disponible.

- **Localizar paquetes del procedimiento de acceso aleatorio.**

Escribe el siguiente texto para realizar el filtro quitando los paquetes SI y SIB1.

“!(mac-lte.bch.pdu)”

Busque el primer paquete del procedimiento de acceso aleatorio. Como se muestra en la siguiente figura, los paquetes 1721, 1723 y 1725 corresponden a Msg2, Msg3 y Msg4 del procedimiento de acceso aleatorio. Msg1 no se ha capturado.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1129	17.860143126	127.0.0.1	127.0.0.20	SCPT	98	HEARTBEAT_ACK
1721	27.324990380	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	71	RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)
1723	27.335079544	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_CCCH	105	RRCConnectionRequest
1725	27.340015647	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	89	DL-SCH: (SFN=778, SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25 bytes) (Pa-
1726	27.352965583	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	71	[UL] [AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..

- **Verificar parámetros Msg.**

Selecciona el paquete correspondiente a Msg2 y verifica los parámetros de respuesta de acceso aleatorio (RAR).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1721	27.324990380	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	71	RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)

> Frame 1721: 71 bytes on wire (568 bits), 71 bytes captured (568 bits) on interface lo, id 0
 > Ethernet II, Src: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
 > Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
 > User Datagram Protocol, Src Port: 38018, Dst Port: 9999
 > MAC-LTE RAR (RA-RNTI=1, SFN=777, SF=0) (RAPID=0: TA=2, UL-Grant=13644, Temp C-RNTI=37860)

Selecciona el paquete correspondiente a Msg3 y verifica los parámetros de solicitud de conexión RRC, despliega todos los detalles para más información.

```

1723 27.335079544 127.0.0.1 127.0.0.1 LTE RRC UL_CCCH 105 RRCConnectionRequest
> Frame 1723: 105 bytes on wire (840 bits), 105 bytes captured (840 bits) on interface lo, id 0
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
> MAC-LTE UL-SCH: (SFN=777, SF=6) UEId=0 (Short BSR) (CCCH:6 bytes) (Padding:remainder)
  > [Context (RNTI=37860)]
  > MAC PDU Header (Short BSR) (CCCH:6) (Padding:remainder) [3 subheaders]
  > Short BSR (lcid=0 BS = 0)
  > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    Padding data: 000220f6ab48a1defefccf828e941380409802ed4edc21c317ef3f1327fe
    [Padding length: 30]

```

Verifica el mensaje de UL-CCH enviado en Msg3.

```

> Frame 1723: 105 bytes on wire (840 bits), 105 bytes
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 12
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9
> MAC-LTE UL-SCH: (SFN=777, SF=6) UEId=0 (Short BSR)
  > [Context (RNTI=37860)]
  > MAC PDU Header (Short BSR) (CCCH:6) (Padding:rema
  > Short BSR (lcid=0 BS = 0)
  > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    > UL-CCCH-Message
      Padding data: 000220f6ab48a1defefccf828e941380409
      [Padding length: 30]

```

Selecciona el paquete correspondiente a Msg4 y verifica los parámetros de resolución de contención, despliega todos los detalles para más información.

```

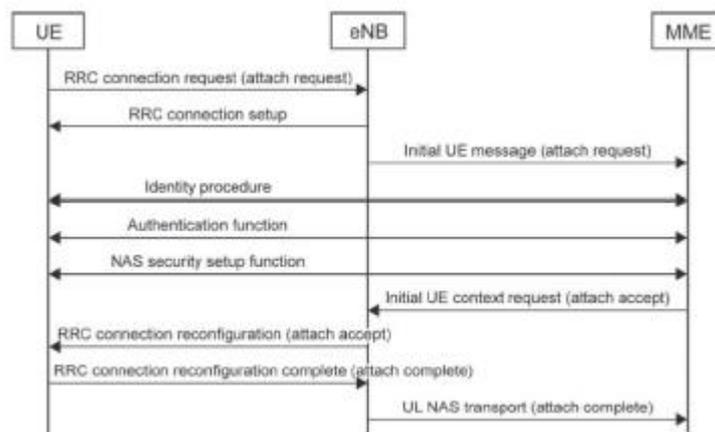
1725 27.340015647 127.0.0.1 127.0.0.1 MAC-LTE 89 DL-SCH: (SFN=778, SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity)
> Frame 1725: 89 bytes on wire (712 bits), 89 bytes captured (712 bits) on interface lo,
> Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 38010, Dst Port: 9999
> MAC-LTE DL-SCH: (SFN=778, SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25)
  > [Context (RNTI=37860)]
  > MAC PDU Header (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:25) (Padding:remainder) [
  > Sub-header (lcid=UE Contention Resolution Identity)
  > Sub-header (lcid=CCH, length=25)
  > Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
  > UE Contention Resolution (matches Msg3 from frame 1723, 4ms ago)
    UE Contention Resolution Identity: 5b36260f3376
    [Msg3: 1723]
    [Time since Msg3: 4]
    [UE Contention Resolution Matches Msg3: True]

```

Tarea 6: Analizar proceso de conexión de UE.

- Verificar proceso de registro de un UE en MME.

El UE completará el procedimiento de conexión enviando un mensaje de registro al MME de la red LTE, este registro se realiza para que el dispositivo pueda recibir servicios de paquete y establecer una conexión activa con la red LTE. En la siguiente figura se puede observar el proceso de conexión.

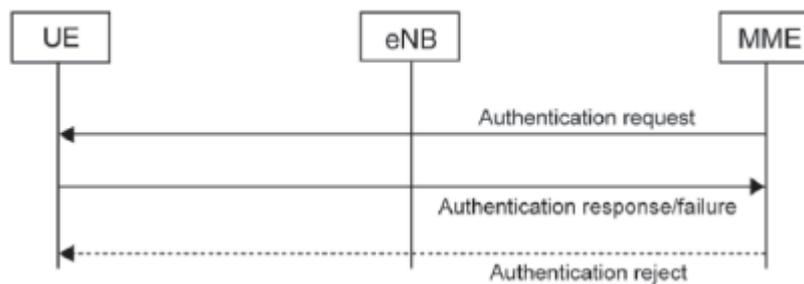


Identifique los paquetes y mensajes relevantes capturados en Wireshark del proceso de registro y conexión. En la siguiente figura se observa el paquete 1728 correspondiente al mensaje de solicitud de conexión RRC.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1724	27.339998313	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
1725	27.340015647	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	89	DL-SCH: (SFN=778 , SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH)
1726	27.352965583	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	71	[UL] [AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..
1727	27.360057217	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1
1728	27.360948684	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	193	RRCConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request
1729	27.360989757	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	75	[DL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2

- **Verificar proceso de autenticación.**

Utilice la siguiente figura como guía para identificar los paquetes capturados en Wireshark correspondiente al proceso de autenticación entre un UE y MME.



Cada vector de autenticación consta de cuatro parámetros: un número aleatorio (RAND), el token de autenticación (AUTN), la respuesta esperada del usuario (XRES) y la clave de entidad de administración de seguridad de acceso intermedio (KASME). Verifique el vector de autenticación en la respuesta de información de autenticación como se muestra en la siguiente figura.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1785	27.488765922	127.0.0.1	127.0.0.1	DIAHETER	366	cmd=3GPP-Authentication-Information Answer(318) flags=-P- appl=3GPP S

```

1... .. = Vendor-Specific: Set
.1... .. = Mandatory: Set
..0... .. = Protected: Not set
...0... .. = Reserved: Not set
... 0... = Reserved: Not set
... .0... = Reserved: Not set
... ..0 = Reserved: Not set
... ...0 = Reserved: Not set
AVP Length: 144
AVP Vendor Id: 3GPP (10415)
Authentication-Info: 00000586c000004000028af000005a7c000001c000028af605a563990db604483436b1c...
  AVP: E-UTRAN-Vector(1414) l=132 f=VM- vnd=TGPP
    AVP Code: 1414 E-UTRAN-Vector
      AVP Flags: 0xc0, Vendor-Specific: Set, Mandatory: Set
        1... .. = Vendor-Specific: Set
        .1... .. = Mandatory: Set
        ..0... .. = Protected: Not set
        ...0... .. = Reserved: Not set
        ... 0... = Reserved: Not set
        ... .0... = Reserved: Not set
        ... ..0 = Reserved: Not set
        ... ...0 = Reserved: Not set
        AVP Length: 132
        AVP Vendor Id: 3GPP (10415)
        E-UTRAN-Vector: 000005a7c000001c000028af605a563990db604483436b1c...
          > AVP: RAND(1447) l=28 f=VM- vnd=TGPP val=605a563990db604483436b1c...
          > AVP: XRES(1448) l=20 f=VM- vnd=TGPP val=d742ccb805363b4c
          > AVP: AUTN(1449) l=28 f=VM- vnd=TGPP val=b806f33bc7de800dd8af12f0f52f44a
          > AVP: KASME(1450) l=44 f=VM- vnd=TGPP val=08ade7a93d6d958561d7879bf0015aa43fe18fe2d2404d4b538de4b36250642
  
```

Identifique el mensaje de solicitud de autenticación en la lista de paquetes capturados y compare el RAND y el AUTN de este mensaje con los de respuesta de información de autenticación (AIA).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1789	27.490029309	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH/NAS-EPS	111	DLInformationTransfer, Authentication request
1790	27.499916412	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	79	SystemInformationBlockType1

```

PDCP-LTE sn=2
  > [Configuration: (direction=Downlink, plane=Signalling)]
    000. .... = Reserved: 0
    ...0 0010 = Seq Num: 2
  > [Sequence Analysis - OK]
  > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    > DL-DCCH-Message
      > message: c1 (0)
        > c1: dlInformationTransfer (1)
          > dlInformationTransfer
            rrc-TransactionIdentifier: 1
            > criticalExtensions: c1 (0)
              > c1: dlInformationTransfer-r8 (0)
                > dlInformationTransfer-r8
                  > dedicatedInfoType: dedicatedInfoNAS (0)
                    > dedicatedInfoNAS: 075200605a563990db604483436b1cff683f5110b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
                      > Non-Access-Stratum (NAS)PDU
                        0000 .... = Security header type: Plain NAS message, not security protected (0)
                        ... 0111 = Protocol discriminator: EPS mobility management messages (0x7)
                        NAS EPS Mobility Management Message Type: Authentication request (0x52)
                        0000 .... = Spare half octet: 0
                        ... 0... = Type of security context flag (TSC): Native security context (for KSIasme or KSIamf)
                        .... 0000 = NAS key set identifier: (0) ASME
                      > Authentication Parameter RAND - EPS challenge
                        RAND value: 605a563990db604483436b1cff683f51
                      > Authentication Parameter AUTN (UMTS and EPS authentication challenge) - EPS challenge
                        Length: 16
                        > AUTN value: b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
                          SQN xor AK: b806f33bc7de
                          AMF: 8000
                          MAC: dd8af12f0f52f44a
  
```

Identifique el mensaje de respuesta de autenticación en su lista de paquetes capturados y compare el RES en este mensaje con el XRES en el AIA.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1806	27.646902955	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	127	ULInformationTransfer, Authentication response

```

MAC-LTE UL-SCH: (SFN=808, SF=8) UEId=0 (Short BSR) (1:21 bytes) (Padding:remainder)
  > [Context (RNTI=37860)]
  > MAC PDU Header (Short BSR) (1:21) (Padding:remainder) [3 subheaders]
  > Short BSR (lcgid=0 BS = 0)
  > RLC-LTE [UL] [AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=4 [19-bytes]
    > [Context]
    > AM Header (P) sn=4
    > [Sequence Analysis - OK]
    > PDCP-LTE sn=3
      > [Configuration: (direction=Uplink, plane=Signalling)]
        000. .... = Reserved: 0
        ...0 0011 = Seq Num: 3
      > [Sequence Analysis - OK]
      > LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
        > UL-DCCH-Message
          > message: c1 (0)
            > c1: ulInformationTransfer (9)
              > ulInformationTransfer
                > criticalExtensions: c1 (0)
                  > c1: ulInformationTransfer-r8 (0)
                    > ulInformationTransfer-r8
                      > dedicatedInfoType: dedicatedInfoNAS (0)
                        > dedicatedInfoNAS: 075308d742ccb805363b4c
                          > Non-Access-Stratum (NAS)PDU
                            0000 .... = Security header type: Plain NAS message, not security protected (0)
                            ... 0111 = Protocol discriminator: EPS mobility management messages (0x7)
                            NAS EPS Mobility Management Message Type: Authentication response (0x53)
                          > Authentication response parameter
                            Length: 8
                            RES: d742ccb805363b4c
  
```

8. Interpretación de resultados

- Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformationBlockType1” (SIB1) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.

Filtre los paquetes SIB1 y registre los primeros 10 paquetes.

Paquetes (SIB1)	Hora	Intervalo (ms)
1	0.00000	--
2	0.02000	20.00
3	0.03999	19.99
4	0.06001	20.02
5	0.08001	20.00
6	0.10002	20.01
7	0.12003	20.01
8	0.14004	20.01
9	0.16005	20.01
10	0.18006	20.01
Promedio		20.00

Los paquetes SIB1 son enviados es un intervalo de tiempo promedio de 20.00 (ms) lo que corresponde a su valor de periodicidad constante.

- **Realice una tabla del paquete SIB1 que contenga datos y una descripción de los siguientes campos.**
 - **plmn-Identity**
 - **trackingAreaCode**
 - **cellIdentity**
 - **cellBarred**
 - **cellReservedForOperatorUser**
 - **freqBanIndicator**

Abra los detalles del paquete SIB1, identifique los campos y realice la tabla.

Campo (SIB1)	Datos	Descripción
plmn-Identity	MCC = 901 MNC = 70	Identificación del país (MCC) y del operador (MNC) de la red móvil.
trackingAreaCode	1	Código de área que identifica un área geográfica.
cellIdentity	3584	Identidad única de la celda en la red.
cellBarred	notBarred	Indica si la celda está prohibida o no para el acceso de dispositivos.
cellReservedForOperatorUser	notReserved	Indica si la celda está reservada o no para el uso exclusivo del operador.
freqBanIndicator	7	Indicador de la banda de frecuencia utilizada por la celda.

- **Registre el tiempo para los primeros 10 paquetes “SystemInformation” (SI) capturados. Calcule el intervalo de tiempo entre dos paquetes consecutivos y registre estos valores en una tabla. Calcule el valor promedio del intervalo de tiempo.**

Filtre los paquetes SI y construya una tabla con los primeros 10 paquetes.

Paquetes SI	Hora	Intervalo (ms)
1	0.05008	--
2	0.13012	80.04
3	0.20999	79.87
4	0.29003	80.04
5	0.37006	80.03
6	0.45011	80.05
7	0.52998	79.87
8	0.61002	80.04
9	0.69006	80.04
10	0.77010	80.04
Promedio		80.00

Los paquetes SI son enviados en un intervalo promedio de 80 (ms), presentando una regularidad en los paquetes que respalda la consistencia de la estabilidad en la transmisión o recepción de datos.

- **Registre los valores de respuesta de acceso aleatorio (RAR) en función del Msg2 Capturados.**
 - **RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary ID)**
 - **RAPID (Random Access Preamble ID)**
 - **TA (Timing Advance)**
 - **UL Grant**
 - **Temp C-RNTI (Temporary Cell-RNTI)**

Parámetro RAR	Valor
RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary ID)	1
RAPID (Random Access Preamble ID)	0
TA (Timing Advance)	2
UL Grant Temp	13644
C-RNTI (Temporary Cell-RNTI)	37860

Los valores enviados en Msg2 contienen información necesaria para que el eNB pueda identificar y comunicarse con el UE que está intentando acceder a la red. Entre los datos se tiene el Timing Advance (TA) que indica al UE cuando debe comenzar a transmitir, el C-RNTI es una identificación temporal asignada al UE, el RA-RNTI se utiliza para identificar el dispositivo durante el proceso de acceso aleatorio.

- **Registre los valores de solicitud de conexión RRC en función de Msg3.**
 - **C-RNTI**
 - **Ue-Identity (randomValue)**

Parámetro RRCConnectionRequest	Valor
---------------------------------------	--------------

C-RNTI	37860
ue-Identity (randomValue)	b36260f337

El Msg3 es enviado por el UE después de recibir el RAR obteniendo la identificación temporal asociada a la celda, además envía la identidad del usuario el cual es un valor aleatorio que sirve para la configuración de la conexión RRC.

- **Registre los valores capturados para Msg4.**
 - **C-RNTI**
 - **UE Contention Resolution Identity**

Parámetro RAR	Valor
C-RNTI	37860
UE Conetetion Resolucion Identity	5b36260f3376

Los valores enviados por Msg4 son la respuesta al Msg3 enviado por el UE el cual confirma la recepción exitosa y autoriza al UE para continuar con la configuración para la conexión.

- **Identifique el protocolo utilizado y la información enviada en los siguientes paquetes/mensajes en el proceso de conexión.**
 - **RRC connection request (attach request)**
 - **Initial UE message (attach request)**
 - **Initial UE message (attach accept)**
 - **RRC connection reconfiguration (attach accept)**
 - **RRC connection reconfiguration (attach complete)**
 - **UL NAS transport (attach complete)**

Mensaje	Nº de paquete	Hora	Protocolo	Información
RRC connection request (attach request)	1728	27.36094	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	RRCConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request
Initial UE message (attach request)	1730	27.36112	S1AP/NAS-EPS	InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request
Initial UE message (attach accept)	1832	27.67306	S1AP/NAS-EPS	InitialContextSetupRequest, Attach accept, Activate default EPS bearer context request

RRC connection reconfiguration (attach accept)	1844	27.71792	LTE RRC DL_DCCH/NAS-EPS	RRCCConnectionReconfiguration, Attach accept, Activate default EPS bearer context request
RRC connection reconfiguration (attach complete)	1847	27.73710	LTE RRC UL_DCCH	[UL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=7 , RRCCConnectionReconfigurationComplete
UL NAS transport (attach complete)	1851	27.76503	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	ULInformationTransfer, Attach complete, Activate default EPS bearer context accept

- **Identifique la respuesta de autenticación-información (AIA) en los paquetes capturados y registre el valor de los siguientes parámetros.**
 - **RAND**
 - **XRES**
 - **AUTN**
 - **KASME**

Parámetro AIA	Valor
RAND	605a563990db604483436b1cff683f51
XRES	d742ccb805363b4c
AUTN	b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
KASME	08ade7a93d6d958561d7879bfd0015aa43fe18fe2d2404d4b538de4b36250642

el RAND y el AUTN en el mensaje de solicitud de autenticación y el RES en el mensaje de respuesta de autenticación en los paquetes capturados son idénticos a los datos de respuesta de autenticación- información.

```

.... 0... = type of security context flag (1b): nat
.... .000 = NAS key set identifier: (0) ASME
  Authentication Parameter RAND - EPS challenge
    RAND value: 605a563990db604483436b1cff683f51
  Authentication Parameter AUTN (UMTS and EPS authenti
    Length: 16
  > AUTN value: b806f33bc7de8000dd8af12f0f52f44a
  Authentication response parameter
    Length: 8
    RES: d742ccb805363b4c

```

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

2.4 Práctica 4:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 4**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema:

Evaluación del rendimiento de la red LTE

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, los estudiantes podrán evaluar los tres indicadores principales del rendimiento de la red LTE: rendimiento, pérdida de paquetes y latencia. Analizando la interacción en los flujos de tráfico del protocolo de control de transmisión TCP y del protocolo de datagramas de usuario UDP.

3. Objetivos

- Medir y analizar el rendimiento TCP
- Medir y analizar el rendimiento UDP
- Medir y analizar la latencia de la red LTE.

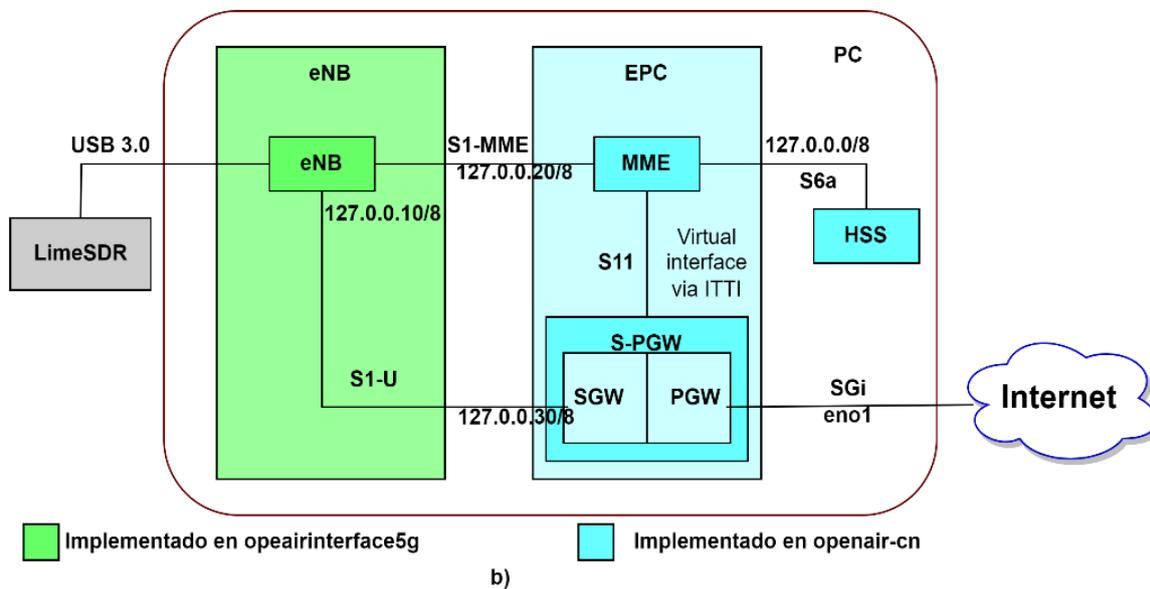
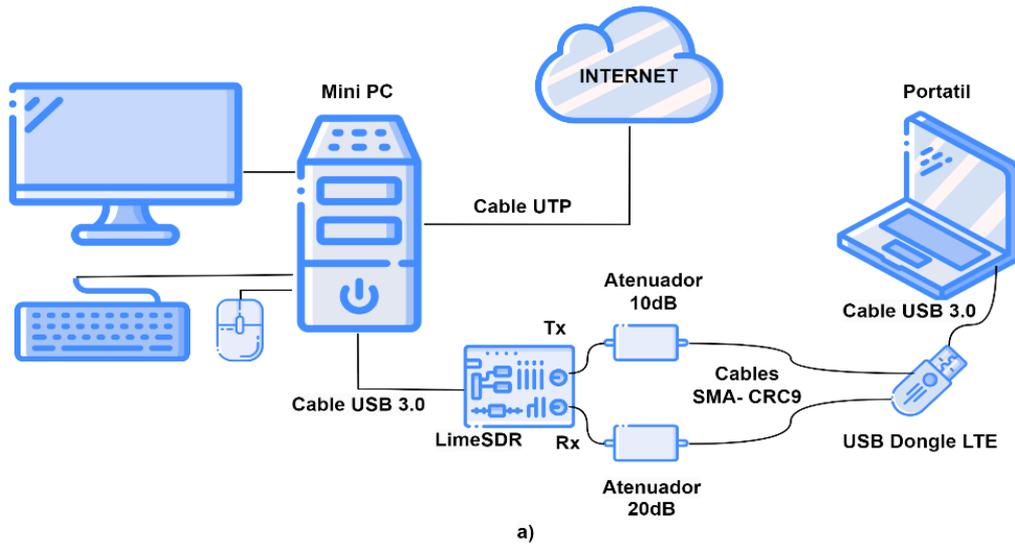
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una consulta bibliográfica sobre rendimiento TCP, UDP, latencia en una red LTE.

5. Materiales y equipos

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mini PC con OpenAirInterface. • LimeSDR • 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). • Atenuador 10dB y 20dB. | <ul style="list-style-type: none"> • 2 cables SMA(m) a CRC9. • USB Dongle LTE • Cable UTP. • Portátil. |
|---|--|

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Requisitos previos.

- **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**

Conecte los componentes de la red tal como se muestra en el diagrama de la topología.

- **Configurar software OAI.**

Cargue los archivos ya configurados mediante los siguientes comandos.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
```

Ingrese la contraseña "lte" para ejecutar como superusuario.

```
$sudo ./startLTE_l2.sh
```

Aparecerán ventanas nuevas, como el alcance suave y estadísticas L2 y L1. Una vez verificado cierre todas las ventanas abiertas.

Tarea 2: Instalar iperf3

La instalación de iperf3 se realizó en el host local (Mini-PC), mediante los siguientes comandos.

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install iperf3
```

- **Verificar iperf 3 en mini pc.**

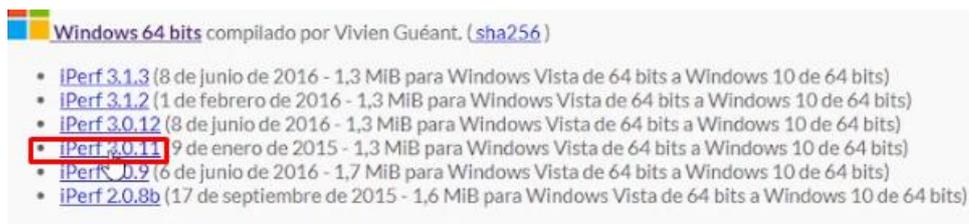
Verifique la versión instalada en el host local Ubuntu utilizando el siguiente comando el terminal.

```
$ iperf3 -v
```

```
lte@lte-desktop:~$ iperf3 -v
iperf 3.0.11
Linux lte-desktop 4.15.0-142-generic
x86_64 x86_64 x86_64 GNU/Linux
```

- **Descargar iperf3 en portátil (Windows).**

Descargue iperf3 desde <https://iperf.fr/iperf-download.php>. Se debe utilizar la misma versión instalada en el host local para el ordenador del estudiante.



Tarea 3: Ejecutar red LTE

- **Activar certificados HSS y MME.**

Utilice los siguientes comandos para activar los certificados HSS y MEE.

```
$ cd ~/openair-cn
$ source oaienv
$ cd scripts
$ ./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
hss.OpenAir5G.Alliance
$ ./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter
mme.OpenAir5G.Alliance
```

En la siguiente figura se observa el mensaje de validación de los certificados.

```
HSS S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
MME S6A: Found valid certificate in /usr/local/etc/oai/freeDiameter
```

- **Comprobar la disponibilidad de archivos PEM**

Utilice el siguiente comando para ver la disponibilidad de los archivos PEM.

```
$ ls -l /usr/local/etc/oai/freeDiameter/*.pem
```

Los archivos “.pem” permiten utilizar los archivos de certificados y llaves del hss y mme. En siguiente figura se observa el resultado de este paso.

```

-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 973 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cacert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 916 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cakey.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 3093 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.cert.pem
-rw-rw-r-- 1 lte lte 887 Feb 17 05:10 /usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme.key.pem

```

- **Cargar base de datos para el HSS**

Utilice el siguiente comando para ejecutar la base de datos.

```
$ ~/openair-cn/scripts/hss_db_import 127.0.0.1 root lte oai_db
~/epc/hss-database/hss_db.sql
```

El comando crea e importa datos para la BDD, si el proceso fue el correcto se mostrará mediante mensajes como se puede observar en la siguiente figura.

```

mysqladmin: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
Database "oai_db" dropped
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db creation succeeded
mysql: [Warning] Using a password on the command line interface can be insecure.
HSS: oai_db import succeeded

```

- **Ejecutar HSS**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

- **Ejecutar MME**

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0               | 0                         | 0                           |
Connected UEs  | 0               | 0                         | 0                           |
Default Bearers | 0              | 0                         | 0                           |
S1-U Bearers  | 0               | 0                         | 0                           |
===== STATISTICS =====

```

- **Ejecutar SPGW**

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

```
- Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

- **Ejecutar eNB**

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

Un ejemplo sería el eNB para 25 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Re114 -d -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

Al finalizar y si todos los pasos fueron los correctos aparecerán las ventanas Soft Scope.

Tarea 4: Verificar rendimiento TCP de enlace ascendente y descendente.

- **Verificar dirección IP del EPC.**

En una ventana de terminal verifique la dirección de la interfaz GTP usando el siguiente comando:

```
$ ifconfig gtp0
```



```
lte@lte-desktop:~$ ifconfig gtp0
gtp0      link encap:UNSPEC HWaddr 00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
          inet addr:172.16.0.1  P-t-P:172.16.0.1  Mask:255.240.0.0
          inet6 addr: fe80::55b8:f8f4:6caa:1948/64 Scope:Link
          UP POINTOPOINT RUNNING NOARP MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:0 errors:4 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
```

La dirección del EPC corresponde a la interfaz gtp0.

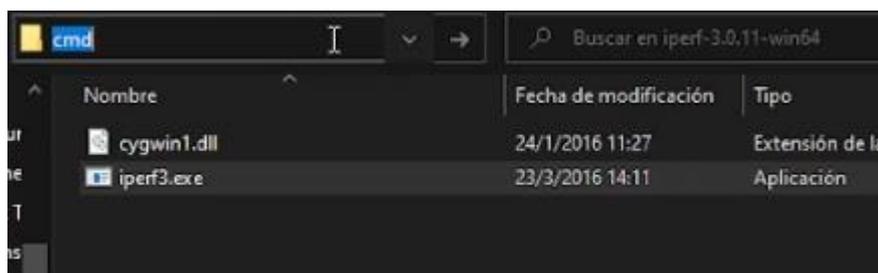
- **Ejecutar iperf3 en el host local**

Ejecute iperf3 en el modo servidor usando el siguiente comando:

```
$ iperf3 -s
```

- **Ejecutar iperf3 en el pc portátil.**

Diríjase a la carpeta donde se encuentra el ejecutable iperf3, en la barra de nombre ingrese “cmd” y presione enter.



En la ventana del símbolo de sistema inicie el cliente TCP con la dirección IP del servidor como parámetro, utilizando el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1
```

Comenzará a transmitir datos desde el cliente al servidor.

```
D:\1. (iperf-3.0.11-win64) iperf3 -c 172.16.0.1
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 63497 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval            Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-1.01 sec        1.00 MBytes      8.28 Mbits/sec
[ 4] 1.01-2.01 sec        1.00 MBytes      8.42 Mbits/sec
[ 4] 2.01-3.00 sec        1.00 MBytes      8.45 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec        896 KBytes       7.33 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.01 sec        1.00 MBytes      8.31 Mbits/sec
[ 4] 5.01-6.01 sec        1.00 MBytes      8.41 Mbits/sec
[ 4] 6.01-7.01 sec        1.00 MBytes      8.41 Mbits/sec
[ 4] 7.01-8.01 sec        896 KBytes       7.36 Mbits/sec
[ 4] 8.01-9.00 sec        1.00 MBytes      8.40 Mbits/sec
[ 4] 9.00-10.00 sec       1.00 MBytes      8.41 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval            Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-10.00 sec      9.75 MBytes      8.18 Mbits/sec  sender
[ 4] 0.00-10.00 sec      9.75 MBytes      8.18 Mbits/sec  receiver
```

- **Verificar rendimiento TCP en Wireshark.**

Inicie Wireshark en el pc con Windows y comience a capturar el paquete de la interfaz de red LTE.



- **Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.**

Realice la transmisión de datos desde el cliente al servidor ejecutando el comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1
```

```
D:\1. (iperf-3.0.11-win64) iperf3 -c 172.16.0.1
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 55158 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval            Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec        896 KBytes       7.32 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.01 sec        1.00 MBytes      8.33 Mbits/sec
[ 4] 2.01-3.00 sec        896 KBytes       7.39 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.01 sec        1.00 MBytes      8.30 Mbits/sec
[ 4] 4.01-5.01 sec        1.00 MBytes      8.39 Mbits/sec
[ 4] 5.01-6.01 sec        1.00 MBytes      8.44 Mbits/sec
[ 4] 6.01-7.00 sec        1.00 MBytes      8.42 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.01 sec        896 KBytes       7.28 Mbits/sec
[ 4] 8.01-9.01 sec        1.00 MBytes      8.39 Mbits/sec
[ 4] 9.01-10.00 sec       1.00 MBytes      8.44 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval            Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-10.00 sec      9.62 MBytes      8.07 Mbits/sec  Sender
[ 4] 0.00-10.00 sec      9.62 MBytes      8.07 Mbits/sec  receiver
```

Tenga en cuenta la dirección IP del remitente (cliente) y del receptor (servidor).

La dirección IP y el número de puerto pueden variar para el cliente.

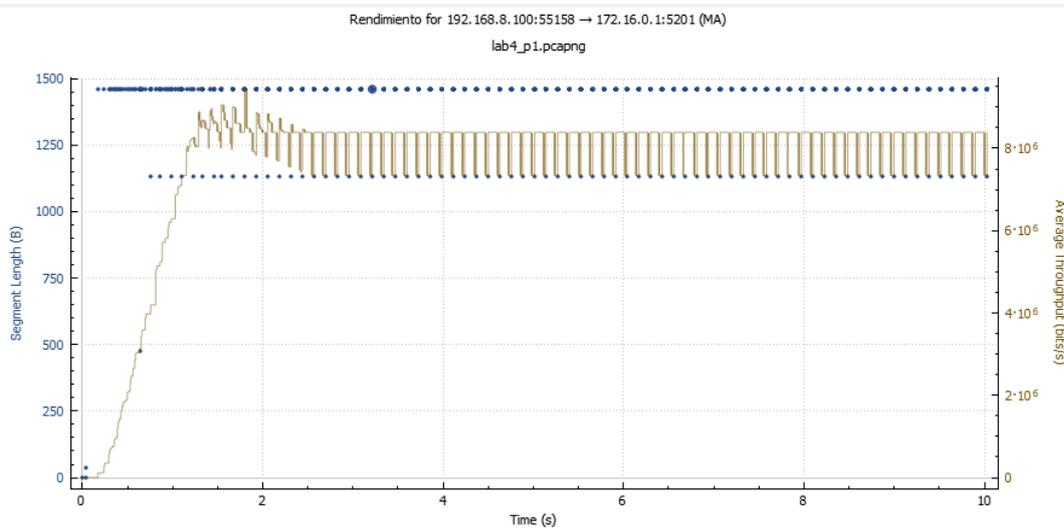
Detenga la captura de paquetes en Wireshark cuando finalice el envío de datos y aplique el siguiente filtro a la lista de paquetes.

```
tcp.port==5201
```

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
345	32.176992	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	54	55157 → 5201 [ACK] Seq=99 Ack=4...
346	32.221132	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	55	5201 → 55157 [PSH, ACK] Seq=4 A...
347	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=38 Ack=1...
348	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=1498 Ack...
349	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=2958 Ack...
350	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=4418 Ack...
351	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=5878 Ack...
352	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=7338 Ack...
353	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=8798 Ack...
354	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=10258 Ac...
355	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=11718 Ac...
356	32.221329	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	1514	55158 → 5201 [ACK] Seq=13178 Ac...
357	32.270474	192.168.8.100	172.16.0.1	TCP	54	55157 → 5201 [ACK] Seq=99 Ack=5...
358	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=14...
359	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=29...
360	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=44...
361	32.284482	172.16.0.1	192.168.8.100	TCP	54	5201 → 55158 [ACK] Seq=1 Ack=58...

Identifique el paquete enviado desde el cliente al servidor con el puerto utilizado, en este ejemplo 55158 para el cliente y 5201 para el servidor.

Seleccione el paquete, luego se ingrese a la opción Estadísticas>Gráficos de flujo TCP>Rendimiento. Aparecerá un gráfico para el rendimiento de TCP similar.



TCP presenta un inicio lento como estrategia de control de congestión, al inicio del envío de los datos por lo que se puede usar la opción “-O” para omitir este periodo lento y obtener resultados más precisos utilizando el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -O 2
```

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -O 2
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 55215 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00    sec 896 KBytes  7.32 Mbits/sec (omitted)
[ 4] 1.00-2.01    sec 1.00 MBytes  8.29 Mbits/sec (omitted)
[ 4] 0.00-1.01    sec 1.00 MBytes  8.30 Mbits/sec
[ 4] 1.01-2.00    sec 1.00 MBytes  8.42 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00    sec 896 KBytes  7.39 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.01    sec 1.00 MBytes  8.27 Mbits/sec
[ 4] 4.01-5.01    sec 1.00 MBytes  8.42 Mbits/sec
[ 4] 5.01-6.00    sec 1.00 MBytes  8.41 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00    sec 1.00 MBytes  8.43 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.01    sec 896 KBytes  7.28 Mbits/sec
[ 4] 8.01-9.01    sec 1.00 MBytes  8.38 Mbits/sec
[ 4] 9.01-9.99    sec 1.00 MBytes  8.52 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-9.99    sec 9.75 MBytes  8.18 Mbits/sec sender
[ 4] 0.00-9.99    sec 9.97 MBytes  8.37 Mbits/sec receiver
```

Realice la transmisión de datos durante 20 segundos mediante el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -t 20 -O 2
```

- Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.

Detenga la red LTE y realice la transmisión usando la configuración de 100 PRB (20 MHz), revise la tarea 3.

Realice la transmisión de datos en el enlace descendente en modo inverso, el servidor envía y el cliente recibe, mediante la opción “-R” en el sistema del cliente como se muestra a continuación:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -R -t 20 -O 2
```

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 172.16.0.2, port 62565
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.2 port 62566
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Retr  Cwnd
[ 5] 0.00-1.00    sec 2.37 MBytes  19.9 Mbits/sec  1  85.5 KBytes (omitted)
[ 5] 1.00-2.00    sec 2.51 MBytes  21.1 Mbits/sec  0  128 KBytes (omitted)
[ 5] 0.00-1.00    sec 2.29 MBytes  19.2 Mbits/sec  0  155 KBytes
[ 5] 1.00-2.00    sec 2.53 MBytes  21.2 Mbits/sec  18  89.8 KBytes
[ 5] 2.00-3.00    sec 2.21 MBytes  18.5 Mbits/sec  0  108 KBytes
[ 5] 3.00-4.00    sec 2.36 MBytes  19.8 Mbits/sec  0  124 KBytes
[ 5] 4.00-5.00    sec 2.37 MBytes  19.9 Mbits/sec  7  98.4 KBytes
[ 5] 5.00-6.00    sec 2.44 MBytes  20.5 Mbits/sec  0  120 KBytes
[ 5] 6.00-7.00    sec 2.44 MBytes  20.5 Mbits/sec  0  130 KBytes
[ 5] 7.00-8.00    sec 2.22 MBytes  18.7 Mbits/sec  20  97.0 KBytes
[ 5] 8.00-9.00    sec 2.33 MBytes  19.6 Mbits/sec  3  85.5 KBytes
[ 5] 9.00-10.00   sec 2.23 MBytes  18.7 Mbits/sec  14  72.7 KBytes
[ 5] 10.00-11.00  sec 1.93 MBytes  16.2 Mbits/sec  2  62.7 KBytes
[ 5] 11.00-12.00  sec 1.92 MBytes  16.1 Mbits/sec  0  82.7 KBytes
[ 5] 12.00-13.00  sec 2.10 MBytes  17.6 Mbits/sec  8  72.7 KBytes
[ 5] 13.00-14.00  sec 1.94 MBytes  16.3 Mbits/sec  0  88.4 KBytes
[ 5] 14.00-15.00  sec 1.98 MBytes  16.6 Mbits/sec  6  75.6 KBytes
[ 5] 15.00-16.00  sec 1.59 MBytes  13.4 Mbits/sec  4  69.9 KBytes
[ 5] 16.00-17.00  sec 2.30 MBytes  19.3 Mbits/sec  0  92.7 KBytes
[ 5] 17.00-18.00  sec 2.20 MBytes  18.4 Mbits/sec  0  110 KBytes
[ 5] 18.00-19.00  sec 2.23 MBytes  18.7 Mbits/sec  0  124 KBytes
[ 5] 19.00-20.00  sec 2.39 MBytes  20.1 Mbits/sec  0  138 KBytes
[ 5] 20.00-20.04  sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec  0  138 KBytes
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Retr
[ 5] 0.00-20.04   sec 44.0 MBytes  18.4 Mbits/sec  82
[ 5] 0.00-20.04   sec 44.2 MBytes  18.5 Mbits/sec
```

En el servidor iperf3 se observa que el rendimiento medido para el servicio LTE de 20 MHz es bajo, debido a la pérdida de paquetes y limitación de la ventana de congestión (Cwnd). Para solucionar este error y medir correctamente el rendimiento TCP es necesario transmitir más datos a través del enlace para llenar la canalización de datos, este proceso se lo hace mediante la opción “-P” mediante el siguiente comando:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -R -t 20 -O 2 -P 10
```

[15]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	1	5.70	KBytes
[17]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	2	8.55	KBytes
[19]	20.00-20.06	sec	22.8	KBytes	3.22	Mbits/sec	0	18.5	KBytes
[21]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	7.13	KBytes
[23]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	4	5.70	KBytes
[25]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	3	5.70	KBytes
[27]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	15.7	KBytes
[29]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	24.2	KBytes
[31]	20.00-20.06	sec	22.8	KBytes	3.22	Mbits/sec	0	12.8	KBytes
[33]	20.00-20.06	sec	0.00	Bytes	0.00	bits/sec	0	17.1	KBytes
[SUM]	20.00-20.06	sec	45.6	KBytes	6.43	Mbits/sec	24		

[ID]	Interval		Transfer	Bandwidth	Retr	
[5]	0.00-20.06	sec	3.63	MBytes	1.52	Mbits/sec 150 sender
[5]	0.00-20.06	sec	3.65	MBytes	1.53	Mbits/sec receiver
[7]	0.00-20.06	sec	4.64	MBytes	1.94	Mbits/sec 149 sender
[7]	0.00-20.06	sec	4.64	MBytes	1.94	Mbits/sec receiver
[9]	0.00-20.06	sec	3.24	MBytes	1.36	Mbits/sec 114 sender
[9]	0.00-20.06	sec	3.24	MBytes	1.36	Mbits/sec receiver
[11]	0.00-20.06	sec	3.63	MBytes	1.52	Mbits/sec 127 sender
[11]	0.00-20.06	sec	3.63	MBytes	1.52	Mbits/sec receiver
[13]	0.00-20.06	sec	3.71	MBytes	1.55	Mbits/sec 155 sender
[13]	0.00-20.06	sec	3.75	MBytes	1.57	Mbits/sec receiver
[15]	0.00-20.06	sec	4.89	MBytes	2.04	Mbits/sec 126 sender
[15]	0.00-20.06	sec	4.88	MBytes	2.04	Mbits/sec receiver
[17]	0.00-20.06	sec	4.04	MBytes	1.69	Mbits/sec 163 sender
[17]	0.00-20.06	sec	3.99	MBytes	1.67	Mbits/sec receiver
[19]	0.00-20.06	sec	3.59	MBytes	1.50	Mbits/sec 127 sender
[19]	0.00-20.06	sec	3.62	MBytes	1.51	Mbits/sec receiver
[21]	0.00-20.06	sec	3.66	MBytes	1.53	Mbits/sec 163 sender
[21]	0.00-20.06	sec	3.63	MBytes	1.52	Mbits/sec receiver
[23]	0.00-20.06	sec	4.44	MBytes	1.86	Mbits/sec 128 sender
[23]	0.00-20.06	sec	4.41	MBytes	1.85	Mbits/sec receiver
[25]	0.00-20.06	sec	4.00	MBytes	1.67	Mbits/sec 137 sender
[25]	0.00-20.06	sec	3.95	MBytes	1.65	Mbits/sec receiver
[27]	0.00-20.06	sec	3.74	MBytes	1.57	Mbits/sec 158 sender
[27]	0.00-20.06	sec	3.71	MBytes	1.55	Mbits/sec receiver
[29]	0.00-20.06	sec	4.85	MBytes	2.03	Mbits/sec 112 sender
[29]	0.00-20.06	sec	4.82	MBytes	2.02	Mbits/sec receiver
[31]	0.00-20.06	sec	3.17	MBytes	1.32	Mbits/sec 156 sender
[31]	0.00-20.06	sec	3.13	MBytes	1.31	Mbits/sec receiver
[33]	0.00-20.06	sec	4.18	MBytes	1.75	Mbits/sec 158 sender
[33]	0.00-20.06	sec	4.13	MBytes	1.73	Mbits/sec receiver
[SUM]	0.00-20.06	sec	59.4	MBytes	24.8	Mbits/sec 2123 sender
[SUM]	0.00-20.06	sec	59.2	MBytes	24.7	Mbits/sec receiver

Verifique el comportamiento del rendimiento final de la prueba.

Tarea 6: Verificar rendimiento UDP de enlaces ascendente y descendente.

- Realizar transmisión de datos desde el cliente al servidor.

Realice la transmisión de datos UDP mediante el siguiente código en el terminal iperf3 del cliente.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u
```

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -u
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 61447 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Total Datagrams
[ 4]  0.00-1.00    sec    120 KBytes    980 Kbits/sec    15
[ 4]  1.00-2.01    sec    128 KBytes    1.04 Mbits/sec    16
[ 4]  2.01-3.00    sec    128 KBytes    1.06 Mbits/sec    16
[ 4]  3.00-4.01    sec    128 KBytes    1.04 Mbits/sec    16
[ 4]  4.01-5.01    sec    128 KBytes    1.05 Mbits/sec    16
[ 4]  5.01-6.01    sec    128 KBytes    1.05 Mbits/sec    16
[ 4]  6.01-7.01    sec    128 KBytes    1.05 Mbits/sec    16
[ 4]  7.01-8.01    sec    128 KBytes    1.05 Mbits/sec    16
[ 4]  8.01-9.02    sec    128 KBytes    1.04 Mbits/sec    16
[ 4]  9.02-10.01   sec    128 KBytes    1.05 Mbits/sec    16
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4]  0.00-10.01   sec    1.24 MBytes    1.04 Mbits/sec    8.615 ms    0/159 (0%)
[ 4] Sent 159 datagrams
```

El envío de paquetes UDP realizados están limitados a 1Mbps, además, el cliente no verifica la cantidad de datos que recibe del servidor por lo que debe verificar los resultados en el extremo del servidor, utilice el siguiente comando:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u --get-server-output
```

```
[ 4] 5.01-6.01 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 6.01-7.01 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 7.01-8.01 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 8.01-9.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
[ 4] 9.00-10.01 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 16
-----
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.01 sec 1.24 MBytes 1.04 Mbits/sec 11.373 ms 1/159 (0.63%)
[ 4] Sent 159 datagrams

Server output:
-----
Accepted connection from 172.16.0.6, port 65130
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.6 port 64567
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec 112 KBytes 917 Kbits/sec 7.578 ms 0/14 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 112 KBytes 917 Kbits/sec 10.293 ms 1/15 (6.7%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 7.163 ms 0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 144 KBytes 1.18 Mbits/sec 6.962 ms 0/18 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 112 KBytes 915 Kbits/sec 12.279 ms 0/14 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 9.387 ms 0/16 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 6.337 ms 0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 9.517 ms 0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 136 KBytes 1.11 Mbits/sec 11.790 ms 0/17 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 120 KBytes 983 Kbits/sec 8.717 ms 0/15 (0%)
```

Ahora se puede observar el jitter y la pérdida total de datagramas tanto en la ventana del cliente en Windows como en el terminal del servidor.

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 172.16.0.6, port 65130
[ 5] local 172.16.0.1 port 5201 connected to 172.16.0.6 port 64567
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec 112 KBytes 917 Kbits/sec 7.578 ms 0/14 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 112 KBytes 917 Kbits/sec 10.293 ms 1/15 (6.7%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 7.163 ms 0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 144 KBytes 1.18 Mbits/sec 6.962 ms 0/18 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 112 KBytes 915 Kbits/sec 12.279 ms 0/14 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 9.387 ms 0/16 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 6.337 ms 0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 128 KBytes 1.05 Mbits/sec 9.517 ms 0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 136 KBytes 1.11 Mbits/sec 11.790 ms 0/17 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 120 KBytes 983 Kbits/sec 8.717 ms 0/15 (0%)
[ 5] 10.00-10.08 sec 16.0 KBytes 1.65 Mbits/sec 11.373 ms 0/2 (0%)
-----
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.08 sec 1.24 MBytes 1.03 Mbits/sec 11.373 ms 1/159 (0.63%)
```

- **Realizar transmisión de datos desde el servidor al cliente.**

Utilice la opción “-R” como se observa a continuación.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -R
```

Si la prueba produce resultados inusuales, reduzca la longitud de los datos (búfer), ya que la longitud de datos predeterminada es de 8 kB para UDP mediante el siguiente comando.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -R -l 1K
```

- **Configurar el ancho de banda objetivo.**

Use la opción “-b” como se observa a continuación el código indica que el ancho de banda objetivo debe ser posible 5 Mbps .

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b - R 5M
```

- **Realizar prueba de rendimiento de UDP.**

Use la primera línea de código para la prueba del envío de paquetes UDP desde el servidor al cliente y la segunda línea para el envío de paquetes UDP desde el cliente al servidor utilizando todos los parámetros necesarios para mejorar los resultados de las pruebas.

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b 5M -R -l 1k
> iperf3 -s 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
```

```
D:\1. Biblioteca Personal\Documentos\CITEL\Tesis\iperf-3.0.11-win64>iperf3 -c 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
Connecting to host 172.16.0.1, port 5201
[ 4] local 192.168.8.100 port 59086 connected to 172.16.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.01    sec 553 KBytes   4.48 Mbits/sec 553
[ 4] 1.01-2.01    sec 630 KBytes   5.17 Mbits/sec 630
[ 4] 2.01-3.01    sec 610 KBytes   5.00 Mbits/sec 610
[ 4] 3.01-4.00    sec 604 KBytes   4.97 Mbits/sec 604
[ 4] 4.00-5.01    sec 608 KBytes   4.93 Mbits/sec 608
[ 4] 5.01-6.01    sec 608 KBytes   4.99 Mbits/sec 608
[ 4] 6.01-7.01    sec 611 KBytes   5.01 Mbits/sec 611
[ 4] 7.01-8.01    sec 619 KBytes   5.10 Mbits/sec 619
[ 4] 8.01-9.01    sec 611 KBytes   5.01 Mbits/sec 611
[ 4] 9.01-10.00   sec 611 KBytes   5.02 Mbits/sec 611
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.00   sec 5.92 MBytes  4.97 Mbits/sec 0.945 ms    0/6065 (0%)
[ 4] Sent 6065 datagrams
```

Tarea 7: Verificar latencia de red LTE.

- **Realizar prueba de ruta.**

Verificar la latencia de la red mediante una prueba de ruta ingresando al símbolo de sistema del cliente.

Utilice el comando “tracert” el cual determina la ruta de destino haciendo uso de RTT (tiempo de ida y vuelta).

```
> tracert 8.8.8.8
```

- **Realizar prueba de ping.**

Para medir el RTT de una mejor forma se utiliza el comando “ping”. El cual brinda información de los tiempos RTT mínimos, máximos y un valor medio.

```
> ping 192.168.8.1
```

8. Interpretación de resultados

- **Realizar pruebas de rendimiento TCP para un número creciente de flujos paralelos de 5,10,20,30 para el enlace ascendente y descendente.**

Para el enlace ascendente utilice el siguiente comando:

```
> iperf3 -c 172.16.0.1 -t 20 -O 2 -P 5
```

Utilice el siguiente comando para el enlace ascendente

```
> iperf3 -s 172.16.0.1 -R -t 20 -O 2 -P 5
```

Los resultados que se presentan a continuación pueden variar dependiendo de la prueba, sin embargo, deben ser próximos a estos.

Flujos paralelos	Enlace ascendente Mbits/sec	Enlace descendente Mbits/sec
	25PRB	

5	8.29	5.00
10	7.87	6.04
20	7.77	6.77
30	7.46	7.67
50PRB		
5	18.5	6.50
10	18.4	7.76
20	18.2	8.64
30	18.5	9.52
100PRB		
5	18.06	23.3
10	18.5	23.8
20	18.7	27.3
30	18.8	26.7

- Realizar pruebas de rendimiento UDP para el enlace ascendente y descendente utilizando un ancho de banda objetivo de 5,10,15,20. Mbps, Registrar el rendimiento, jitter y la tasa de perdida de datagramas.

Utilice los siguientes códigos respectivamente para cada enlace:

```
> -c 172.16.0.1 -u -b 5M --get-server-output -l 1k
> -c 172.16.0.1 -u -b 5M -R -l 1k
```

Los valores obtenidos se muestran a continuación, los mismos pueden variar dependiendo del comportamiento de la red, sin embargo, deben ser próximos a los mostrados en la tabla.

BW (Mbps)	Rendimiento UDP (Mbps)	Jitter UL (ms)	Tasa de perdida de datagramas UL (%)	Rendimiento UDP (Mbps)	Jitter DL (ms)	Tasa de perdida de datagramas DL (%)
25 PRBs						
5	4.96	1.766	0.017	5.00	4.711	0
10	9.92	0.891	14	8	3.709	0.41
15	14.9	0.919	40			
20	19.8	0.910	55			
50 PRBs						
5	4.96	1.609	0	5.00	2.067	0
10	9.92	0.607	0	10.1	1.975	0.47
15	14.9	0.443	0	14	1.682	0.72
20	19.8	0.445	4			
100 PRBs						
5	4.97	0.634	0	5	0.287	0
10	9.91	0.470	0	10	0.612	0.06
15	14.9	0.461	0	15	0.159	3.8
20	19.8	0.459	7	20	0.399	5.1

- Realizar una prueba de ping para medir el RTT promedio hacia el dongle LTE, EPC y un servidor externo.

A continuación, se muestran los valores obtenidos, los mismos pueden variar dependiendo del comportamiento de la red, sin embargo, deben ser próximos a los mostrados en la tabla.

PRBS	RTT medio (ms) 192.168.8.1	RTT medio (ms) 172.16.0.1	RTT medio (ms) 8.8.8.8
25	23	34	97
50	24	33	97
100	24	34	96

9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

2.5 Práctica 5:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 5**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

1. Tema

Recuperación de temporización de símbolo FDD-LTE y compensación de desplazamiento de frecuencia fraccional.

2. Introducción

En esta práctica de laboratorio, inicialmente se analizará el efecto del desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación OFDM. A continuación, se llevará a cabo la aplicación de la estimación y compensación CFO para una señal FDD-LTE capturada en tiempo real.

3. Objetivos

- Analizar el efecto de desplazamiento de tiempo y de la frecuencia portadora en la demodulación OFDM.
- Realizar ajustes para compensar el desplazamiento temporal y frecuencia fraccional para una señal FDD-LTE de enlace descendente.

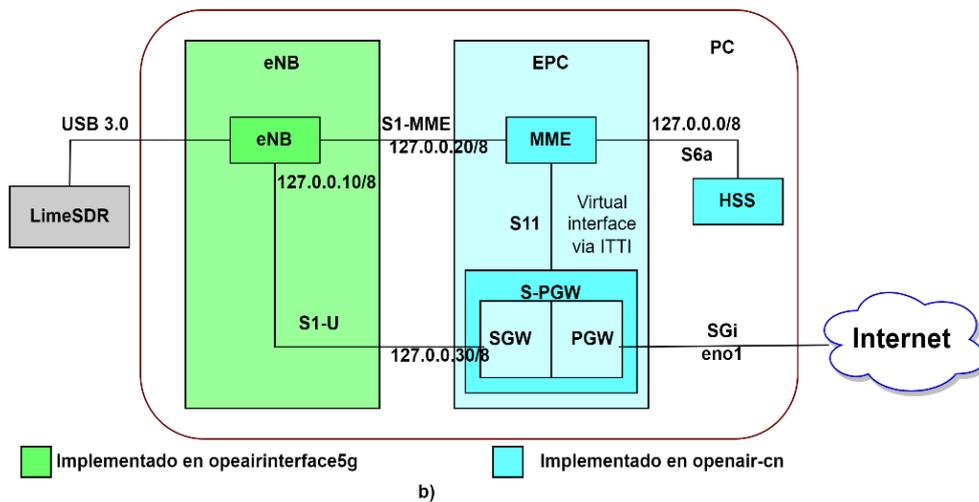
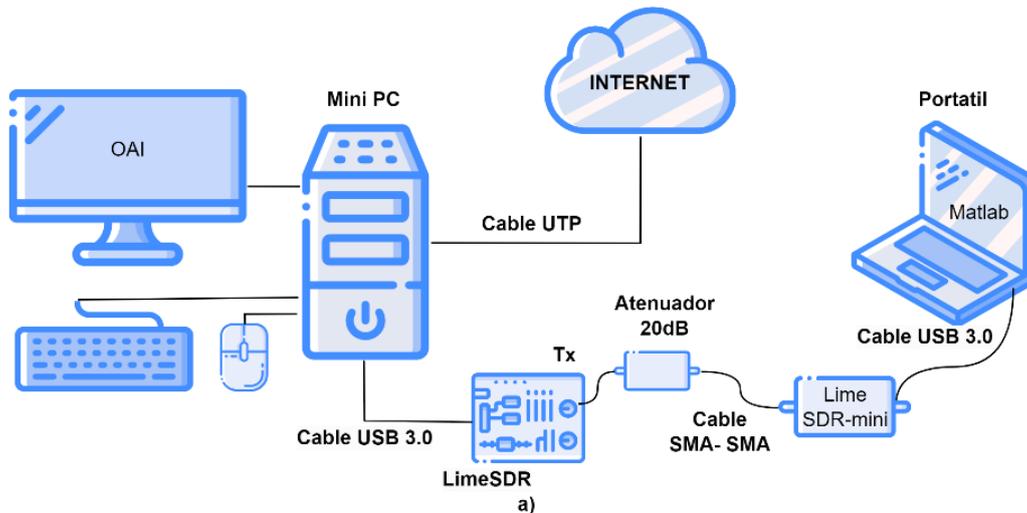
4. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre modulación y demodulación OFDM para una señal FDD LTE, estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML), compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de desplazamiento de frecuencia portadora (CFO).

5. Materiales y equipos

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| - Mini PC con OpenAirInterface. | - Cable SMA(m) a SMA(m). |
| - LimeSDR | - LimeSDR mini |
| - 2 cables USB 3.0 (m) a USB (h). | - Portátil. |
| - Atenuador 20dB. | - Matlab. |
| - Cable UTP. | |

6. Diagrama de la topología



7. Desarrollo

Tarea 1: Impacto del desplazamiento de temporización y CFO en la demodulación OFDM.

- Generar un código en Matlab que simule el proceso de modulación y demodulación de símbolos utilizando la modulación OFDM.

Genere un bucle de 3 iteraciones, con un vector de datos aleatorios con valores entre 0 y 15, utilice modulación 16QAM. Aplique la transformada inversa de Fourier (IFFT) y añada un prefijo cíclico al símbolo OFDM en cada iteración.

Para el proceso de demodulación, elimine el prefijo cíclico y recupere el símbolo demodulado en función de la frecuencia.

```
%MODULACION Y DEMODULACION DE SIMBOLOS OFDM
```

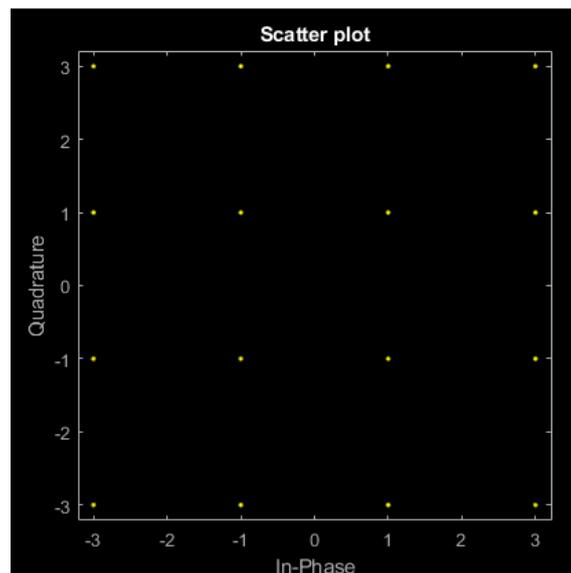
```
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 0; % desplazamiento de tiempo
eps = 0; % desplazamiento de frecuencia
L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
num_simbolos = 3;
```

```

sk = [];% Inicialización del vector para almacenar los datos
for n = 1:num_simbolos
    data = randi([0 15], N, 1); % Generar vector de datos
    s = qammod(data, 16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
    sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
    if n == 2
        symb = [sf(N - L + 1:N); sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
    else
        symb = [sf(N - LCP1 + 1:N); sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
    end
    sk = [sk; symb];
end

datos_demodulados = [];% Inicialización del vector para almacenar los datos
demodulados
% Demodulación de la señal OFDM
for i = 1:num_simbolos
    % Obtener el símbolo OFDM recibido
    simbolo_rx = sk((i - 1) * (N + LCP1) + 1 : i * (N + LCP1));
    % Eliminar el prefijo cíclico
    simbolo_sin_prefijo = simbolo_rx(LCP1 + 1 : end);
    % FFT para convertir al dominio de la frecuencia
    simbolo_demodulado = fft(simbolo_sin_prefijo);
end
scatterplot(simbolo_demodulado);
scatterplot(R1); % diagrama de constelación

```



La sincronización temporal de las muestras es precisa y no hay compensación de la frecuencia de la portadora, es posible lograr una recuperación perfecta de los símbolos de datos, incluso sin realizar ajustes en la sincronización temporal y en la compensación de la frecuencia de la portadora.

- **Generar un código en Matlab para considerar el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia en 3 casos.**
 - **Sin corrección de tiempo y CFO.**
 - **Solo con corrección de tiempo.**
 - **Con corrección de tiempo y corrección de CFO.**

Modifique el código anterior basándose en el modelo de señal recibida $r(k)$ en un canal sin dispersión y afectado por ruido gaussiano blanco aditivo, el cual se describe mediante la siguiente ecuación.

$$r(k) = s(k - \tau) \cdot e^{\frac{j2\pi\epsilon k}{N}} + n(k) \quad k = 0, 1, \dots$$

Donde:

- τ es el tiempo de llegada desconocido de un símbolo.
- ϵ denota el desplazamiento de frecuencia.
- $n(k)$ es el ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN).

Identifique los 3 tipos de casos propuestos. Empleando la generación de retraso temporal y CFO en la transmisión, haga uso de un gráfico de dispersión para visualizar los resultados.

```

N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

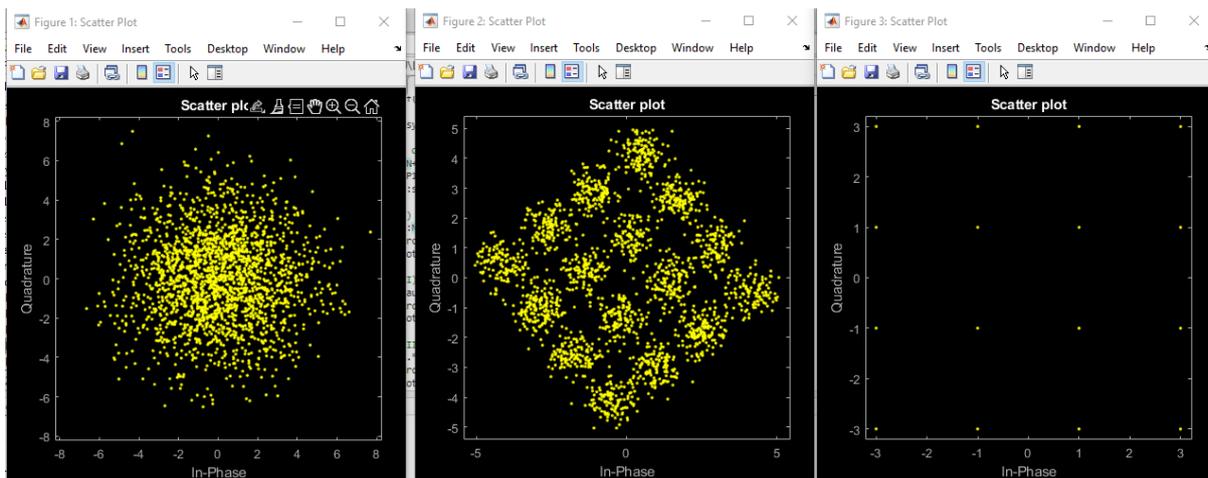
% Caso (I)
rc1 = r(1:N+L); % Sin tiempo y corrección CFO
R1 = fft(rc1(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R1); % diagrama de constelación

% Caso (II)
rc2 = r(tau+1:tau+N+L); % Corrección de tiempo
R2 = fft(rc2(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R2); % diagrama de constelación

% Caso (III)
rc3 = rc2.*exp(-1i*2*pi*eps*(tau+1:tau+N+L)'/N); % corrección de CFO
R3 = fft(rc3(L+1:end)); % eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R3); % diagrama de constelación

```

La figura 1 corresponde al caso 1, la figura 2 al caso 2 y la figura 2 al caso 3.



Tarea 2: Compensación de temporización de símbolos OFDM y estimación de CFO.

- **Generar un código en Matlab que permita calcular la estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML).**

Utilice el código anterior hasta la generación de observaciones con retraso y CFO.

La estimación conjunta de máxima verosimilitud (ML) permite encontrar el retardo temporal óptimo y el desplazamiento de frecuencia, utilizado para maximizar una métrica específica que evalúa la calidad de la señal o su relación con respecto al ruido e interferencia mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{\tau}_{ML} = \arg \frac{\max}{\tau} \{J(\tau)\} = \arg \frac{\max}{\tau} \{|\gamma(\tau)| - \rho\phi(\tau)\}$$

$$\hat{\epsilon}_{ML} = -\frac{1}{2\pi} \angle \gamma(\hat{\tau}_{ML})$$

Use una función que calcule la función objetivo para la estimación del retardo temporal y del desplazamiento de frecuencia utilizando la ecuación anterior.

```
function [t,e] = MLObjFun(r,N,L)
% r: Señal recibida
% N: tamaño de muestras
% L: Longitud del prefijo cíclico

% Inicialización de variables para almacenar métricas
gamma = zeros(1,N+1);
phi = zeros(1,N+1);
rho = 0.98;
for theta=1:N+1
    for k = theta:theta+L-1
% Cálculo de gamma y phi basado en la señal recibida r
        gamma(theta) = gamma(theta) + r(k)*conj(r(k+N));
        phi(theta) = phi(theta) + 0.5*(abs(r(k))^2 + abs(r(k+N))^2);
    end
end
% Cálculo de la función objetivo t (retardo temporal)
t = abs(gamma)-rho*phi;
% Cálculo de la estimación de desplazamiento de frecuencia e
e = -1/(2*pi)*angle(gamma);
```

Llame a la función en el código principal de la actividad, cree figuras que permiten identificar la estimación conjunta de máxima verosimilitud.

```

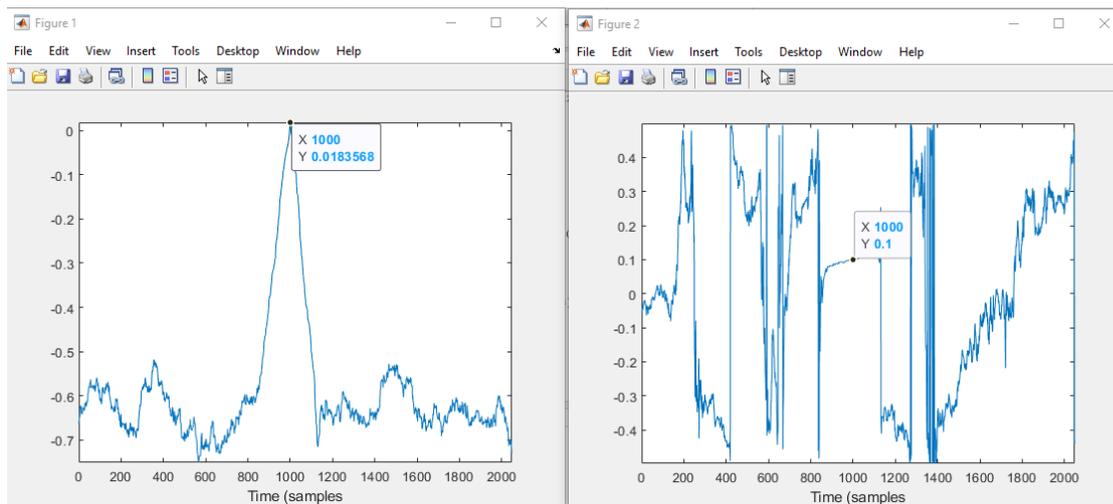
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el simbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar simbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar Simbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (simbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (simbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');
figure; plot(0:N,e); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');

```



En la figura 1 se observa el índice máximo de la función objetivo produce la compensación de tiempo en “1000” y la figura 2 la compensación de frecuencia en 0.1.

- **Generar un código en Matlab para identificar los efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP) en los siguientes casos:**

Utilice el código anterior y realice modificaciones que permitan trabajar con los diferentes casos propuestos.

- Longitud CP0 real y longitud CP1 asumido

```
%Caso 1: LCP0 real, LCP1 asumido
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP0; % longitud de CP para el símbolo 2
sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP0+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

% Generar observaciones con retraso y CFO correcto
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP0-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Tiempo (samples)');

% Generar observaciones con retraso y CFO (CP incorrecto)
L2 = LCP1; % de longitud de CP incorrecta
k = (0:2*N+L2-1)';
st = N+LCP0-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L2)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L2);
hold on; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Tiempo (samples)');
legend('CP correcto', 'CP incorrecto');
```

- Longitud CP1 real y longitud CP0 asumido.

```
%Caso 2: LCP1 real, LCP0 asumido
N = 2048; % Tamaño FFT (número de datos que el analizador toma en cada medición)
LCP0 = 160; % longitud prefijo cíclico CP0
LCP1 = 144; % longitud prefijo cíclico CP1
tau = 1000; % desplazamiento de tiempo
eps = 0.1; % desplazamiento de frecuencia

L = LCP1; % longitud de CP para el símbolo 2
```

```

sk = [];
for n = 1:3
data = randi([0 15],N,1); % Generar vector de datos
s = qammod(data,16); % Generar símbolos de datos 16 QAM
sf = ifft(s); % Generar símbolo OFDM
if n==2
symb = [sf(N-L+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 2)
else
symb = [sf(N-LCP1+1:N);sf]; % Añadir CP (símbolo 1&3)
end
sk = [sk;symb];
end

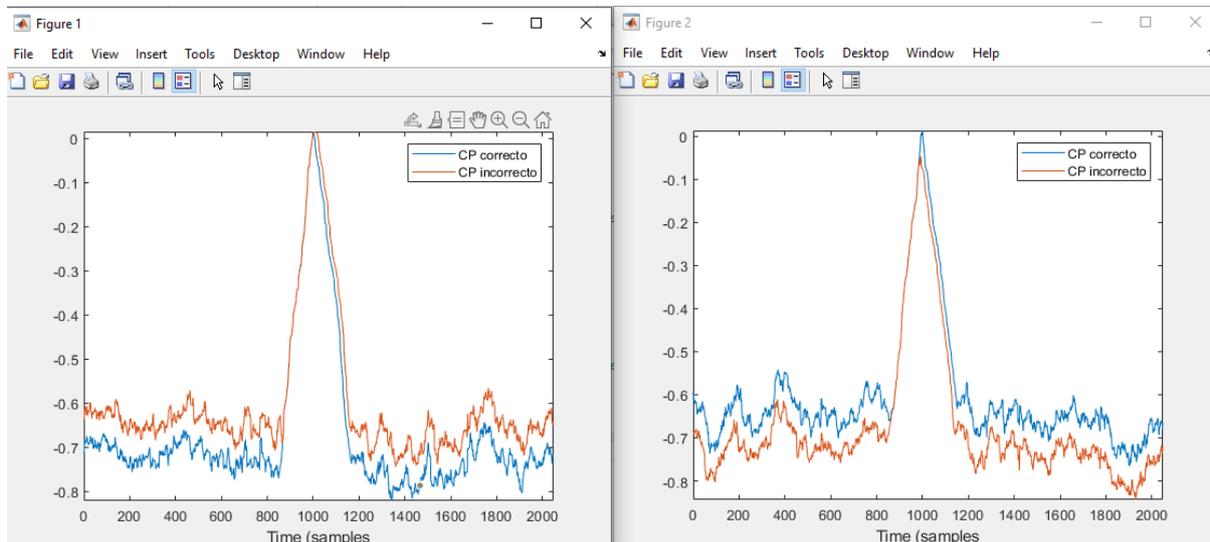
% Generar observaciones con retraso y CFO correcto
k = (0:2*N+L-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L);
figure; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');

% Generar observaciones con retraso y CFO (CP incorrecto)
L2 = LCP0; % de longitud de CP incorrecta
k = (0:2*N+L2-1)';
st = N+LCP1-tau+1;
r = sk(st:st+(2*N+L2)-1).*exp(1i*2*pi*eps*k/N); % observaciones con retraso y CFO

%Calcular y trazar las funciones objetivo ML
[t,e] = MLObjFun(r,N,L2);
hold on; plot(0:N,t); axis('tight'); xlabel('Time (samples)');
legend('CP correcto', 'CP incorrecto');

```



Tarea 3: Capturar señal del enlace descendente LTE.

- **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**
Conecte los componentes de la red tal como se muestra en el diagrama de la topología.
- **Configurar software OAI.**

Cargue los archivos ya configurados mediante los siguientes comandos.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
```

Ingrese la contraseña “lte” para ejecutar como superusuario.

- **Iniciar la red LTE.**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```
===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   | 0              | 0                          | 0                            |
Connected UEs  | 0              | 0                          | 0                            |
Default Bearers | 0             | 0                          | 0                            |
S1-U Bearers  | 0              | 0                          | 0                            |
===== STATISTICS =====
```

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

```
- Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -d -o <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

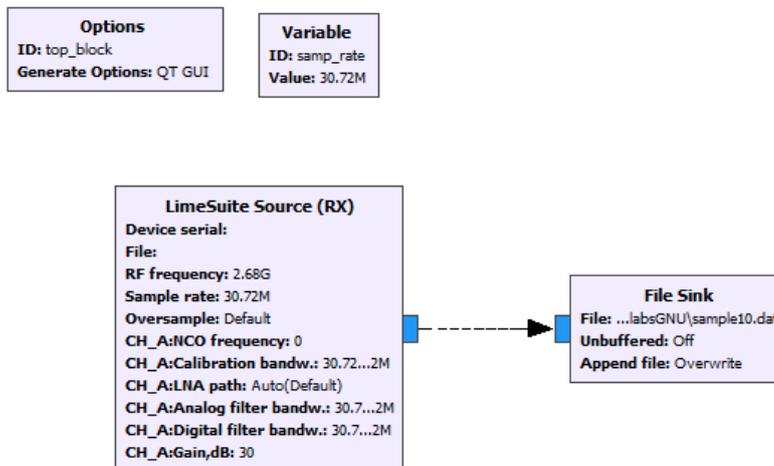
Un ejemplo sería el eNB para 100 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -d -o ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

Al finalizar y si todos los pasos fueron los correctos aparecerán las ventanas Soft Scope

- **Capturar señal LTE.**

Utilice GNU Radio en el ordenador portátil para capturar las señales del enlace descendente LTE en vivo.



- Configure "samp_rate" a 30.72 MHz para la señal LTE estándar de 20 MHz. Para señales LTE de 5 y 10 MHz se usa frecuencias de muestreo de 7.68 MHz y 15.36 MHz, respectivamente.
- En el bloque "LimeSuite Source", configure la "frecuencia de RF" en la frecuencia de transmisión de enlace descendente LTE a 2.68 GHz.
- Ajuste la "Ganancia" a un valor adecuado para evitar el recorte.
- Las opciones "Calibration bandw.", "Analog filter bandw." y "Filtro digital bandw." en la pestaña CH_A se cambian el valor a samp_rate.
- En el bloque "File Sink", elija una carpeta y nombre de archivo (.dat) para almacenar las muestras capturadas.

Reproduzca el flujo, y deténgalo inmediatamente para evitar archivos de gran tamaño.

Tarea 4: Compensación de temporización y estimación de CFO en señal LTE.

- **Transferir la captura de señal a Matlab.**

Importe el archivo generado a Matlab, mediante la creación de una función en la cual se abra el archivo y devuelva el contenido como un vector, tratándolos como números complejos de 32 bits.

```
function v = read_complex_binary (filename, count)
% Función para leer datos complejos desde un archivo binario
% Parámetros:
% - filename: Nombre del archivo binario a leer
% - count: Número opcional de elementos a leer

% Comprobar el número de argumentos de entrada
m = narginchk (1,2,nargin);

if (m)
    usage (m);
end

% Establecer el valor predeterminado para count si no se proporciona
if (nargin < 2)
```

```

count = Inf;
end

% Abrir el archivo en modo lectura binaria
f = fopen (filename, 'rb');

% Verificar si la apertura del archivo fue exitosa
if (f < 0)
    v = 0; % Si falla, establecer el resultado en 0
else
    % Leer datos del archivo en formato de matriz 2xcount de números de punto
    flotante de 32 bits
    t = fread (f, [2, count], 'float');

    % Cerrar el archivo después de la lectura
    fclose (f);

    % Crear un vector de números complejos combinando partes real e imaginaria
    v = t(1,:) + t(2:)*1i;

    % Obtener dimensiones y transponer el vector
    [r, c] = size (v);
    v = reshape (v, c, r);
end

```

- **Importar muestras y trazar espectro de potencia y función objetivo.**

Utilice la función previamente creada, “read_complex_binary”, para importar datos desde el archivo binario capturado.

Utilice la función “periodogram” para calcular el espectro de potencia de las muestras y genere gráficos para las partes real e imaginaria en el dominio temporal.

Solicite al usuario ingresar el índice de inicio basado en la figura del componente I, recorte las muestras desde el índice de inicio proporcionado.

Implemente un bucle para calcular y graficar la función objetivo de máxima verosimilitud (ML) para 10 símbolos OFDM, asumiendo diferentes longitudes de prefijo cíclico (LCP0 y LCP1).

Presente los resultados de la función objetivo en una nueva figura.

```

% Configuración de parámetros
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs*20e-3; % Número de muestras (20ms)

% Lectura de muestras complejas desde un archivo binario
v = read_complex_binary ('sample.dat', count);

% Gráfico del espectro de potencia de las muestras
figure, periodogram(v,[], 'centered', count, fs, 'power');
title('Espectro de Potencia'); % Título del gráfico
xlabel('Frecuencia (MHz)'); % Etiqueta del eje x
ylabel('Potencia Espectral (dB)'); % Etiqueta del eje y

% Gráfico de las partes real e imaginaria en el dominio temporal
figure;
subplot(2,1,1); plot(real(v));

```

```

axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)'); title('Componente I');
subplot(2,1,2); plot(imag(v));
axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)'); title('Componente Q');

% Configuración de parámetros adicionales
N = 2048; % Tamaño de la FFT
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1

% Solicitar al usuario el índice de la muestra de inicio
prompt = 'Ingrese el índice de la muestra de inicio: ';
st = input(prompt);

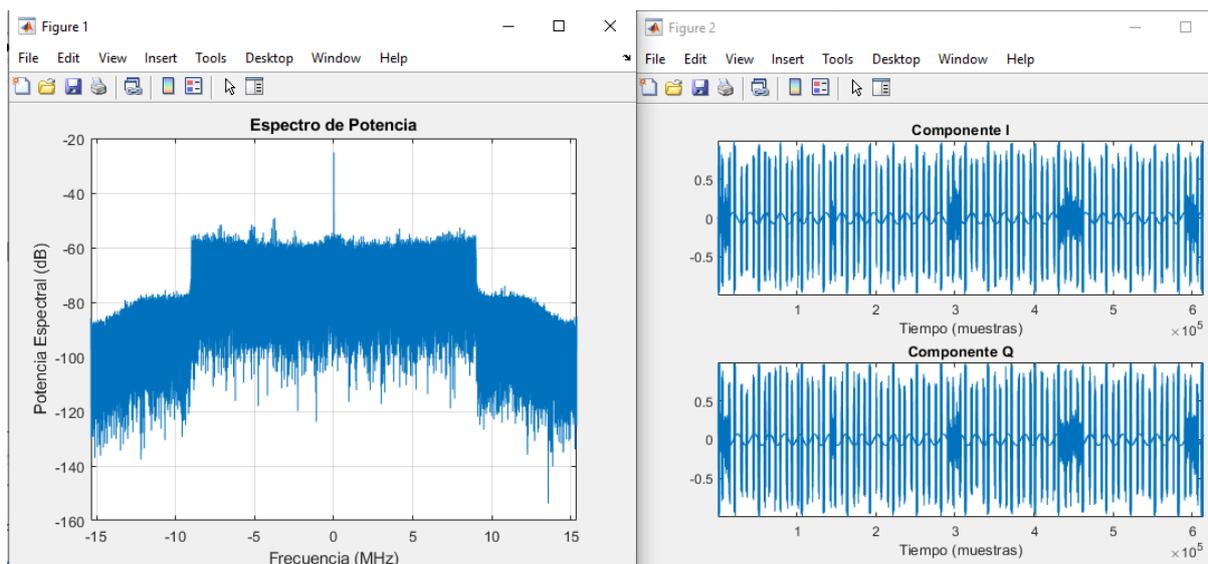
% Recortar el vector de muestras desde el índice de inicio
v = v(st:end);

% Gráfico de 10 símbolos OFDM con prefijos cíclicos de diferentes longitudes
figure;
for symb = 1:10 % Número de símbolos OFDM
    % Asumir prefijo cíclico LCP0
    r = v((N+LCP0)*(symb-1)+1:(N+LCP0)*(symb-1)+(2*N+LCP0));
    [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP0);
    plot((N+LCP0)*(symb-1):(N+LCP0)*(symb-1)+N,t, 'b'); hold on;

    % Asumir prefijo cíclico LCP1
    r = v((N+LCP1)*(symb-1)+1:(N+LCP1)*(symb-1)+(2*N+LCP1));
    [t,e] = MLObjFun(r,N,LCP1);
    plot((N+LCP1)*(symb-1):(N+LCP1)*(symb-1)+N,t, 'r'); hold on;
end
axis('tight'); xlabel('Tiempo (muestras)');

```

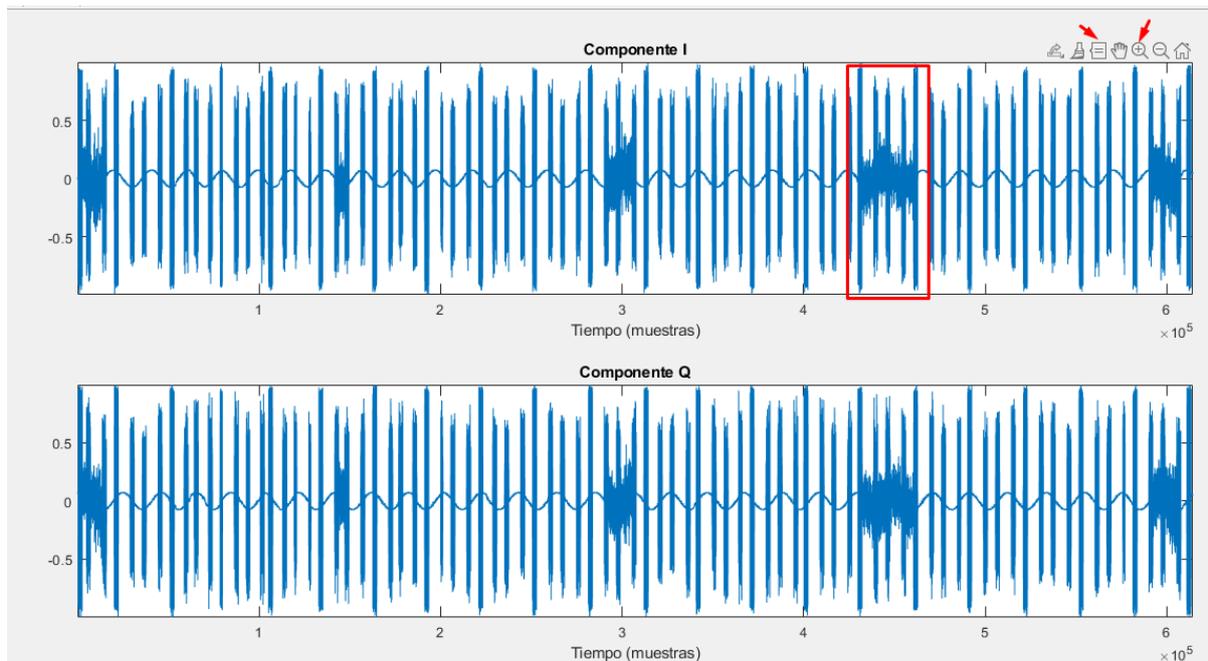
Al ejecutar el programa se genera 2 figuras iniciales el espectro de potencia y los componentes I y Q, además en la ventana de comando se imprime un texto el cual pide ingresar el índice de la muestra de inicio.



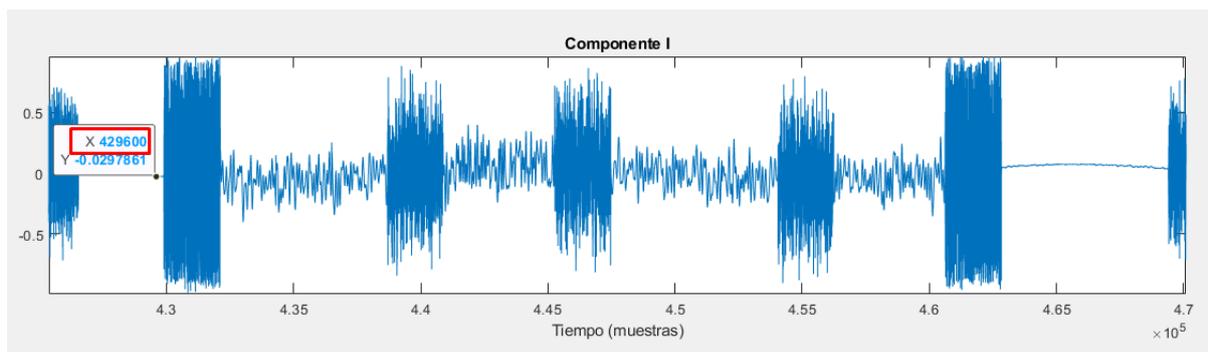
```
>> Lab5_T4
```

Ingrese el índice de la muestra de inicio:

Para ingresar el índice de la muestra, diríjase a la ventana del componente I, la señal de transmisión no es totalmente continua, para utilizar correctamente la recuperación de temporización de símbolos y el algoritmo de compensación de frecuencia se necesita una sección de la señal con transmisión continua. Identifique la señal como se observa a continuación utilice la herramienta “zoom in” para acercarse a la sección deseada y la herramienta “data tips” para marcar explorar los datos de la gráfica.



Identifique un punto cercano a la señal continua para averiguar el valor inicial de índice de muestra, como se observa en la siguiente imagen corresponde al eje x.



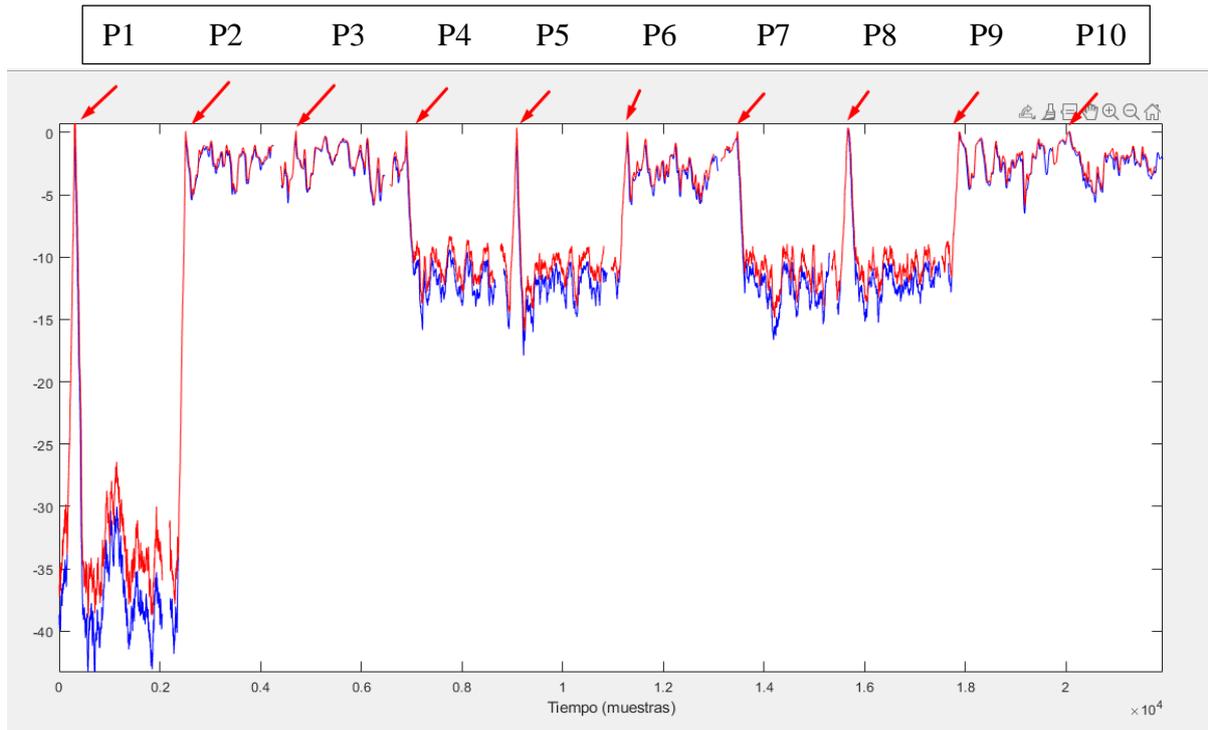
Ingrese el valor en la ventana de comandos y presione enter.

```
>> Lab5_T4
```

```
Ingrese el índice de la muestra de inicio: 429600
```

El programa ejecuta el resto de código y presenta una figura en la cual se traza la función objetivo considerando 10 símbolos OFDM, por lo que se observan 10 picos.

La línea roja es para la salida asumiendo una longitud CP de 160, mientras que la línea azul es para una longitud CP 144.



- **Generar un código de Matlab para la temporización de ML y la estimación y compensación de CFO.**

Para llevar a cabo esta actividad, se emplean los códigos previamente desarrollados en actividades anteriores. El procedimiento se inicia con la configuración de parámetros, seguido por la importación de muestras desde un archivo binario. Es esencial especificar el índice de inicio de la muestra durante este proceso. Posteriormente, se procesa los primeros tres símbolos OFDM. En esta etapa, se realiza la estimación del retardo y del Error de Frecuencia de Portadora (CFO), se elimina el Prefijo Cíclico (CP) y se efectúan gráficas de constelación y del espectro de potencia. A continuación, se presenta el código que ejecuta este proceso detallado.

```
% Configuración de parámetros
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs*20e-3; % Número de muestras (20ms)

% Importar muestras desde el archivo binario 'sample.dat'
v = read_complex_binary('sample.dat', count);

% Configuración adicional
N = 2048; % Tamaño de la FFT
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1

% Solicitar al usuario el índice de inicio
prompt = 'Ingrese el índice de la muestra de inicio: ';
st = input(prompt);

% Bucle para procesar 3 símbolos OFDM
for symb = 1:3
    % Verificar si el símbolo es el primero de cada grupo de 7
    if mod(symb,7)==1
        % Procesar con LCP0
        r = v(st:st+(2*N+LCP0)-1);
```

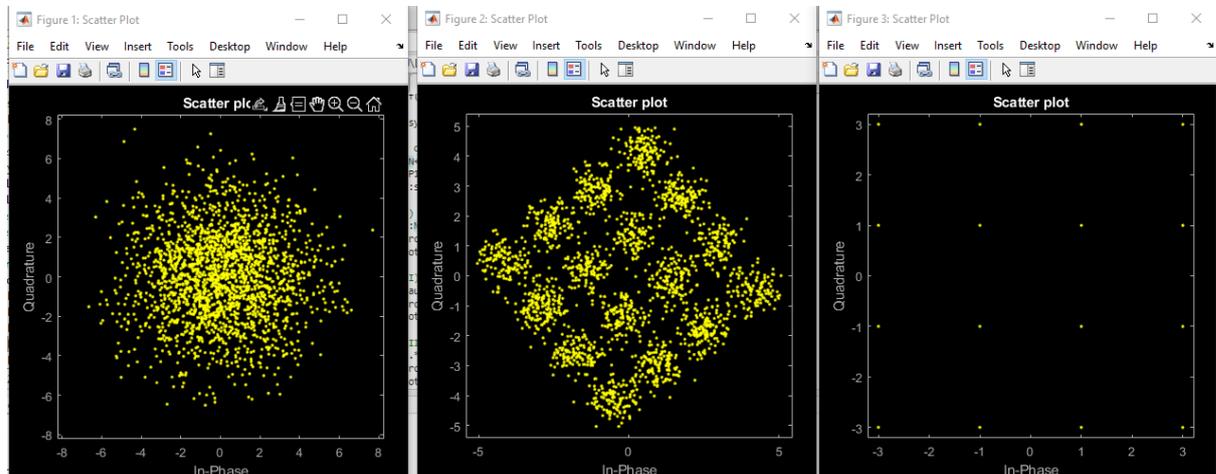
```

[t,e] = MObjFun(r,N,LCP0);
[~,tau] = max(t); % Estimar el retardo
eps = e(tau); % Estimar el CFO
rc = r(tau:tau+(N+LCP0)-1).*exp(-1i*2*pi*eps*(st+tau-1:st+tau+N+LCP0-
2).'/N); % Corrección de tiempo y CFO
R = fft(rc(LCP0+1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R(2:end)); % Excluir DC y trazar la constelación
figure, periodogram(rc(LCP0+1:end),[], 'centered',N,fs, 'power'); %
Graficar el espectro de potencia
st = st+tau+N+LCP0-1-1000; % Actualizar el índice de inicio
else
% Procesar con LCP1
r = v(st:st+(2*N+LCP1)-1);
[t,e] = MObjFun(r,N,LCP1);
[~,tau] = max(t); % Estimar el retardo
eps = e(tau); % Estimar el CFO
rc = r(tau:tau+(N+LCP1)-1).*exp(-1i*2*pi*eps*(st+tau-1:st+tau+N+LCP1-
2).'/N); % Corrección de tiempo y CFO
R = fft(rc(LCP1+1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
scatterplot(R(2:end)); % Excluir DC y trazar la constelación
figure, periodogram(rc(LCP1+1:end),[], 'centered',N,fs, 'power'); %
Graficar el espectro de potencia
st = st+tau+N+LCP1-1-1000; % Actualizar el índice de inicio
end
end
end

```

8. Interpretación de resultados

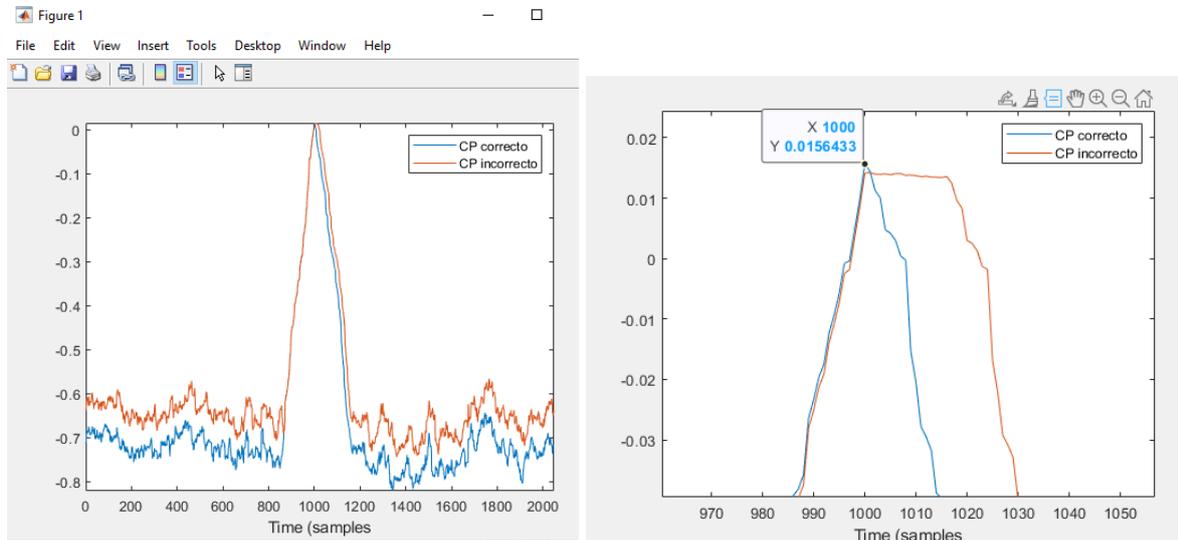
- **Realice un comparativa entre los diferentes casos realizados sobre el desplazamiento de tiempo y desplazamiento en frecuencia.**



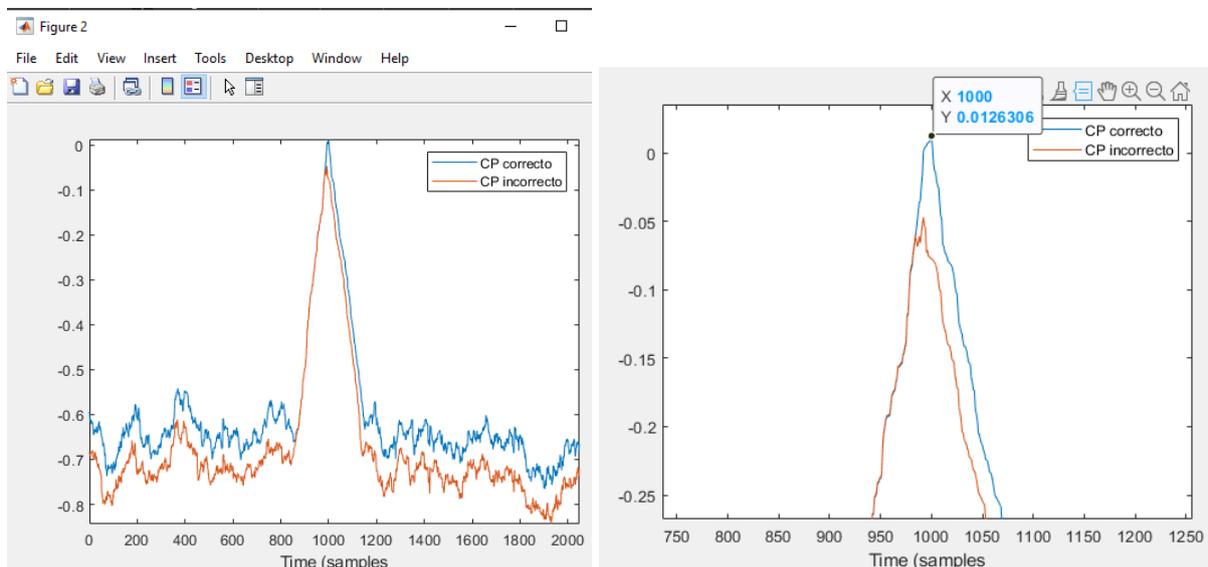
El proceso de recuperación de datos se ve vinculado a la comprensión del tiempo asociado con el símbolo y la corrección del CFO. Aunque se logre una sincronización de muestra impecable, la presencia del CFO agrega rotación y dispersión de los símbolos de datos, lo que resulta en errores significativos en la detección de símbolos. Sin embargo, a medida que se aborda y corrige el CFO a lo largo del tiempo, se consigue una recuperación óptima de los símbolos de datos, disminuyendo así los problemas previamente mencionados. Este proceso de corrección gradual del CFO se traduce en una mejora sustancial en la precisión de la recuperación de datos.

- **Realice una comparativa entre los diferentes casos realizados de efectos de un error de longitud del prefijo cíclico (CP).**

Para el primer caso Longitud CP0 real y longitud CP1 asumido en la gráfica que se obtiene, al realizar un acercamiento al pico mas alto se observa que estos valores son próximos.



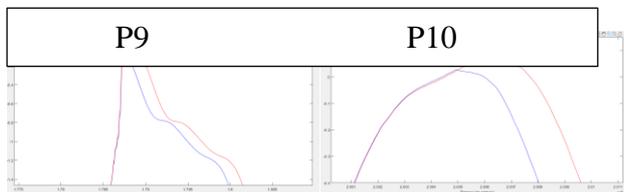
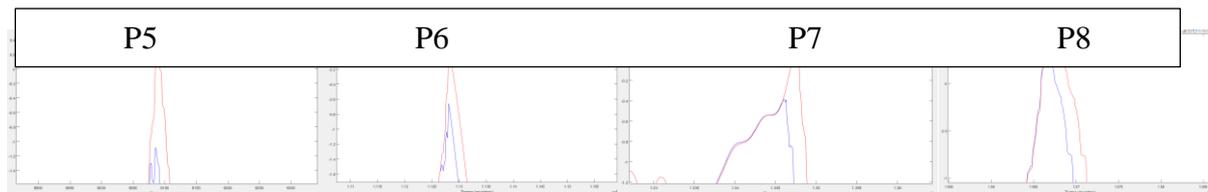
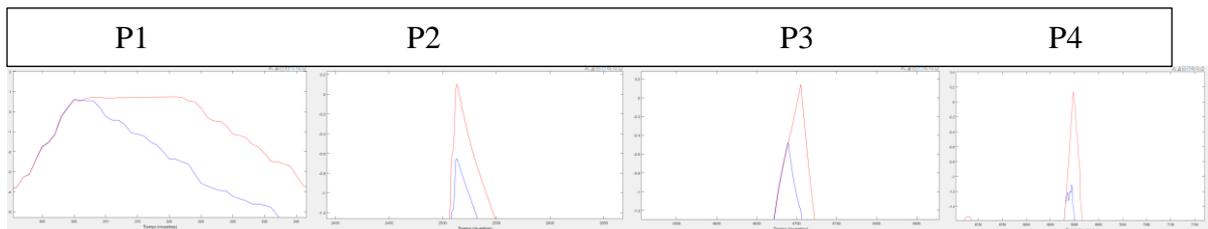
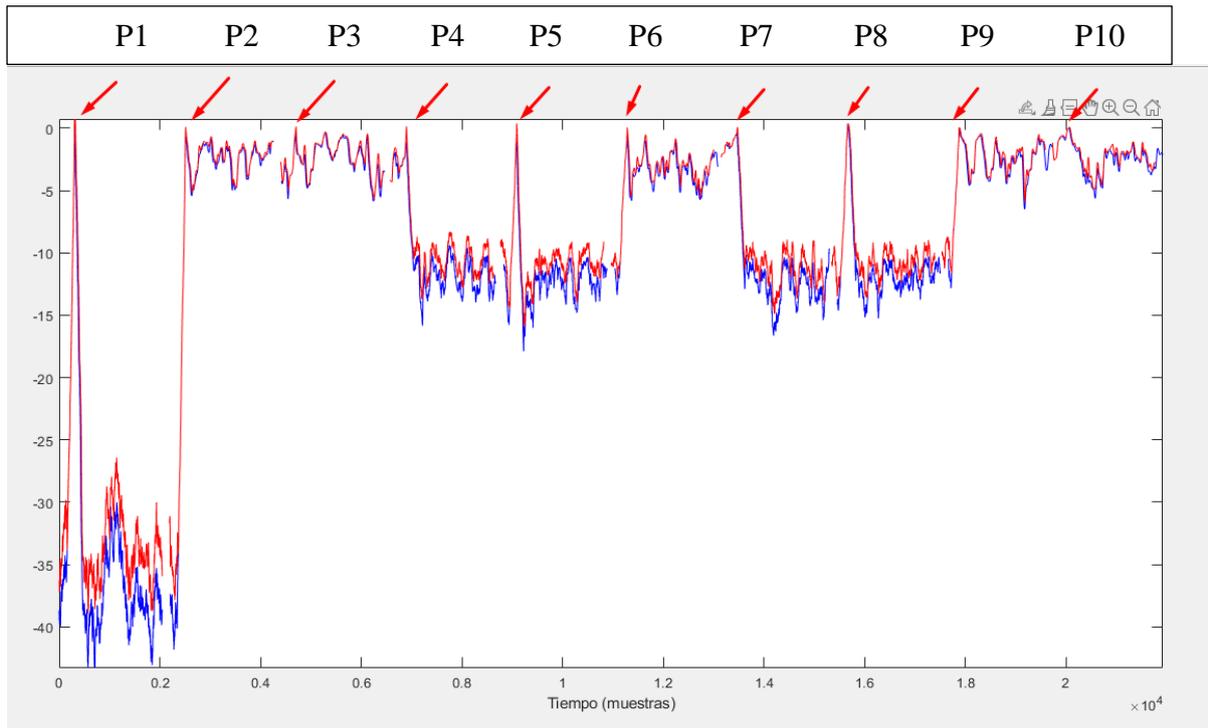
Para el segundo caso Longitud CP1 real y longitud CP0 asumido, al realizar el acercamiento se observa que el pico de la señal incorrecta no alcanza al pico de la señal correcta.



Se asume que si CP real es LCP0 los picos obtenidos son aproximadamente los mismos, sin embargo, esto no es cierto si el CP real es LCP1.

- **Determine la estructura de símbolos OFDM de la señal LTE capturada.**

Para determinar la estructura de símbolos OFDM se realiza un acercamiento a cada pico de la señal.

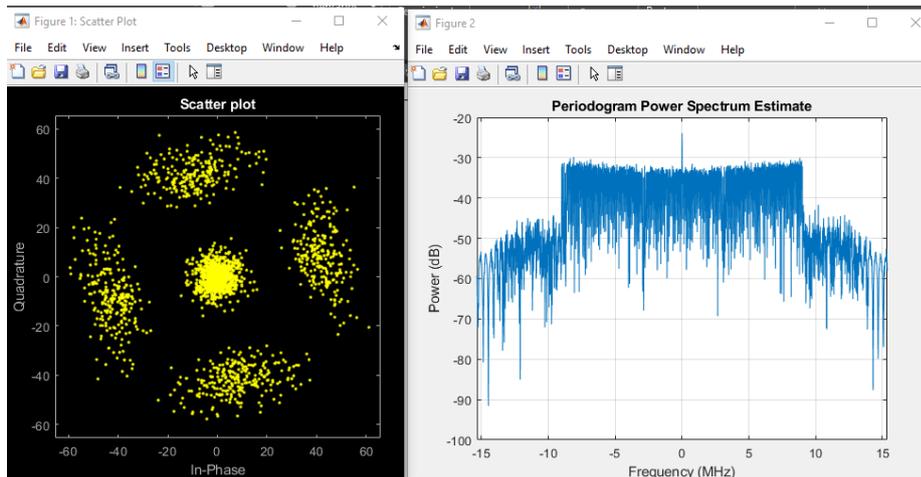


Se puede identificar que los picos 1 y picos 8 son casi exactamente los mismos esto demuestra que el CP real el $L_{CP0} = 160$, lo que concuerda con una estructura de símbolos OFDM para el caso de prefijo cíclico normal, el cual está compuesto por 7 símbolos OFDM, el primer símbolo tiene un prefijo cíclico más largo de 160 muestras mientras que los siguientes 6 símbolos tienen una longitud de 144 muestras.

- **Realice un análisis de la función objetiva de la estimación temporal en la señal LTE capturada.**

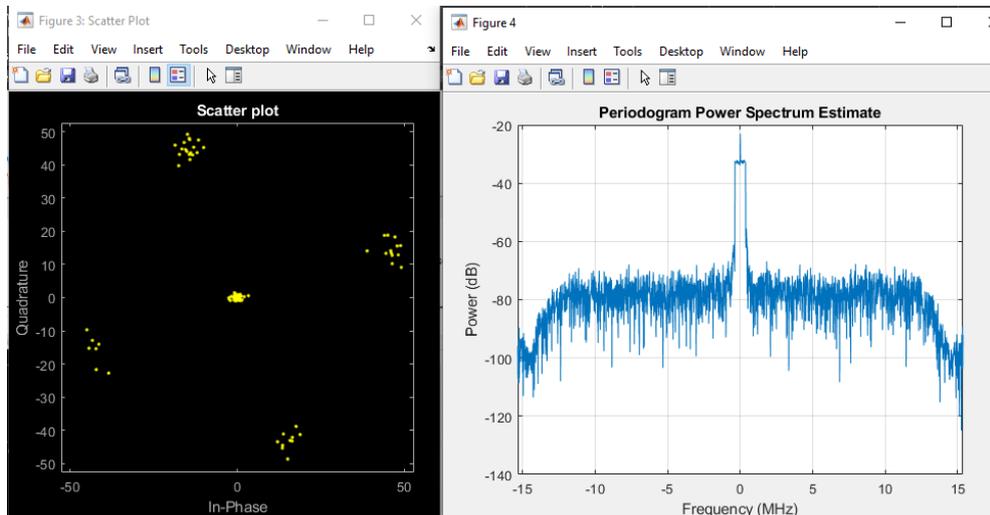
El diagrama de constelación muestra puntos dispersos y giratorios indicando problemas de ruido, interferencia, distorsión del canal desplazamiento de frecuencia.

Símbolo #1

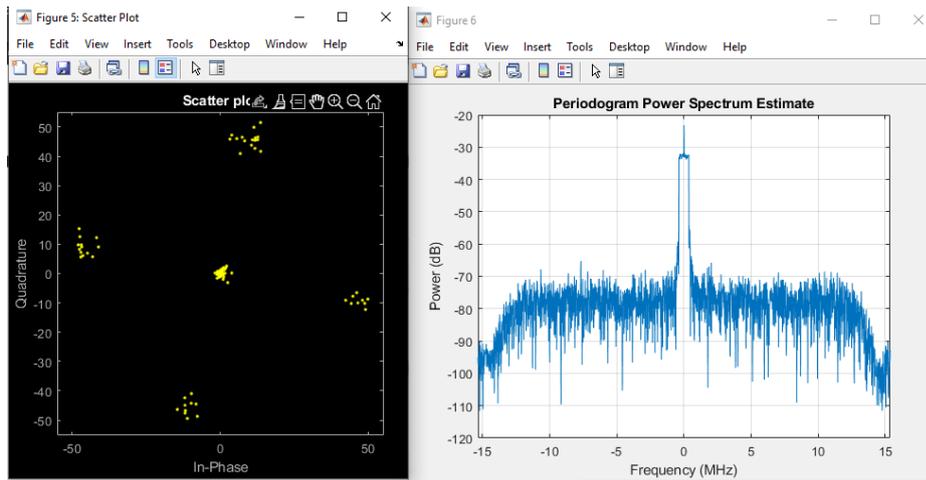


El símbolo 2 y 3 muestra puntos más agrupados sin embargo siguen siendo rotatorios, esto indica que ha mejorado la transmisión y esta menos afectada por interferencia o ruido sin embargo aun no presenta una sincronización completa.

Símbolo #2



Símbolo #3



9. Conclusiones y Recomendaciones

Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

10. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

2.7 Práctica 6:**GUIA DE LABORATORIO- REDES MOVILES****LABORATORIO N.º 6**

Estudiantes:.....

Docente:.....

Técnico Docente:.....

Fecha:.....

11. Tema

Búsqueda de celdas LTE: detección de ID de celda

12. Introducción

En esta práctica se comprenderá la secuencia Zadoff-Chu y la secuencia de longitud máxima utilizadas en PSS y SSS para el proceso de detección de ID de celda para una señal LTE.

13. Objetivos

- Detectar el ID de celda de sector utilizando la señal de sincronización primaria.
- Detectar el ID de celda y temporización de tramas, empleando la señal de sincronización secundaria.

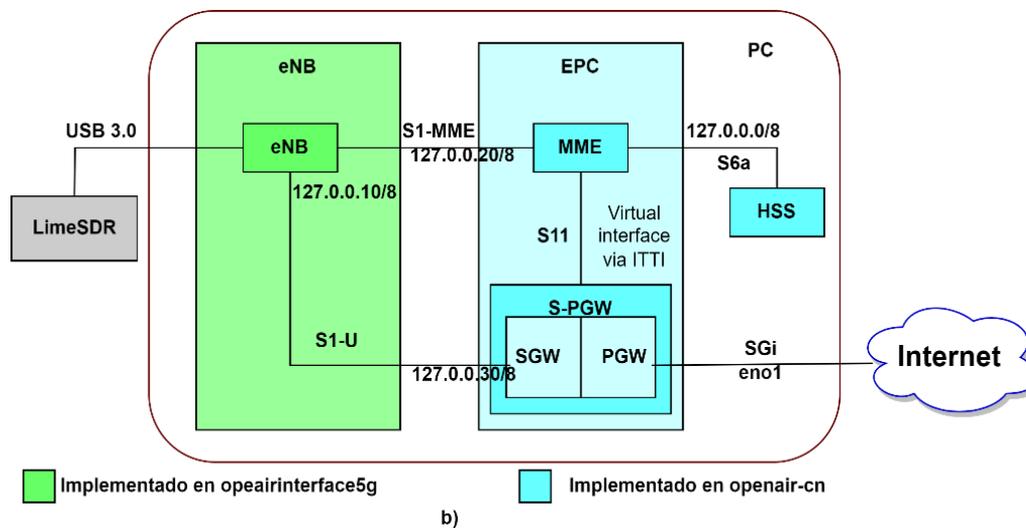
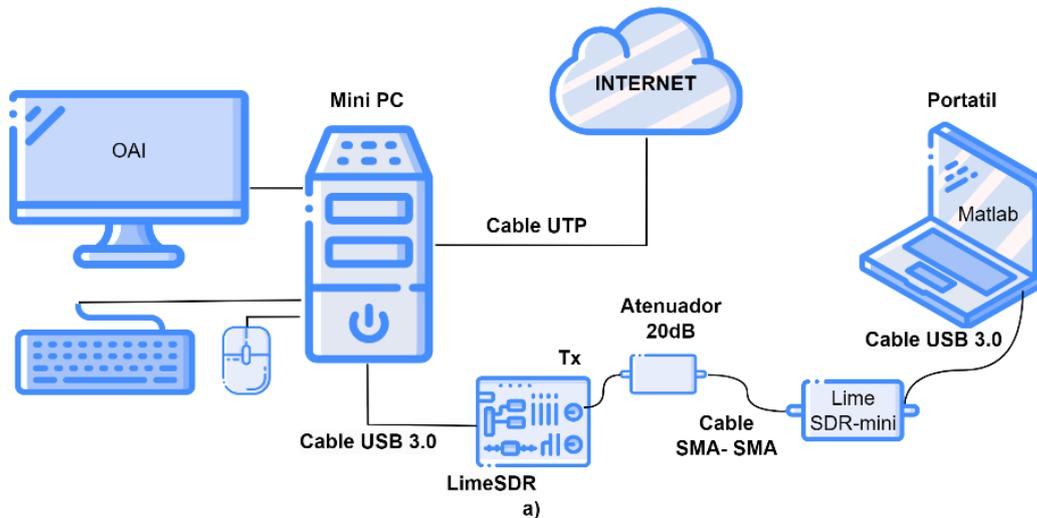
14. Preparatorio, fundamentación Teórica

Realizar una fundamentación bibliográfica sobre el proceso de sincronización de enlace descendente en la red LTE para obtener la identificación de la celda y la sincronización de tramas (PSS, SSS).

15. Materiales y equipos

- Mini PC con OpenAirInterface.
- LimeSDR
- cables USB 3.0 (m) a USB (h).
- Atenuador 20dB.
- Cable UTP.
- Cable SMA(m) a SMA(m).
- LimeSDR mini
- Portátil.
- Matlab.

16. Diagrama de la topología



17. Desarrollo

Tarea 1: Capturar señal del enlace descendente LTE.

- **Conectar los componentes de la red acorde a la topología.**

Conecte los componentes de la red tal como se muestra en el diagrama de la topología.

- **Configurar software OAI.**

Cargue los archivos ya configurados mediante los siguientes comandos.

```
$ cd LTEconfigs
$ chmod +x *
$ ./l2cfg.sh
```

Ingrese la contraseña "lte" para ejecutar como superusuario.

- **Iniciar la red LTE.**

Abra una nueva terminal y ejecute el HSS mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_hss
```

Cuando ejecute el MME el terminal de HSS ejecutara el mensaje que se muestra a continuación:

```
NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.OpenAir5G.Alliance'
```

Abra una nueva terminal y ejecute el MME mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; ./run_mme
```

Si se ejecuta el MME correctamente la terminal comenzará a indicar la tabla de estadísticas como se muestra a continuación.

```
===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display | Removed since last display |
Attached UEs   |                |                          |                             |
Connected UEs  |                |                          |                             |
Default Bearers|                |                          |                             |
S1-U Bearers   |                |                          |                             |
===== STATISTICS =====
```

Abra una nueva terminal y ejecute el SPGW mediante el siguiente comando:

```
$ cd openair-cn; source oaienv; cd scripts; sudo -E ./run_spgw
```

El SPGW está iniciado correctamente si sale el siguiente mensaje:

```
- Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

Abra una nueva terminal y ejecute eNB mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo bash
$ cd openairinterface5g; source oaienv
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -d -O <archivo de configuración
eNB> --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

<archivo de configuración eNB> puede ser utilizado para cada archivo eNB modificado.

```
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.25PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.50PRB.lmssdr.conf
./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf
```

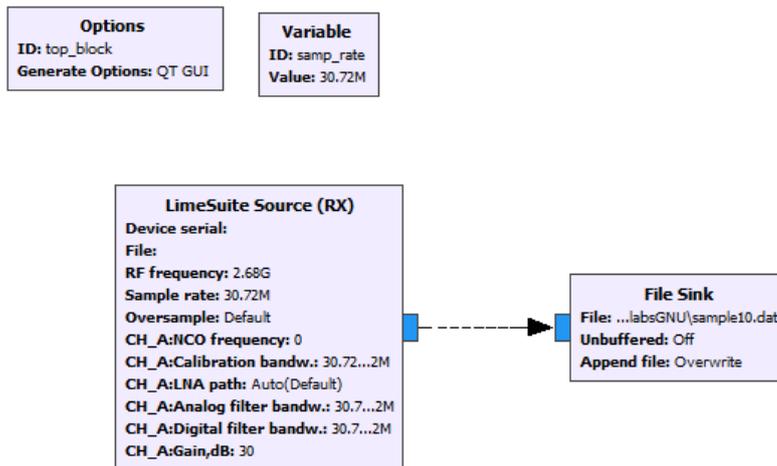
Un ejemplo sería el eNB para 100 PRB.

```
$ ./targets/bin/lte-softmodem.Rel14 -d -O ./targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-
EPC/CONF/enb.band7.tm1.100PRB.lmssdr.conf --rf-config-file
./targets/ARCH/LMSSDR/LimeSDR_above_1p8GHz_1v4.ini
```

Al finalizar y si todos los pasos fueron los correctos aparecerán las ventanas Soft Scope

- **Capturar señal LTE.**

Utilice GNU Radio en el ordenador portátil para capturar las señales del enlace descendente LTE en vivo.



- Configure "samp_rate" a 30.72 MHz para la señal LTE estándar de 20 MHz. Para señales LTE de 5 y 10 MHz se usa frecuencias de muestreo de 7.68 MHz y 15.36 MHz, respectivamente.
- En el bloque "LimeSuite Source", configure la "frecuencia de RF" en la frecuencia de transmisión de enlace descendente LTE a 2.68 GHz.
- Ajuste la "Ganancia" a un valor adecuado para evitar el recorte.
- Las opciones "Calibration bandw.", "Analog filter bandw." y "Filtro digital bandw." en la pestaña CH_A se cambian el valor a samp_rate.
- En el bloque "File Sink", elija una carpeta y nombre de archivo (.dat) para almacenar las muestras capturadas.

Reproduzca el flujo, y deténgalo inmediatamente para evitar archivos de gran tamaño.

- **Transferir la captura de señal a Matlab**

Importe el archivo generado a Matlab, mediante la creación de una función en la cual se abra el archivo y devuelva el contenido como un vector, tratándolos como números complejos de 32 bits.

```
function v = read_complex_binary (filename, count)
% Función para leer datos complejos desde un archivo binario
% Parámetros:
% - filename: Nombre del archivo binario a leer
% - count: Número opcional de elementos a leer

% Comprobar el número de argumentos de entrada
m = nargchk (1,2,nargin);

if (m)
    usage (m);
end

% Establecer el valor predeterminado para count si no se proporciona
if (nargin < 2)
    count = Inf;
end

% Abrir el archivo en modo lectura binaria
f = fopen (filename, 'rb');

% Verificar si la apertura del archivo fue exitosa
```

```

if (f < 0)
    v = 0; % Si falla, establecer el resultado en 0
else
    % Leer datos del archivo en formato de matriz 2xcount de números de punto
    flotante de 32 bits
    t = fread (f, [2, count], 'float');

    % Cerrar el archivo después de la lectura
    fclose (f);

    % Crear un vector de números complejos combinando partes real e imaginaria
    v = t(1,:) + t(2,)*1i;

    % Obtener dimensiones y transponer el vector
    [r, c] = size (v);
    v = reshape (v, c, r);
end

```

Tarea 2: Detección de CFO e ID de celda mediante señal de sincronización primaria

- **Desarrollar un programa en Matlab que permita generar y trazar el PSS para un valor de raíz específico.**

Utilice la secuencia Zadoff-Chu la cual modula las subportadoras PSS en el dominio de la frecuencia, mediante la siguiente ecuación:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{\frac{-j\pi u n(n+1)}{63}} & n = 0, 1, \dots, 30 \\ e^{\frac{j\pi u (n+1)(n+2)}{63}} & n = 31, 32, \dots, 61 \end{cases}$$

El código que se presenta a continuación es la función creada utilizando la ecuación.

```

function seq = zadoffchu(u)
% zadoffchu: Genera un vector Zadoff-Chu con el índice de raíz 'u'.
% u: Índice de raíz (25, 29 o 34).

% Inicializar el vector Zadoff-Chu como una matriz de ceros.
seq = zeros(62,1);

% Primer rango de índices (n de 0 a 30).
n = 0:30;
seq(1:31) = exp(-1i*pi*u*n.*(n+1)/63);

% Segundo rango de índices (n de 31 a 61).
n = 31:61;
seq(32:62) = exp(-1i*pi*u*(n+1).*(n+2)/63);

```

Realice el llamado de la función “zadoffchu”, construya la secuencia PSS y grafique su señal en magnitud y fase.

```

% Configuración del índice de raíz 'u' para el vector Zadoff-Chu
u = 25;
% Generar la secuencia Zadoff-Chu usando la función zadoffchu
seq = zadoffchu(u);
% Construir la secuencia PSS (Primary Synchronization Signal)

```

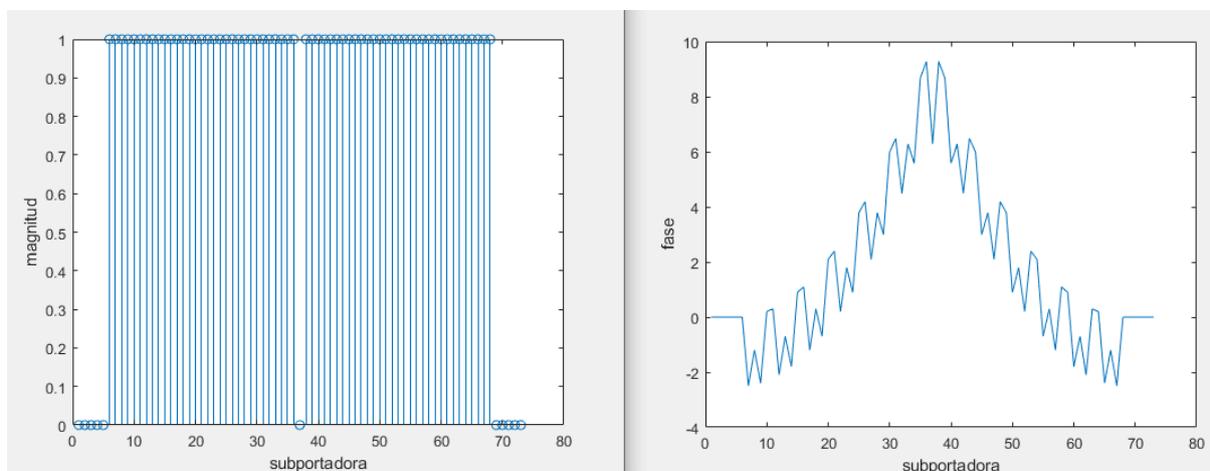
```

pss = [zeros(5,1); seq(1:31); 0; seq(32:62); zeros(5,1)]; % Incluir ceros
% Graficar la magnitud y la fase de la señal PSS
figure;
stem(abs(pss));
xlabel('subportadora');
ylabel('magnitud');

figure;
plot(unwrap(angle(pss)));
xlabel('subportadora');
ylabel('fase');

```

A continuación, se presenta el resultado cuando $u=25$, la secuencia Zadoff-Chu tiene una magnitud unitaria constante y la fase depende de u . Se observa 5 subportadoras nulas en ambos extremos del PSS y la subportadora DC (Subportadora central) se establece en cero.



- **Desarrollar un código en Matlab que permita generar la función de autocorrelación de la secuencia de Zadoff-Chu.**

Utilice la función creada en la actividad anterior “zadoffchu” para generar una secuencia con índice de raíz 25

Utilice la función “xcorr” para calcular la autocorrelación para retardos en el rango de -61 a 61, normalice le resultado dividiendo por la longitud de la secuencia. La visualización resultante muestra la forma de onda de la función de autocorrelación, que es útil para el análisis de sincronización y detección de secuencias. El código empleado se muestra a continuación:

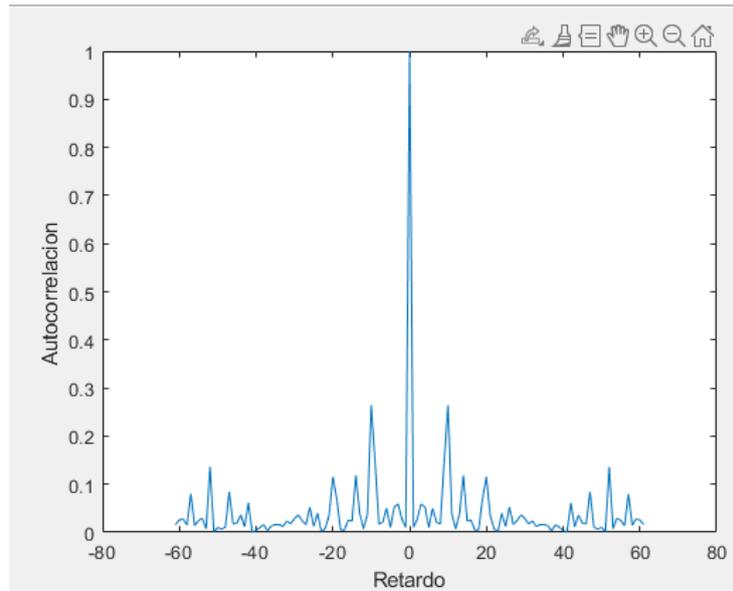
```

% Generar una secuencia Zadoff-Chu con índice de raíz '25'
seq25 = zadoffchu(25);

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación
figure;
plot(-61:61, abs(xcorr(seq25)./62)); % Función de autocorrelación
xlabel('Retardo');
ylabel('Autocorrelación ');

```

La figura que se muestra a continuación representa la función de autocorrelación de la secuencia de Zadoff-Chu con $u=25$, donde el pico de la correlación ocurre cuando las secuencias están perfectamente alineadas, mientras que los valores de correlación en otros instantes son relativamente más bajos.



- **Desarrollar un código en Matlab que permita simular las salidas de correlación cruzada para escenarios de secuencia Zadoff-Chu emparejados y no coincidentes.**

Para realizar esta actividad, cree un código función que permita implementar el cálculo de correlación cruzada, mediante dos variables de entrada que son el símbolo OFDM y la secuencia Zadoff-Chu.

```
function [v, y] = corrdif(symb, d)
% symb: Secuencia de símbolos OFDM.
% d: Secuencia de referencia.
% v: Vector de desplazamiento.
% y: Resultado de la correlación cruzada

% Eliminar la componente DC y reorganizar las subportadoras
Z = [symb(2048-599:2048), symb(2:601)];

% Inicializar variables
v = (-20:20);
y = zeros(1, length(v));

% Calcular la correlación cruzada para cada desplazamiento en 'v'
for c = 1:length(v)
    v2 = v(c)+600;
    temp1 = 0;
    temp2 = 0;

    % Calcular la primera suma acumulativa
    for k1 = -30:-1
        temp1 = temp1 + (Z(k1+1+v2) * conj(Z(k1+v2))) * conj(d(k1+32) *
conj(d(k1+31)));
    end

    % Calcular la segunda suma acumulativa
    for k2 = 2:31
        temp2 = temp2 + (Z(k2+v2) * conj(Z(k2+v2-1))) * conj(d(k2+31) *
conj(d(k2+30)));
    end

    % Calcular el resultado de la correlación cruzada
```

```
y(c) = temp1 + temp2;
end
```

Cree un código principal que genere las secuencias Zadoff-Chu con índices de raíz 25, 29 y 34. Luego, construye dos símbolos OFDM utilizando seq25 y datos aleatorios. Posteriormente, calcula y traza la correlación cruzada de la diferencia de fase entre el símbolo OFDM generado y cada secuencia Zadoff-Chu.

Realiza una gráfica resultante que compara las correlaciones cruzadas para diferentes secuencias.

```
% Generar secuencias Zadoff-Chu
seq25 = zadoffchu(25);
seq29 = zadoffchu(29);
seq34 = zadoffchu(34);

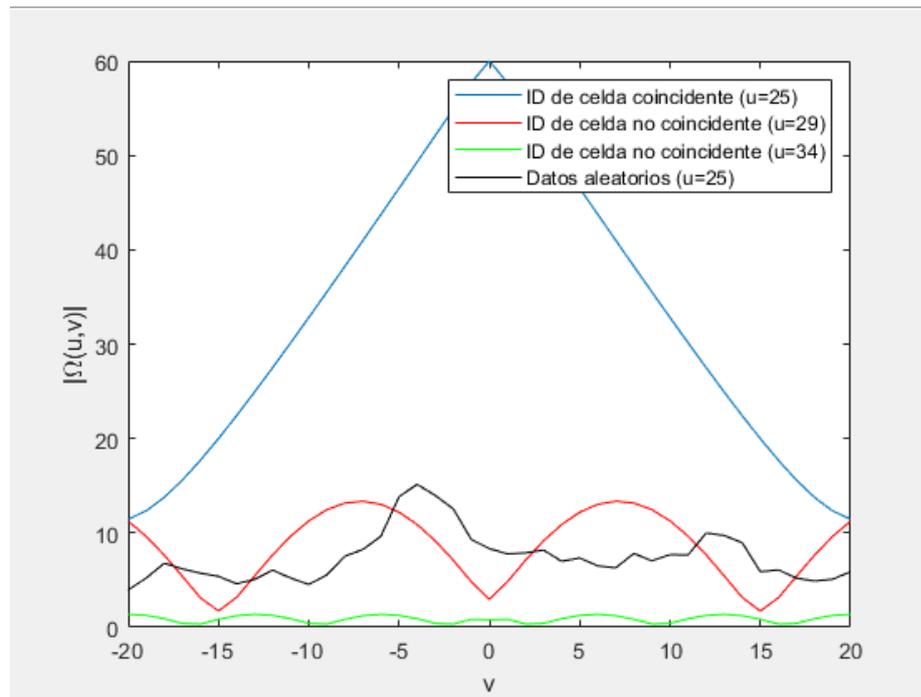
% Construir un símbolo OFDM con seq25
symb = zeros(1, 2048);
symb(2:32) = seq25(32:62);
symb(end-30:end) = seq25(1:31);

% Construir un símbolo OFDM con datos aleatorios
symb2 = zeros(1, 2048);
data = randi([0 15], 1, 1200); % Generar vector de datos aleatorios
s = qammod(data, 16) / sqrt(10); % Generar símbolos de datos 16-QAM
symb2(2:601) = s(601:end);
symb2(end-599:end) = s(1:600);

% Calcular y trazar la correlación cruzada de la diferencia de fase
[v, y] = corrdif(symb, seq25);
figure, plot(v, abs(y)); hold on;
[v, y2] = corrdif(symb, seq29);
plot(v, abs(y2), 'r'); hold on;
[v, y3] = corrdif(symb, seq34);
plot(v, abs(y3), 'g'); hold on;
[v, y4] = corrdif(symb2, seq25);
plot(v, abs(y4), 'k');

ylabel('| \Omega(u,v) |');
xlabel('v');
legend('ID de celda coincidente (u=25)', 'ID de celda no coincidente (u=29)',
'ID de celda no coincidente (u=34)', 'Datos aleatorios (u=25)');
```

En la imagen se observa un pico que se produce cuando los valores de Id de celda coincide con el índice de raíz de la secuencia Zadoff-Chu.



- **Desarrollar un programa en Matlab que permita la sincronización de símbolos y recuperación del CFO e ID de celda de una señal LTE.**

Lea las muestras desde la señal lte capturada. A continuación, defina los parámetros como el número de símbolos OFDM y las longitudes de los prefijos cíclicos (LCP0 y LCP1). Genere una secuencia Zadoff-Chu (seq) con un parámetro específico.

El bucle principal del código se encarga de procesar cada símbolo OFDM. Se inicializan variables de salida y una matriz para almacenar los símbolos OFDM corregidos. Dentro del bucle, se realiza una corrección de tiempo y frecuencia para cada símbolo, eliminando el prefijo cíclico y aplicando una Transformada Rápida de Fourier (FFT). Además, se lleva a cabo una detección conjunta de la ID de celda e ICFO. Los resultados se almacenan en matrices de salida.

Finalmente, se visualizan los resultados mediante gráficos. Se generan gráficos para mostrar los picos de magnitud y el CFO entero para cada símbolo. Además, se implementa una condición que analiza los símbolos con prefijo cíclico CP0 y CP1, generando un gráfico adicional y deteniendo el bucle si se supera un umbral específico. Finalmente, se guardan todos los símbolos corregidos en tiempo y CFO en un archivo “.mat”.

```

fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs * 30e-3; % Número de muestras (30ms)
v = read_complex_binary('sample.dat', count); % Leer muestras
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nsymb = 70; % Número de símbolos OFDM
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1
seq = zadoffchu(25); % Secuencia Zadoff-Chu en consideración
st = 1; % Índice de inicio del símbolo con CP0 (modificar esto)
out = zeros(2, Nsymb);
ofdmsymb = zeros(N, Nsymb);

for symb = 1:Nsymb
    if mod(symb, 7) == 1 % Para símbolos con CP0

```

```

    r = v(st:st + (2*N + LCP0) - 1);
    [t, e] = MLObjFun(r, N, LCP0);
    [~, tau] = max(t); % Estimar el retardo
    eps = e(tau); % Estimar el FCFO
    rc = r(tau:tau + (N + LCP0) - 1) .* exp(-1i * 2 * pi * eps * (st + tau -
1:st + tau + N + LCP0 - 2).' / N); % Corrección de tiempo y FCFO
    R = fft(rc(LCP0 + 1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
    R(1) = 0; % Eliminar componente DC
    [ev, y] = corrdif(R.', seq); % Detección conjunta de ID de celda e ICFO
    [out(1, symb), ind] = max(abs(y));
    out(2, symb) = ev(ind);
    st = st + tau + N + LCP0 - 1 - 1000;
    ofdmsymb(:, symb) = R;
else
    r = v(st:st + (2*N + LCP1) - 1);
    [t, e] = MLObjFun(r, N, LCP1);
    [~, tau] = max(t); % Estimar el retardo
    eps = e(tau); % Estimar el FCFO
    rc = r(tau:tau + (N + LCP1) - 1) .* exp(-1i * 2 * pi * eps * (st + tau -
1:st + tau + N + LCP1 - 2).' / N); % Corrección de tiempo y FCFO
    R = fft(rc(LCP1 + 1:end)); % Eliminar CP y luego FFT
    R(1) = 0; % Eliminar componente DC
    [ev, y] = corrdif(R.', seq); % Detección conjunta de ID de celda e ICFO
    [out(1, symb), ind] = max(abs(y));
    out(2, symb) = ev(ind);

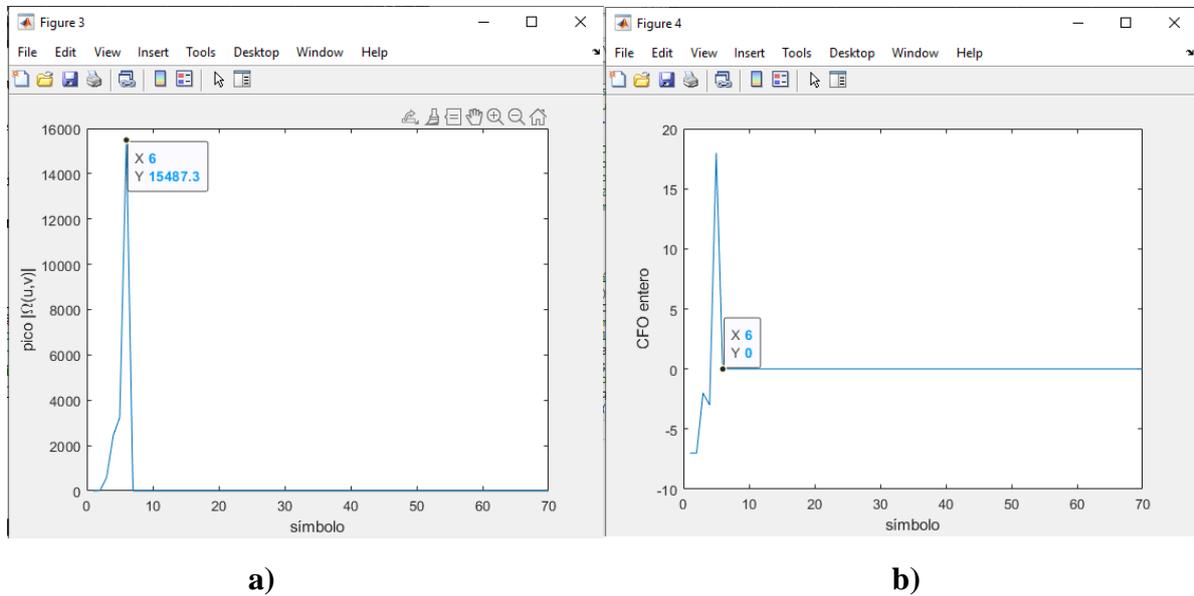
    % Plotear símbolo con PSS si supera un umbral específico
    if out(1, symb) > 1.5e4
        figure, plot(abs(fftshift(R)));
        axis('tight');
        xlabel('subcarrier'); ylabel('|Z(k)|');
        p = [R(end-30:end); R(2:32)];
        figure, plot(unwrap(angle(p)));
        hold on, plot(unwrap(angle(seq)), 'r');
        axis('tight'); xlabel('subcarrier'); ylabel('phase');
        legend('Recibido', 'Real');
        break;
    end

    st = st + tau + N + LCP1 - 1 - 1000;
    ofdmsymb(:, symb) = R;
end
end

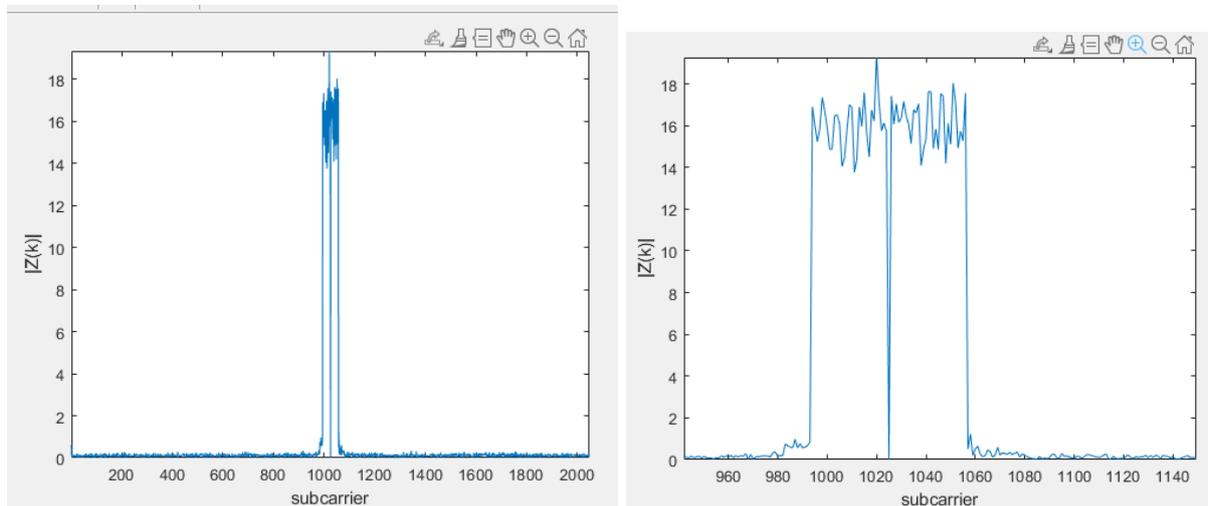
% Plotear resultados
figure; plot(out(1, :)); xlabel('símbolo'); ylabel('pico |\Omega(u,v)|');
figure; plot(out(2, :)); xlabel('símbolo'); ylabel('CFO entero');
save('ofdmsymb.mat', 'ofdmsymb'); % Guardar todos los símbolos corregidos en
tiempo y CFO

```

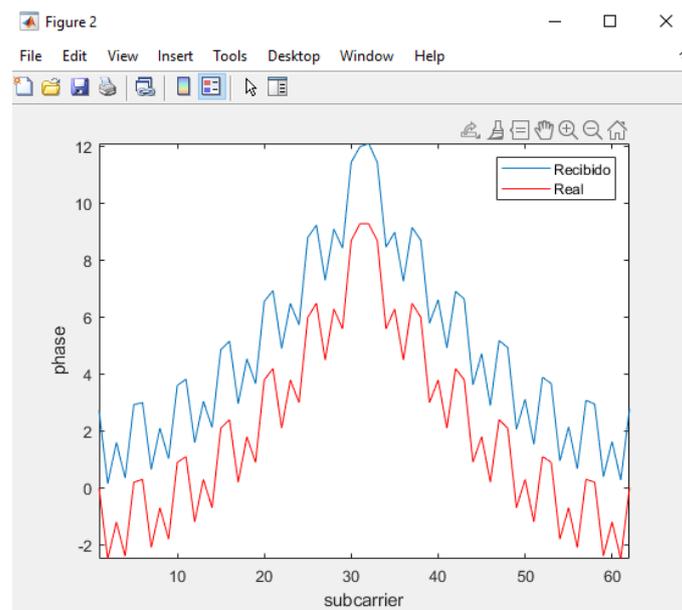
Las figuras que se muestran a continuación presentan a) el valor máximo de correlación cruzada para cada símbolo y b) identifica el ICFO estimado. En el literal a) se observa un pico significativo en el símbolo 6, en otras palabras, se ha detectado un PSS cuando $u=25$.



Las otras 2 figuras que genera el programa muestran los símbolos OFDM con PSS detectados. En la siguiente figura se observa el PSS en la región central, que consisten en la secuencia Zadoff-Chu, con una subportadora DC nula y 5 subportadoras nulas en ambos extremos.



La figura que se presenta a continuación muestra la fase de la secuencia Zadoff-Chu recibida y real.



Tarea 3: Detección del grupo de ID de celda y la temporización de tramas mediante señal de sincronización secundaria.

- **Generar un código en Matlab que permita generar los SSS**

Para cumplir con esta actividad identifique como está constituido la señal de sincronización secundaria (SSS).

SSS se encuentra en el símbolo OFDM anterior al símbolo que contiene la PSS. SSS es una concatenación intercalada de 2 secuencias binarias de longitud 31, SSS_1 en la subtrama 0 y SSS_2 en la subtrama 5.

A continuación, se presenta la ecuación (5) utilizada para llevar a cabo la actividad, la cual define el SSS como la combinación de 2 secuencias de longitud 31 que varían entre subtramas y secuencias para índices pares e impares.

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n)c_0(n) & \text{en subtrama 0} \\ s_1^{(m_1)}(n)c_0(n) & \text{en subtrama 5} \end{cases} \quad (13)$$

$$d(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n)c_1(n)z_1^{(m_0)}(n) & \text{en subtrama 0} \\ s_0^{(m_0)}(n)c_1(n)z_1^{(m_1)}(n) & \text{en subtrama 5} \end{cases}$$

Donde:

- $s_0^{(m_0)}(n)$ y $s_1^{(m_1)}(n)$: son secuencias de símbolos modulados.
- $c_0(n)$ y $c_1(n)$: son secuencias de los símbolos de portadora común.
- $z_1^{(m_0)}(n)$ y $z_1^{(m_1)}(n)$: son secuencias de los símbolos de portadora de referencia.
- $0 \leq n \leq 30$.

Los índices m_0 y m_1 se presentan en la ecuación (6) los cuales se derivan del grupo de identidad celular de la capa física de acuerdo con $N_{ID}^{(1)}$.

$$m_0 = m' \text{ mod } 31$$

$$m_1 = \left(m_0 + \left\lfloor \frac{m'}{31} \right\rfloor + 1 \right) \text{ mod } 31$$

$$m' = N_{ID}^{(1)} + \frac{q(q+1)}{2}, q = \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)} + q' \left(\frac{q+1}{2} \right)}{30} \right\rfloor, q' \quad (14)$$

$$= \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)}}{30} \right\rfloor$$

Donde: $0 \leq N_{ID}^{(1)} \leq 167$.

La ecuación (7) presenta las 2 secuencias $s_0^{(m_0)}(n)$ y $s_1^{(m_1)}(n)$.

$$s_0^{(m_0)}(n) = \tilde{s}[(n + m_0) \text{ mod } 31] \quad (15)$$

$$s_1^{(m_1)}(n) = \tilde{s}[(n + m_1) \text{ mod } 31]$$

Donde: $\tilde{s}(n) = 1 - 2x(n)$ para $0 \leq n \leq 30$. Definida por la ecuación (8). Con condiciones iniciales $x(0) = x(1) = x(2) = x(3) = 0$ y $x(4) = 1$.

$$x(i + 5) = [x(i + 2) + x(i)] \text{ mod } 2, 0 \leq i \leq 25 \quad (16)$$

Las secuencias de aleatorización $c_0(n)$ y $c_1(n)$ dependen del PSS y están definidas por desplazamientos cíclicos diferentes de la secuencia $\tilde{c}(n)$ de acuerdo con la ecuación (9).

$$c_0(n) = \tilde{c} \left[\left(n + N_{ID}^{(2)} \right) \bmod 31 \right]$$

$$c_1(n) = \tilde{c} \left[\left(n + N_{ID}^{(2)} + 3 \right) \bmod 31 \right]$$
(17)

Donde $N_{ID}^{(2)} \in \{0,1,2\}$ es el Id de celda de sector dentro del grupo de identidad de celda de capa física y $\tilde{c}(n) = 1 - 2x(n)$ para $0 \leq n \leq 30$. La cual se genera mediante la ecuación (18).

$$x(i + 5) = [x(i + 3) + x(i)] \bmod 2, 0 \leq i \leq 25$$
(18)

Para $z_1^{(m_0)}(n)$ y $z_1^{(m_1)}(n)$ se definen por un desplazamiento cíclico de la secuencia m $\tilde{z}(n)$ conforme a la ecuación (19).

$$z_1^{(m_0)}(n) = \tilde{z}[(n + (m_0 \bmod 8)) \bmod 31]$$

$$z_1^{(m_1)}(n) = \tilde{z}[(n + (m_1 \bmod 8)) \bmod 31]$$
(19)

Define $\tilde{z}(n) = 1 - 2x(n)$, $0 \leq n \leq 30$ con condiciones iniciales de $x(0) = x(1) = x(2) = x(3) = 0$ y $x(4) = 1$. Generado mediante la ecuación (20).

$$x(i + 5) = [x(i + 4)x(i + 2) + x(i + 1) + x(i)] \bmod 2,$$

$$0 \leq i \leq 25$$
(20)

Las secuencias m tienen la propiedad útil donde el pico de correlación ocurre solo cuando las 2 secuencias están perfectamente alineadas. A continuación, se presenta el código utilizado para generar señales de referencia SSS.

```
function [d0, d5] = sss(Nid1, Nid2)
% Función para generar señales de referencia primarias (SSS) para LTE.

% Calcular m0 y m1 [Eq.(2)]
q_prime = floor(Nid1/30);
q = floor(((Nid1+q_prime*(q_prime+1)/2))/30);
m_prime = Nid1 + q*(q+1)/2;
m0 = mod(m_prime, 31);
m1 = mod(m0 + floor(m_prime/31) + 1, 31);

% Generar s0m0 y s1m1 [Eq.(3)&(4)]
```

```

x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+2) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
s_tilde = 1 - 2 * x;
s0m0 = zeros(1, 31);
s1m1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    s0m0(n+1) = s_tilde(mod((n+m0), 31)+1); % s_tilde[(n+m0) mod 31]
    s1m1(n+1) = s_tilde(mod((n+m1), 31)+1); % s_tilde[(n+m1) mod 31]
end

% Generar c0 y c1 [Eq.(5)&(6)]
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+3) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
c_tilde = 1 - 2 * x;
c0 = zeros(1, 31);
c1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    c0(n+1) = c_tilde(mod((n+Nid2), 31)+1); % c_tilde[(n+Nid2) mod 31]
    c1(n+1) = c_tilde(mod((n+Nid2+3), 31)+1); % c_tilde[(n+Nid2+3) mod 31]
end

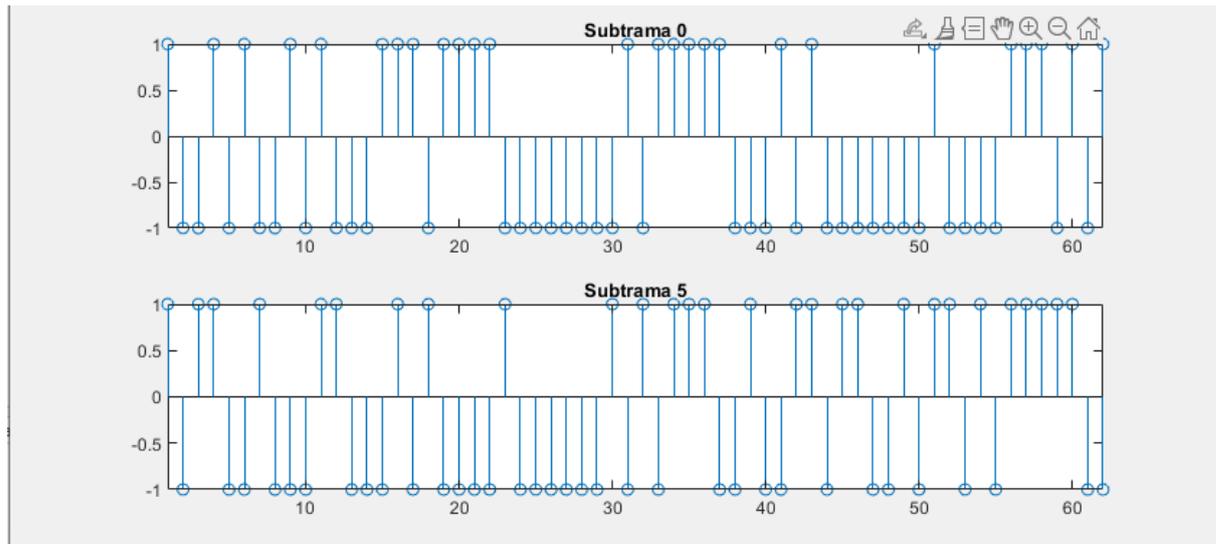
% Generar z1m0 y z1m1 [Eq. (7)&(8)]
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i = 1:26
    x(i+5) = mod(x(i+4) + x(i+2) + x(i+1) + x(i), 2); % mod(x,2) = x mod 2
end
z_tilde = 1 - 2 * x;
z1m0 = zeros(1, 31);
z1m1 = zeros(1, 31);
for n = 0:30
    z1m0(n+1) = z_tilde(mod((n+mod(m0, 8)), 31)+1); % z_tilde[(n+(m0 mod 8)) mod 31]
    z1m1(n+1) = z_tilde(mod((n+mod(m1, 8)), 31)+1); % z_tilde[(n+(m1 mod 8)) mod 31]
end

% Construir SSS de subtrama 0
d0_even = s0m0 .* c0;
d0_odd = s1m1 .* c1 .* z1m0;
d0 = zeros(1, 62);
d0(1:2:62) = d0_even;
d0(2:2:62) = d0_odd;

% Construir SSS de subtrama 5
d5_even = s1m1 .* c0;
d5_odd = s0m0 .* c1 .* z1m1;
d5 = zeros(1, 62);
d5(1:2:62) = d5_even;
d5(2:2:62) = d5_odd;

```

La salida de este código se muestra en la siguiente figura:



- **Generar un código en Matlab que permita identificar los resultados de correlación cruzada.**

Para identificar la correlación cruzada el código debe tener parámetros específicos, es decir se utiliza el identificador de grupo de celda y el identificador de celda del sector con los siguientes valores $N_{ID}^{(1)} = 67$ y $N_{ID}^{(2)} = 1$.

El código genera los SSS utilizando la función realizada en la actividad anterior, separa los componentes pares e impares, luego calcula la correlación cruzada con todas las posibles SSS y finalmente presenta los resultados para las subtramas 0 y 5.

```
% Configuración de los identificadores de celda
Nid1 = 67; % ID de grupo de celda
Nid2 = 1; % ID de celda del sector

% Generación de las señales de referencia primarias (SSS) para subtrama 0 y 5
[d0, d5] = sss(Nid1, Nid2);

% Separación de componentes pares e impares de la subtrama 0
d0_even = d0(1:2:62); % componentes pares de la subtrama 0
d0_odd = d0(2:2:62); % componentes impares de la subtrama 0

% Inicialización de variables para almacenar resultados de correlación
out1_e = zeros(1, 168);
out1_o = zeros(1, 168);
out2_e = zeros(1, 168);
out2_o = zeros(1, 168);

% Bucle para calcular correlaciones con todas las posibles SSS
for id = 0:167
    [d0_t, d5_t] = sss(id, Nid2); % Generar todas las SSS posibles (se asume que
    Nid2 es conocido)
    d0_t_even = d0_t(1:2:62);
    d0_t_odd = d0_t(2:2:62);
    d5_t_even = d5_t(1:2:62);
    d5_t_odd = d5_t(2:2:62);
end
```

```

out1_e(id+1) = sum(d0_even .* d0_t_even);
out1_o(id+1) = sum(d0_odd .* d0_t_odd);
out2_e(id+1) = sum(d0_even .* d5_t_even);
out2_o(id+1) = sum(d0_odd .* d5_t_odd);
end

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out1_e)), max(abs(out1_o)));

% Crear figura y subgráficos para resultados de correlación de subtrama 0
(componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out1_e));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out1_o));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');

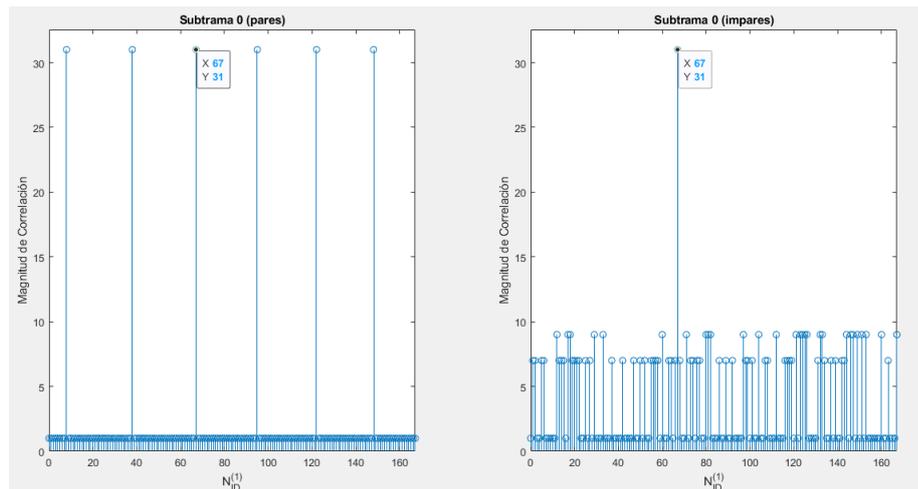
% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out2_e)), max(abs(out2_o)));

% Crear figura y subgráficos para resultados de correlación de subtrama 5
(componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out2_e));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out2_o));
xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de
Correlación');

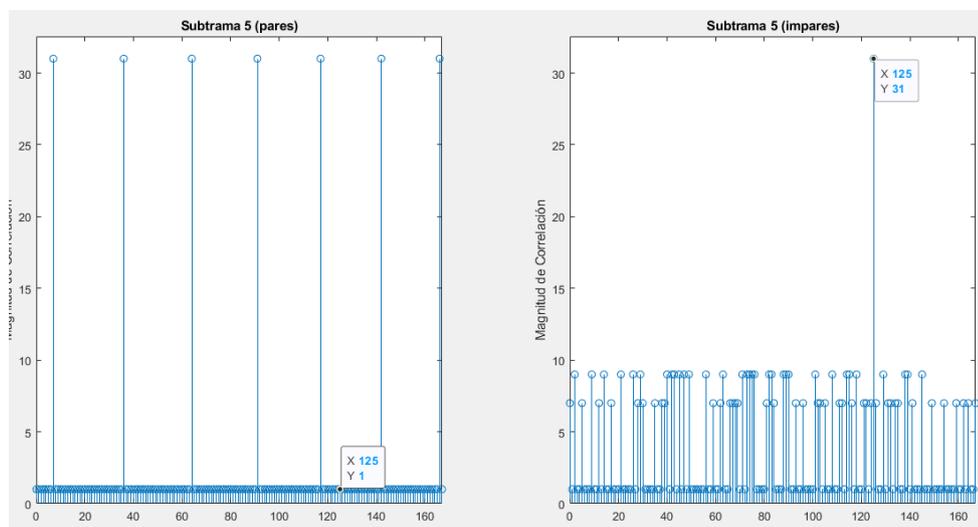
```

Es importante señalar que se utilizan todas las posibles secuencias para la subtrama 0 y 5 ya que, al procesar por primera vez un SSS para la detección de $N_{ID}^{(1)}$ se desconocen en que subtrama se encuentra el SSS.

Los resultados de correlación cruzada se muestran a continuación: en el literal a) se evidencia que cuando $N_{ID}^{(1)}$ es igual a 67 los picos de correlación en las secuencias pares e impares coinciden en el número de subtrama, si la suposición de la subtrama es incorrecta los picos de correlación se presentan en diferentes alturas como se observa en el literal b).



a)



b)

- **Generar un código en Matlab que permita detectar y recuperar la temporización de la trama de radio de una señal LTE.**

Para realizar este código se utiliza los símbolos corregidos en tiempo y CFO guardados en la actividad 4 de la tarea 2, específicamente en el archivo “ofdmsymb.mat”.

El primer paso es cargar la matriz de símbolos OFDM desde el archivo “ofdmsymb.mat”, configurar los parámetros, en este caso $N_{ID}^{(2)}$ correspondiente al ID de celda del sector el cual se identificó en la Tarea 2 como 0 y el símbolo OFDM que contiene la SSS, que es el anterior al símbolo PSS en este caso identificado en el símbolo 5.

A continuación, se extrae los SSS del símbolo OFDM y se organiza las subportadoras, extrayendo los componentes pares e impares, luego se inicializan las variables para almacenar los resultados de la correlación mediante un bucle que calcula la correlación cruzada con todas las posibles SSS. Finalmente se presenta los resultados de correlación para los componentes pares e impares de las subtramas 0 y 5.

```
% Cargar datos del archivo 'ofdmsymb.mat'
load('ofdmsymb.mat');
```

```

% Configuración de parámetros
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nid2 = 0; % ID de celda del sector
R = ofdmsymb(:,5).'; % Símbolo OFDM que contiene SSS (modificar según sea necesario)

% Procesamiento del símbolo OFDM para obtener la SSS
sss_t = [R(N-30:N), R(2:32)]; % Eliminar la subportadora de DC y reorganizar
sss_t = real(sss_t); % Toma solo la parte con valores reales
sss_t_even = sss_t(1:2:62);
sss_t_odd = sss_t(2:2:62);

% Inicialización de variables para almacenar resultados de correlación
out1_e = zeros(1, 168);
out1_o = zeros(1, 168);
out2_e = zeros(1, 168);
out2_o = zeros(1, 168);

% Bucle para calcular correlaciones con todas las posibles SSS
for id = 0:167
    [d0_t, d5_t] = sss(id, Nid2); % Generar todas las posibles SSS
    d0_t_even = d0_t(1:2:62);
    d0_t_odd = d0_t(2:2:62);
    out1_e(id+1) = sum(sss_t_even .* d0_t_even);
    out1_o(id+1) = sum(sss_t_odd .* d0_t_odd);
    d5_t_even = d5_t(1:2:62);
    d5_t_odd = d5_t(2:2:62);
    out2_e(id+1) = sum(sss_t_even .* d5_t_even);
    out2_o(id+1) = sum(sss_t_odd .* d5_t_odd);
end

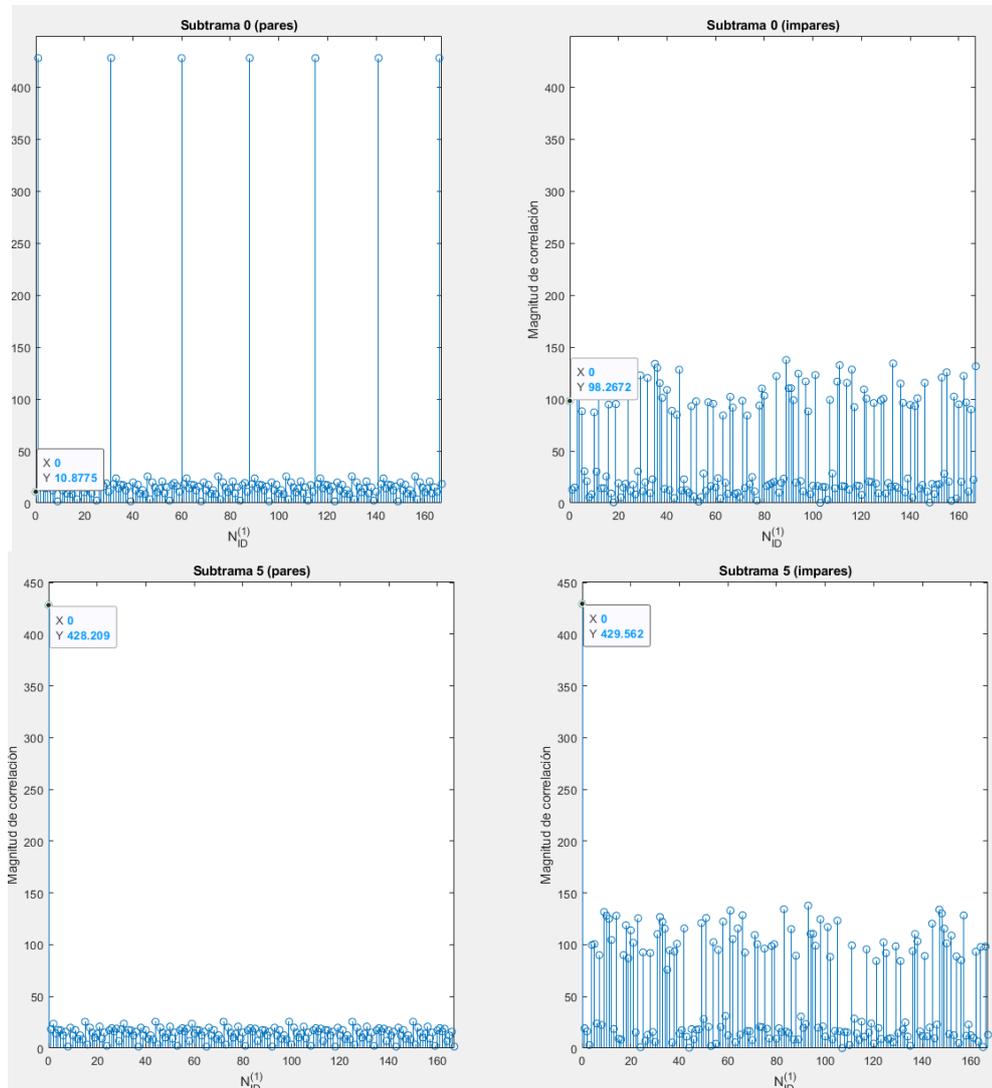
% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out1_e)), max(abs(out1_o)));
% Gráficos para Subtrama 0 (componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out1_e)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out1_o)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 0 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');

% Configuración de límites para la visualización de las gráficas
p = max(max(abs(out2_e)), max(abs(out2_o)));
% Gráficos para Subtrama 5 (componentes pares e impares)
figure;
subplot(1, 2, 1); stem(0:167, abs(out2_e)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (pares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');
hold on;
subplot(1, 2, 2); stem(0:167, abs(out2_o)); xlim([0 167]); ylim([0 p*1.05]);
title('Subtrama 5 (impares)'); xlabel('N_{ID}^{(1)}'); ylabel('Magnitud de correlación');

```

Los resultados que se muestran en la siguiente figura denotan que el SSS en el símbolo

5 se encuentra en la subtrama 5, con un valor $N_{ID}^{(1)}$ de 0.



18. Interpretación de resultados

- Compare la magnitud y fase del PSS con un valor de índice de raíz de 25,29 y 34.

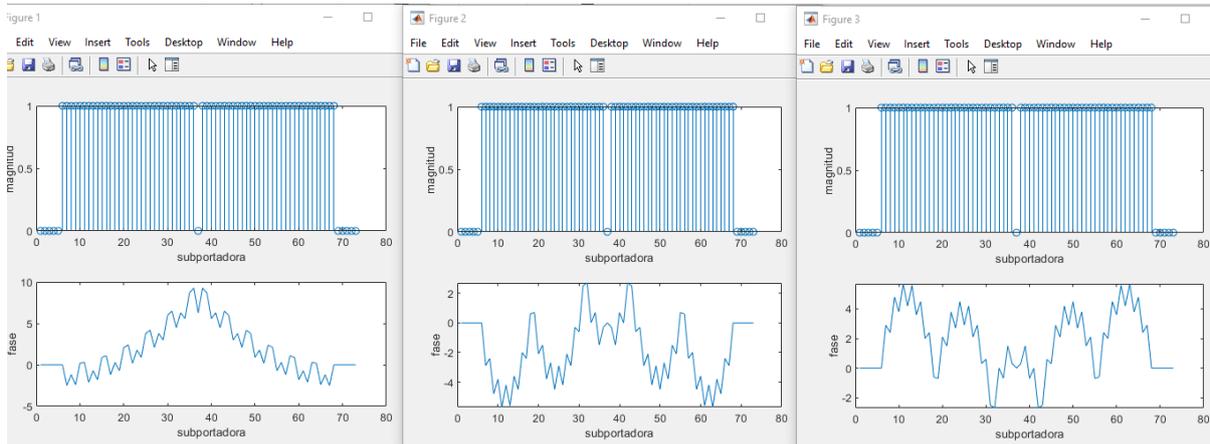
Modifique el código de la actividad 1 de la tarea 2 para graficar la magnitud y fase de del PSS con un valor de índice de raíz diferente, A continuación, se muestra un código ejemplo:

```
u1 = [25,29,34]; % indice de raiz
for i= 1:3
    u = u1(i);
    seq = z adoffchu(u); % Generador de Zadoff-Chu
    pss = [zeros(5,1);seq(1:31);0;seq(32:62);zeros(5,1)];
    % Incluir ceros

% Magnitud y fase de la gráfica del PSS
figure;
subplot(2,1,1);stem(abs(pss));
xlabel('subportadora'); ylabel('magnitud');
```

```
subplot(2,1,2);plot(unwrap(angle(pss)));
xlabel('subportadora'); ylabel('fase');
end
```

La figura resultante muestra que la gráfica en magnitud es constante también se observa 5 subportadoras nulas en ambos extremos del PSS y la subportadora DC se establece en 0, sin embargo, la gráfica en función de la fase difiere para cada índice de raíz.



- **Compare la función de autocorrelación y correlación cruzada para las secuencias de Zadoff-Chu con índice de raíz 25, 29 y 34.**

Modifique el código de la actividad 2 de la tarea 2 para graficar las funciones de autocorrelación y correlación cruzada.

```
% Generar una secuencia Zadoff-Chu con índice de raíz '25'
seq25 = zadoffchu(25);
seq29 = zadoffchu(29);
seq34 = zadoffchu(34);

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=25
figure;
subplot(1,3,1);plot(-61:61, abs(xcorr(seq25)./62)); % Función de autocorrelación
title('u=25');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=29
subplot(1,3,2);plot(-61:61, abs(xcorr(seq29)./62)); % Función de autocorrelación
title('u=29');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

% Crear una figura y trazar la función de autocorrelación u=34
subplot(1,3,3);plot(-61:61, abs(xcorr(seq34)./62)); % Función de autocorrelación
title('u=34');xlabel('Retardo'); ylabel('Autocorrelación ');

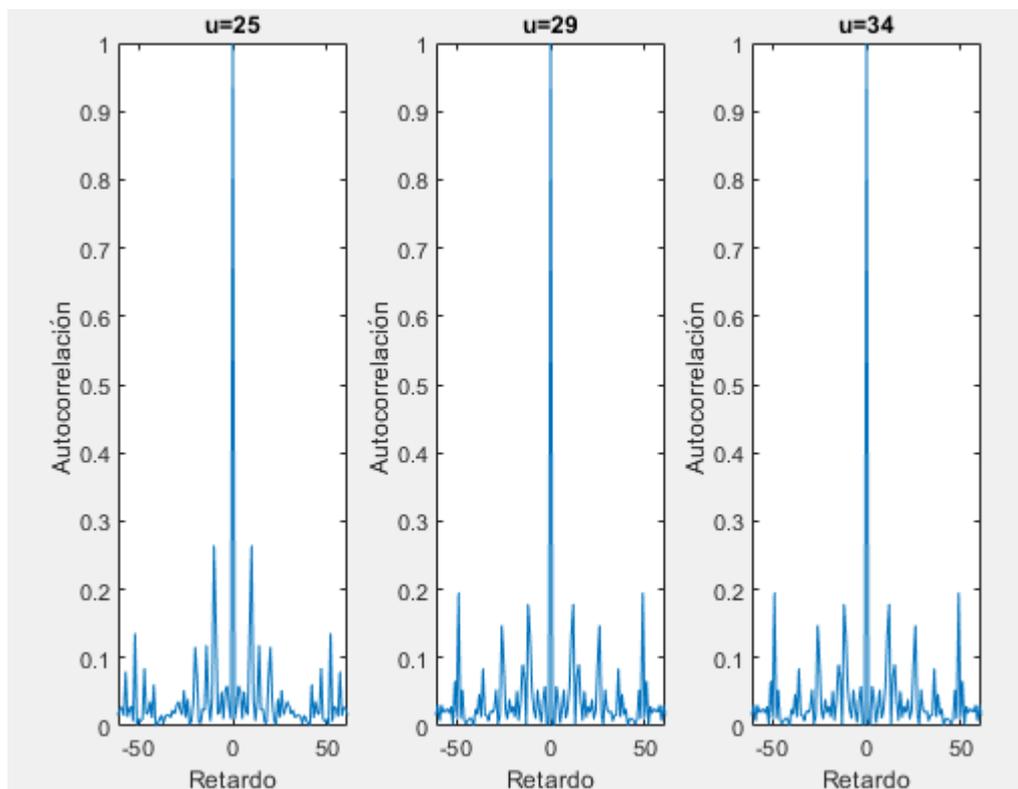
% funcion de correlación cruzada (u=25)
figure;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25)./62)); hold on;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25,seq29)./62),'g'); hold on;
subplot(1,3,1); plot(-61:61,abs(xcorr(seq25,seq34)./62),'r'); hold on;
legend('u=25', 'u=25,u=29', 'u=25,u=34');
axis([-61 61 0 1]);
% funcion de correlación cruzada (u=29)
```

```

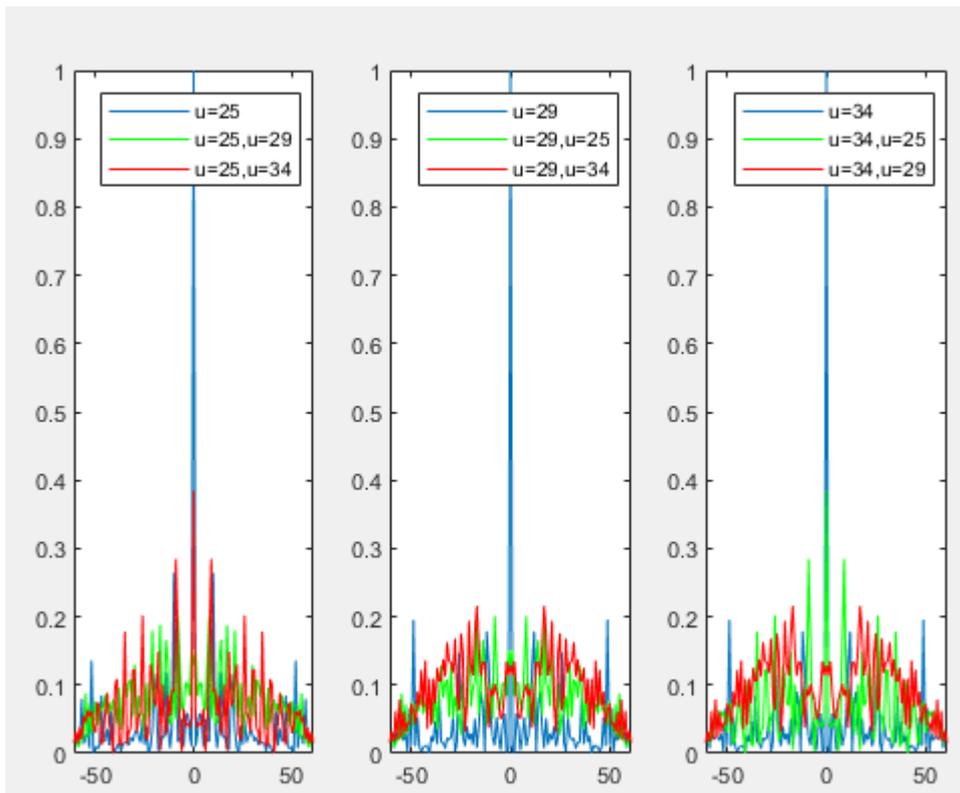
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29)./62)); hold on;
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29,seq25)./62),'g'); hold on;
subplot(1,3,2); plot(-61:61,abs(xcorr(seq29,seq34)./62),'r'); hold on;
legend('u=29','u=29,u=25','u=29,u=34');
axis([-61 61 0 1]);
% funciones de correlación cruzada (u=34)
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34)./62)); hold on;
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34,seq25)./62),'g'); hold on;
subplot(1,3,3); plot(-61:61,abs(xcorr(seq34,seq29)./62),'r'); hold on;
legend('u=34','u=34,u=25','u=34,u=29');
axis([-61 61 0 1]);

```

A continuación, se presenta las funciones de autocorrelación para secuencias de Zadoff-Chu.



Cuando se analizan distintos pares de secuencias de Zadoff-Chu, se observa que los valores máximos de correlación cruzada son considerablemente inferiores a los valores máximos de autocorrelación obtenidos al considerar la misma secuencia. Estos resultados confirman que la secuencia de Zadoff-Chu exhibe las propiedades deseadas tanto en términos de correlación interna como externa.



- **Compare las salidas de correlación cruzada para la raíz 29 y 34 de la señal LTE capturada.**

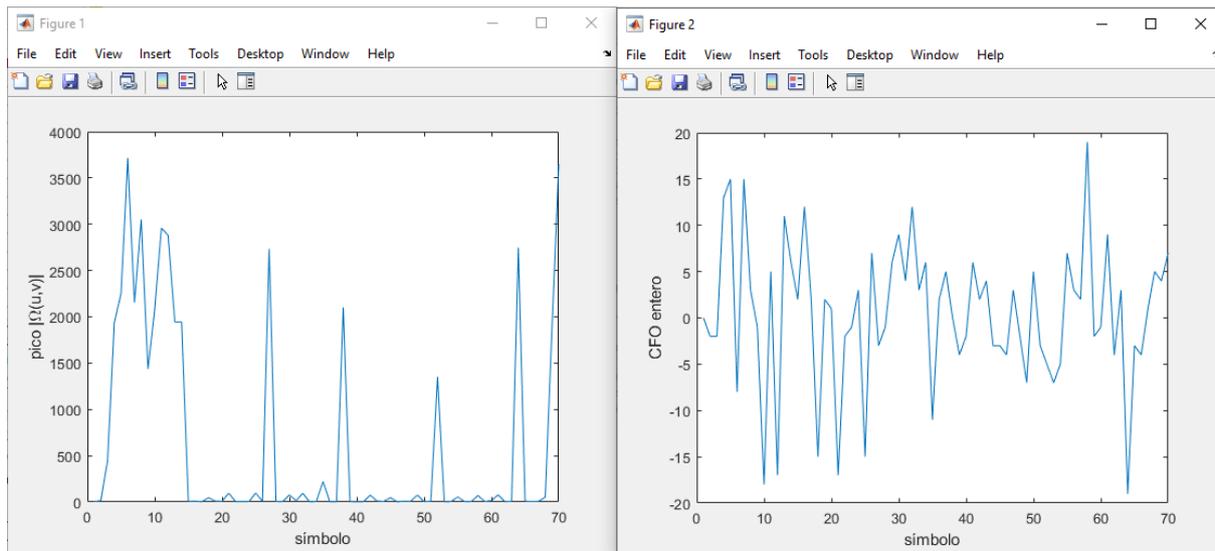
Modifique el índice de raíz en el código de la actividad 4 tarea 2 para determinar los resultados.

```

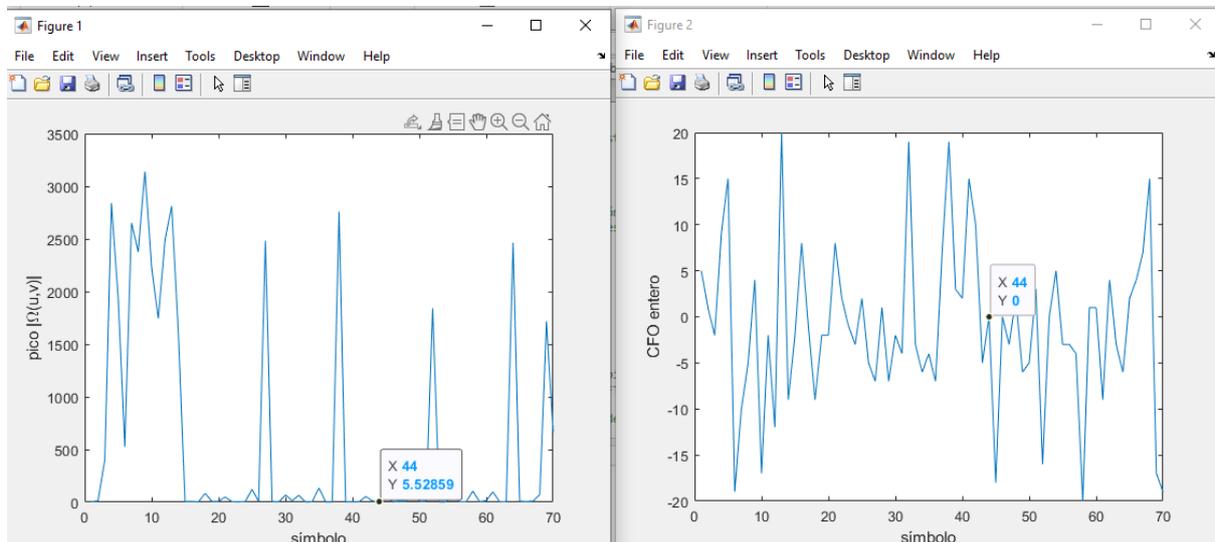
fs = 30.72e6; % Frecuencia de muestreo
count = fs * 30e-3; % Número de muestras (30ms)
v = read_complex_binary('sample25.dat', count); % Leer muestras
N = 2048; % Tamaño de la FFT
Nsymb = 70; % Número de símbolos OFDM
LCP0 = 160; % Longitud del prefijo cíclico 0
LCP1 = 144; % Longitud del prefijo cíclico 1
seq = zadoffchu(25); % Secuencia Zadoff-Chu en consideración
st = 1; % Índice de inicio del símbolo con CP0 (modificar esto)
out = zeros(2, Nsymb);
ofdmsymb = zeros(N, Nsymb);

```

La imagen que se presenta a continuación representa la correlación cruzada para a) índice de raíz 29 y b) índice de raíz 34. se puede observar que los valores no superan el índice de valor del umbral $1.5e4$, ya que el índice de raíz no coincide, la magnitud máxima de correlación cruzada sigue siendo baja para todos los símbolos.



a)



b)

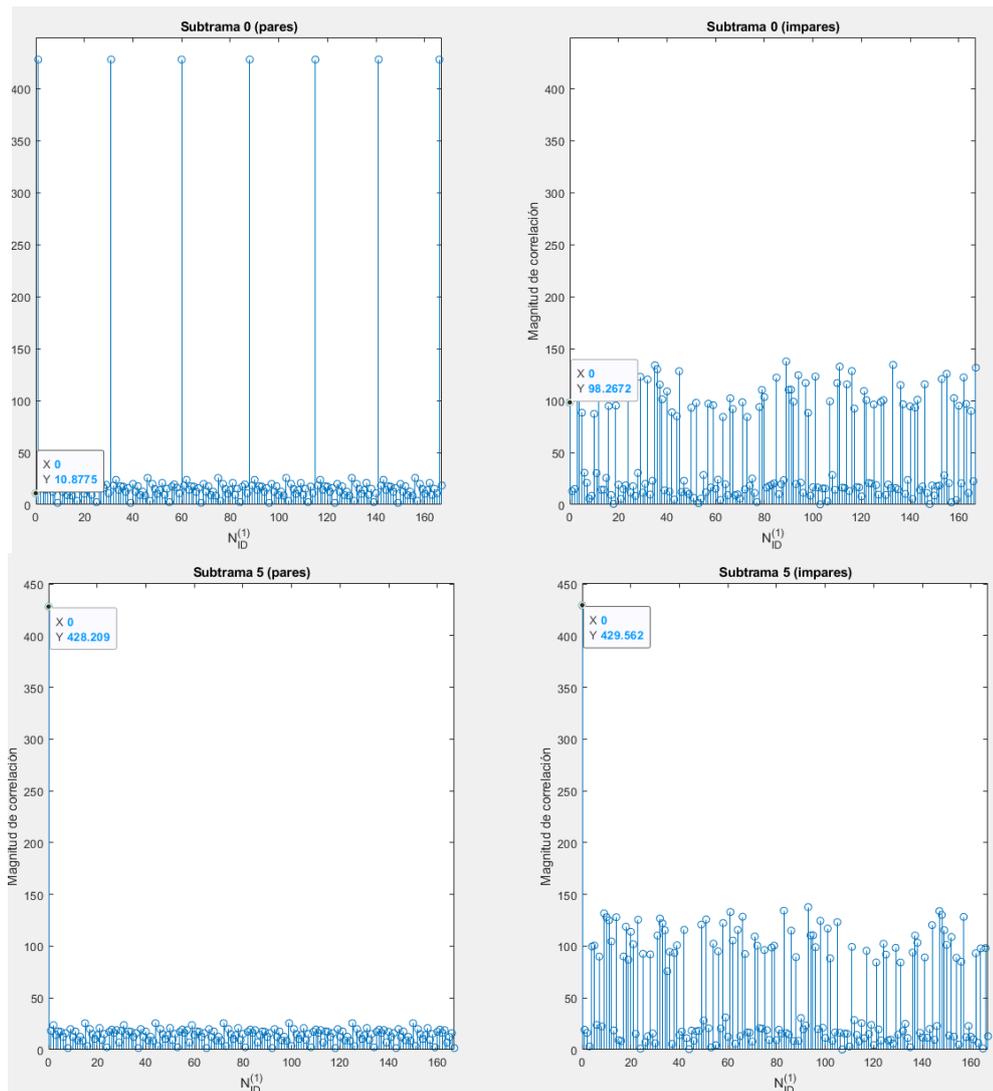
- **Compare la correlación cruzada para las secuencias pares e impares de la señal LTE capturada.**

En la siguiente figura se observa los resultados de las secuencias pares e impares para la señal Lte capturada en la subtrama 0 y 5. Denotan que el SSS en el símbolo 5 se encuentra en la subtrama 5, con un valor $N_{ID}^{(1)}$ de 0.

El ID de celda de la capa física viene dado por:

$$N_{ID}^{cell} = 3 N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} = 3(0) + 0 = 0$$

La temporización de la señal de radio se ha recuperado con éxito.



19. Conclusiones y Recomendaciones

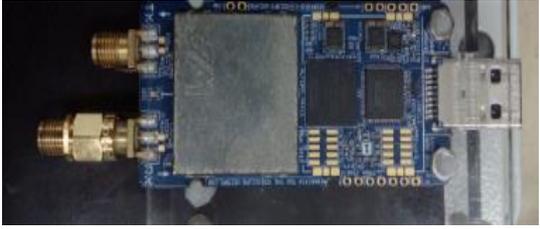
Son específicas de cada práctica, al menos deberá escribir 5 conclusiones y 5 recomendaciones.

20. Bibliografía

Son específicas de cada práctica, al menos 5 referencias bibliográficas de fuentes validas.

Guía de montaje

COMPONENTES

<p style="text-align: center;">LimeSDR</p>  <p>The image shows a LimeSDR software-defined radio board. It is a blue printed circuit board (PCB) populated with various electronic components, including a large central chip. Two white labels are attached to the board, one labeled 'TX' and the other 'RX', indicating the transmit and receive ports. The board is shown with some cables connected to its ports.</p>	<p style="text-align: center;">LimeSDR mini</p>  <p>The image shows a LimeSDR mini software-defined radio board. It is a smaller, blue PCB with a prominent silver heat sink in the center. It features two SMA connectors on the left side and a USB connector on the right side. The board is shown with some cables connected to its ports.</p>
<p style="text-align: center;">Dongle USB LTE</p>  <p>The image shows a black USB LTE dongle. It has a standard USB-A connector on one end and a small antenna on the other. A small yellow label with the 'LTE' logo is visible on the side of the device.</p>	<p style="text-align: center;">Cable USB 3.0</p>  <p>The image shows two black USB 3.0 cables. One cable has a standard USB-A connector on one end and a USB-B connector on the other. The other cable has a USB-A connector on one end and a different type of connector on the other, possibly for a specific device or adapter.</p>
<p style="text-align: center;">Cables RF CRC9(m) a SMA(m)</p>  <p>The image shows two orange braided RF cables. Each cable has a CRC9 connector on one end and an SMA connector on the other. The cables are shown in a curved arrangement.</p>	<p style="text-align: center;">Cable coaxial RF</p>  <p>The image shows a single red coaxial RF cable. It has SMA connectors on both ends. The cable is shown in a circular arrangement.</p>
<p style="text-align: center;">Atenuadores 20 dB</p>  <p>The image shows two silver metal attenuators. Each has a label that reads '20dB Attenuator'. They have SMA connectors on both ends.</p>	<p style="text-align: center;">Atenuadores 10 dB</p>  <p>The image shows two silver metal attenuators. Each has a label that reads '10dB Attenuator'. They have SMA connectors on both ends.</p>

<p style="text-align: center;">Cable ethernet</p> 	<p style="text-align: center;">Mini PC</p> 
<p style="text-align: center;">Adaptador de corriente</p> 	<p style="text-align: center;">Monitor</p> 

Conecte la Mini-Pc con el hardware (monitor, teclado, mouse) necesario para su funcionamiento.



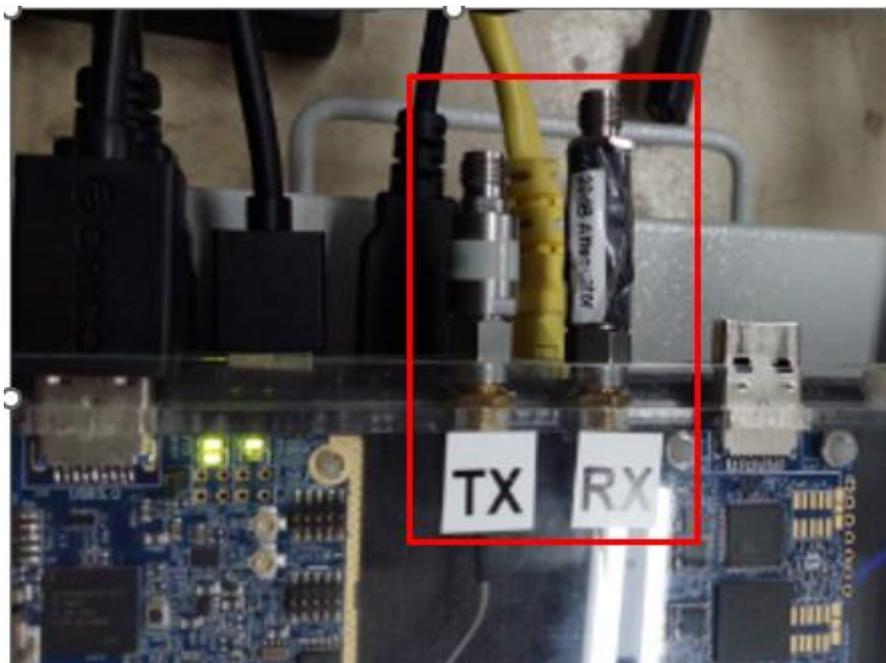
- Conecte el cable ethernet a un punto de acceso, utilice el puerto Ethernet 1 de la mini pc que se indica en la siguiente imagen.



- Conecte el mini-Pc con cable USB 3.0 al LimeSDR.



- Conecte el atenuador 10 dB al Tx del LimeSDR
- Conecte el atenuador 20 dB al Rx del LimeSDR.



- Conecte cable SMA-CRC9 desde el atenuador 10 dB (Tx) al USB dongle Tx (lado del conector).

- Conecte cable SMA-CRC9 desde el atenuador 20 dB (Rx) al USB dongle Rx (lado de la curva)



- Conecte el USB dongle a Portátil.

