



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

DESPLIEGUE DE UNA RED 5G NSA IMPLEMENTADA EN SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO OAI CON USRPS ETTUS B210 PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR: LUIS ANTONIO PESANTEZ SANCHEZ

DIRECTOR: Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez. PhD

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Luis Antonio Pesantez Sanchez

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

Yo, Luis Antonio Pesantez Sanchez, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 24 de abril de 2023



Luis Antonio Pesantez Sanchez

172553681-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **DESPLIEGUE DE UNA RED 5G NSA IMPLEMENTADA EN SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO OAI CON USRPS ETTUS B210 PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE**, realizado por el señor: **LUIS ANTONIO PESANTEZ SANCHEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

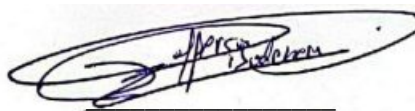
FECHA

Ing. Pedro Infante, PHD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2023-04-24

Ing. Jefferson Ribadeneira. PHD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-04-24

Ing. David Moreno, PHD.
ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-03-24

DEDICATORIA

Este presente trabajo se lo dedico a mis padres, Diego Pesantez y Jimena Sanchez, quienes han sido mi guía y mi mayor apoyo en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí y en mis sueños, por brindarme su amor incondicional y su sabiduría. Este logro no habría sido posible sin su amor, paciencia y dedicación.

Luis Pesantez

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría para enfrentar cada desafío y superar cada obstáculo en el camino de mi carrera universitaria.

Agradezco a mis padres, Diego Pesantez y Jimena Sanchez, por su constante apoyo, amor y sacrificio en mi vida. Gracias por siempre creer en mí, por brindarme su consejo y por darme el impulso que necesitaba para seguir adelante en los momentos difíciles. Agradezco también a mis hermanos por ser mi soporte emocional y por estar a mi lado en todo momento.

A mi tutor, al Ing. Jefferson Ribadeneria, le agradezco por su orientación, paciencia y dedicación en este proceso. Gracias por su valiosa ayuda y por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo.

También quiero agradecer a todos los docentes que me han instruido a lo largo de mi carrera, por brindarme sus conocimientos y experiencia, y por ayudarme a desarrollar las habilidades necesarias para alcanzar mis metas.

Por último, a todas las personas que de alguna u otra forma han contribuido a este logro, les doy las gracias. Su apoyo y aliento me han inspirado y motivado en todo momento.

Luis Pesantez

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY	xix

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	3
<i>1.4.1 Justificación teórica.....</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2 Justificación aplicada</i>	<i>5</i>
1.5 OBJETIVOS	5
<i>1.5.1 Objetivo general.....</i>	<i>5</i>
<i>1.5.2 Objetivos específicos</i>	<i>6</i>

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO	7
2.1 Redes Móviles 4G LTE.....	7
<i>2.1.1 Características 4G LTE</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2 Arquitectura LTE/SAE.....</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2.1 Nodo MME (Mobility Management Entity).....</i>	<i>9</i>
<i>2.1.2.2 Nodo P/S – GW.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2.3 HSS (Home Subscriber Server)</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2.4 PCRF (Policy and Charging Rule Function)</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3 Protocolos de LTE/SAE.....</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3.1 Protocolos de la interfaz de radio</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3.2 Protocolos en las interfaces X2 y S1</i>	<i>13</i>
<i>2.1.4 Interfaces LTE/SAE</i>	<i>13</i>

2.2	Redes Móviles 5G NR	14
2.2.1	Espectro para 5G	15
2.2.1.1	<i>Bandas en frecuencias bajas</i>	15
2.2.1.2	<i>Bandas de frecuencias medias</i>	15
2.2.1.3	<i>Bandas de frecuencia alta</i>	16
2.2.2	Opciones de implementación 4G y 5G	16
2.2.2.1	<i>Opción 3 5G NSA</i>	17
2.3	OPEN AIR INTERFACE	18
2.4	SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)	19
2.4.1	USRP ETTUS B210	20
2.5	ANTENA LOGARÍTMICA WA5VJB	21
2.6	ANTENA VERT2450	21

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	22
3.1	Introducción	22
3.2	Tipos de investigación	22
3.2.1	<i>Investigación descriptiva</i>	22
3.3	Metodología de desarrollo	22
3.4	Requerimientos	23
3.4.1	<i>Requerimientos de Hardware y Software</i>	23
3.4.1.1	<i>Características del computador portátil</i>	23
3.4.1.2	<i>Características del terminal COST UE</i>	24
3.4.1.3	<i>Características de SIM y quemadora SIM</i>	24
3.4.1.4	<i>Características del Sistema Operativo</i>	25
3.4.2	<i>Prerrequisitos de instalación</i>	25
3.5	Análisis y Diseño	25
3.6	Implementación	26
3.6.1	<i>Instalación y configuración del EPC de Open Air Interface</i>	26
3.6.2	<i>Instalación de la RAN de Open Air Interface</i>	27
3.6.3	<i>Ejecución del EPC de Open Air Interface</i>	28
3.6.4	<i>Configuración y ejecución de la RAN de Open Air Interface</i>	30
3.6.5	<i>Configuración del equipo de usuario y conexión a la red 5G</i>	32

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	34
4.1	Introducción	34
4.2	Conexión de dispositivos UE a la Red 5G NSA y pruebas de velocidad y latencia. 34	
4.3	Medición de la potencia de salida de las USRP's usando el analizador de espectros. 41	
4.4	Medición de parámetros a un metro de distancia.....	43
4.5	Cálculo del Throughput 5G NR	45
4.6	Indor Testing 4G/5G en el laboratorio de comunicaciones de la FIE.....	47
4.7	Captura de tráfico del sistema.....	53
4.7.1	<i>Tráfico en la interfaz radio (Uu).....</i>	53
4.7.2	<i>Tráfico en el EPC</i>	54
4.7.3	<i>Tráfico en eNB y gNB</i>	56
4.8	Herramientas de monitorización de eNodeB y gNodeB	59
	CONCLUSIONES.....	62
	RECOMENDACIONES.....	63

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Comparación entre las últimas tecnologías móviles.....	18
Tabla 1-4: Umbrales de calidad.....	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1:	Casos de utilización de las IMT para 2020 y en Adelante.....	4
Ilustración 2-1:	El despliegue mundial de 5G	5
Ilustración 1-2:	Arquitectura SAE.....	8
Ilustración 2-2:	Coexistencia de LTE con tecnologías anteriores 2G/3G.	9
Ilustración 3-2:	Protocolos de la interfaz de radio de E-UTRAN	11
Ilustración 4-2:	Consideraciones de capacidad y cobertura de las categorías de espectro ...	15
Ilustración 5-2:	Opciones de implementación 4G y 5G.	17
Ilustración 6-2:	Arquitectura Red de Acceso de Radio Open Air Interface 5G	19
Ilustración 7-2:	USRP B210.....	20
Ilustración 8-2:	Antena Log Periodic 850 a 6500 MHz	21
Ilustración 9-2:	Antena VERT2450	21
Ilustración 1-3:	Metodología RUP	23
Ilustración 2-3:	Samsung Galaxy A52s 5G.....	24
Ilustración 3-3:	XCRFID USIM.....	24
Ilustración 4-3:	Smart Card Reader PC/SC CCID ISO7816 USB	25
Ilustración 5-3:	Diseño del sistema	26
Ilustración 6-3:	Visualización de la red de Docker “demo-oai-public-net”	28
Ilustración 7-3:	Visualización de la red de Docker “demo-oai-private-net”	29
Ilustración 8-3:	Inicialización de la entidad MME del EPC.....	29
Ilustración 9-3:	Mensaje de estadísticas de conexión del MME	30
Ilustración 10-3:	Ventana eNB - Inicialización exitosa	31
Ilustración 11-3:	Ventana MME – eNB añadido a la red.....	31
Ilustración 12-3:	Ventana eNB - Funcionamiento del protocolo X2AP	32
Ilustración 13-3:	Ventana gNB – Inicialización exitosa.....	32
Ilustración 14-3:	Administración y Modos de SIM en el UE.....	33
Ilustración 15-3:	Configuración del APN en el UE.....	33
Ilustración 1-4:	Notificación de conexión 4G en el teléfono celular.....	34
Ilustración 2-4:	Autenticación exitosa del usuario 505010000000022	35
Ilustración 3-4:	Estadísticas de dispositivos conectados en el MME.....	35
Ilustración 4-4:	Pruebas de latencia y velocidad en 4G	36
Ilustración 5-4:	Notificación de conexión 5G en el teléfono celular.....	36
Ilustración 6-4:	Primeras pruebas de latencia y velocidad en 5G.....	37
Ilustración 7-4:	Error inicial al momento de poner en marcha el gNodeB.....	37
Ilustración 8-4:	Configuración de los Dispositivos USRP B200 en OAI.....	38

Ilustración 9-4:	Segundas pruebas de latencia y velocidad en 5G	39
Ilustración 10-4:	Error al intentar conectar un UE a la red 5G NSA.....	39
Ilustración 11-4:	Configuración del HSS de OAI	40
Ilustración 12-4:	Autenticación exitosa del usuario 505010000000023	40
Ilustración 13-4:	Autenticación exitosa del usuario 505010000000051	40
Ilustración 14-4:	Autenticación fallida del usuario 505010000000052	41
Ilustración 15-4:	Espectro de la señal LTE (B7 - 2.68 GHz)	41
Ilustración 16-4:	Espectro de la señal NR (n78 - 3.619 GHz).....	42
Ilustración 17-4:	a la izquierda "Acceso al Canal NSA", a la derecha "Sesiones NSA"	43
Ilustración 18-4:	Variación de parámetros de "Conexión Dual NSA"	44
Ilustración 19-4:	a la izquierda "Niveles de potencia", a la derecha "Uso de modulaciones"	45
Ilustración 20-4:	Escenario del laboratorio de comunicaciones de la FIE	47
Ilustración 21-4:	Resultados de medición RSRP 4G.....	48
Ilustración 22-4:	Porcentaje de datos de medición RSRP 4G	49
Ilustración 23-4:	Resultados de medición RSRQ 4G.....	49
Ilustración 24-4:	Porcentaje de datos de medición RSRQ 4G.....	50
Ilustración 25-4:	Resultados de medición SINR 4G	50
Ilustración 26-4:	Resultados de medición SS-RSRP 5G	51
Ilustración 27-4:	Porcentaje de datos de medición SS-RSRP 5G	51
Ilustración 28-4:	Resultados de medición SS-RSRQ 5G	52
Ilustración 29-4:	Porcentaje de datos de medición SS-RSRQ 5G.....	52
Ilustración 30-4:	Resultados de medición SS-SINR 5G.....	53
Ilustración 31-4:	Tráfico en la interfaz radio Uu eNodeB.....	54
Ilustración 32-4:	Tráfico en la interfaz radio Uu gNodeB	54
Ilustración 33-4:	Captura de tráfico entre MME y HSS – Protocolo Diameter	55
Ilustración 34-4:	Flujo de mensajes entre MME y HSS – Protocolo Diameter	55
Ilustración 35-4:	Captura de tráfico entre SPGWU y SPGWC – Protocolo PFCP	55
Ilustración 36-4:	Flujo de mensajes entre SPGWU y SPGWC – Protocolo PFCP	55
Ilustración 37-4:	Captura de tráfico entre MME y SPGWC – Protocolo GTPv2	56
Ilustración 38-4:	Flujo de mensajes entre MME y SPGWC – Protocolo GTPv2	56
Ilustración 39-4:	Captura de tráfico en la interfaz S1-MME – Protocolos SCTP/S1AP.....	56
Ilustración 40-4:	Flujo de mensajes de la interfaz S1-MME – Protocolos SCTP/S1AP.....	57
Ilustración 41-4:	Captura de tráfico en la interfaz S1-U – Protocolo GTP	57
Ilustración 42-4:	Flujo de mensajes de la interfaz S1-U – Protocolo GTP	57
Ilustración 43-4:	Tráfico del proceso de autenticación de usuario.....	58
Ilustración 44-4:	Flujo de mensajes de autenticación de usuario	58
Ilustración 45-4:	Captura de tráfico en la interfaz X2 – Protocolo X2AP/SCTP.....	58

Ilustración 46-4:	Flujo de mensajes en la interfaz X2 – Protocolo X2AP/SCTP.....	59
Ilustración 47-4:	Herramienta gráfica “T-Tracer” para el eNodeB.....	60
Ilustración 48-4:	Herramienta gráfica “T-Tracer” para el gNodeB.....	60
Ilustración 49-4:	Herramienta "Soft Scope" para el eNodeB.....	61

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: RED 5G NSA EN LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE

ANEXO B: PRERREQUISITOS DE INSTALACIÓN

ANEXO C: GESTIÓN DE OAI-EPC

ANEXO D: GESTIÓN DE OAI-RAN

ANEXO E: CONFIGURACIÓN Y ESCRITURA DEL SIM

ANEXO F: ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

3GPP:	3rd Generation Partnership Project
4G:	4th Generation
5G:	5th Generation
ARQ:	Automatic Repeat reQuest
APN:	Access Point Name
BCCH:	Broadcast Control Channel
CN:	Core Network
DL:	Downlink
DL-SCH:	Downlink – Shared Channel
DNS:	Domain Name System
eNB:	evolved NodeB
EPC:	Evolved Packet Core
EPS:	Evolved Packet System
E-UTRAN:	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FFD:	Full Function Device
gNB:	Next Generation NodeB
GTP:	GPRS Tunnelling Protocol
GTP-C:	GTP-Control Plane
GTP-U:	GTP-User Plane
HSS:	Home Subscriber Server
IMSI:	International Mobile Subscriber Identity
IP:	Internet Protocol
IPv4:	Internet Protocol version 4
LTE:	Long-Term Evolution
MAC:	Medium Access Control

MCC:	Mobile Country Code
MCS:	Modulation and Coding Scheme
MIMO:	Multiple-Input Multiple-Output
MME:	Mobility Management Entity
MNC:	Mobile Network Code
NAS:	Non-Access Stratum
NSA:	Non-Standalone
OAI:	OpenAirInterface
OFDMA:	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OP:	Operator
ORAN:	Open radio Access Network
QCI:	QoS Class Identifier
PBCH:	Physical Broadcast Channel
PCCH:	Paging Control Channel
PCRF:	Policy and Charging Rules Function
PDCP:	Packet Data Convergence Protocol
PDN:	Packet Data Network
PDU:	Protocol Data Unit
PDSCH:	Physical Downlink Shared Channel
PUCCH:	Physical Uplink Control Channel
PUSCH:	Physical Uplink Shared Channel
PGW:	Packet Gateway
PRB:	Physical Resource Block
QAM:	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK:	Quadrature Phase Shift Keying
QoS:	Quality of Service
RACH:	Random Access Channel

RAN:	Radio Access Network
RB:	Resource Block
RF:	Radio Frequency
RLC:	Radio Link Control
RRC:	Radio Resource Control
RSRP:	Reference Signal Received Power
RSRQ:	Reference Signal Received Quality
RUP:	Rational Unified Process
S1AP:	S1 Application Protocol
SCTP:	Stream Control Transmission Protocol
SIRN:	System Information Release Number
SDR:	Software Defined Radio
SGW:	Serving Gateway
TAC:	Tracking Area Code
TAI:	Tracking Area Identity
TCP:	Transmission Control Protocol
TDD:	Time Division Duplex
UDP:	User Datagram Protocol
UHD:	USRP Hardware Driver
UL:	Uplink
USB:	Universal Serial Bus
USIM:	Universal Subscriber Identity Module
USRP:	Universal Software Radio Peripheral
UTRAN:	Universal Terrestrial Radio Access Network
X2-AP:	X2 Application Protocol

RESUMEN

En el presente trabajo se desplegó una red 5G NSA implementada en software de código abierto de Open Air Interface con USRP's Ettus B210 para el laboratorio de comunicaciones de la Facultad de Informática y Electrónica (FIE). Para el desarrollo de este trabajo se empleó una investigación descriptiva, además se usó la metodología iterativa denominada Proceso Racional Unificado (RUP), la cual consta de cuatro fases: en la fase de requerimientos, se definió los requisitos que debe cumplir el sistema, tanto de hardware como de software; en la fase de diseño y análisis, se estableció el diseño que debe acatar la red 5G NSA para una correcta comunicación entre cada uno de sus componentes; en la fase de implementación, se desarrolló la instalación de los componentes del núcleo de paquetes evolucionado (EPC) y de la red de acceso por radio (RAN), usando los repositorios oficiales de la plataforma OAI para posteriormente poner en marcha la red; y finalmente, en la fase de pruebas, se comprobó el correcto funcionamiento. Además, se realizó mediciones de la red a través de un Indoor test para determinar la cobertura dentro del laboratorio de comunicaciones de la FIE; se obtuvo como resultado la conexión exitosa de un UE hacia la red 5G NSA, con retardos de 12 milisegundos de respuesta y proveyendo al usuario salida a Internet. Así mismo, se utilizaron herramientas como T Tracer y SoftScope las cuales permiten el análisis y monitoreo de la interfaz radio de la red. Concluyendo que, se logró implementar una red 5G NSA, proveyendo de un entorno didáctico para el estudio de estas tecnologías. Sin embargo, se encontró que el modelo B210 de la USRP tiene limitantes en cuanto a su ancho de banda y velocidad de muestreo, lo que no permitió explotar las características de 5G obteniendo bajas velocidades de transmisión, por lo que, para futuros trabajos se recomienda usar modelos actuales y con mejores capacidades de ancho de banda.

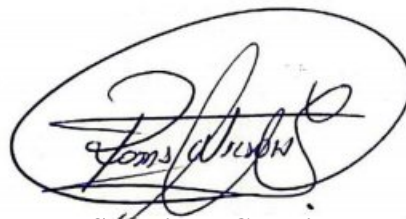
Palabras clave: <REDES MÓVILES>, <COMUNICACIÓN INALÁMBRICA>, <ESTÁNDAR DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS LTE>, <5G NON-STAND ALONE>, <RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)>, <USRP B210 >, <OPEN AIR INTERFACE (OAI)>.



SUMMARY

In the present work, a 5G NSA network implemented in Open Air Interface open-source software with USRP's Ettus B210 was deployed for the communications laboratory of the Faculty of Informatics and Electronics (FIE). For the development of this work a descriptive investigation was used, in addition the iterative methodology called Rational Unified Process (RUP) was used, which consists of four phases: in the requirements phase, the requirements that the system must meet, both hardware and software, were defined; In the design and analysis phase, the design that the 5G NSA network must comply with for proper communication between each of its components was established; in the implementation phase, the installation of the evolved packet core (EPC) and radio access network (RAN) components was carried out, using the official repositories of the OAI platform to subsequently launch the network; and finally, in the testing phase, the correct operation was verified. In addition, network measurements were carried out through an Indoor test to determine the coverage within the FIE communications laboratory; The successful connection of a UE to the 5G NSA network was obtained as a result, with response delays of 12 milliseconds and providing the user with access to the Internet. Likewise, tools such as T Tracer and SoftScope were used, which allow the analysis and monitoring of the radio interface of the network. Concluding that, it was possible to implement a 5G NSA network, providing a didactic environment for the study of these technologies. However, it was found that the USRP B210 model has limitations in terms of its bandwidth and sampling rate, which did not allow exploiting the characteristics of 5G obtaining low transmission speeds, therefore, for future work it is recommended use current models and with better bandwidth capabilities.

Keywords: <MOBILE NETWORKS>, <WIRELESS COMMUNICATION>, <LTE WIRELESS COMMUNICATIONS STANDARD>, <5G NON-STAND ALONE>, <SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR)>, <USRP B210 >, <OPEN AIR INTERFACE (OAI)>.

A handwritten signature in black ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature appears to read 'Wilson G. Rojas'.

MSc. Wilson G. Rojas

C.I. 0602361842

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día cuesta pensar un mundo sin el uso de las tecnologías que permiten comunicarnos a largas distancias de manera eficaz e instantánea. Las tecnologías de redes móviles han continuado mejorando sus prestaciones, capacidades y servicios durante los últimos años. Para brindar la capacidad de que las personas puedan estar comunicadas entre sí y estar conectadas a la red en cualquier momento

La evolución de las generaciones de redes móviles provoca la aparición de nuevos componentes dentro de la red central y la parte de radio acceso. Esto hace que al querer pasar a una generación superior se tenga que cambiar parte de la infraestructura, equipos y componentes de la red actual, traduciendo en costos altos para las compañías de operadores móviles.

Las compañías de operadores móviles al querer estar a la vanguardia de su competencia adquieren los equipos y componentes necesarios para soportar estas nuevas tecnologías. Sin embargo, dentro del ámbito académico no siempre se cuenta con el presupuesto y permisos necesarios para poder experimentar con tecnologías 4G y 5G desplegadas.

En este contexto, nuevas investigaciones han permitido solucionar este problema al desarrollar software de código abierto de bajo costo para el despliegue de redes inalámbricas, como es el caso de la Redes 5G.

Por tal razón, se plantea la implementación de una solución de código abierto dentro del laboratorio de comunicaciones de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH donde se podrá experimentar con estas tecnologías y aplicar los conocimientos aprendidos en clase. Por tanto, será una útil herramienta en el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la carrera de telecomunicaciones.

1.2 ANTECEDENTES

Con la creación de OpenRAN cuyo objetivo es tener un estándar de interoperabilidad para los elementos de la RAN que incluye hardware y software abierto (no patentados por diferentes proveedores), se ve una alternativa para desplegar una red 5G debido a que las empresas no

tendrán que invertir grandes cantidades de dinero en infraestructura. Teniendo en cuenta también que en 5G, el alcance de la señal va a ser menor, será necesario implementar más estaciones base para brindar una cobertura más general. Partes de la red celular que solían ser manejadas por hardware y software especializados ahora son virtualizadas mediante la arquitectura Open RAN (Marte, 2022).

Actualmente existen varios grupos o alianzas que desarrollan código abierto y que proponen una solución para el despliegue de redes 5G. Entre ellos: i) Open Air Interface, alianza la cual reúne una comunidad de desarrolladores de todo el mundo, que trabajan juntos para construir tecnologías celulares inalámbricas de red de acceso por radio (RAN) y red central (CN) (OpenAirInterface, 2022) y ii) srsRAN, el cual construye sistemas inalámbricos móviles 4G y 5G basados en las especificaciones técnicas 3GPP. Brindando soluciones completas tanto para el teléfono (UE) como para la torre celular (eNodeB/gNodeB) (SRS, 2022).

El trabajo de máster final de la Universidad Politécnica de Valencia, titulado Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRP's, muestra la implementación de una estación base 5G Non-Standalone privada y código abierto de Open Air Interface haciendo uso USRP B210, logrando establecer de forma correcta todas las interfaces de conexión, confirmando que tanto el eNB y el gNB se encuentran radiando. Además, se realizó un estudio de cobertura en un laboratorio del campus para establecer escenarios donde la red 5G privada podría ofrecer ciertos servicios. También en su artículo comentan que obtuvieron problemas de compatibilidad implementando el código abierto debido a que las versiones desarrolladas por OAI estaban desactualizadas en ese entonces, lo cual no les permitía el paso de mensajes entre eNB y gNB para la conexión de un UE, únicamente permitía un UE poder acceder a la red 4G, pero no a la 5G en cuanto a la transmisión de datos a través de la portadora de radio. Por lo que, en una de sus líneas futuras hablan de actualizar el código OAI y verificar estas conexiones entre eNB, gNB y UE (Riaño, 2020).

El trabajo de titulación de la Universidad Politécnica de Valencia, titulado Deployment of 5G Non-Standalone networks based on OpenAirInterface, se implementa de igual manera una solución de red 5G Non-Standalone, usando equipamiento de última generación y además se realizaron cambios pertinentes al código abierto de Open Air Interface para optimizar su rendimiento. La novedad de dicho trabajo es la utilización del USRP N321, siendo un equipo de última generación con características muy altas. El equipo del ITEAM fue el primero en hacer que este dispositivo funcionará con el código abierto de OAI, esto fue un gran desafío para ellos. En sus resultados se puede observar que la estabilidad de la USRP N321 es inferior a la USRP B210 porque la información transmitida por la USRP N321 hacia la computadora host

era más grande y, como resultado, más difícil de administrar por la máquina Linux. Para que la red estuviera operativa se tuvo que dividir la carga en 2 máquinas Linux. A pesar de las limitaciones que se presentaron, se logró brindar una conexión 5G al laboratorio del grupo de comunicaciones móviles de la UPV, demostrando que las soluciones 5G de código abierto son funcionales, ofreciendo a los operadores una nueva herramienta, transparente y adaptable a cada situación. Además, que tener una red estable 5G independiente no está tan lejos (Picazo, 2021).

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo desplegar una red 5G NSA implementada en software de código abierto OAI con USRP's Ettus B210 para el laboratorio de comunicaciones de la FIE?

¿Cómo Investigar acerca de la arquitectura y evolución de las redes 4G y 5G, sus principales cambios y características?

¿Cómo configurar y desplegar una red 5G NSA implementado el código abierto de Open Air Interface (OAI)?

¿Cómo realizar mediciones de la red 5G NSA basada en OAI mediante un dispositivo COTS UE?

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 *Justificación teórica*

La telefonía móvil ha ido evolucionando con cada generación que se lanzaba. Se pasó de comunicaciones de analógicas para transmisión de voz (1G) a convertirlas en señales digitales para evitar interferencias y poseer más usuarios conectados (2G), luego con la necesidad de tener más servicios que solo la transición de voz se incorporó en esta red el uso de paquetes para el envío de datos (3G), para la cuarta generación la demanda de información, calidad de servicio y altas velocidades hizo que esta tecnología sea todo IP (All-IP), tecnología que usamos en la actualidad y que plantea una base para la siguiente generación que es 5G NR (Barreno, 2016).

Con 5G se puede tener 3 casos de utilización diferentes, como se puede observar en la Ilustración 1-1. Estos son i) Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC), permitiendo un gran número de usuarios conectados, enfocado a IoT e Industria 4.0; ii) Banda ancha móvil mejorada (eMBB), que se centra en el acceso al contenido multimedia, servicios y datos para el ser humano debido a la creciente demanda de ancho de banda móvil y iii) Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (URLLC), dando estricta prioridad a la latencia, caudal, y

disponibilidad. Como, por ejemplo: cirugía a distancia, seguridad en el transporte, etc (UIT-R M.2083-0, 2015).

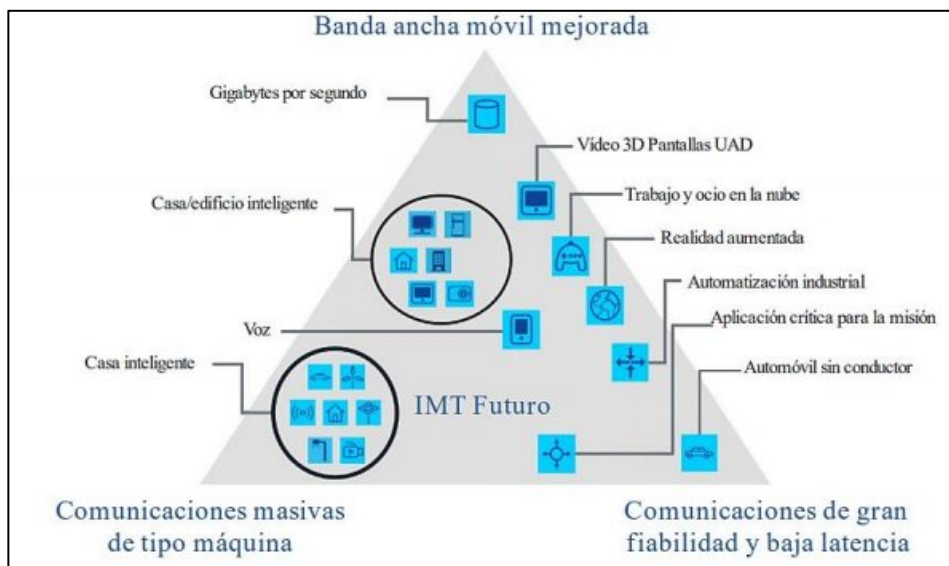


Ilustración 1-1: Casos de utilización de las IMT para 2020 y en Adelante

Fuente: UIT-R M.2083-0, 2015

La Ilustración 2-1 muestra una estadística mundial sobre el despliegue de redes 5G. En la cual se nota que en algunos países ya ha sido desplegada. Pero la mayoría de los países aún no cuentan con tecnología 5G o solo existen pocas transmisiones piloto. Por lo que, existe una lenta implementación del estándar, debido entre otros factores a que, los equipamientos para la RAN (Radio Access Network), las cuales sirven para conectar las estaciones base que reciben y transmiten el tráfico de los terminales, son diseñados para que su comunicación sea entre dispositivos de la misma marca, provocando interoperabilidad entre proveedores. Esto resulta que una compañía o empresa se vea obligada a tratar con una sola compañía al momento de querer desplegar esta red. Este bloqueo causa que se mantengan precios altos ya que limita la competencia entre proveedores de equipos para los elementos individuales de la RAN y a su vez limita la flexibilidad en el diseño de la red. Para solventar estos problemas se crea Open RAN, la siguiente generación de RAN, siendo una arquitectura de red que promueve la interoperabilidad de hardware, software e interfaces abiertas, la cual podría abaratar el despliegue de redes 5G y otras redes móviles dando paso a una innovación de funciones y servicios más rápida (CIO México, 2021).



Ilustración 2-1: El despliegue mundial de 5G

Fuente: <https://es.statista.com/grafico/23241/nivel-de-desarrollo-de-la-tecnologia-5g-en-el-mundo/>

1.4.2 *Justificación aplicativa*

El presente proyecto de trabajo de titulación pretende desplegar una red 5G NSA usando software de código abierto propuesto por OAI en sus versiones más recientes, brindando los elementos necesarios de RAN y Core para que la red sea funcional. Además, se usará como hardware dispositivos de radio definido por software USRP B210 de propósito general, desarrollados por Ettus Research compañía de Nationals Instruments y un teléfono celular con conexión 5G el cual se define como COTS UE.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende dar un punto de partida para la implementación de redes 5G privadas dentro de la facultad, el cual servirá a futuro para realizar nuevos estudios e implementaciones usando esta nueva tecnología, tema que puede ser de mucha utilidad tanto para docencia, al ser un componente para que los estudiantes comprendan mejor este estándar, como para nuevos temas de titulación que se pueden derivar.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 *Objetivo general*

Desplegar una red 5G NSA implementada en software de código abierto OAI con USRP's Ettus B210 para el laboratorio de comunicaciones de la FIE

1.5.2 *Objetivos específicos*

- Investigar acerca de la arquitectura y evolución de las redes 4G y 5G, sus principales cambios y características.
- Configurar y desplegar una red 5G NSA implementando el código abierto de Open Air Interface (OAI).
- Realizar mediciones de la red 5G NSA basada en OAI mediante un dispositivo COTS UE

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1 Redes Móviles 4G LTE

La cuarta generación de telefonía móvil se refiere a un conjunto de protocolos y tecnologías las cuales proveen un máximo rendimiento de procesamiento dentro de la red inalámbrica. Está basada totalmente en IP soportando el intercambio de paquetes. Long Term Evolución (LTE) se desarrolló con el objetivo de cumplir las crecientes demandas de parte de los usuarios y las redes, sustituyendo así a UMTS (Pérez, 2010, p.4).

2.1.1 Características 4G LTE

Entre las características que presentan LTE se tiene (Jaramillo, 2015, p. 2):

- El ancho de banda de las portadoras o canales se encuentra en un rango de 1.4MHz hasta 20MHz.
- Latencia del plano de control inferior a 100 ms y latencia del plano de usuario menor a 30 ms.
- Algunas de las bandas de frecuencia estándares que se usan son: 700MHz, 850MHz, 1700MHz, 1800MHz, 1900MHz, 2100MHz, 2600MHz.
- Soporta Duplexación por División de Tiempo (TDD) y Duplexación por División de Frecuencia (FDD).
- Se puede tener tasas de transmisión de 100Mbps en bajada y de 50Mbps en subida. La velocidad de transmisión varía de acuerdo con el ancho de banda de las portadoras.
- El método de acceso utilizado es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Domain Multiple Access).
- Las subportadoras pueden modularse con símbolos QPSK, 16QAM o 64QAM.
- Funciones avanzadas como MIMO permiten a LTE la agregación de portadoras lo que se traduce en un aumento en las tasas de transmisión, capacidad de usuarios y eficiencia del espectro.

2.1.2 Arquitectura LTE/SAE

La arquitectura LTE/ SAE se encuentra especificada en el Release 8 de 3GPP. Dentro de 3GPP se encuentran 2 líneas de trabajo: LTE apunta a la evolución de la red de radio y SAE (System Architecture Evolution) apunta a la evolución de la red central de paquetes (Ericsson, 2009, p. 12).

Dentro de esta arquitectura, la parte de acceso a radio es llamado E-UTRAN (Evolved UTRAN), y el núcleo de datos Evolved Pack Core (EPC). El conjunto de estos dos elementos forma el Evolved Packet System (EPS). Cada capa de la red se compone de diversos elementos y su comunicación se lleva a cabo a través de interfaces estándares definidas que conectan a las diferentes capas de la red, servidores de bases de datos y hacia otras generaciones de redes como GSM y 3G. Debido a que esta generación está basada únicamente en IP, la voz se maneja como un servicio de voz sobre IP (VoIP) y direccionando el servicio a una red coexistente 2G/3G. En esta generación ya no se usa comunicaciones de conmutación de circuitos (Jaramillo, 2015, pp.4-5).

La E-UTRAN está compuesta únicamente de la radio base que se denomina eNodeB o evolved-Node B, tal como se observa en la Ilustración 1-2. Aquí no se encuentra un elemento controlador de radio RNC o BSC como lo había en generaciones anteriores. El EPC está compuesta por 3 entidades: El Mobility Management Entity (MME) el cual administra el plano de control de la red, el Serving Gateway (S-GW) y el Packet data network Gateway (P-GW) que suele residir en el mismo nodo físico, denominado SAE-GW o P/S-GW, estos últimos trabajan con el plano de usuario o información.

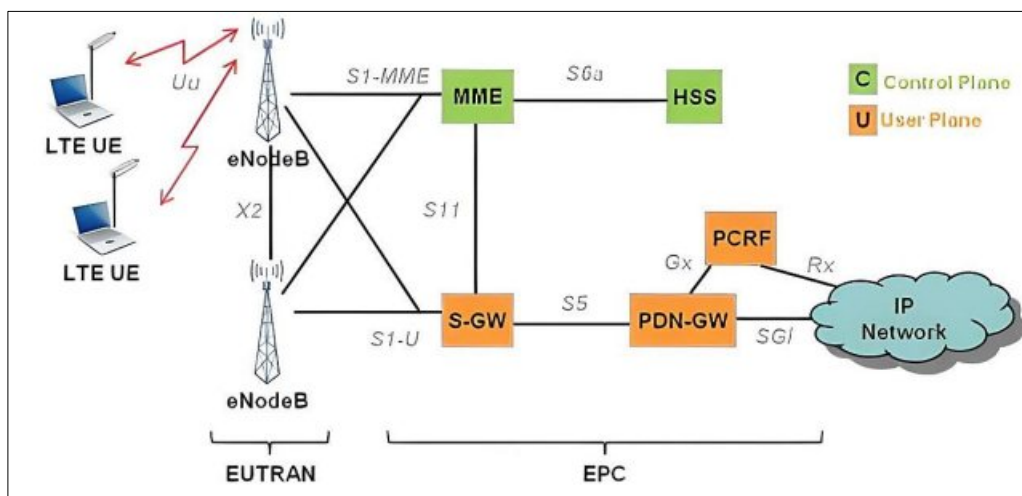


Ilustración 1-2: Arquitectura SAE

Fuente: IPv6 GO, 2014.

En la Ilustración 2-2 se puede apreciar la coexistencia de tecnologías anteriores como 2G y 3G con LTE, mostrando como se encuentra conectada su estructura usando tipos de interfaces específicas para cada conexión.

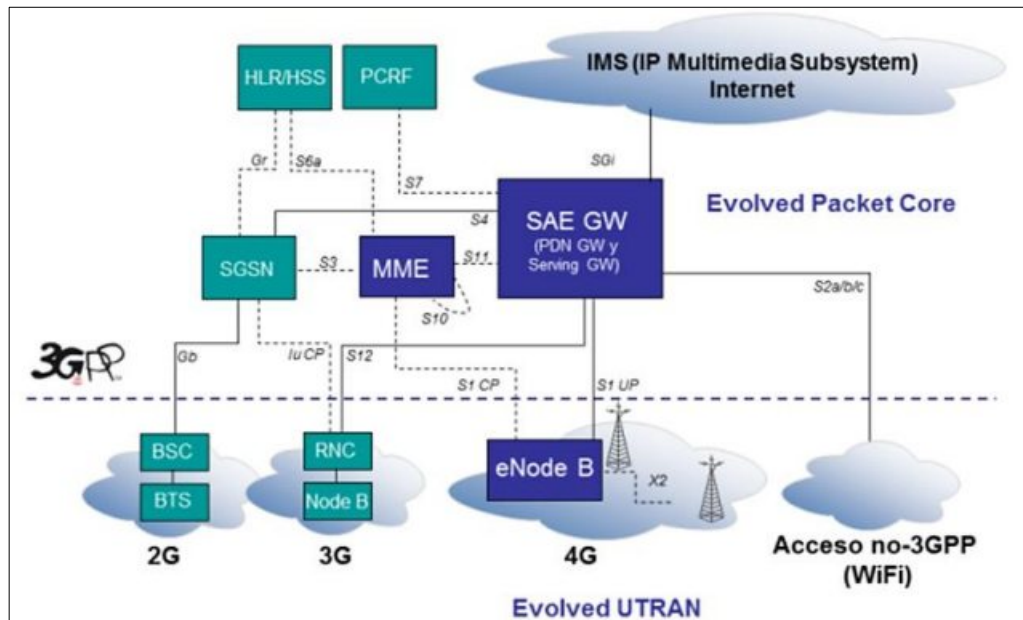


Ilustración 2-2: Coexistencia de LTE con tecnologías anteriores 2G/3G.

Fuente: Millán R., 2012, pág. 66.

2.1.2.1 Nodo MME (Mobility Management Entity)

El MME realiza las siguientes funciones (Ericsson, 2009, p.45):

- Gestiona de la conexión y desconexión de los UE's, permitiendo que los UE's puedan registrarse y cancelar su registro en la red.
- Provee de seguridad implementando funciones de autenticación y autorización y de esta manera identificar la identidad de los usuarios, dar acceso a la red y realizar un seguimiento de las actividades que realizan los usuarios.
- Gestiona el establecimiento, modificación y retiro de las portadoras EPS.
- Gestiona la movilidad para un UE en modo IDLE

El MME recolecta los datos del suscriptor mediante la información almacenada en el HSS. Además, el MME provee conectividad entre el eNB y la red GSM/UMTS existente por medio del SGSN (Serving GPRS Support Node) (Pérez, 2010, p.3).

2.1.2.2 *Nodo P/S – GW*

Las funciones del nodo P/S-GW se asemejan al nodo GGSN existente. Principalmente se agregan funciones como: almacenamiento en búfer de paquetes de soporte durante la paginación E-UTRAN y soporte adicional de inter-funcionamiento no GPP (CDMA2000, WLAN).

El P/S-GW provee de una interfaz con el mundo exterior (Internet). También se lo puede ver principalmente como un nodo del plano de usuario, no obstante, también realiza ciertas señalizaciones relacionadas con QoS (Ericsson, 2009, p.45).

El P/S-GW participa en las siguientes funciones del plano de control:

- Activa la configuración de portadoras EPS a pedido de las funciones de control de políticas.
- El P-GW actúa como punto de anclaje de movilidad para los UE. Un UE puede transferirse a otro MME o S-GW si ocurre un Handover, pero el PoP (Punto de presencia) permanecerá en el P-GW.
- El P-GW asigna una dirección IP a los UE conectados.

El P/S-GW maneja las siguientes funciones del plano de usuario:

- Aplicación y control de políticas de QoS. El tráfico de enlace descendente (DL) se controla en el P/S-GW, mientras que el tráfico de enlace ascendente (UL) se controla en el eNB.
- Se encarga de cobrar al usuario el tráfico consumido de acuerdo con las tarifas establecidas por la compañía.
- Además, permite que las comunicaciones sean interceptadas por organismos legales en caso de que lo autoricen mandatos judiciales o reglamentarios.

2.1.2.3 *HSS (Home Subscriber Server)*

HSS es la base de datos central en la cual se almacenan los perfiles de usuario: estado de suscripción de servicio e información de calidad de servicio del usuario. Además, HSS se encarga de identificar y direccionar información del usuario como: IMSI (International Mobile Subscriber Identity), MSISDN (Mobile Station International Integrated Services Digital Network Number) o número de teléfono (Xueyan, 2018, p.25).

HSS integra AuC (Authentication Center), entidad de las redes 2G y 3G el cual se encarga de generar vectores de autenticación y generación de claves de seguridad.

2.1.2.4 PCRF (Policy and Charging Rule Function)

Esta entidad gestiona la política de servicio y tarificación, además envía información sobre la configuración de QoS para cada sesión de usuario. Se encuentra conectado al PGW por medio de la interfaz S7 y a las PDN por medio de la interfaz RX+ (Peinado, 2019, p.32).

2.1.3 Protocolos de LTE/SAE

Aquí se describen los diferentes protocolos que se usan LTE, dividiéndose en 2 grupos: el plano de control, el cual proporciona información de señalización y el plano de usuario que nos permite el intercambio de datos de los usuarios.

2.1.3.1 Protocolos de la interfaz de radio

La interfaz de radio es aquella que permite el envío de paquetes IP entre eNodeB y los equipos de usuario. Está conformada de una capa física y una capa de enlace de datos. Dentro de la capa de enlace de datos se encuentra una pila de protocolos como son: PDCP, RLC y MAC, tal como se observa en la Ilustración 3-2.

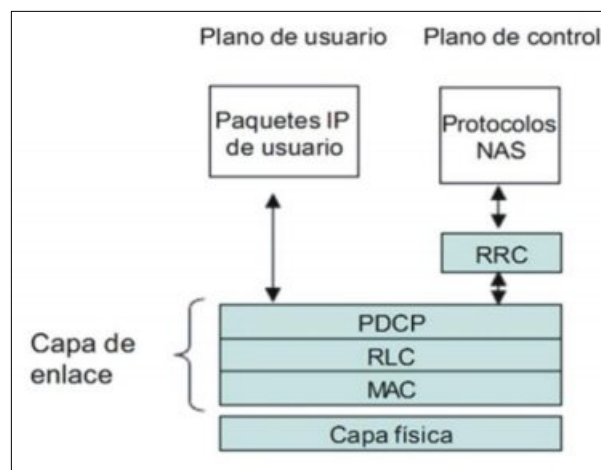


Ilustración 3-2: Protocolos de la interfaz de radio de E-UTRAN

Fuente: Nuñez, 2013, p.3

- PDCP (Packet Data Convergence Protocol)

Encargado de brindar el punto de acceso al servicio Radio Bearer (RB) o portador radio, siendo esta capa la cual entrega y recibe los paquetes IP del tráfico de usuario. Entre las funciones que proporciona esta capa está la de comprimir cabecera de paquetes IP, cifrar la información para brindar confidencialidad e integridad, permita la ordenación e identificación de paquetes IP duplicados en el caso de handover. Cada RB se asocia a una entidad PDCP (Nuñez, 2013, p.2).

- RLC (Radio Link Control)

Encargado que los paquetes PDCP sean enviados de forma segura entre el eNB y el equipo de usuario. Entre las funciones de esta capa se tiene la de corrección de errores mediante ARQ, segmentación, concatenación, reensamblado. Además, se encarga de ordenar paquetes PDCP, enviarlas a capas superiores (no incluye en el handover). Cada RB se asocia a una entidad RLC (Nuñez, 2013, p.3).

- MAC (Medium Access Control)

Encargado de controlar el acceso al canal de radio. Entre las funciones que realiza se tiene la de multiplexar paquetes RLC de diferentes servicios RB en los canales de transporte de la capa física y realizar control de errores usando Hybrid ARQ (Nuñez, 2013, p.3).

- Capa Física

Encargada de transmitir la información por medio de un canal de radio. Realiza funciones de modulación, codificación de canal, MIMO, mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo apropiados, etc (Nuñez, 2013, p.3).

- NAS (Non-Access Stratum)

El uso de estos protocolos se da entre la entidad MME de la red central y los equipos de usuario. Consisten en mensajes de señalización que se encapsulan dentro de RRC y se transportan por la interfaz de radio. NAS tiene como funciones: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que carecen de una conexión RRC establecida y la gestión de servicios portadores de la red EPS (Nuñez, 2013, p.4).

- RRC (Radio Resource Control)

Encargada de establecer, reconfigurar y liberar una conexión de control entre el equipo de usuario y el eNodeB, transmitiendo información del sistema relacionada con los protocolos NAS y AS (Nuñez, 2013, p.4).

2.1.3.2 *Protocolos en las interfaces X2 y S1*

- GTP-U (GPRS Tunneling Protocol UserPlane)

El protocolo GTP-U ofrece un método de encapsulación para transmitir paquetes de usuario entre nodos de una red IP. Los paquetes relacionados con un servicio portador EPS particular se transportan mediante un Identificador de Punto Final de Túnel (TEID). Para establecer un túnel GTP-U, se selecciona un TEID específico asociado con un servicio portador EPS en ambos extremos del túnel (Vivas y Vallejo, 2019, p.37).

- S1AP (S1 -Application Part)

Se utiliza en la interfaz S1-MME o S1-C, e incluye funciones para establecer servicios de transporte en el eNodeB, paginación, control de handover, entre otras. Las entidades MME y eNB intercambian mensajes de señalización de S1AP mediante el uso del protocolo SCTP (Nuñez, 2013, p.5).

- SCTP (Stream Control Transmission Protocol)

Este protocolo de transporte de propósito general se implementa en el plano de control de las interfaces S1 y X2, y la asociación SCTP incluye mecanismos para controlar la congestión y el flujo de la conexión. Además, proporciona soporte para multihoming y multistreaming, y estructura la información transmitida en forma de mensajes (Nuñez, 2013 pág. 5).

2.1.4 *Interfaces LTE/SAE*

Las interfaces principales en una red LTE son (Jaramillo, 2015, pp.8-10):

- **Interfaz S1:** Conecta el E-UTRAN con el EPC. A través de la interfaz S1-MME, se comunica el eNB con el MME en el plano de control, utilizando el protocolo S1AP para la gestión de movilidad y transporte de información NAS. La interfaz S1-U, por su parte,

conecta el eNB con el S-GW en el plano de usuario, mediante un túnel con el protocolo GTP-U que encapsula los paquetes IP y transporta los datos del usuario.

- **Interfaz X2:** Permite la comunicación entre dos eNBs y se utiliza en caso de un handover inter-eNodeB. En el plano de usuario, se crea un túnel mediante el protocolo GTP-U para compartir los datos del usuario entre eNBs. En el plano de control se usa el protocolo X2-AP, que transmite información de la administración de los recursos de radio RRM y la señalización de handover.
- **Interfaz S6a:** Conecta el HSS con el MME, utilizando el protocolo Diameter para la transferencia de datos de suscripción y autenticación de usuarios.
- **Interfaz S5:** Conecta el S-GW y el P-GW mediante un túnel GTP. En ciertas ocasiones, el S-GW y el P-GW se encuentran en un único nodo, lo que convierte a esta interfaz en una interfaz interna.
- **Interfaz S11:** Conecta el S-GW y el MME en el plano de control mediante un túnel con el protocolo GTP-C. Esta interfaz se utiliza durante el handover inter-eNodeB para transferir los canales de portadoras de datos y durante la actualización del área de tracking.
- **Interfaz de radio Uu:** Conecta el eNB con el UE y utiliza mensajes RRC para la señalización en el plano de control, proporcionando una comunicación directa del UE hasta el EPC en el plano de usuario.

2.2 Redes Móviles 5G NR

Para poder cumplir con ciertos requisitos que LTE no era capaz de cumplir, 3GPP inició el desarrollo de una nueva tecnología de acceso por radio conocida como NR (New Radio). A finales del 2017 se publicó la primera versión de las especificaciones de NR y de esta manera alcanzar con los requisitos comerciales para sus primeros despliegues en 2018. Además de contar la tecnología NR, 3GPP desarrolló una nueva red central 5G llamada 5GCN la cual también proporciona conectividad para LTE. En adición, NR también puede conectarse al núcleo de LTE llamado EPC si se opera en el modo no independiente (non-standalone) (Dahlman et al., 2018, pp.28).

2.2.1 Espectro para 5G

Para desplegar 5G, el espectro adecuado se divide en bandas de frecuencia baja, media y alta, que se utilizan en entornos rurales, urbanos y urbanos (Hotspot) respectivamente, cada banda de frecuencia ofrece ciertas características en cuanto a la capacidad y cobertura tal como se muestra en la Ilustración 4-2:

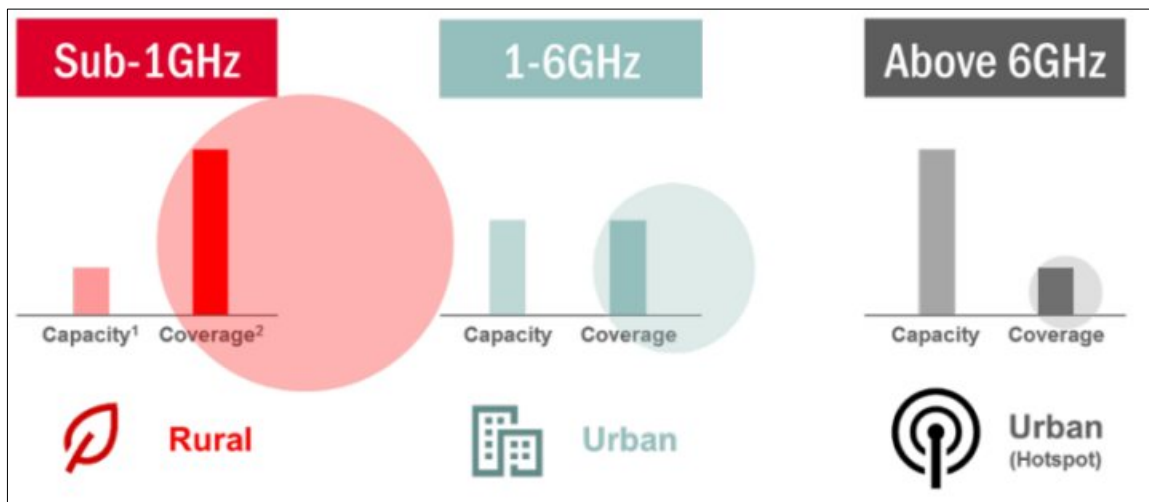


Ilustración 4-2: Consideraciones de capacidad y cobertura de las categorías de espectro

Fuente: GSMA, 2018, p.14

2.2.1.1 Bandas en frecuencias bajas

Estas bandas corresponden a las de LTE por debajo de 2 GHz, son ideales para brindar una amplia y profunda cobertura, especialmente en interiores. Las bandas de 600 y 700 MHz (n71 y n28 de 3GPP NR). Debido a que no son muy anchas, el ancho de banda máximo del canal en estas bandas de baja frecuencia se espera que sea de 20 MHz (Dahlman et al., 2018, p.58).

2.2.1.2 Bandas de frecuencias medias

Las bandas de frecuencia media, que abarcan de 3 a 6 GHz, ofrecen cobertura, capacidad y alta velocidad de datos con el ancho de banda de canal más amplio posible. El rango de 3300 a 4200 MHz es de mayor interés a nivel mundial, y en él, 3GPP ha designado las bandas NR n77 y n78. Estas bandas tienen la capacidad de soportar anchos de banda de canal de hasta 100 MHz debido a su mayor amplitud. A largo plazo, se podrían asignar hasta 200 MHz por operador en este rango de frecuencia, y la agregación de portadoras podría utilizarse para implementar el ancho de banda completo (Dahlman et al., 2018, pp.58-59).

2.2.1.3 *Bandas de frecuencia alta*

Las bandas de alta frecuencia se encuentran en el rango de ondas milimétricas por encima de 24 GHz y son ideales para brindar una alta capacidad local y altas velocidades de datos en puntos de acceso. El rango de 24,25 a 29,5 GHz se han asignado las bandas 3GPP NR n257 y n258 para su uso. Estas bandas permiten anchos de banda de canal de hasta 400 MHz, y la agregación de portadoras puede aumentar aún más el ancho de banda disponible (Dahlman et al., 2018, p.59).

2.2.2 *Opciones de implementación 4G y 5G*

Aunque 3GPP está definiendo tanto una nueva red central 5G (5GC) como una nueva tecnología de acceso de radio llamada 5G "New Radio" (NR), es posible integrar elementos de diferentes generaciones en diferentes configuraciones con 5G. Estas configuraciones incluyen SA (independiente) y NSA (no independiente). El escenario SA utiliza solo una tecnología de acceso de radio (5G NR o las celdas de radio evolved LTE), y la red central se opera sola. Por otro lado, el escenario NSA combina celdas de radio NR y celdas de radio LTE que usan conectividad dual para proporcionar acceso de radio. La red central en este caso puede ser EPC o 5GC (GSMA, 2018, p.14).

En la Ilustración 5-2 se pueden observar las diferentes opciones de implementación 4G y 5G y se las enlista a continuación:

Variaciones de escenarios SA

- Opción 1: SA LTE bajo EPC
- Opción 2: SA NR bajo 5GC
- Opción 5: SA LTE bajo 5GC

Variaciones de escenarios NSA

- Opción 3: NSA LTE y NR bajo EPC
- Opción 4: NSA NR y LTE bajo 5GC
- Opción 7: NSA LTE y NR bajo 5GC

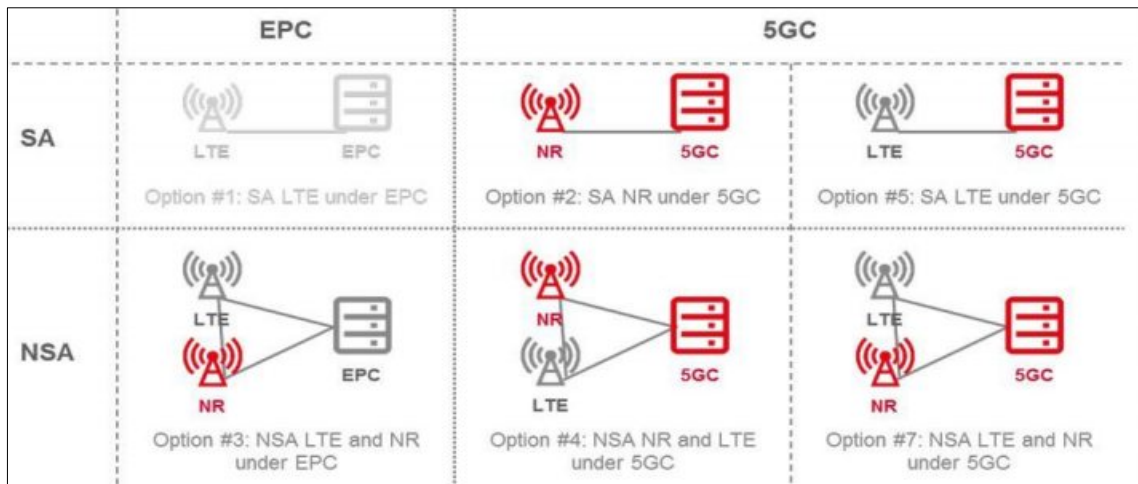


Ilustración 5-2: Opciones de implementación 4G y 5G.

Fuente: GSMA, 2018, p.17

2.2.2.1 Opción 3 5G NSA

En la opción 3 de 5G NSA, la red de acceso de radio está formada por un eNB (eNodeB) como nodo principal y un gNB (gNodeB) como nodo secundario, y está conectada a EPC (Evolved Packet Core). Esta opción se puede implementar rápidamente en el mercado con modificaciones menores a la red 4G existente, y es compatible con dispositivos 4G heredados. Los dispositivos 5G solo necesitan ser compatibles con los protocolos NR para desarrollarse rápidamente. Sin embargo, esta opción no introduce 5GC, por lo que puede no estar optimizada para casos de uso de 5G más allá de la banda ancha móvil. Dependiendo de cómo se desarrollen los dispositivos 5G, puede ser necesario retener el EPC por más tiempo que en el caso de tener EPS solo para 4G en lugar de admitir la opción 3 de NSA (GSMA, 2018 p. 16).

Entre algunas ventajas de desplegar este tipo de red se tiene:

- Aprovechamiento de las infraestructuras existentes de 4G para ofrecer una mayor velocidad de conexión y una mayor capacidad de datos.
- Se tiene una mayor cobertura, ya que al utilizar la infraestructura de 4G existente, la red 5G NSA puede llegar a más lugares que si se tuviera que construir una red 5G SA desde cero.
- Se tiene una latencia más baja que la red 4G, lo que significa que las aplicaciones pueden responder más rápidamente.

En la Tabla 1-2 se muestra una comparativa sobre algunas características entre las últimas tecnologías móviles, donde una red 5G NSA se encuentra entre 4G+ y 5G SA, aportando mejoras a la red 4G, pero sin tener todos los beneficios que brindaría una red 5G SA.

Tabla 1-2: Comparación entre las últimas tecnologías móviles

	4G+	5G NSA	5G SA
Velocidad máxima teórica de descarga	Hasta 1 Gbps	Hasta 2 Gbps	Al menos 20 Gbps
Velocidad máxima teórica de subida	Hasta 150 Mbps	Hasta 150 Mbps	No definido
Latencia	Alrededor de 30 ms	Alrededor de 15 ms	Alrededor de 1 ms
Densidad dispositivos conectados	Hasta 100.000 por km ²	Hasta 1 millón por km ²	Hasta 1 millón por km ²
Espectro	Banda 800 MHz: 60 MHz FDD Banda 2,6 Ghz: 120 MHz FDD + 50 MHz TDD	Banda 700 MHz: pendiente de subasta Banda 3,7 Ghz: 360 MHz TDD	Banda 700 MHz: pendiente de subasta Banda 3,7 Ghz: 360 MHz TDD
Infraestructura	Arquitectura EPC, radio LTE	Arquitectura EPC, radio LTE/NR	Arquitectura 5G NR con core basado en software de red

Fuente: Xataka, 2019.

2.3 OPEN AIR INTERFACE

OpenAirInterface Software Alliance (OSA) es una organización francesa que fue establecida en 2014, sin fines de lucro y financiada por patrocinadores corporativos. OpenAirInterface nace en la OSA como un software abierto que junta a comunidades de desarrolladores de todo el mundo, con el objetivo de desarrollar tecnologías celulares inalámbricas de red de acceso por radio (RAN) y red central (CN) (OpenAirInterface, 2022).

Actualmente, la plataforma OAI incluye una implementación de software completa de la pila de protocolos 3GPP 4G-LTE y 5G-NR para (GitLabEurocom, 2022):

- RAN (OpenAirInterface5G) para 4G y 5G.
- EPC (OpenAirCN) para 4G.
- 5G-CORE (CN-5G) para 5G.

Además, OpenAirInterface 5G Radio Access Network Project tiene como objetivo desarrollar y entregar una pila de software 5G bajo la Licencia pública OAI V1.1. Como muestra la Ilustración 6-2, la pila OAI 5G RAN admite lo siguiente (OpenAirInterface, 2022):

- gNB Non-Standalone (NSA).
- gNB Standalone (SA).
- 5G NSA y SA UE.

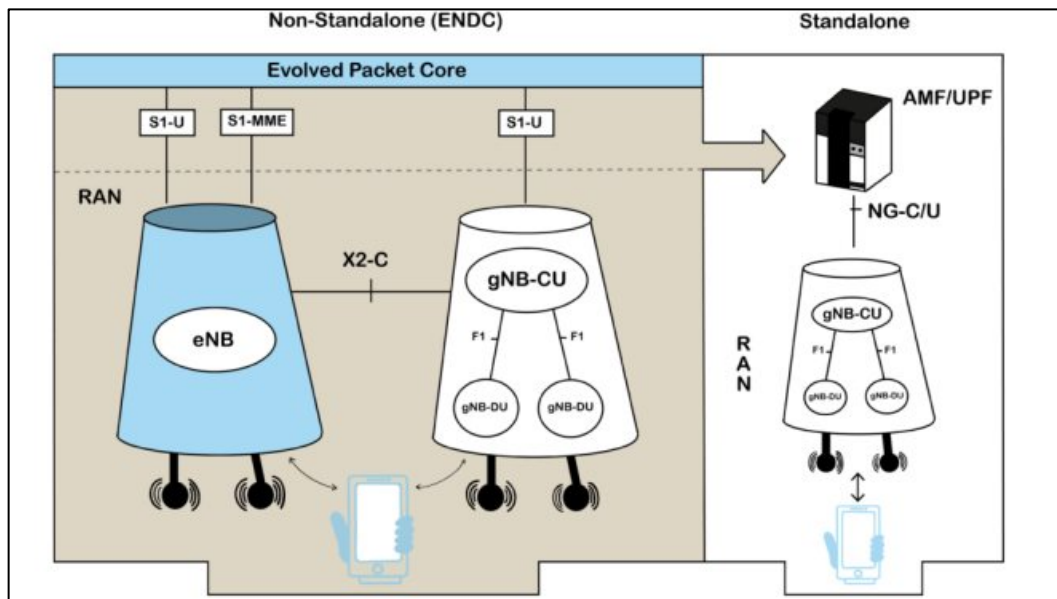


Ilustración 6-2: Arquitectura Red de Acceso de Radio Open Air Interface 5G

Fuente: Open Air Interface, 2022.

2.4 SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)

La radio definida por software (SDR) es un tipo de comunicación inalámbrica en la que una computadora controla tanto la modulación del transmisor como la recuperación de la señal por parte del receptor. El propósito de la tecnología SDR es reemplazar la mayor cantidad posible de componentes analógicos y digitales cableados del transceptor con dispositivos programables, incluyendo la interfaz aérea, los esquemas de modulación y codificación, el convertidor de analógico a digital (ADC) y el convertidor de digital a analógico (DAC). La tecnología SDR es útil en muchas áreas de los sistemas inalámbricos (Sadiku y Akujuobi, 2004, p.1).

La radio definida por software (SDR) es un conjunto de tecnologías tanto de hardware como de software, en el que el software o firmware modificable realiza algunas o todas las funciones necesarias para enviar y recibir señales de radiofrecuencia. El uso de SDR permite agregar nuevas capacidades a los sistemas de radio existentes sin necesidad de nuevo hardware. En

resumen, SDR es una tecnología que permite modificar la funcionalidad de los dispositivos de radio sin tener que hacer cambios en el hardware (Peinado, 2019, p.34).

Por esta razón se optó utilizar la tecnología SDR para la implementación de la Red 5G NSA haciendo uso de equipos de la familia USRP con los que cuenta el laboratorio de Telecomunicaciones de la FIE, concretamente USRP ETTUS B210.

2.4.1 USRP ETTUS B210

El USRP B210, mostrada en la Ilustración 7-2, es un periférico de Radio de Software Universal. Comprende de 2 canales integrados que permite un manejo de cobertura de frecuencias continua desde 70 MHz a 6 GHz. Posee una conectividad SuperSpeed USB3.0 con alimentación de bus. Permite una comunicación Full duplex, usando MIMO (2 Tx y 2 Rx) con hasta 56 MHz de ancho de banda en tiempo real (61,44 MS/s en cuadratura) (Ettus Research, 2022).

Diseñado para la experimentación de bajo costo, en una amplia gama de aplicaciones que incluyen: transmisión de TV y FM, telefonía móvil, GPS, WiFi, ISM, etc. Tiene compatibilidad con GNURadio y OpenBTS a través del USRP Hardware Driver™ (UHD) de código abierto (Ettus Research, 2022).



Ilustración 7-2: USRP B210

Fuente: Ettus Research, 2022.

2.5 ANTENA LOGARÍTMICA WA5VJB

Esta antena de placa de circuito impreso logarítmica periódica que se observa en la Ilustración 8-2 ofrece un espectro de trabajo que va desde 850 a 6500 MHz. Tiene una ganancia hacia adelante de 6 dBi. Esta gama incluye teléfonos móviles analógicos antiguos y redes inalámbricas de 2,4 GHz. Esto también se puede aplicar fácilmente a otras aplicaciones de aficionados en este rango. Excelente para aplicaciones EMI/RFI (Kent Electronics, 2022).



Ilustración 8-2: Antena Log Periodic 850 a 6500 MHz

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

2.6 ANTENA VERT2450

En la Ilustración 9-2 se observa la antena VERT2450, la cual es omnidireccional y tiene doble banda, cubriendo rangos de frecuencia de 2,4 a 2,48 GHz y de 4,9 a 5,9 GHz. Su ganancia es de 3 dBi (Ettus Research, 2022).



Ilustración 9-2: Antena VERT2450

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología que se utilizó al momento de desplegar la red 5G NSA, se expone el diseño del prototipo del sistema, así como también los pasos a seguir para desplegarla usando el software de código abierto de Open Air Interface y las USRP's Ettus B210. Para ello es necesario que el computador cumpla con ciertos requisitos de hardware y software y que el teléfono celular cuente con conectividad 5G.

3.2 Tipos de investigación

3.2.1 *Investigación descriptiva*

Según Tamayo (2004, p.46), la investigación descriptiva se enfoca en la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición o procesos de los fenómenos. Su principal característica es trabajar con realidades factuales y presentar una interpretación precisa y correcta.

Por otro lado, Bernal (2010, p.129), anuncia que, la capacidad de elegir las características esenciales del tema de estudio y presentar una descripción detallada de las partes, categorías o clases de este, es una de las funciones principales de la investigación descriptiva.

A través de este tipo de investigación se logró entender el comportamiento de la red 5G NSA desplegada exponiendo sus características, herramientas y limitaciones, así como también analizar los datos obtenidos en las diferentes pruebas y mediciones realizadas.

3.3 Metodología de desarrollo

Para el despliegue y modelado de la red 5G NSA para el laboratorio de Telecomunicaciones de la FIE usando código abierto de OAI y USRP's Ettus B210 se decidió trabajar con la metodología RUP (Rational Unified Process), el cual según Gil (2008, p.86), tiene un enfoque iterativo e incremental y se lo puede definir en 4 etapas para su desarrollo: Requerimientos, Análisis y Diseño, Implementación y Pruebas, tal como se observa en la Ilustración 1-3.

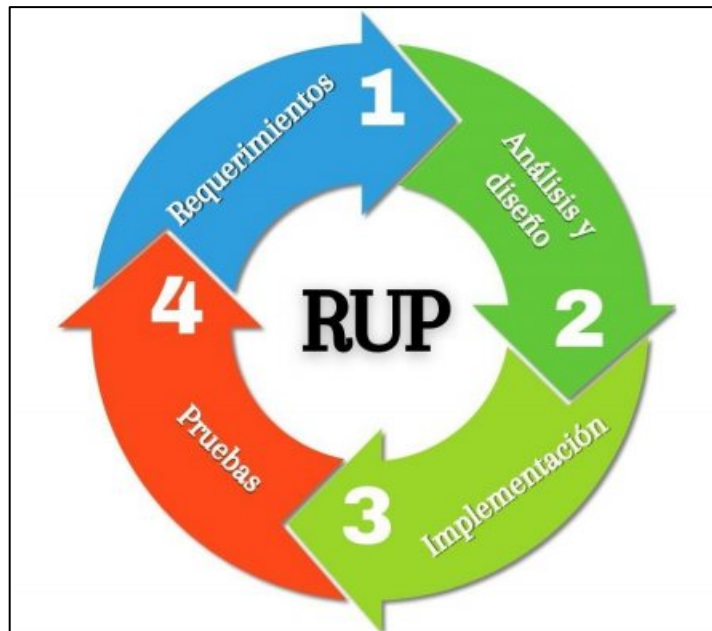


Ilustración 1-3: Metodología RUP

Fuente: Pesantez Luis, 2023

3.4 Requerimientos

3.4.1 *Requerimientos de Hardware y Software*

El implementar una Red 5G exige una demanda alta de recursos de hardware, además es necesario contar con un kernel de baja latencia para tener tiempos de retardos mínimos. A continuación, se detallan las características de hardware y software usados para el despliegue de la Red 5G NSA.

3.4.1.1 *Características del computador portátil*

Para implementar la parte central y acceso de radio de la red se contó con un computador portátil HP Victus 15-fa0032dx el cual posee las siguientes características:

- Procesador Intel Core i7-12650H con 10 núcleos
- 16 GB SODIMM DDR4 SDRAM
- 512 GB Disco Sólido
- Wifi 6
- Puerto Ethernet (RJ-45)
- 2 puertos USB 3.1
- 1 puerto USB 3.2 Tipo C

3.4.1.2 Características del terminal COST UE

El teléfono celular que se utilizó es el “Samsung Galaxy A52s 5G” que se muestra en la Ilustración 2-3, el cual cuenta con conectividad de red 4G LTE en las bandas: B2, B4, B5, B12, B17, B26, B40, B41, B66 y bandas 5G SA/NSA/Sub6: B1, B3, B5, B7, B8, B20, B28, B38, B40, B4, B66, B78 (SmartGSM, 2022).



Ilustración 2-3: Samsung Galaxy A52s 5G

Fuente: SmartGSM, 2022

3.4.1.3 Características de SIM y quemadora SIM

Para que el terminal pueda conectarse a la red 5G NSA debe contar con una tarjeta SIM adecuada. Para esta implementación no es necesario contar con tarjetas SIM con servicios 5G propiamente (esto únicamente para redes 5G SA), sino que se lo puede realizar con tarjetas SIM 4G LTE sin ningún inconveniente. En la Ilustración 3-3 se puede observar los USIM's de la marca XCRFID que se han utilizado.



Ilustración 3-3: XCRFID USIM

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Para poder programar las USIM con la información necesaria para que el UE pueda conectarse a la red se utilizó el dispositivo “Smart Card Reader PC/SC CCID ISO7816 USB” tal como se muestra en la Ilustración 4-3.



Ilustración 4-3: Smart Card Reader PC/SC CCID ISO7816 USB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

3.4.1.4 *Características del Sistema Operativo*

Para el correcto funcionamiento de la red se utilizó el sistema operativo Ubuntu 20.04 con un kernel de baja latencia “5.15.0-67-lowlatency” aunque es posible ejecutarlo en versiones diferentes como Ubuntu 18.04 o Ubuntu 22.04 debido a que los componentes del EPC funcionan con contenedores (corren sobre Ubuntu 18.04 incluyendo las librerías necesarias para su ejecución) y la RAN se la puede compilar sin mayores problemas. La instalación del sistema operativo se realizó de forma nativa en una partición de disco de 64 GB SSD.

3.4.2 *Prerrequisitos de instalación*

Antes de instalar los componentes de la RAN y red central de la red es necesario que el sistema operativo cuente con la configuración y paquetes necesarios con la finalidad de que no exista ningún problema al momento de desplegar la red. Las tareas realizadas acerca de los prerrequisitos de instalación se encuentran en el Anexo B.

3.5 **Análisis y Diseño**

Para el despliegue de la red NSA se tomó en cuenta que todos los componentes necesarios para su funcionamiento deben ser ejecutados en un mismo computador. El sistema está compuesto por las partes EPC y RAN de Open Air Interface, tal como se muestra en la Ilustración 5-3. El núcleo de la red consta de los siguientes componentes: MME, HSS con conexión a la base de

datos Cassandra, SPGWC y SPGWU, mismos que se alojan en contenedores Docker de manera separada y cada uno con una dirección IP designada. La parte de acceso de radio está conformada por: eNodeB y gNodeB, para lo cual se creó interfaces virtuales designadas a cada componente de radio. Por último, se hizo uso de dos equipos USRP B210 conectados por medio de cables USB 3.0.

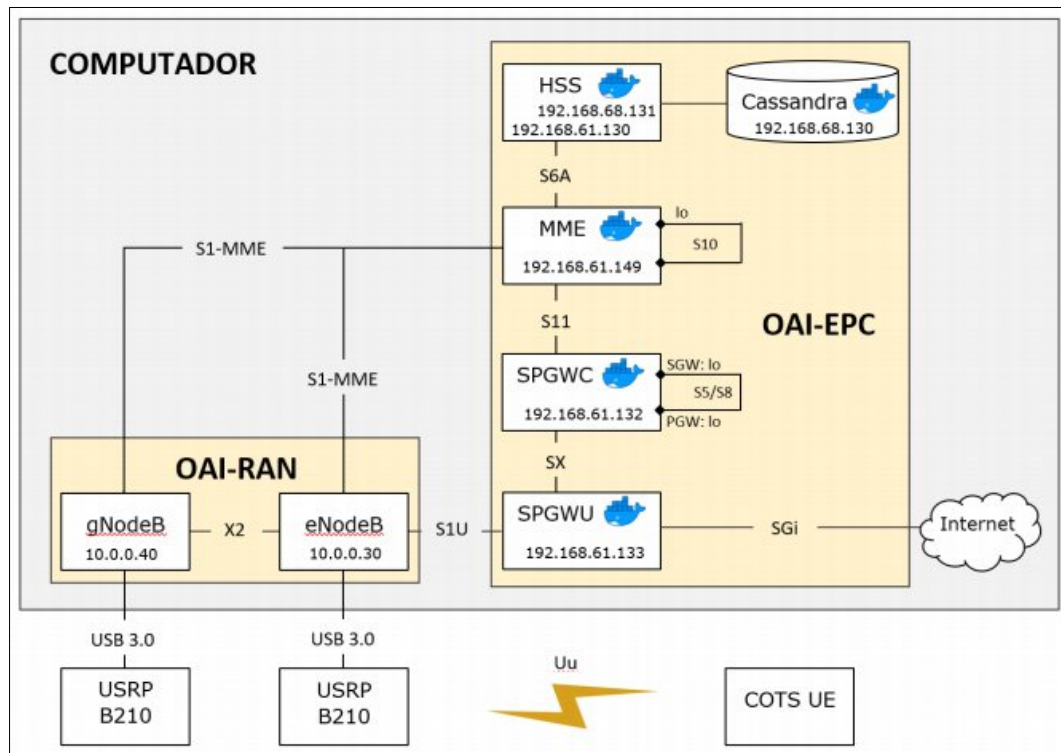


Ilustración 5-3: Diseño del sistema

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

3.6 Implementación

3.6.1 Instalación y configuración del EPC de Open Air Interface

Para poder instalar los componentes del EPC previamente es necesario instalar los paquetes de Docker y Docker Compose, las instrucciones se encuentran en el Anexo C, sección 1.

Docker creó una red puente la cual permitió comunicar los contenedores conectados a esta red hacia las interfaces propias del computador y a su vez garantizó aislar aquellos contenedores que no estén conectados a la red puente de Docker. Docker crea por defecto esta red en el rango de direcciones IP: 172.17.0.0/16.

“Openair-epc-fed” es el nombre del repositorio Git Hub de Open Air Interface para los componentes del EPC. Este repositorio permite la creación propia de imágenes Docker para componentes del EPC. Existe una alternativa en la que se evita crear imágenes Docker por cuenta propia y es la de usar imágenes ya creadas que se encuentran alojadas en Docker Hub. La desventaja es que estos repositorios de Docker Hub tardan en actualizar sus imágenes con respecto a los repositorios de Git Hub, por lo que en ciertos casos será mejor construir estas imágenes por cuenta propia si se desea tener todos los componentes actualizados a la última versión. Las instrucciones para la instalación del EPC se encuentran en el Anexo C sección 2.

Cabe señalar que cada vez que se inicie un contenedor se cargan las configuraciones con las que se crearon las imágenes, por lo que hacer algún cambio en los archivos del contenedor en ejecución no tendrá efecto una vez que éste se reinicie. Para poder ingresar los parámetros necesarios para el despliegue de nuestra red se editó un archivo Docker Compose de tipo “yaml”, el cuál por medio de variables carga dichas configuraciones cada vez que se inicien los contenedores. Las instrucciones para configurar el EPC se encuentran en el Anexo C, sección 3.

En resumen, los parámetros configurados en el EPC se describen a continuación:

- MCC: 505
- MNC: 01
- TAC: 1
- APN: oai.ipv4
- K: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
- OP: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
- IMSI: 505010000000022

Es importante señalar que el valor de 505 para el MCC fue aquel que funcionó para que el UE pueda reconocer la celda NR debido a que con valores como “001” o “222” no funcionaron. Se recomienda probar con otros valores y encontrar con que valores más funciona la red 5G NSA

3.6.2 Instalación de la RAN de Open Air Interface

En primer lugar, se instaló los controladores UHD para que los dispositivos USRP puedan comunicarse con el PC. Las instrucciones de este punto se encuentran en el Anexo D, sección 1.

El siguiente paso es instalar la RAN de OAI. “Openairinterface5g” es el nombre del repositorio Git Hub de Open Air Interface para los componentes RAN que se utilizaron. Este repositorio contiene componentes como: eNodeB, gNodeB, LTE User Equipment y NR User Equipment. Las instrucciones para instalar la RAN de OAI se encuentran en el Anexo D, sección 2.

3.6.3 Ejecución del EPC de Open Air Interface

Para desplegar los componentes del EPC seguir las instrucciones del Anexo C, sección 4. Esto provocó que se creen dos redes virtuales: “demo-oai-private-net” con un rango de direcciones: 192.168.68.128/26 y “demo-oai-public-net” con un rango de direcciones: 192.168.61.128/26. Además, dentro de estas redes se designaron IP’s estáticas para cada componente del EPC, tal como se observa en la Ilustración 6-3 y en la Ilustración 7-3. A continuación se detallan las direcciones IP asignadas a cada componente: MME: 192.168.61.149/26, HSS: 192.168.61.130/26, SPGWU: 192.168.61.133/26, SPGWC: 192.168.61.132

```

"Name": "demo-oai-public-net",
"Id": "d1ca21b05af6e656d98aaec3b8718584ab82dcb5aa83e5312d53da40e72aa9b5",
"Created": "2023-01-14T22:23:30.694213286-05:00",
"Scope": "Local",
"Driver": "bridge",
"EnableIPv6": false,
"IPAM": {
  "Driver": "default",
  "Options": null,
  "Config": [
    {
      "Subnet": "192.168.61.128/26"
    }
  ]
},
"Internal": false,
"Attachable": false,
"Ingress": false,
"ConfigFrom": {
  "Network": ""
},
"ConfigOnly": false,
"Containers": {
  "0f2b2f41fc91c0718a873397701cb2d06c1b6974cc351668d2ebb08ab5fc19ac": {
    "Name": "demo-oai-spgwc",
    "EndpointID": "cdd7e440b99adba17d480fd17d026cbd72206957fb333f7c023010f2d88288f8",
    "MacAddress": "02:42:c0:a8:3d:84",
    "IPv4Address": "192.168.61.132/26",
    "IPv6Address": ""
  },
  "9216493797a512daccf8d70f0bd95fef2bbdb1abac9e88ac830fda82cb8c8dc0": {
    "Name": "demo-oai-spgwu-tiny",
    "EndpointID": "830d53ce1e0a78f514b0f2685724faf2562495a1b564675d7ee31f0e4d1d644e",
    "MacAddress": "02:42:c0:a8:3d:85",
    "IPv4Address": "192.168.61.133/26",
    "IPv6Address": ""
  },
  "954a6223e7b4b8f153a3666071141b3ed1809d5d5d8185953b192d140b69c58d": {
    "Name": "demo-oai-hss",
    "EndpointID": "497391490c40b93126879c807705501173f0d49c875f18556190d6a7dd810033",
    "MacAddress": "02:42:c0:a8:3d:82",
    "IPv4Address": "192.168.61.130/26",
    "IPv6Address": ""
  },
  "98118e3e1ca535c7089075563c0fe3bb2444946a031b3062d554a104f16b5296": {
    "Name": "demo-redis",
    "EndpointID": "59500edaa320826d841946175cd8511396e55113933d39730337bc20207d8370",
    "MacAddress": "02:42:c0:a8:3d:94",
    "IPv4Address": "192.168.61.148/26",
    "IPv6Address": ""
  },
  "a350ca0552c82510b370c74a64b1dc154ed3e00ec6589a5535183d1cc58c0d80": {
    "Name": "demo-magma-mme",
    "EndpointID": "32548b07e2171609e6e4fe7b5f1d08dd6c2d77e679db7c50f4ebb5890449248b",
    "MacAddress": "02:42:c0:a8:3d:95",
    "IPv4Address": "192.168.61.149/26",
    "IPv6Address": ""
  }
}

```

Ilustración 6-3: Visualización de la red de Docker “demo-oai-public-net”

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

```

root@tony:/home/tony# docker network inspect demo-oai-private-net
[
  {
    "Name": "demo-oai-private-net",
    "Id": "9abaefb7e4958f48c1a1766eb72cf15d706d50c87af36f3c8b2f207a4dfb86dc",
    "Created": "2023-01-14T22:23:30.73699277-05:00",
    "Scope": "Local",
    "Driver": "bridge",
    "EnableIPv6": false,
    "IPAM": {
      "Driver": "default",
      "Options": null,
      "Config": [
        {
          "Subnet": "192.168.68.128/26"
        }
      ]
    },
    "Internal": false,
    "Attachable": false,
    "Ingress": false,
    "ConfigFrom": {
      "Network": ""
    },
    "ConfigOnly": false,
    "Containers": {
      "954a6223e7b4b8f153a3666071141b3ed1809d5d5d8185953b192d140b69c58d": {
        "Name": "demo-oai-hss",
        "EndpointID": "c7a76a3cd5e10f72d2bf9a95be08fa97e5e8c817f7728ad728f936121f4cd39d",
        "MacAddress": "02:42:c0:a8:44:83",
        "IPv4Address": "192.168.68.131/26",
        "IPv6Address": ""
      },
      "d9d4463316056e5e0d5f200a9c116b8bdb5035aa6cfd3f6fcf5797d140ddc64": {
        "Name": "demo-cassandra",
        "EndpointID": "47b5897125a75dd1a584212d1a551cfe15c120f4e82a82f0bc878d82c8f09001",
        "MacAddress": "02:42:c0:a8:44:82",
        "IPv4Address": "192.168.68.130/26",
        "IPv6Address": ""
      }
    },
    "Options": {},
    "Labels": {
      "com.docker.compose.network": "private_net",
      "com.docker.compose.project": "magna-mme-demo",
      "com.docker.compose.version": "2.14.1"
    }
  }
]

```

Ilustración 7-3: Visualización de la red de Docker “demo-oai-private-net”

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

Al seguir los archivos log del MME, tal como se observa en la Ilustración 8-3, se pudo comprobar que el MME se conectó con éxito al HSS por medio la interfaz S6A la cual usa el protocolo Diameter para su comunicación.

```

e/magna-mme-demo# docker exec -it demo-magna-mme /bin/bash -c "tail -f /var/log/mme.log"
S6A tasks/s6a/s6a_fd_iface.cpp :0175 fd_core_start done
S6A tasks/s6a/s6a_fd_iface.cpp :0186 fd_core_waltstartcomplete done
S6A tasks/s6a/s6a_fd_iface.cpp :0194 s6a_fd_init dict obis done
S6A tasks/s6a/s6a_fd_iface.cpp :0206 Initializing S6a interface over free-diameter:DONE
S6A tasks/s6a/s6a_peer.c :0095 Diameter identity of MME: mme.openairinterface.org with length: 24
S6A tasks/s6a/s6a_peer.c :0130 S6a peer connection attempt 1 / 8
S6A tasks/s6a/s6a_peer.c :0141 Peer hss.openairinterface.org is now connected...
MME-AP tasks/mme_app/mme_app_state_mana:0097 Inside get_state with read_from_db 0
S1AP tasks/s1ap/s1ap_mme.c :0121 S1AP ZMQ latency: 192.
MME-AP tasks/mme_app/mme_app_main.c :0083 MME APP ZMQ latency: 258.

```

Ilustración 8-3: Inicialización de la entidad MME del EPC

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

En la Ilustración 9-3, se pueden observar las estadísticas del estado de conexión de UEs, eNBs y portadoras, notando que todavía no se ha conectado ninguna de ellas a la red.

tasks/service303/service303_mme_:		Current Status
tasks/service303/service303_mme_:0050		
tasks/service303/service303_mme_:0053	Attached UEs	0
tasks/service303/service303_mme_:0056	Connected UEs	0
tasks/service303/service303_mme_:0059	Connected eNBs	0
tasks/service303/service303_mme_:0062	Default Bearers	0
tasks/service303/service303_mme_:0065	S1-U Bearers	0

Ilustración 9-3: Mensaje de estadísticas de conexión del MME

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

3.6.4 Configuración y ejecución de la RAN de Open Air Interface

Primero se debe editar los archivos de configuración tanto para el eNodeB como el gNodeB, tal como se muestra en el Anexo D, sección 3.

Dos interfaces virtuales fueron creadas con el propósito de asignarlas como interfaces para el eNodeB y el gNodeB pudiendo de esta manera comunicarse con las entidades MME y SPGWU las cuales se encuentran alojadas en contenedores.

En resumen, la configuración del eNodeB se describe a continuación:

- MCC: 505
- MCC: 01
- TAC: 1
- Banda b7 (2600 MHz)
- Modo de duplexación: FDD
- Ancho de banda: 20 MHz
- Modo de transmisión 1 (Un puerto de antena)

Y a continuación la configuración del gNodeB:

- MCC: 505
- MCC: 01
- TAC: 1
- Banda n78 (3500 MHz)
- Modo de duplexación: TDD
- Ancho de banda: 40 MHz
- Modo de transmisión 1 (Un puerto de antena)

Una vez configurado el eNodeB y gNodeB en concordancia con los parámetros configurados anteriormente en el MME se procedió a ponerlos en marcha.

Para la ejecución del archivo eNB solo se tuvo conectado únicamente un dispositivo USRP conectado con la antena VERT2450, cumpliendo la función de eNodeB. Para ello seguir los pasos del Anexo D, sección 4. La Ilustración 10-3 muestra que la ejecución ha sido exitosa y está lista para su uso.

```
[LIBCONFIG] MMEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to default value)
[MCE_APP] Creating MCE_APP eNB Task
[ITTI] Created Posix thread TASK_MCE_APP
[LIBCONFIG] MCEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to default value)
[LIBCONFIG] MCEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to default value)
[ENB_APP] TYPE <CTRL-C> TO TERMINATE
[ENB_APP] [MCE 0] MCE_app_register via M3AP for instance 0
[HW] current pps at 3.000000, starting streaming at 4.000000
[PHY] RU 0 rf device ready
[PHY] RU 0 Starting steady-state operation
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
[RLC] rlc_tick: discontinuity (expected 0.1, got 0.4)
[MAC] SCHED_MODE = 0
```

Ilustración 10-3: Ventana eNB - Inicialización exitosa

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

Se puede notar en los mensajes y estadísticas del MME se ha agregado un nuevo eNB a la red, tal como se muestra en la Ilustración 11-3.

```
:0536 New s1 setup request incoming from eNB-Eurecom-LTEBox macro eNB id: 00e13
:0639 Adding eNB with enb_id :3603 to the list of served eNBs
:0049 ===== STATISTICS =====

:0050
:0053   Attached UEs |      Current Status |
:0056   Connected UEs |      0 |
:0059   Connected eNBs |      1 |
:0062   Default Bearers |      0 |
:0065   S1-U Bearers |      0 |
```

Ilustración 11-3: Ventana MME – eNB añadido a la red.

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

En un nuevo terminal, se procedió a ejecutar el gNodeB, para ello se conectó el otro dispositivo USRP con la antena logarítmica WA5VJB. Seguir las instrucciones del Anexo D, sección 4 para la inicialización del gNB.

Se puede notar en la ventana del eNB como se ha logrado la comunicación entre eNB y gNB por medio de la interfaz X2, tal como se muestra en la Ilustración 12-3.

```
eNB id 0 (null)
state 2
nextstream 0
ln_streams 16 out_streams 16
cnx_id 1 assoc_id 6
[X2AP] X2AP_ProcedureCode_id_endcX2Setup message!
[X2AP] TAC: 000007
[X2AP] PLMN: 05F510
<X2AP-PDU>
  <successfulOutcome>
    <procedureCode>36</procedureCode>
    <criticality><reject/></criticality>
    <value>
      <ENDCX2SetupResponse>
```

Ilustración 12-3: Ventana eNB - Funcionamiento del protocolo X2AP

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

Después de que se logró con éxito la comunicación entre ellos, el gNodeB estuvo en funcionamiento a la espera de que algún UE quiera unirse a la red, tal como se muestra en la Ilustración 13-3.

```
ALL RUs ready - ALL gNBs ready
Sending sync to all threads
Entering ITTI signals handler
TYPE <CTRL-C> TO TERMINATE
got sync (L1_stats_thread)
got sync (ru_thread)
[HW] current pps at 2.000000, starting streaming at 3.000000
[PHY] RU 0 rf device ready
[PHY] RU 0 RF started opp_enabled 0
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
sleep...
[PHY] tx_reorder_thread started
[NR_MAC] Frame.Slot 128.0
```

Ilustración 13-3: Ventana gNB – Inicialización exitosa

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

3.6.5 Configuración del equipo de usuario y conexión a la red 5G

Para este punto ya se debe contar con el SIM programado con los parámetros de la red 5G desplegada. Las instrucciones para poder programar el SIM se encuentra en el Anexo E.

Una vez insertado el SIM en el UE se debe asegurar que el Modo de SIM de dicha ranura este seleccionada en 5G, tal como se muestra en la Ilustración 14-3.

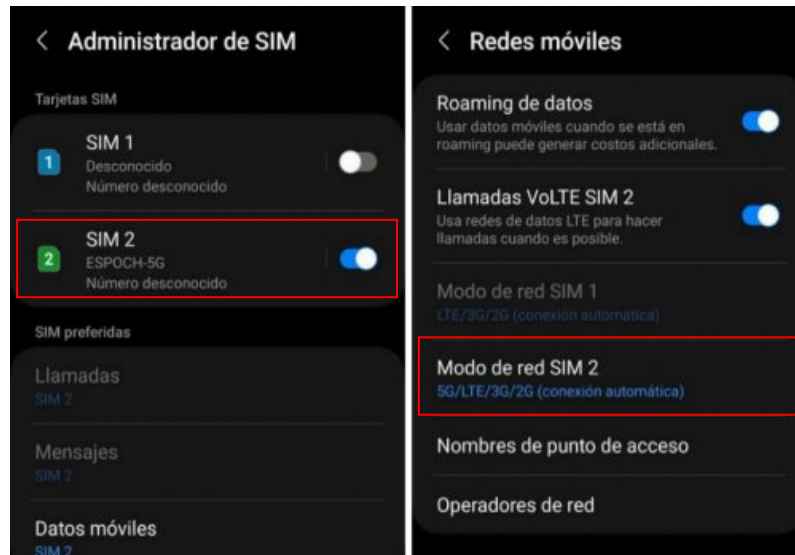


Ilustración 14-3: Administración y Modos de SIM en el UE

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

Para que el UE pueda acceder a Internet a través de la conexión 5G fue necesario configurar el APN (Access Point Name) de forma manual. En el caso del Samsung A52s 5G para realizar esta configuración se abrieron los ajustes del teléfono, luego se dirigió a la opción Conexiones>Redes móviles>Nombres de punto de acceso>Añadir. Los parámetros importantes para configurar son: Nombre, APN, MCC y MNC. La Ilustración 15-3 muestra la configuración de este punto de acceso.

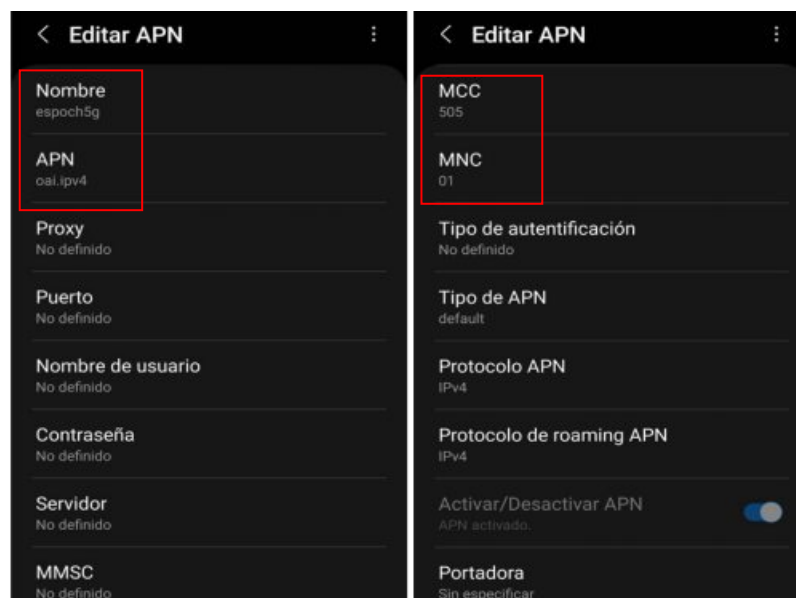


Ilustración 15-3: Configuración del APN en el UE

Realizado por: Pesantez Luis., 2023

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se describen los resultados obtenidos cuando un UE intenta conectarse a la red 5G NSA que se implementó en el Capítulo III. Se presentan resultados de pruebas de latencia y velocidad, pruebas de cobertura Indoor, capturas de tráfico del sistema y uso de herramientas de monitoreo de la interfaz de radio.

4.2 Conexión de dispositivos UE a la Red 5G NSA y pruebas de velocidad y latencia.

En primer lugar se verificó que el teléfono celular pueda conectarse correctamente a la red 4G. Para ello no se necesita poner en marcha el gNodeB por el momento.

Se procedió en primera instancia a colocar el teléfono celular en “modo avión”. Realizado esto, se activó los datos provocando que el teléfono celular comenzara a conectarse a la red 4G. Este proceso duró un par de minutos la primera vez ya que el usuario aun no se encuentra registrado en la base de datos del EPC. En la Ilustración 1-4 se observa como el teléfono celular muestra en sus notificaciones que cuenta con una conexión 4G.



Ilustración 1-4: Notificación de conexión 4G en el teléfono celular

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

De la misma manera se pudo comprobar la correcta conexión del UE observando los “logs” del MME, tal como se muestra en la Ilustración 2-4. Se puede observar cómo se realizó la correcta autenticación y adjunción del usuario con IMSI “50501000000022”, registrándose en la base de datos de la red. Además, se observó en las estadísticas mensajes como “Attached UEs” el cual indica cuantos UEs se han registrado correctamente a la red, “Connected UEs” muestra cuantos UEs están conectados a la red, “Connected eNBs” señala el número eNodeB que están conectados y por último también se muestra el número de portadoras usadas, tal como se observa en la Ilustración 3-4.

```

EMMAS-SAP - Received Authentication Response message for ue id 1
[50501000000022] EMM-PROC - Authentication complete (ue_id=1)
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_1 : AUTHENTICATION RESPONSE received, stop T3460, check RES
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_2 : authentication procedure is success, new eKSI for new authentication

EMM-FSM - Received event COMMON_PROC_CNF (2) in state EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED
UE 1 EMM-FSM - Status changed: EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED ==> EMM-DEREGISTERED
[50501000000022] ATTACH - Authentication procedure success!
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_5_1_2_3_1 : EMM common procedure initiation during attach procedure
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_5_1_2_3_1 : EMM common procedure initiation during attach procedure
EMM-PROC - Initiate security mode control procedure, KSI = 0

```

Ilustración 2-4: Autenticación exitosa del usuario 50501000000022

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

```

tasks/mme_app/mme_app_state_mana:0097 Inside get_state with read_from_db 0
tasks/service303/service303_mme_:0049 ===== STATISTICS =====

tasks/service303/service303_mme_:0050
tasks/service303/service303_mme_:0053
tasks/service303/service303_mme_:0056
tasks/service303/service303_mme_:0059
tasks/service303/service303_mme_:0062
tasks/service303/service303_mme_:0065
tasks/service303/service303_mme_:0070 ===== STATISTICS =====

```

	Current Status
Attached UEs	1
Connected UEs	1
Connected eNBs	1
Default Bearers	1
S1-U Bearers	2

Ilustración 3-4: Estadísticas de dispositivos conectados en el MME

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Luego se procedió a realizar pruebas de latencia y velocidad de la red LTE, para esto se hizo uso de aplicaciones disponibles en la Play Store de Android. Para pruebas de latencia se usó la app “Ping” y para pruebas de velocidad la app “Speedtest”. Las pruebas fueron realizadas a medio metro de distancia de los equipos USRP.

Cabe recalcar que el eNodeB esta configurado para que trabaje con 100 Resource Block, es decir con un ancho de banda de 20 MHz.

Para realizar una prueba de latencia de la red 4G es necesario hacerla directamente al gateway de la red, en este caso el SGPWC del EPC. Como se vió en el capítulo III el gateway de la red cuenta con la IP “12.1.1.1”, para lo cual se hizo una prueba de ping a esta dirección. Como resultado se obtuvo un promedio de 29.002 milisegundos de latencia entre el telefono celular y el gateway, valor que se encuentra dentro del teórico que permite una red LTE que es aproximadamente 30 milisegundos. Como resultado de las pruebas de velocidad se obtuvo en bajada una velocidad de 66.5 Mbps y en subida una velocidad de 14.7 Mbps. Estos resultados se observan en la Ilustración 4-4.

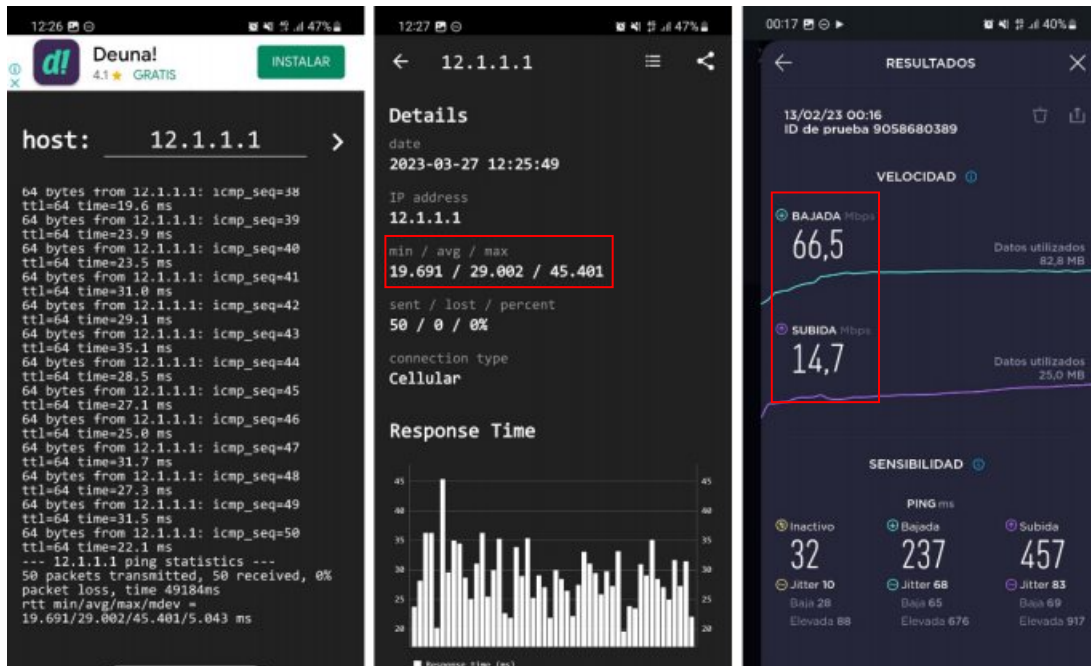


Ilustración 4-4: Pruebas de latencia y velocidad en 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Una vez que se verificó que la red 4G opera de manera satisfactoria se procedió a encender el gNodeB para poder comprobar la conexión a 5G.

El procedimiento es similar al que se hizo en 4G, se debe tener el teléfono celular con los datos encendidos y en “modo avión”. Una vez desactivado el modo avión el teléfono celular comenzó a conectarse a la red 5G. Como en este caso la red 5G implementada es NSA, la manera en la cual el teléfono celular debe conectarse a 5G es: i) el teléfono celular se conecta al eNodeB y ii) se realiza un traspaso hacia el gNodeB, teniendo como resultado final una conexión 5G. Las notificaciones del proceso de la conexión a la red 5G NSA se observan en la Ilustración 5-4.

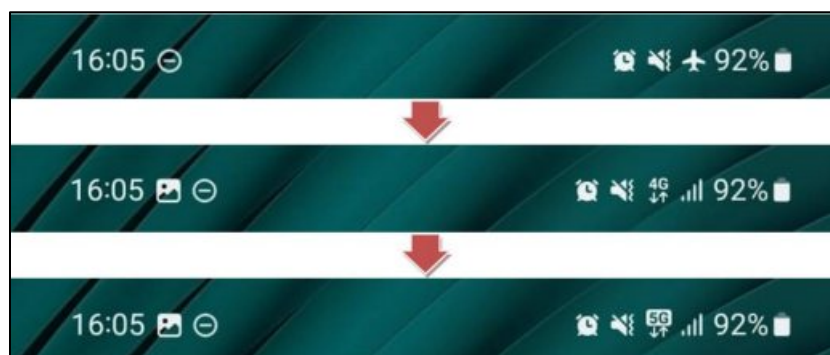


Ilustración 5-4: Notificación de conexión 5G en el teléfono celular

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

De igual manera se procedió a realizar una prueba de latencia para la red 5G, tal como se hizo para la red 4G. Como resultado se obtuvo un promedio de 12.169 milisegundos de latencia entre el telefono celular y el Gateway, valor que se acerca al teórico que permite una red 5G NSA que es aproximadamente 10 milisegundos. Como resultado de las pruebas de velocidad se obtuvo en bajada una velocidad de 15.8 Mbps y en subida una velocidad de 3.89 Mbps. Estos resultados se observan en la Ilustración 6-4. Cabe recalcar que la red 5G opera en la banda n78 con un ancho de banda de 40 MHz en modo de duplexación TDD.

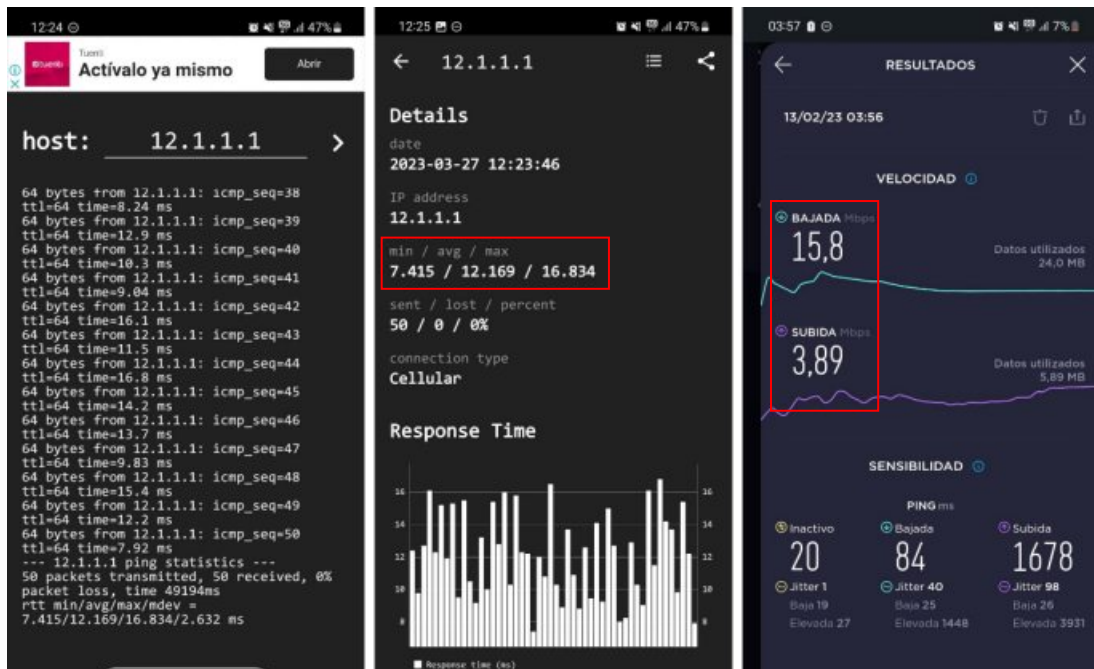


Ilustración 6-4: Primeras pruebas de latencia y velocidad en 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Como se observa estos valores de velocidad no se acercan a los de una red 5G NSA, esto puede deberse a diversos factores. Una posibilidad puede ser la limitación de hardware, ya que se trabajó con USRP's B210 e inicialmente al momento de poner en marcha el gNodeB se presentó un error, tal como se observa en la Ilustración 7-4, el cual manifiesta que desconoce la velocidad de muestreo de 61440000. Este error se contradice con las características que posee la USRP B210, entre ellas contar con un ancho de banda de 56 MHz y una velocidad de muestreo máxima de 61.44 MS/s.

```
[HW] Setting clock source to internal
[HW] Setting time source to internal
-- Using calibration table: calib_table_b210_38
[HW] Error: unknown sampling rate 61440000.000000
```

Ilustración 7-4: Error inicial al momento de poner en marcha el gNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Investigando sobre el caso se encontró que en los archivos de configuración de OAI para las USRP, concretamente para el modelo B210, no se define una opción que permita trabajar a 61.44 MS/s, se permite un máximo de 46.08 MS/s con 40 MHz de ancho de banda, tal como se observa en la Ilustración 8-4.

```

if (device->type == USRP_B200_DEV) {
  if ((vers == 3) && (subvers == 9) && (subsubvers>=2)) {
    openair0_cfg[0].rx_gain_calib_table = calib_table_b210;
    bw_gain_adjust=0;
    std::cerr << "-- Using calibration table: calib_table_b210" <<
  } else {
    openair0_cfg[0].rx_gain_calib_table = calib_table_b210_38;
    bw_gain_adjust=1;
    std::cerr << "-- Using calibration table: calib_table_b210_38"
  }

  switch ((int)openair0_cfg[0].sample_rate) {
    case 46080000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(46.08e6);
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 115;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 40e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 40e6;
      break;

    case 30720000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(30.72e6);
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 115;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 20e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 20e6;
      break;

    case 23040000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(23.04e6); //to be checked
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 113;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 20e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 20e6;
      break;

    case 15360000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(30.72e6);
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 103;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 20e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 20e6;
      break;

    case 7680000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(30.72e6);
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 80;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 20e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 20e6;
      break;

    case 1920000:
      s->usrp->set_master_clock_rate(30.72e6);
      //openair0_cfg[0].samples_per_packet = 1024;
      openair0_cfg[0].tx_sample_advance = 40;
      openair0_cfg[0].tx_bw = 20e6;
      openair0_cfg[0].rx_bw = 20e6;
      break;

    default:
      LOG_E(HW, "Error: unknown sampling rate %f\n", openair0_cfg[0].sample_rate);
      exit(-1);
  }
}

```

Ilustración 8-4: Configuración de los Dispositivos USRP B200 en OAI

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por esta razón se tuvo que añadir la opción “-E” al momento de poner en marcha el gNodeB, Esto significa que se realizó un remuestreo a tres cuartos de la señal y permitió que con estos modelos de USRP se pueda desplegar la red 5G NSA.

Hay que tomar en cuenta que los repositorios de OAI y controladores UHD estan en constante actualización por lo que se realizó estas pruebas nuevamente actualizando el computador con las nuevas versiones. Para LTE se obtuvieron resultados similares a los anteriores para valores de latencia, velocidades de subida y descarga. Por otra parte, para 5G se obtuvieron mejores resultados en cuanto a la velocidad de descarga. En la Ilustración 9-4 se observa que esta velocidad alcanza los 125 Mbps en descarga y 7.68 Mbps en subidad. En cuanto a la latencia se obtuvieron similares valores a la anteriores pruebas, teniendo un promedio de 12.855 milisegundos.

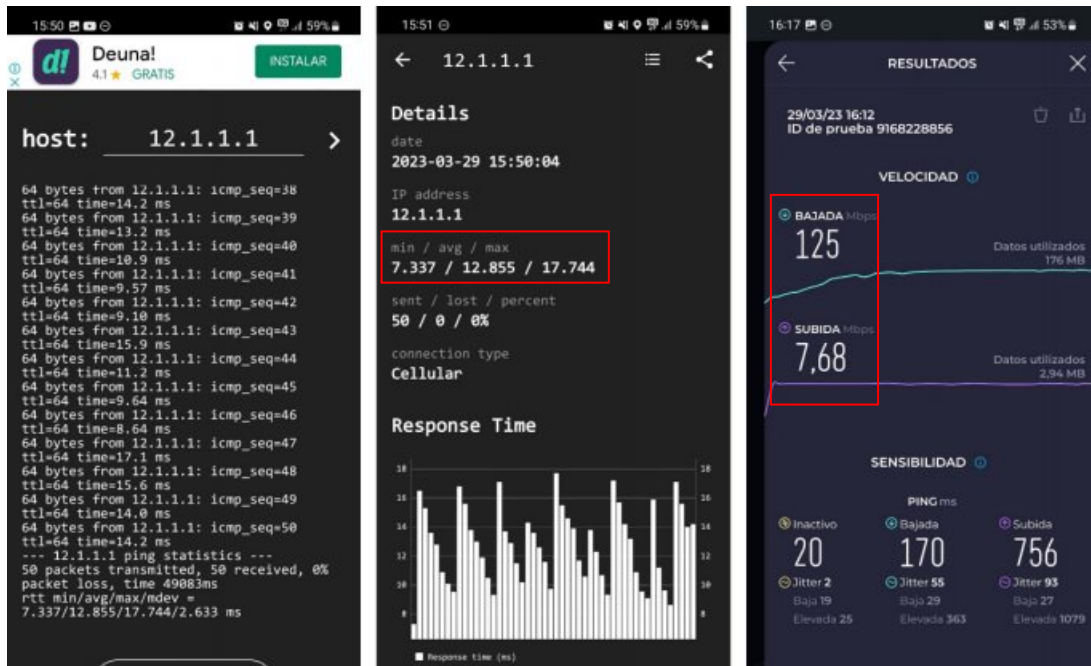


Ilustración 9-4: Segundas pruebas de latencia y velocidad en 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Esto demuestra que las últimas actualizaciones mejoraron el rendimiento de la red 5G NSA. Sin embargo, se encontró que, en ciertas ocasiones, cuando el UE intenta acceder a la red 5G NSA, esta colapsa y se detiene, arrojando un error de comunicaciones del protocolo SCTP y X2AP. Para estos problemas es necesario iniciar el gNB varias veces hasta lograr que el UE pueda conectarse a la red 5G NSA sin detenerse. Se espera que estos errores se solucionen en futuras actualizaciones.

```
Assertion (x2ap_enb_data_p != ((void *)0)) failed!
In x2ap_enb_handle_sctp_association_resp() /home/tony/openairinterface5g/openair2/X2AP/x2ap_enb.c:134
Exiting execution
/home/tony/openairinterface5g/openair2/X2AP/x2ap_enb.c:134 x2ap_enb_handle_sctp_association_resp() Exiting OAI softmodem:
[HW] releasing USRP
[PHV] Exiting ru_thread
[HW] releasing USRP
terminate called after throwing an instance of 'std::runtime_error'
what(): rcv buffer smaller than vrt packet offset
Aborted
```

Ilustración 10-4: Error al intentar conectar un UE a la red 5G NSA

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por último se comprobó la posibilidad de que otros usuarios puedan unirse a la red 5G, ya que en los archivos de configuración del EPC, específicamente en “docker.compose.yml” solo permite ingresar un único valor de IMSI, pero cuenta con una opción de “número de usuarios”, tal como se muestra en la Ilustración 11-4. Intuyendo de esta manera que se generaron automáticamente 30 números de IMSI consecutivos al primer IMSI ingresado.

```
oai_hss:
  image: oai-hss:production
  container_name: demo-oai-hss
  privileged: true
  depends_on: [cassandra]
  networks:
    private_net:
      ipv4_address: 192.168.68.131
    public_net:
      ipv4_address: 192.168.61.130
  environment:
    TZ: Europe/Paris
    REALM: openairinterface.org
    HSS_FQDN: hss.openairinterface.org
    PREFIX: /openair-hss/etc
    cassandra_Server_IP: 192.168.68.130
    OP_KEY: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
    LTE_K: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
    APN1: oai.ipv4
    APN2: oai2.ipv4
    FIRST_IMSI: 505010000000022
    NB_USERS: 30
```

Ilustración 11-4: Configuración del HSS de OAI

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Se programó tres USIM's más, la priemra con el valor de “505010000000023”, otra con el valor de “505010000000051” y la última con el valor de “505010000000052”. Luego se procedió a probar cada uno de ellos en el mismo celular con la finalidad de comprobar su conexión a la red.

Se colocó el USIM “505010000000023”, siendo este usuario el segundo disponible. Se obtuvo la autenticación y adjunción exitosa a la red, tal como se muestra en la Ilustración 12-4.

```
EMMAS-SAP - Received Authentication Response message for ue id 3
[505010000000023] EMM-PROC - Authentication complete (ue_id=3)
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_1 : AUTHENTICATION RESPONSE received, stop T3460, check RES
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_2 : authentication procedure is success, new eKSI for new authentication

EMM-FSM - Received event COMMON_PROC_CNF (2) in state EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED
UE 3 EMM-FSM - Status changed: EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED ==> EMM-DEREGISTERED
[505010000000023] ATTACH - Authentication procedure success!
```

Ilustración 12-4: Autenticación exitosa del usuario 505010000000023

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Para el USIM “505010000000051” siendo el usuario el treintavo y último disponible. Se obtuvo una autenticación y adjunción exitosa a la red, tal como se muestra en la Ilustración 13-4.

```
EMMAS-SAP - Received Authentication Response message for ue id 4
[505010000000051] EMM-PROC - Authentication complete (ue_id=4)
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_1 : AUTHENTICATION RESPONSE received, stop T3460, check RES
Hit 3GPP TS 24_301R10_5_4_2_4_2 : authentication procedure is success, new eKSI for new authentication

EMM-FSM - Received event COMMON_PROC_CNF (2) in state EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED
UE 4 EMM-FSM - Status changed: EMM-COMMON-PROCEDURE-INITIATED ==> EMM-DEREGISTERED
[505010000000051] ATTACH - Authentication procedure success!
```

Ilustración 13-4: Autenticación exitosa del usuario 505010000000051

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Para el USIM “505010000000052” siendo este un usuario no registrado debido a que no estan dentro de los 30 usuarios permitidos. Se obtuvo una autenticación y adjunción fallida a la red, tal como se muestra en la Ilustración 14-4.

```

[505010000000052] Received Authentication Information Answer from S6A for ue_id = 9
[505010000000052] INFORMING NAS ABOUT AUTH RESP ERROR CODE
[505010000000052] Auth info Rsp failure for imsi 505010000000052, experimental_error_code 4181
EMMCN-SAP - Received primitive EMM CN AUTHENTICATION PARAM FAIL (402)
[505010000000052] ATTACH - Authentication procedure failed!
EMM-FSM - Received event ATTACH_REJ (6) in state EMM-DEREGISTERED
EMM-PROC - EMM attach procedure not accepted by the network (ue_id=9, cause=EMM_CAUSE_NETWORK_FAILURE)

```

Ilustración 14-4: Autenticación fallida del usuario 505010000000052

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

De esta manera se comprobó que la red está configurada para admitir 30 usuarios, siendo los IMSI creados automática y consecutivamente a partir de un primer IMSI configurado. Además, el valor de 30 usuarios se lo puede cambiar, así como también el valor del primer IMSI.

4.3 Medición de la potencia de salida de las USRP's usando el analizador de espectros.

Con la ayuda del equipo ANRITSU MS2724C se obtuvo el espectro de la señal LTR y NR. De esta manera se pudo comprobar el uso del espectro, el ancho de banda y potencia media de dichas señales en las bandas b7 y n78 respectivamente. Para la captura del espectro se configuró el “Resolution Band Width” (RBW) en 100 KHz y se usó un atenuador de 20 dB.

En la Ilustración 15-4 se observa el espectro generado por el eNB, con una frecuencia central de 2.68 GHz, una potencia media de -8.1 dBm y un “Occupied Bandwidth” (OCC BW) de 17.858 MHz al 99% de la potencia media integrada total del espectro transmitido en el canal asignado según el documento 3GPP TS 36.101 Release 14.

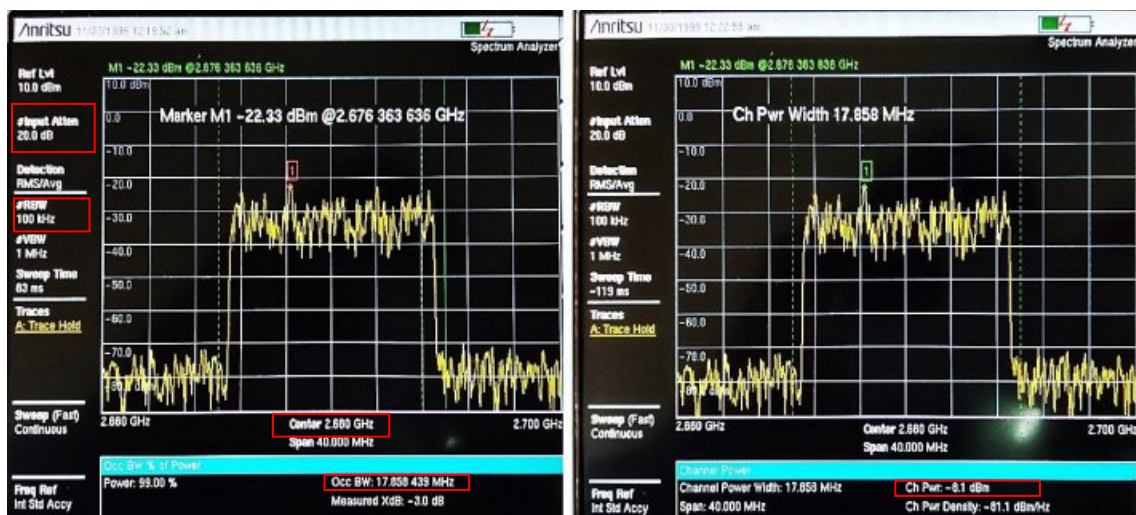


Ilustración 15-4: Espectro de la señal LTE (B7 - 2.68 GHz)

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Para poder obtener la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) de salida del canal es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$PIRE = P_{med} + A_t - 10 \log\left(\frac{RBW}{BW_{efectivo}}\right) + G_t \quad (1)$$

En donde P_{med} es la potencia media de transmisión, A_t es el valor del atenuador (20 dB), RBW el valor del filtro de resolución usado, BW el ancho de banda efectivo del canal y G_t la ganancia de la antena.

Reemplazando valores en la ecuación (1) se obtiene el PIRE del eNB:

$$PIRE = -8.1 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} - 10 \log\left(\frac{100 \text{ KHz}}{17.858 \text{ MHz}}\right) + 3 \text{ dBi} = -2.582 \text{ dBm}$$

En la Ilustración 16-4 se observa el espectro generado por el gNB, con una frecuencia central de aproximadamente 3.619 GHz, con una potencia media de -21.7 dBm y un OCC BW de 37.894 MHz al 99% de la potencia media integrada total del espectro transmitido en el canal asignado según el documento 3GPP TS 38.101-1 Release 17.



Ilustración 16-4: Espectro de la señal NR (n78 - 3.619 GHz)

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

De la misma manera se procedió a calcular el PIRE del gNB usando la misma ecuación:

$$PIRE = -21.7 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} - 10 \log\left(\frac{100 \text{ KHz}}{37.894 \text{ MHz}}\right) + 6 \text{ dBi} = -9.904 \text{ dBm}$$

4.4 Medición de parámetros a un metro de distancia

Para estas mediciones se utilizó la aplicación “Network Signal Guru” la misma que necesita permisos “Root” para funcionar de manera óptima y para desbloquear más parámetros de medición. Además, en segundo plano se ejecutó la aplicación “Spotify” con el fin de tener consumo de internet. Las mediciones se hicieron aproximadamente a un metro de los equipos USRP.

Como se observa en la Ilustración 17-4 (izquierda), se indican las estadísticas del protocolo RRC, el cual se encarga de establecer y liberar la comunicación, entre otras funciones. Se puede notar que el estado RRC es “Conectado” lo cual indica que el UE se encuentra conectado a la red y se está transmitiendo datos. Además, se puede observar como el retardo del acceso es de 16 ms. En la Ilustración 17-4 (derecha), se muestran las sesiones de portadoras NSA que han sido creadas, donde solo se ha creado una sesión usando la portadora por defecto, la cual se estableció cuando el UE inició la conexión con la red. Se puede observar cómo esta sesión se encuentra activa, además, el identificador “BearerID” es 5 y el valor de calidad de servicio “QCI” es 9, valor predeterminado usado especialmente para tráfico de voz y video con baja latencia y alta disponibilidad. En adición se puede observar la PDN IP “12.1.1.2” y APN: OAI.

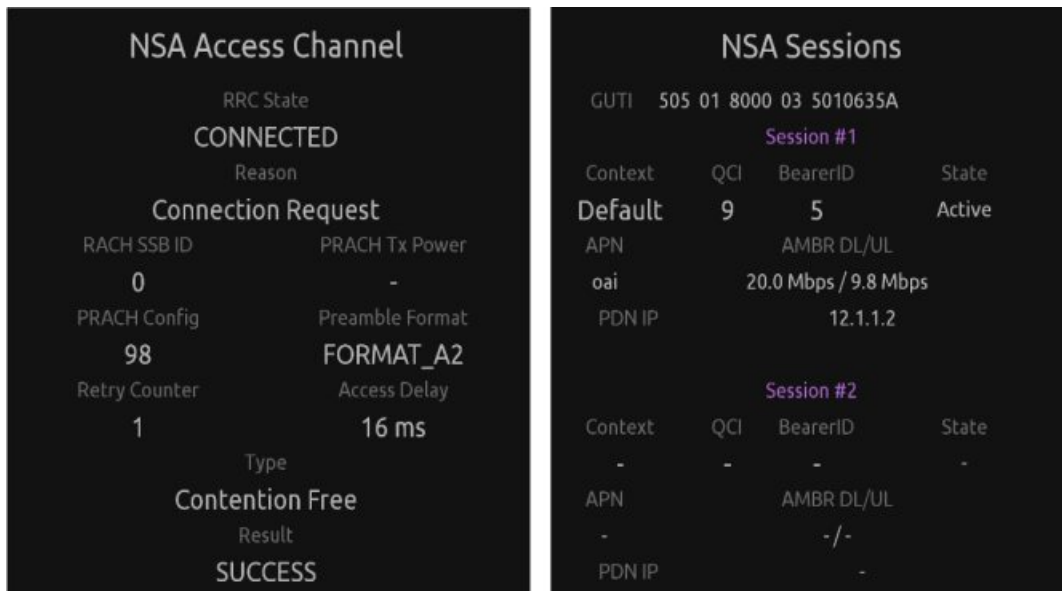


Ilustración 17-4: a la izquierda "Acceso al Canal NSA", a la derecha "Sesiones NSA"

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

En la Ilustración 18-4 se muestran los parámetros de medición de LTE y de NR. Se indica que la celda principal es la de LTE y la secundaria es NR, además se puede apreciar las bandas de

operación: B7 a 20 MHz para LTE y N78 a 40 MHz para NSA, tal como se configuró la red en capítulos anteriores. Se obtuvo que los niveles de potencia RSRP para LTE varían entre -74 dBm y -73.1 dBm y para NR varía entre -105.3 dBm y -107.9 dBm. Además, se puede apreciar la variación de la modulación, en LTE se puede apreciar el uso de modulación 64 QAM y 16 QAM y en NR modulación 16 QAM y 256 QAM, esto es debido a que se está usando una aplicación de fondo que consume internet, por lo que la modulación se adapta en función a la velocidad de transmisión que el UE requiera para cumplir sus servicios.

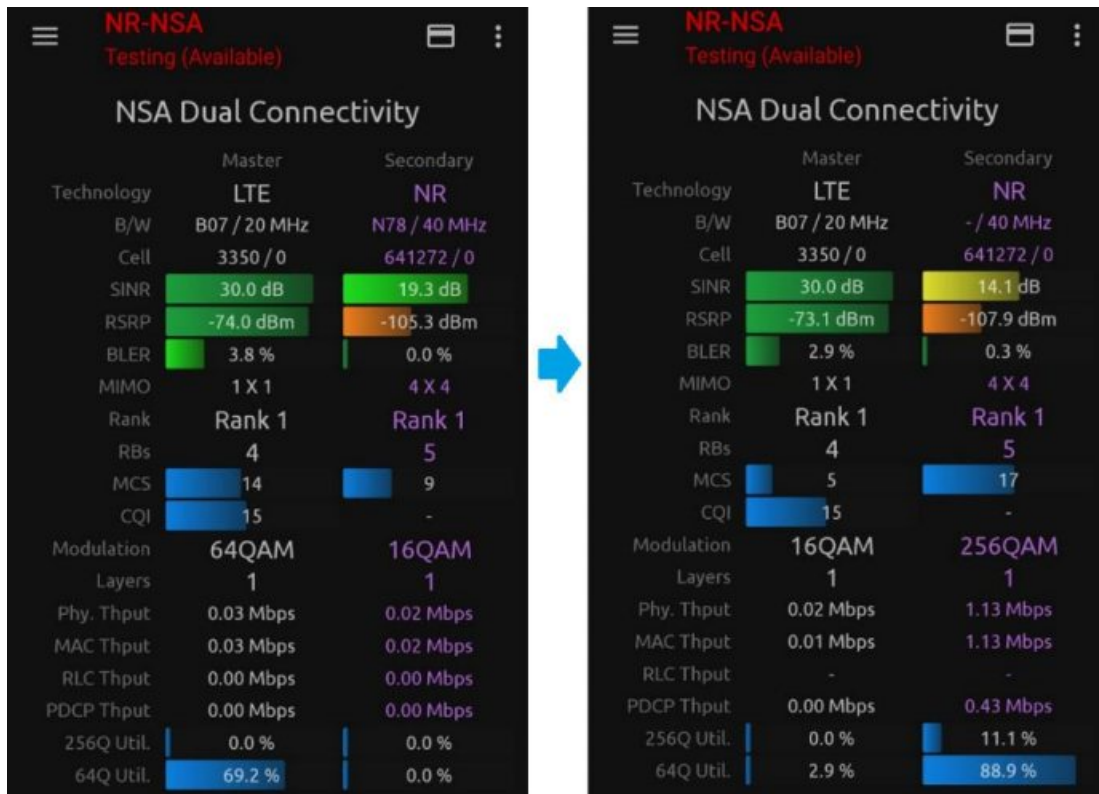


Ilustración 18-4: Variación de parámetros de "Conexión Dual NSA"

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por último, en la Ilustración 19-4, en la ventana de la izquierda se puede apreciar una gráfica referente al nivel de potencia (RSRP), la Relación Señal-Interferencia más Ruido (SIRN), tanto de la señal de sincronización (SS-RSRP y SS-SIRN) como de las señales de estado de canal (CSI-RSRP y CSI-SIRN) y la potencia de transmisión de PUSCH. Se puede apreciar como de 0 a 20 muestras los niveles de potencia se mantienen estables, para RSRP alrededor de los -109 dBm, para SIRN alrededor de 12 dBm y para TX PUSCH alrededor de -10dBm, esto es debido a que el UE se encuentra fijo a un metro de distancia de las USRP. A partir de la muestra 20 se decidió movilizar el UE por el laboratorio de comunicaciones de la FIE, por lo que se puede apreciar cómo fluctúan estos niveles de potencia.

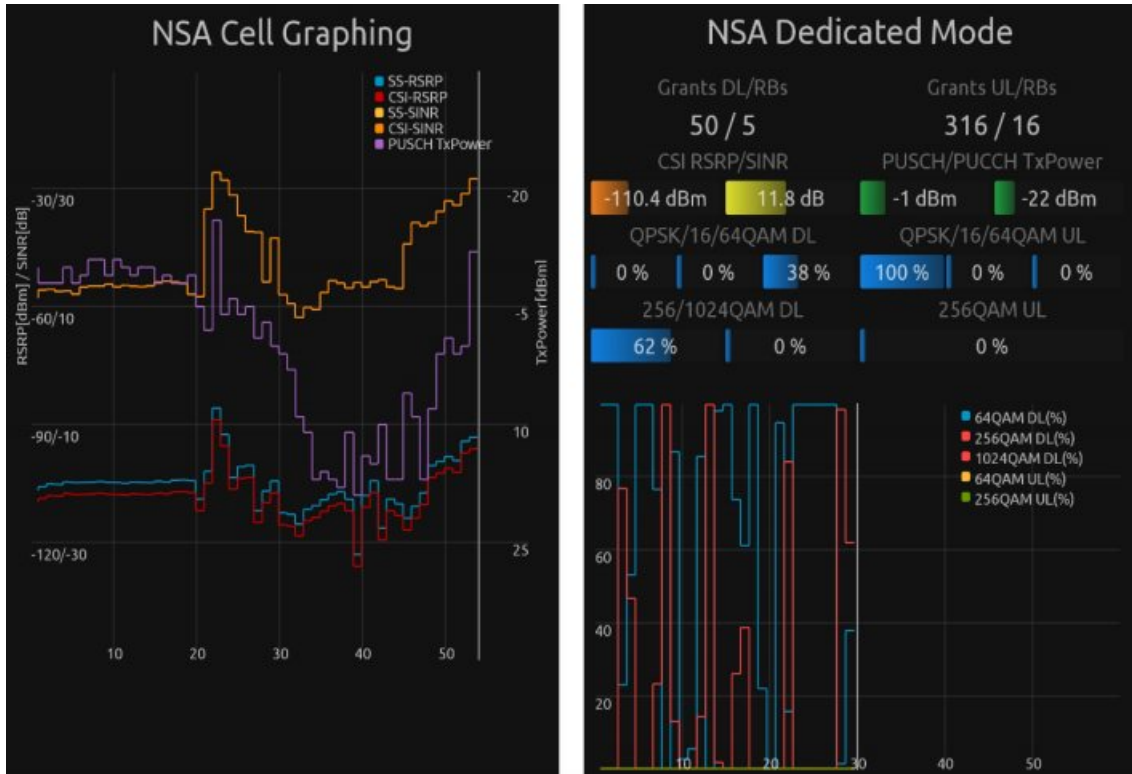


Ilustración 19-4: a la izquierda "Niveles de potencia", a la derecha "Uso de modulaciones"

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

4.5 Cálculo del Throughput 5G NR

La siguiente ecuación (2) está basada en el estándar 3GPP TS 38.306: Capacidades de acceso de radio del equipo de usuario (UE), la cual se utiliza para obtener la tasa de datos de rendimiento de NR en DL (Downlink) y UL (Uplink).

$$data\ rate\ (in\ Mbps) = 10^{-6} \sum_{j=1}^J (v_{layers}^{(j)} * Q_m^{(j)} * f^{(j)} * R_{max} * \frac{N_{PBB}^{BW(j), \mu} * 12}{T_s^\mu} * (1 - OH^{(j)})) \quad (2)$$

Donde:

J es el número de portadoras de componentes agregados en una banda o combinación de bandas, en este caso el número de portadoras es 1.

$v_{layers}^{(j)}$ es el número máximo de capas admitidas dado por el parámetro de capa superior `maxNumberMIMOLayersPDSCH` para el enlace descendente y el máximo de parámetros de

capa superior $\text{maxNumberMIMO-LayersCB-PUSCH}$ y $\text{maxNumberMIMO-LayersNonCB-PUSCH}$ para el enlace ascendente. Para este caso el número de capas MIMO es 1.

$Q_m^{(j)}$ el orden de modulación máximo soportado dado por el parámetro de capa superior $\text{supportModulationOrderDL}$ para el enlace descendente y el parámetro de capa superior $\text{supportModulationOrderUL}$ para el enlace ascendente. El orden de modulación para DL para este caso es 8 debido a que la modulación usada fue 256QAM y para UL es 2 debido a que la modulación usada fue QPSK.

$f^{(j)}$ es el factor de escala dado por el parámetro de capa superior “ scalingFactor ” o “ $\text{scalingFactor-1024QAM-FR1}$ ” y puede tomar los valores 1, 0.8, 0.75 y 0.4.

$$R_{max} = 948/1024$$

μ es la numerología, el cual se define en TS 38.211. En este caso el espaciado de subportadora usada fue 30 KHz, entonces la numerología correspondiente es 1.

T_s^μ es la duración media del símbolo OFDM en una subtrama para numerología μ . $T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$

$N_{PBR}^{BW^{(j),\mu}}$ es la asignación máxima de Resource Blocks RB en ancho de banda $BW^{(j)}$ con numerología μ , como se define en 5.3 TS 38.101-1 y 5.3 TS 38.101-2. El numero de RB utilizado es de 106 con un ancho de banda de 40 MHz.

$OH^{(j)}$ es la sobrecarga y en este caso toma los siguientes valores: 0,14, para rango de frecuencia FR1 para DL y 0,08, para rango de frecuencia FR1 para UL.

Con estos datos se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{data rate DL (in Mbps)} = 227 \text{ Mbps}$$

$$\text{data rate UL (in Mbps)} = 61 \text{ Mbps}$$

Además, se debe considerar que se está utilizando duplexación TDD y está configurado de la siguiente manera:

$$\#\text{DownlinkSymbols} = 7$$

$$\#\text{UplinkSymbols} = 5$$

Por lo que para DL se usó 7 de los 14 símbolos de cada slot, es decir el 50% del slot y para UL 5 de los 14 símbolos es decir el 35.7% del slot.

Obteniendo los siguientes resultados finales:

$$\text{data rate DL (in Mbps)} = 227 * 0.5 = 114 \text{ Mbps}$$

$$\text{data rate UL (in Mbps)} = 61 * 0.357 = 22 \text{ Mbps}$$

4.6 Indoor Testing 4G/5G en el laboratorio de comunicaciones de la FIE

Para poder realizar el Indoor Test se usó la aplicación “Cellular-Pro Play” que de igual manera necesita permisos “Root”. Esta aplicación cuenta con la opción de realizar pruebas Indoor permitiendo cargar la imagen del escenario en el que se desee hacer las pruebas y además permite exportar un archivo con las mediciones realizadas durante la prueba.

En este caso el escenario propuesto se muestra en la Ilustración 20-4 que comprende al laboratorio de comunicaciones de la FIE. El icono de la laptop muestra la ubicación de los equipos tanto computador como USRP's.

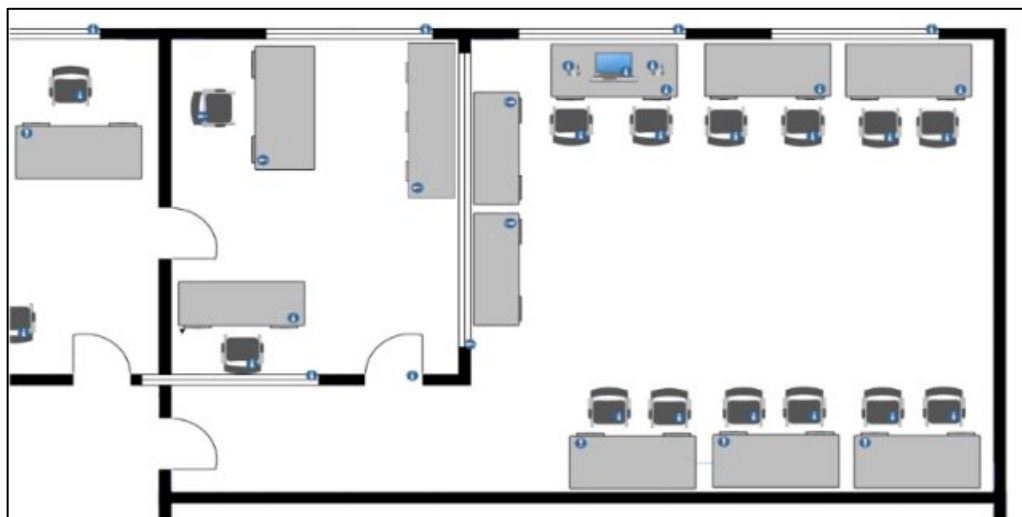


Ilustración 20-4: Escenario del laboratorio de comunicaciones de la FIE

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

En el trabajo de titulación de Picazo M. (2021, p.44) se define una escala para poder determinar la calidad de los parámetros como: RSRP (dBm), RSRQ (dB) y SINR (dB) los cuales se muestran a continuación en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Umbrales de calidad

	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excelente	RSRP>-90	RSRQ>-5	SINR>15
Bueno	-90>RSRP>-100	-5>RSRQ>-10	15>SINR>10
Regular	-100>RSRP>-110	-10>RSRQ>-15	10>SINR>5
Malo	RSRP<-110	RSRQ<-15	SINR<5

Fuente: Picazo M., 2021, p.44

Para los siguientes resultados se hizo una toma de datos usando la app mencionada anteriormente con un total de 78 muestras para las mediciones de LTE y 109 muestras para 5G NR.

En la Ilustración 21-4 e Ilustración 22-4 , se observa la medición de RSRP en 4G, donde se tuvo resultados “buenos” de calidad de señal recibida que corresponden al 61.54% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -100 dBm y -90 dBm, también se puede apreciar que no se encuentran resultados “malos”. Esto indica que la cobertura de la señal es buena dentro del laboratorio de comunicaciones de la FIE

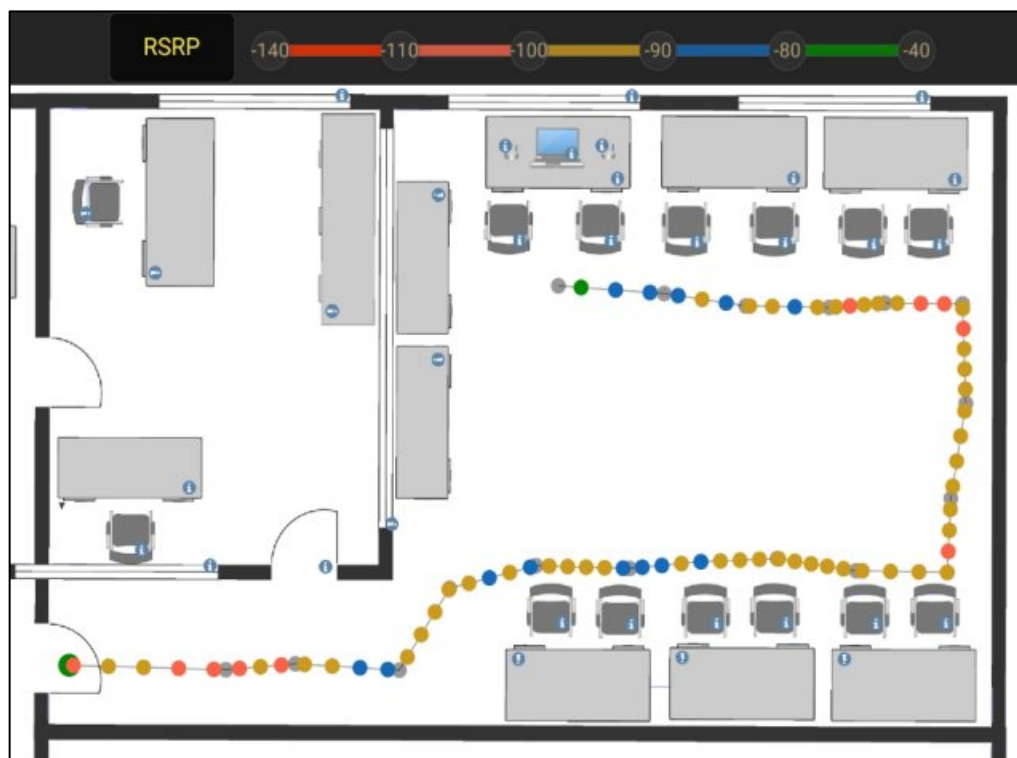


Ilustración 21-4: Resultados de medición RSRP 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

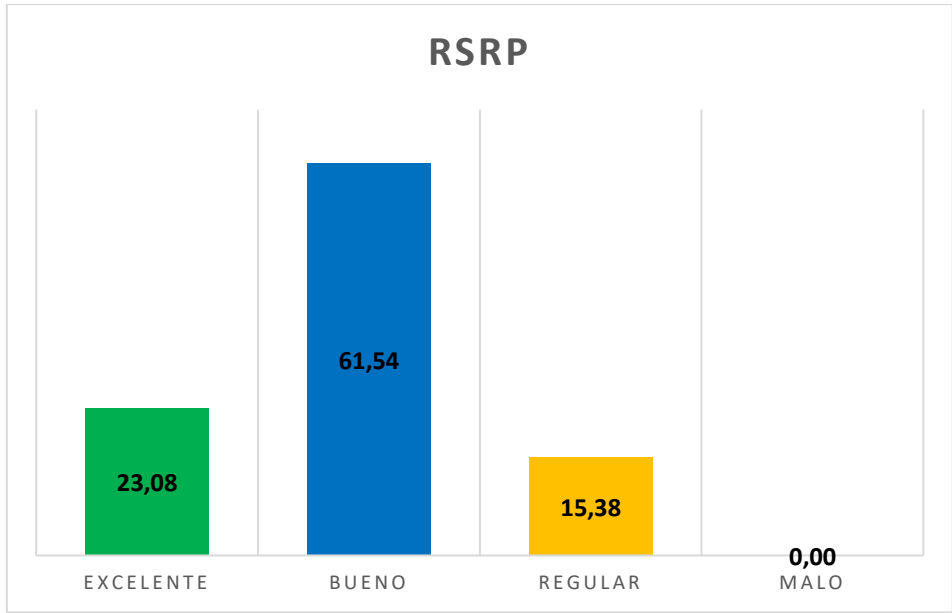


Ilustración 22-4: Porcentaje de datos de medición RSRP 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por otra parte, en la Ilustración 23-4 e Ilustración 24-4 , se aprecia la medición de RSRQ en 4G, donde se tuvo resultados “Excelentes” que corresponden al 98.72% de los datos medidos totales que corresponde a valores mayores de -5 dB. Esto indica que la señal recibida es de buena calidad y tiene una menor probabilidad de sufrir errores.



Ilustración 23-4: Resultados de medición RSRQ 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

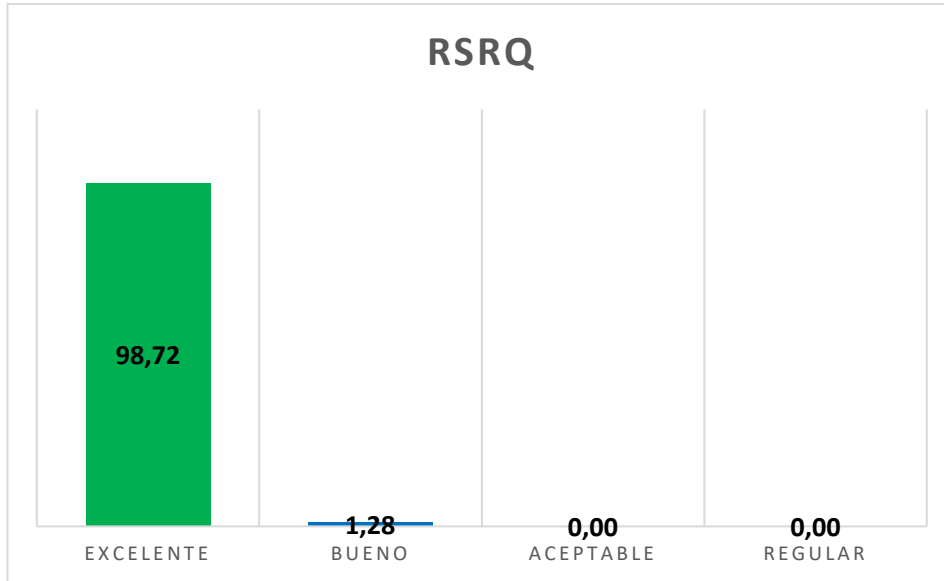


Ilustración 24-4: Porcentaje de datos de medición RSRQ 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por último, con respecto a mediciones en 4G, en la Ilustración 25-4 que corresponde a las medidas de SINR en 4G. Los datos arrojados por la aplicación no presentaron valores de SINR, pero se aprecia que la mayoría de los puntos son de color verde, es decir se tuvo resultados entre “Buenos” y “Excelentes” según la Tabla 1-4. Esto indica que la relación entre la señal deseada, la interferencia y el ruido es buena.

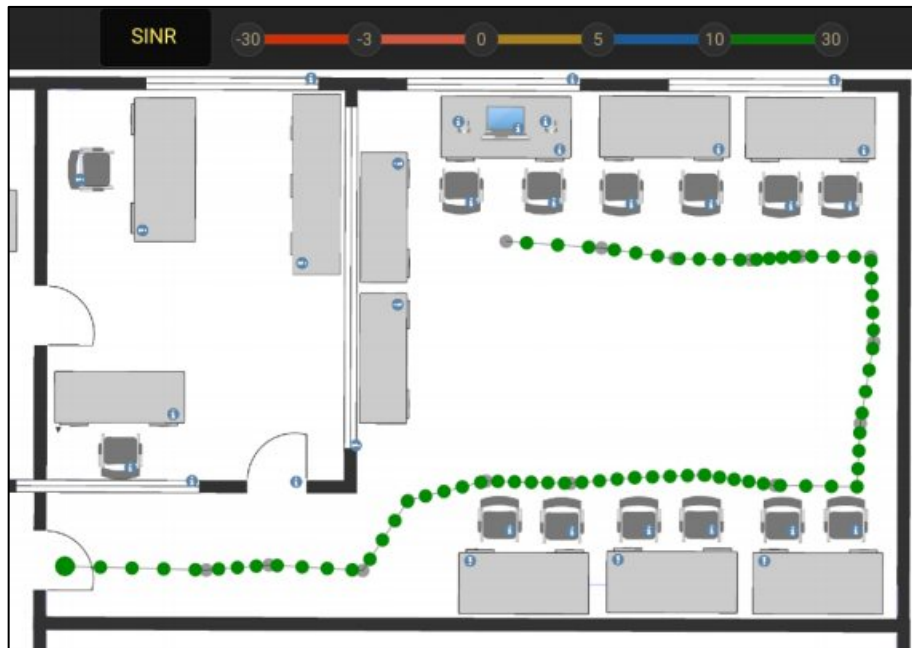


Ilustración 25-4: Resultados de medición SINR 4G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Para las pruebas con 5G, se observa en la Ilustración 26-4 e Ilustración 27-4 las mediciones de SS-RSRP obtenidas. Donde se tuvo en mayor medida resultados “regulares” que corresponden al 36.70% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -110 dBm y -100 dBm, y resultados “malos” que corresponden al 49.54% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -140 dBm y -110 dBm. Esto indica que no se tiene buena cobertura dentro del laboratorio de comunicaciones de la FIE y puede haber problemas de conectividad.



Ilustración 26-4: Resultados de medición SS-RSRP 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

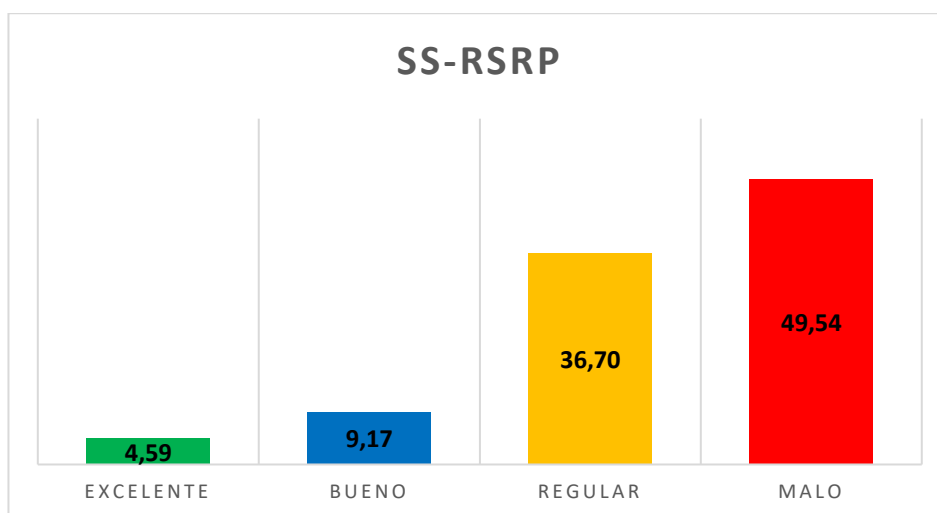


Ilustración 27-4: Porcentaje de datos de medición SS-RSRP 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Además, como se observa en la Ilustración 28-4 e Ilustración 29-4 las mediciones de SS-RSRQ obtenidas. Se tuvo en mayor medida resultados “Aceptables” que corresponden al 95.41% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -15 dB y -10 dB.

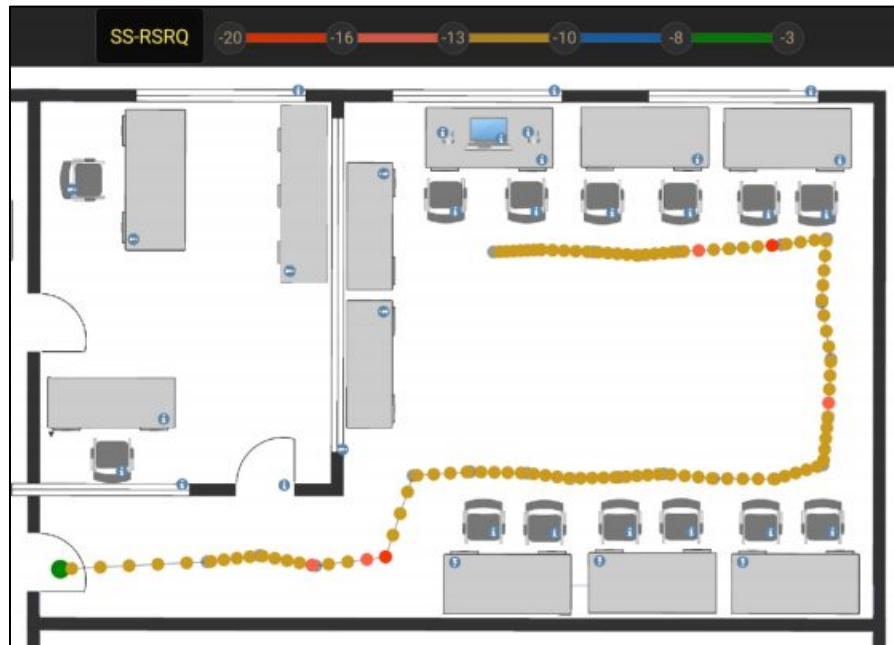


Ilustración 28-4: Resultados de medición SS-RSRQ 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

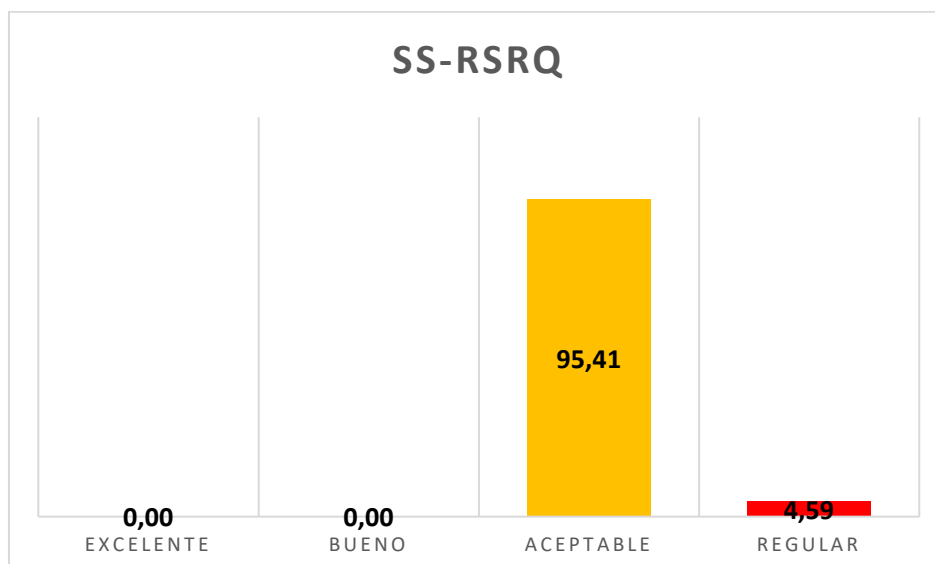


Ilustración 29-4: Porcentaje de datos de medición SS-RSRQ 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por último, con respecto a mediciones en 5G, en la Ilustración 30-4 se muestran las medidas de SIRN en 5G. De igual manera de en 4G, se puede apreciar que la mayoría de los puntos son de

color verde, es decir se tuvo resultados entre “Buenos” y “Excelentes” para valores mayores a 10 dB, y de color azul con resultados “Regulares” que se encuentran en el rango de 5 dB y 10 dB. Con estos datos se puede decir que la calidad de la señal referente al ruido e interferencias es relativamente buena.

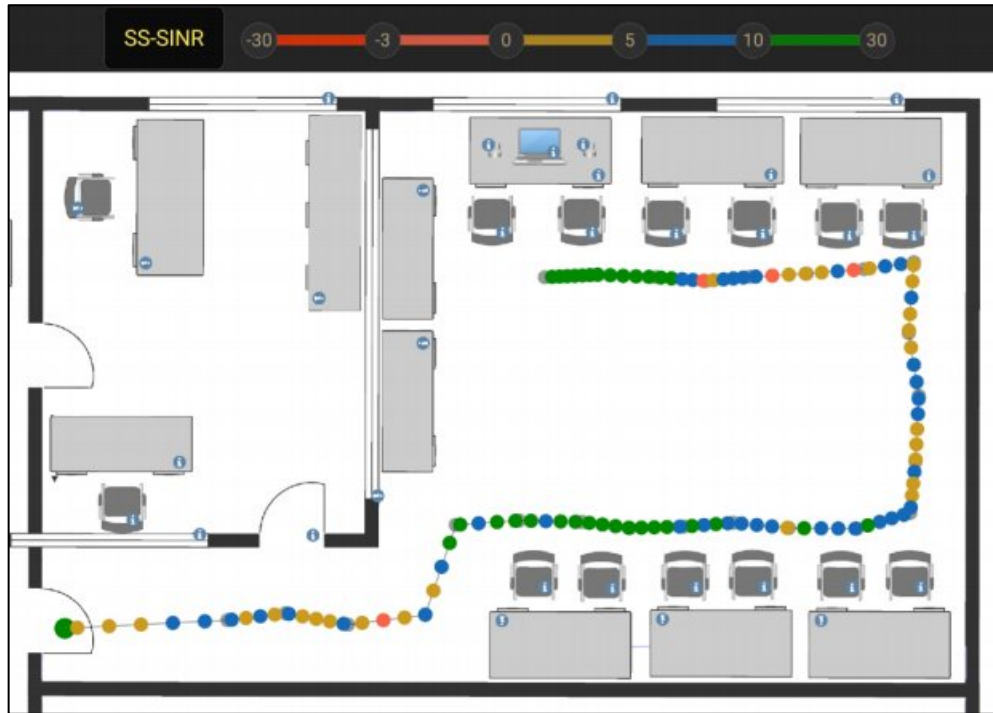


Ilustración 30-4: Resultados de medición SS-SINR 5G

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

4.7 Captura de tráfico del sistema

El análisis de tráfico en la red es un aspecto importante a la hora de estudiar las redes de quinta generación. Las herramientas que provee OAI y el software de Wireshark hacen posible la captura de tráfico tanto en la interfaz radio Uu como en las interfaces que conectan cada uno de sus componentes, de esta manera se puede analizar desde el punto de vista de Redes los diferentes protocolos implicados en la comunicación. A continuación, se muestra de manera general los resultados obtenidos de la captura de tráfico de la red 5G NSA.

4.7.1 Tráfico en la interfaz radio (Uu)

Para capturar tráfico de la interfaz radio Uu usando Wireshark se necesita generar un Tracer, herramienta que proporciona OAI entre otras más. Las instrucciones de cómo realizarlo se encuentran en el Anexo D sección 5.

En la Ilustración 31-4, se muestra el tráfico capturado de la interface radio Uu del eNodeB donde se puede visualizar protocolos de la capa MAC y RCC en LTE, se puede observar el uso del canal de transporte SCH tanto para uplink como para downlink, el cual se encarga de transmitir los datos de usuario; también se puede visualizar el canal lógico BCCH.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
3392	0.01147...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE		63 Scheduling Requests (1) sent (SFN=447 , SF=0): (UE=0 C-RNTI=5027)
3393	0.01147...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59	MasterInformationBlock (SFN=112)
3394	0.01148...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	125	UL-SCH: (SFN=447 , SF=8) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
3395	0.01148...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73	SystemInformationBlockType1
3396	0.01148...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59	MasterInformationBlock (SFN=112)
3397	0.01148...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94	SystemInformation [SIB2 SIB3]
3398	0.01149...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59	MasterInformationBlock (SFN=112)
3399	0.01149...	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73	SystemInformationBlockType1
3400	0.01149...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	125	UL-SCH: (SFN=450 , SF=5) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)

Ilustración 31-4: Tráfico en la interfaz radio Uu eNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por otro lado, en la Ilustración 32-4 se muestra el tráfico capturado de la interface radio Uu del gNodeB, de la misma manera se puede visualizar protocolos de la capa MAC y RCC pero esta vez de NR, se visualiza también el canal de transporte SCH en uplink y downlink.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
2888	1.98580...	127.0.0.1	127.0.0.1	NR RRC	62	MIB
2889	1.98581...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	181	UL-SCH (Long BSR) (Padding 112 bytes)
2890	1.98581...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	181	UL-SCH (Long BSR) (Padding 112 bytes)
2891	1.98582...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	3137	DL-SCH (LCID:4 133 bytes) (LCID:4 1456 bytes) (LCID:4 1456 bytes) (Padding 17 bytes)
2892	1.98584...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	3011	DL-SCH (LCID:4 1456 bytes) (LCID:4 1456 bytes) (Padding 27 bytes)
2893	1.98584...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	89	UL-SCH (LCID:4 20 bytes) (Short BSR LCG_ID=1 BS=7)
2894	1.98585...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	1538	DL-SCH (LCID:4 1456 bytes) (Padding 13 bytes)
2895	1.98585...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	1538	DL-SCH (LCID:4 1456 bytes) (Padding 13 bytes)
2896	1.98587...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	1538	DL-SCH (LCID:4 1456 bytes) (Padding 13 bytes)
2897	1.98588...	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-NR	4547	DL-SCH (LCID:4 1456 bytes) (LCID:4 1456 bytes) (LCID:4 1456 bytes) (Padding 104 bytes)

Ilustración 32-4: Tráfico en la interfaz radio Uu gNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

4.7.2 Tráfico en el EPC

Para poder capturar tráfico tanto en el EPC como en el eNodeB y gNodeB no se necesita de ninguna herramienta extra como en el caso del enlace radio Uu, basta con identificar la interfaz del computador donde transcurre el tráfico que se desea capturar.

En primer lugar, se observó el tráfico intercambiado entre el MME y HSS, para ello se aplicó un filtro usando la IP del MME (192.168.61.149), de esta manera se logró obtener los mensajes que se muestran en la Ilustración 33-4 e Ilustración 34-4. Aquí se observa el uso del protocolo TCP y Diameter el cual se utiliza para la autenticación y autorización de usuarios.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
36	5.631100088	192.168.61.149	192.168.61.130	TCP	74	52556 → 3868 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1
37	5.631117051	192.168.61.130	192.168.61.149	TCP	74	3868 → 52556 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65160 Len=0 MSS=1460 S...
38	5.631125566	192.168.61.149	192.168.61.130	TCP	66	52556 → 3868 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64512 Len=0 TSval=917262955
39	5.631782543	192.168.61.149	192.168.61.130	DIAMETER	298	cmd=Capabilities-Exchange Request(257) flags=R... appl=Diamete
40	5.631795473	192.168.61.130	192.168.61.149	TCP	66	3868 → 52556 [ACK] Seq=1 Ack=233 Win=65536 Len=0 TSval=7148846...
41	5.633559492	192.168.61.130	192.168.61.149	DIAMETER	378	cmd=Capabilities-Exchange Answer(257) flags=---- appl=Diameter...
42	5.633572991	192.168.61.149	192.168.61.130	TCP	66	52556 → 3868 [ACK] Seq=233 Ack=313 Win=64512 Len=0 TSval=91726...

Ilustración 33-4: Captura de tráfico entre MME y HSS – Protocolo Diameter

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

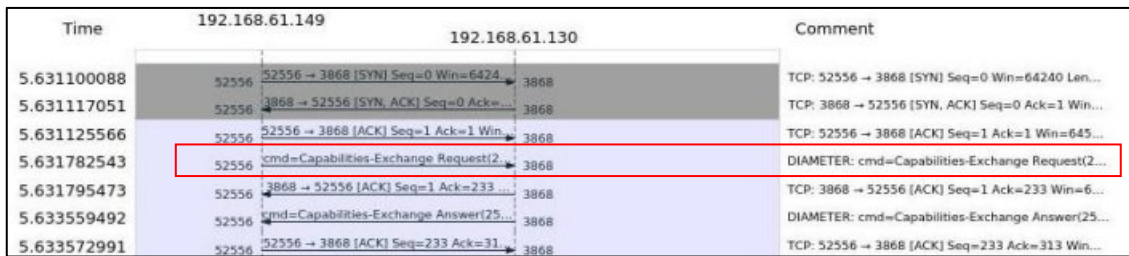


Ilustración 34-4: Flujo de mensajes entre MME y HSS – Protocolo Diameter

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Luego se observó el tráfico entre los componentes SPGW del plano de control y plano de usuario, para ello se utilizó un filtro con la IP de SPGWU (192.168.61.132) logrando obtener mensajes del protocolo PFCP propio de redes 5G, tal como se observa en la Ilustración 35-4 e Ilustración 36-4.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
6	1.143372892	192.168.61.133	192.168.61.132	PFCP	122	PFCP Association Setup Request
7	1.143595634	192.168.61.132	192.168.61.133	PFCP	72	PFCP Association Setup Response
26	3.144152443	192.168.61.132	192.168.61.133	PFCP	58	PFCP Heartbeat Request
27	3.144480954	192.168.61.133	192.168.61.132	PFCP	58	PFCP Heartbeat Response

Ilustración 35-4: Captura de tráfico entre SPGWU y SPGWC – Protocolo PFCP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

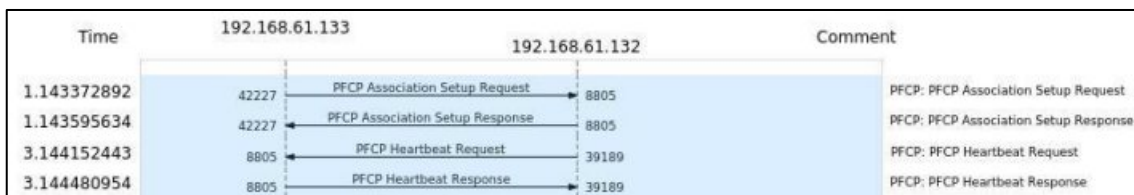


Ilustración 36-4: Flujo de mensajes entre SPGWU y SPGWC – Protocolo PFCP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

También se pudo visualizar el uso del protocolo GTPv2, tal como se muestra en la Ilustración 37-4 e Ilustración 38-4, donde se observa la creación y eliminación de sesiones, así como también la modificación de portadoras; tareas que realiza el protocolo GTPv2 en el plano de control.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1011	526.615613626	192.168.61.149	192.168.61.132	GTPv2	258	Create Session Request
1014	526.616319553	192.168.61.132	192.168.61.149	GTPv2	158	Create Session Response
1019	526.733123908	192.168.61.149	192.168.61.132	GTPv2	76	Modify Bearer Request
1022	526.733613125	192.168.61.132	192.168.61.149	GTPv2	88	Modify Bearer Response
1039	527.883922162	192.168.61.149	192.168.61.132	GTPv2	76	Modify Bearer Request
1042	527.884339262	192.168.61.132	192.168.61.149	GTPv2	88	Modify Bearer Response
16811	2509.8961167...	192.168.61.149	192.168.61.132	GTPv2	79	Delete Session Request
16814	2509.8965823...	192.168.61.132	192.168.61.149	GTPv2	60	Delete Session Response

Ilustración 37-4: Captura de tráfico entre MME y SPGWC – Protocolo GTPv2

Realizado por: Pesantez Luis, 2023



Ilustración 38-4: Flujo de mensajes entre MME y SPGWC – Protocolo GTPv2

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

4.7.3 Tráfico en eNB y gNB

Para la captura de tráfico en estos componentes de la RAN se lo puede hacer en la interfaz X2 la cual conecta el eNB con el gNB, y en la interfaz S1 (S1-MME y S1-U) que conecta el eNB con el EPC.

En la Ilustración 39-4 e Ilustración 40-4 se observan los mensajes de señalización S1AP que se intercambian las entidades MME y eNB haciendo uso del protocolo SCTP, el cual es un protocolo de transporte de propósito general.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
440	253.045106867	10.0.0.30	192.168.61.149	SCTP	82	INIT
443	253.045136772	192.168.61.149	10.0.0.30	SCTP	306	INIT_ACK
444	253.045143633	10.0.0.30	192.168.61.149	SCTP	278	COOKIE_ECHO
445	253.045155552	192.168.61.149	10.0.0.30	SCTP	50	COOKIE_ACK
446	253.045229171	10.0.0.30	192.168.61.149	S1AP	122	S1SetupRequest
447	253.045234441	192.168.61.149	10.0.0.30	SCTP	62	SACK
448	253.055588241	192.168.61.149	10.0.0.30	S1AP	90	S1SetupResponse
449	253.055631183	10.0.0.30	192.168.61.149	SCTP	62	SACK
526	287.274864870	10.0.0.30	192.168.61.149	SCTP	106	HEARTBEAT
527	287.274880949	192.168.61.149	10.0.0.30	SCTP	106	HEARTBEAT
528	287.274917519	10.0.0.30	192.168.61.149	SCTP	106	HEARTBEAT_ACK

Ilustración 39-4: Captura de tráfico en la interfaz S1-MME – Protocolos SCTP/S1AP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023



Ilustración 40-4: Flujo de mensajes de la interfaz S1-MME – Protocolos SCTP/S1AP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

También se pudo observar tráfico de datos del UE encapsulado en túneles GTP que han sido creados por la entidad del eNB y gNB y se comunican al SPGWU del EPC por medio de la interfaz S1-U. Estos mensajes se observan en la Ilustración 41-4 e Ilustración 42-4.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1045	527.943...	::	ff02::1:ff4b:2c2f	GTP <ICMPv6>	122	Neighbor Solicitation for fe80::6880:7aff:fe4b:2c2f
1046	527.943...	12.1.1.2	8.8.4.4	GTP <QUIC>	1278	Initial, DCID=cac3f0efef172bb623df93b1234bec6, SCID=c6b84ba16c4348f0d18152960ef79aea0c959279, SCID=cac3f0efef172bb623df93b1234bec6
1047	527.943...	12.1.1.2	192.168.18.129	GTP <TCP>	110	42880 → 853 [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=16167 TSecr=0 WS=1024
1048	527.943...	12.1.1.2	8.8.4.4	GTP <TCP>	110	54482 → 853 [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=1698647600 TSecr=0 WS=1024
1049	527.943...	12.1.1.2	157.240.6.32	GTP <TCP>	110	39752 → 443 [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=116710571 TSecr=0 WS=1024
1050	527.943...	12.1.1.2	157.240.229.61	GTP <TCP>	110	57752 → 443 [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=614783867 TSecr=0 WS=1024
1059	527.963...	8.8.4.4	12.1.1.2	GTP <TCP>	110	853 → 54482 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=1412 SACK_PERM TSval=16167 TSecr=0 WS=1024
1061	527.965...	8.8.4.4	12.1.1.2	GTP <QUIC>	1278	Initial, DCID=c6b84ba16c4348f0d18152960ef79aea0c959279, SCID=cac3f0efef172bb623df93b1234bec6
1063	527.968...	157.240.6.32	12.1.1.2	GTP <TCP>	110	443 → 39752 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=1392 SACK_PERM TSval=116710571 TSecr=0 WS=1024
1065	528.016...	8.8.4.4	12.1.1.2	GTP <QUIC>	1278	Handshake, DCID=c6b84ba16c4348f0d18152960ef79aea0c959279, SCID=cac3f0efef172bb623df93b1234bec6
1067	528.016...	8.8.4.4	12.1.1.2	GTP <QUIC>	1278	Handshake, DCID=c6b84ba16c4348f0d18152960ef79aea0c959279, SCID=cac3f0efef172bb623df93b1234bec6
1069	528.047...	157.240.229.61	12.1.1.2	GTP <TCP>	110	443 → 57752 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=1392 SACK_PERM TSval=116710571 TSecr=0 WS=1024
1070	528.070...	12.1.1.2	8.8.4.4	GTP <TCP>	102	54482 → 853 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=65536 Len=0 TSval=1698647600 TSecr=16167 WS=0
1072	528.073...	12.1.1.2	157.240.6.32	GTP <TCP>	102	39752 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=65536 Len=0 TSval=116710571 TSecr=116710571 WS=0
1074	528.078...	12.1.1.2	157.240.229.61	GTP <TCP>	102	57752 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=65536 Len=0 TSval=614783867 TSecr=614783867 WS=0
1075	528.078...	12.1.1.2	8.8.4.4	GTP <TLSv1...>	332	Client Hello

Ilustración 41-4: Captura de tráfico en la interfaz S1-U – Protocolo GTP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

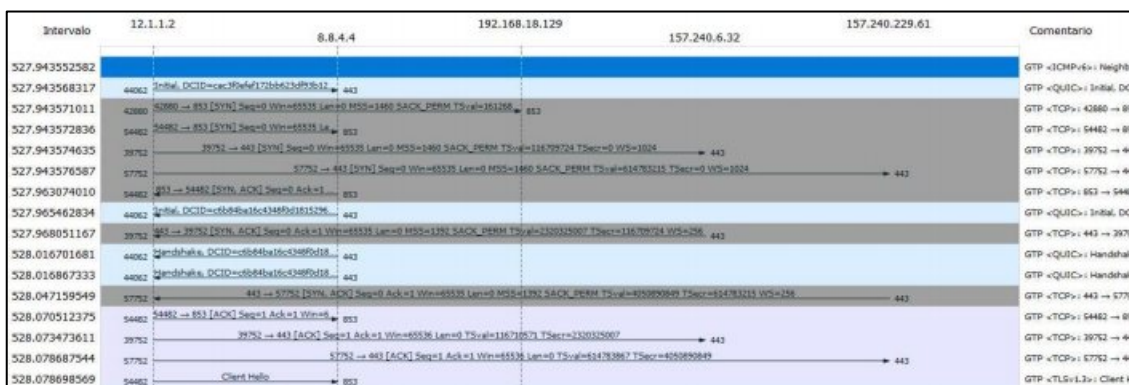


Ilustración 42-4: Flujo de mensajes de la interfaz S1-U – Protocolo GTP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Además, es posible observar el proceso de autenticación cuando un nuevo UE se conecta a la red. En la Ilustración 43-4 e Ilustración 44-4 se observan mensajes de autenticación del protocolo SIAP de tipo “request” y “respond” entre el eNB y MME consiguiendo finalmente obtener un mensaje de tipo “attach” el cual indica que el UE ha sido adjuntado correctamente a la red.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
990	526.342698452	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP/NAS-EPS	234	InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request
994	526.346180064	192.168.61.149	10.0.0.30	SIAP/NAS-EPS	142	DownlinkNASTransport, Authentication request
996	526.426608418	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP/NAS-EPS	146	UplinkNASTransport, Authentication failure (Synch failure)
1000	526.429413256	192.168.61.149	10.0.0.30	SIAP/NAS-EPS	142	DownlinkNASTransport, Authentication request
1001	526.572603975	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP/NAS-EPS	138	UplinkNASTransport, Authentication response
1002	526.573597941	192.168.61.149	10.0.0.30	SIAP/NAS-EPS	130	DownlinkNASTransport, Security mode command
1003	526.592637312	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP/NAS-EPS	146	UplinkNASTransport, Security mode complete
1004	526.593281507	192.168.61.149	10.0.0.30	SIAP/NAS-EPS	114	DownlinkNASTransport, ESM information request
1005	526.612623564	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP/NAS-EPS	146	UplinkNASTransport, ESM information response
1015	526.617026787	192.168.61.149	10.0.0.30	SIAP/NAS-EPS	294	InitialContextSetupRequest, Attach accept, Activate default EP
1016	526.661163559	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP	2438	UECapabilityInfoIndication, UECapabilityInformation
1017	526.661195480	192.168.61.149	10.0.0.30	SCTP	62	SACK
1018	526.732692798	10.0.0.30	192.168.61.149	SIAP	102	InitialContextSetupResponse

Ilustración 43-4: Tráfico del proceso de autenticación de usuario

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Time	10.0.0.30	192.168.61.149	Comment
526.342698452	57231	InitialUEMessage, Attach request, PDN	SIAP/NAS-EPS: InitialUEMessage, Attach request, P...
526.346180064	57231	DownlinkNASTransport, Authentica...	SIAP/NAS-EPS: DownlinkNASTransport, Authentica...
526.426608418	57231	UplinkNASTransport, Authentication fa	SIAP/NAS-EPS: UplinkNASTransport, Authentica...
526.429413256	57231	DownlinkNASTransport, Authentica...	SIAP/NAS-EPS: DownlinkNASTransport, Authentica...
526.572603975	57231	UplinkNASTransport, Authentication r	SIAP/NAS-EPS: UplinkNASTransport, Authentica...
526.573597941	57231	DownlinkNASTransport, Security mod...	SIAP/NAS-EPS: DownlinkNASTransport, Security m...
526.592637312	57231	UplinkNASTransport, Security mode c...	SIAP/NAS-EPS: UplinkNASTransport, Security mod...
526.593281507	57231	DownlinkNASTransport, ESM informati...	SIAP/NAS-EPS: DownlinkNASTransport, ESM inform...
526.612623564	57231	UplinkNASTransport, ESM informati...	SIAP/NAS-EPS: UplinkNASTransport, ESM informati...
526.617026787	57231	InitialContextSetupRequest, Attach ac	SIAP/NAS-EPS: InitialContextSetupRequest, Attach...
526.661163559	57231	UECapabilityInfoIndication, UECapabili	SIAP: UECapabilityInfoIndication, UECapabilityInfo...
526.661195480	57231	SACK	SCTP: SACK
526.732692798	57231	InitialContextSetupResponse	SIAP: InitialContextSetupResponse

Ilustración 44-4: Flujo de mensajes de autenticación de usuario

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Por último, también se observa el tráfico que se da entre el eNB y gNB usando el protocolo X2AP que se da en la interfaz X2, en donde se transmite información de los recursos de radio y señalización. Estos mensajes se muestran en la Ilustración 45-4 e Ilustración 46-4.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	10.0.0.40	10.0.0.30	SCTP	54	SHUTDOWN
2	0.000017114	10.0.0.30	10.0.0.40	SCTP	50	SHUTDOWN_ACK
3	0.000023198	10.0.0.40	10.0.0.30	SCTP	50	SHUTDOWN_COMPLETE
4	4.624406491	10.0.0.40	10.0.0.30	SCTP	82	INIT
5	4.624421272	10.0.0.30	10.0.0.40	SCTP	306	INIT_ACK
6	4.624427321	10.0.0.40	10.0.0.30	SCTP	278	COOKIE_ECHO
7	4.624437758	10.0.0.30	10.0.0.40	SCTP	50	COOKIE_ACK
8	4.624629647	10.0.0.40	10.0.0.30	X2AP	130	ENDCX2SetupRequest
9	4.624634094	10.0.0.30	10.0.0.40	SCTP	62	SACK (Ack=0, Arwnd=106431)
10	4.624780416	10.0.0.30	10.0.0.40	X2AP	118	ENDCX2SetupResponse
11	4.624788121	10.0.0.40	10.0.0.30	SCTP	62	SACK (Ack=0, Arwnd=106443)
20	18.7928728...	10.0.0.30	10.0.0.40	X2AP	914	SgNBAdditionRequest
21	18.8059117...	10.0.0.40	10.0.0.30	X2AP	446	SgNBAdditionRequestAcknowledge, RRC Reconfiguration
22	18.8644568...	10.0.0.30	10.0.0.40	X2AP	106	SgNBReconfigurationComplete

Ilustración 45-4: Captura de tráfico en la interfaz X2 – Protocolo X2AP/SCTP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

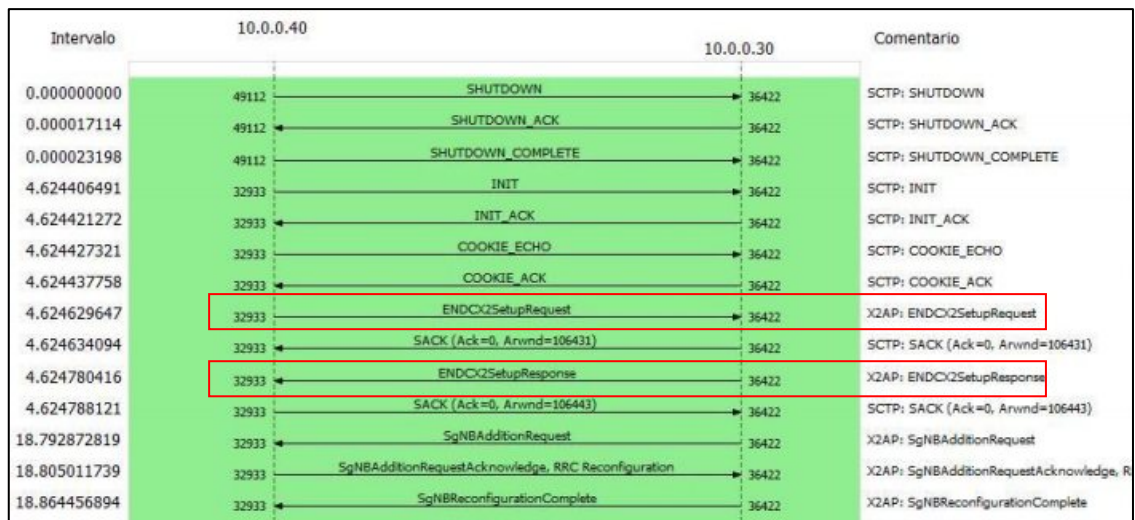


Ilustración 46-4: Flujo de mensajes en la interfaz X2 – Protocolo X2AP/SCTP

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

4.8 Herramientas de monitorización de eNodeB y gNodeB

OpenAirInterface cuenta con herramientas que permiten monitorizar las entidades eNodeB y gNodeB, estas son “T Tracer” y “Softscope”. Para poder instalarlas y desplegarlas seguir las instrucciones del Anexo D, sección 5.

Se ejecutó la herramienta T Tracer en el eNodeB, abriéndose una ventana con una interfaz gráfica, tal como se muestra en la Ilustración 47-4. En esta ventana se puede identificar varias regiones tales como (Gitlab Eurocom, 2018):

- Gráficas de parámetros del enlace físico, como la potencia de la señal de entrada, las constelaciones de la modulación, retardos de canal, velocidades de enlaces de subida y bajada, entre otros.
- Rastros de nivel de tramas PHY
- Rastros de nivel tramas MAC
- Rastros de nivel tramas RLC
- Rastros de nivel tramas PDCP
- Rastros de nivel tramas RRC
- Rastros de nivel LOG

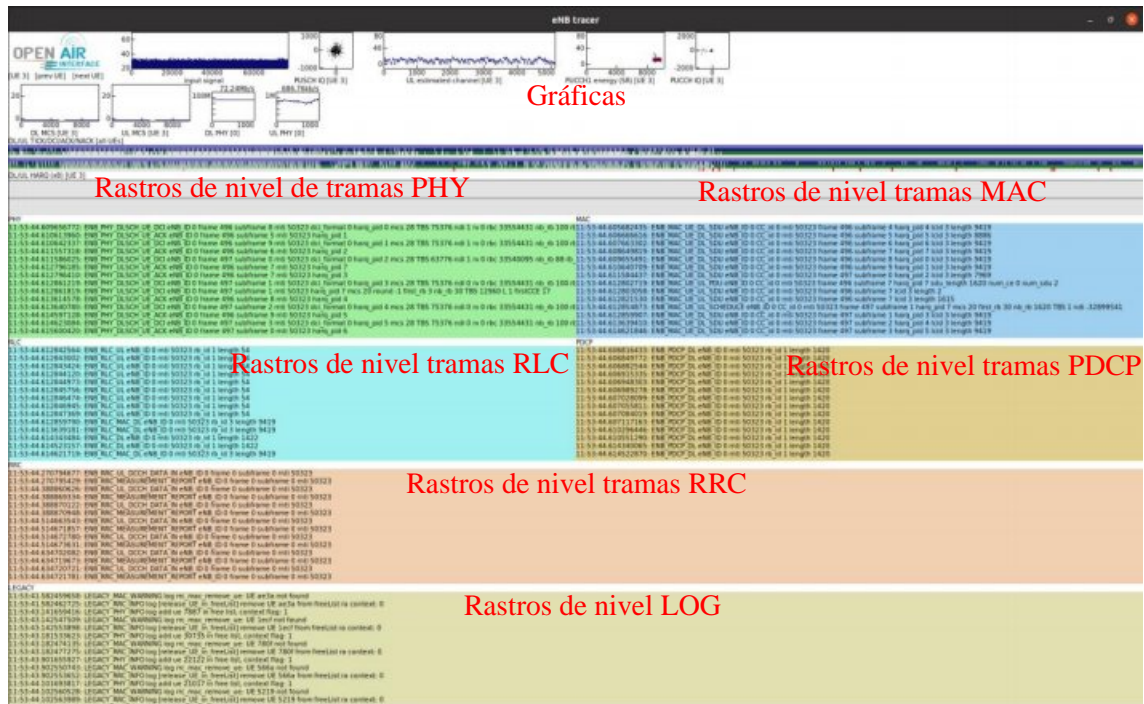


Ilustración 47-4: Herramienta gráfica “T-Tracer” para el eNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

Al ejecutar T Tracer en el gNodeB se abrió una ventana en la cual también se tiene una interfaz gráfica, tal como se muestra en la Ilustración 48-4, pero en este caso cuenta con menos información a comparación que con el eNodeB, mostrando gráficas de las constelaciones de modulación y retardos de canal. Se espera que para futuras actualizaciones se mejore este entorno gráfico aportando más información.

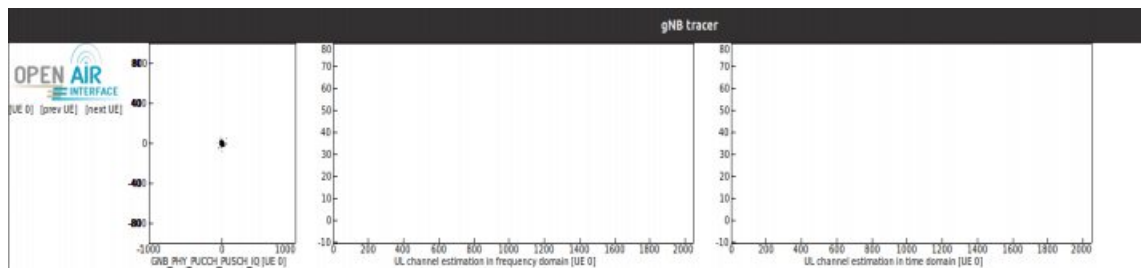


Ilustración 48-4: Herramienta gráfica “T-Tracer” para el gNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

La siguiente herramienta que se usó fue Softscope el cual actúa como un osciloscopio que sirve para realizar un análisis del enlace radio. Las instrucciones para instalar y ejecutar esta herramienta se encuentran en el Anexo D, sección 5.

Al ejecutarlo la herramienta en el eNodeB, se abrió una ventana con una interfaz gráfica, mostrando el comportamiento de la interfaz radio cuando un UE se haya conectado a la red, tal como se muestra en la Ilustración 49-4. Las regiones con las que se cuenta son las siguientes:

- Señal recibida en el dominio del tiempo vs dB
- SRS (Shock response spectrum) en respuesta frecuencial
- Respuesta en frecuencia del canal
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) Log-Likelihood Ratio (LLR)
- Constelaciones PUSCH, entre otros

Al observar las gráficas de LLR y constelaciones de la Ilustración 49-4 se aprecia que se usó una modulación 16 QAM, es decir hay 4 bit por cada símbolo, tendiendo 4 líneas en LLR que representan las secuencias de bits recibidas. Se observan que ambas gráficas que hay dispersión (ruido) con respecto a su punto ideal lo que significa que la calidad del enlace radio no es perfecta.

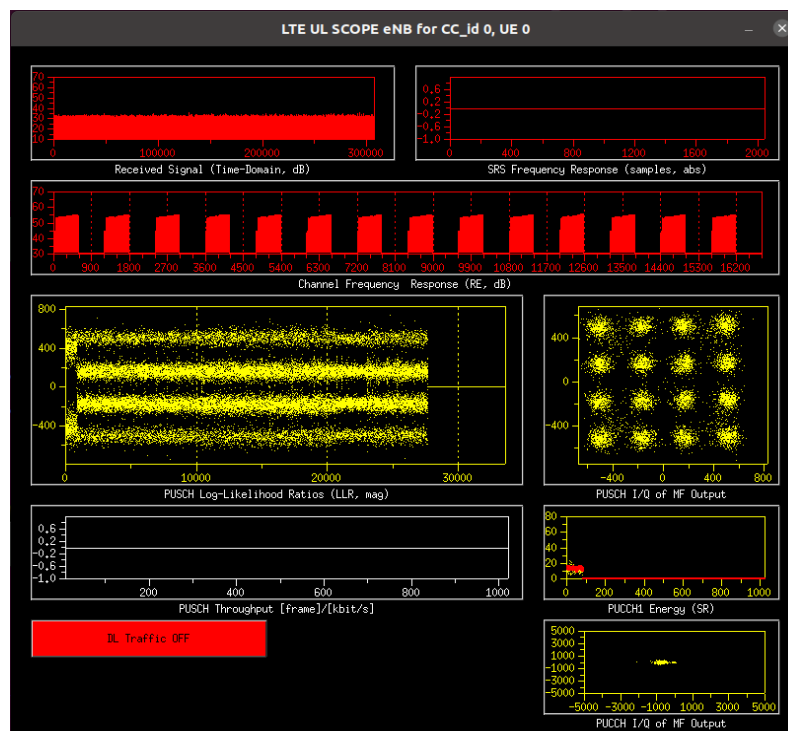


Ilustración 49-4: Herramienta "Soft Scope" para el eNodeB

Realizado por: Pesantez Luis, 2023

CONCLUSIONES

- Para este proyecto de investigación se logró desplegar una red 5G NSA haciendo uso de software de código abierto de Open Air Interface y dispositivos SDR como lo son las USRP's Ettus B210 para el laboratorio de comunicaciones de la FIE. Proveyendo así un entorno didáctico dónde se puede modificar sus parámetros de configuración y que de esta manera poder observar y experimentar con esta tecnología. Cabe mencionar que este trabajo forma parte del Grupo de Investigación de Comunicaciones Inalámbricas GICI, la cual continúa investigando sobre esta tecnología.
- Se realizaron pruebas de cobertura de interiores y se encontró que para LTE se tuvo resultados “buenos” de RSRP con el 61.54% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -100 dBm y -90 dBm. Y Para 5G se tuvo en mayor medida resultados “regulares” con el 36.70% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -110 dBm y -100 dBm, y resultados “malos” con el 49.54% de los datos medidos totales que se encuentran entre el rango de -140 dBm y -110 dBm. En vista a la mala cobertura de la señal se ve que es necesario el uso de un amplificador RF para mejorar este aspecto de la red.
- Se verificó mediante pruebas de latencia los retardos de la red, obteniendo un promedio 29.002 ms de la red LTE y 12.855 ms para 5G, valores que se acercan a los teóricos que son 30 ms y 10 ms respectivamente. En cuanto a la velocidad de transmisión se obtuvieron para LTE velocidades de bajada de 66.5 Mbps y subida de 14.7 Mbps, para la red 5G se obtuvieron valores de bajada de 15.8 Mbps y de subida de 3.89 Mbps. Sin embargo, con pruebas realizadas con las nuevas actualizaciones se lograron obtener velocidades de hasta 125 Mbps en descarga y 7.68 Mbps en subida. En adición un factor importante en cuanto al rendimiento de la red es la capacidad de las USRP's. En este caso se tuvo que realizar un remuestreo a tres cuartos de la señal con el objetivo de poder ejecutar el gNodeB este dispositivo.
- Se pudo comprobar que al implementar una red 5G NSA no es necesario contar con USIM's 5G, fue suficiente contar con USIM's 4G para que el celular reconozca la celda 5G, esto fue útil ya que redujo los costos de implementación de la red, debido no sería necesario adquirir nuevos equipos SIM específicos para 5G.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda instalar una versión de Kernel de baja latencia y a su vez configurar los núcleos del procesador en modo “performance” para evitar retardos en la comunicación especialmente de la parte de acceso a radio.
- Evitar poner en marcha el eNodeB y gNodeB teniendo conectadas ambas USRP's al mismo tiempo. Primero conectar una USRP y poner en marcha el eNodeB, una vez realizado esto conectar la otra USRP y poner en marcha el gNodeB.
- Al momento de apagar el computador no olvidar de detener todos los Dockers que están en marcha de los componentes del EPC y evitar posibles errores o mal funcionamiento de este al iniciar nuevamente Ubuntu.
- Usar el valor de 505 para el MCC, debido a que con este valor el UE pudo reconocer la celda New Radio y conectarse a la red 5G.
- Revisar los repositorios de Open Air Interface para estar al tanto de las nuevas actualizaciones ya que éstas cuentan con nuevas características, corrigen ciertos errores y mejoran el desempeño de la red.
- Implementar el gNodeB en bandas donde se use duplexación FDD ya que en esta implementación de 5G NSA está funcionando en la banda 78 NR con duplexación TDD.
- Implementar la red actual usando dispositivos USRP más actuales con mayor capacidad como lo son los modelos N320 que soportan un ancho de banda de 200MHz y hasta frecuencias de muestreo de 250 MS/s o el modelo X310 que soporta un ancho de banda de 160 MHz y hasta frecuencias de muestreo de 200 MS/s.
- Desplegar nuevamente la red usando amplificadores RF con la finalidad de mejorar la cobertura.
- Implementar el Core 5GC para desplegar una red 5G SA.

BIBLIOGRAFÍA

BERNAL TORRES, César. *Metodología de la investigación* [en línea]. 3ª ed. Bogotá - Colombia: Pearson, 2010. [Consulta: 26 enero 2023]. Disponible en: <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>

DAHLMAN, Erik; et al. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology* [en línea]. Londres - Reino Unido: Elsevier, 2018. [Consulta: 02 noviembre 2022]. Disponible en: <https://dokumen.pub/5g-nr-the-next-generation-wireless-access-technology-0128143231-9780128143230.html>

ERICSSON. *LTE/SAE System Overview* [en línea]. Suecia: Ericsson AB, 2009. [Consulta: 29 octubre 2022]. Disponible en: https://www.academia.edu/35412108/LTE_SAE_System_Overview_LTE_SAE_System_Overview_STUDENT_BOOK_LZT_123_8828_R3A

ETTUS RESEARCH. *VERT2450 Antenna* [en línea]. California - Estados Unidos, 2022. [Consulta: 27 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/>.

ETTUS RESEARCH. *USR P B210 (Board Only)* [en línea]. California - Estados Unidos, 2022. [Consulta: 27 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.

GIL, Celio. “RUP: Metodología en los sistemas y aplicaciones basadas en la web”. *Avances, Investigación en Ingeniería* [en línea], 2008, (Colombia) 1(8), pp. 83-87. [Consulta: 15 enero 2023]. ISSN-e 1794-4953. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6684804>

GITLAB EUROCOM. *Open Air Features* [en línea]. Francia. 2022. [Consulta: 22 octubre 2022]. Disponible en: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/wikis/OpenAirFeatures>.

GITLAB EUROCOM. *enb* [en línea]. Francia. 2018. [Consulta: 26 diciembre 2022]. Disponible en: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/wikis/T/enb>

GSMA. *Road to 5G: Introduction and Migration* [en línea]. Londres – Reino Unido: GSMA, 2018. [Consulta: 05 noviembre 2022]. Disponible en:

https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf

IPv6 GO, Arquitectura de una red LTE [en línea]. 2014. [Consulta: 16 octubre 2022]. Disponible en: http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php

JARAMILLO, Miguel. Implementación de Red Móvil con Tecnología 4G LTE [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en electricidad y Computación, Guayaquil – Ecuador. 2015. pp.xx-xx. [Consulta: 19 noviembre 2022]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/40035/D-84890.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

KENT ELECTRONICS. *Printed Circuit Board Antennas - Log Periodic* [en línea] Texas - Estados Unidos, 2022. [Consulta: 22 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.wa5vjb.com/products1.html>.

MARTE, Tomas. *¿Qué es Open RAN?* [en línea] Republica Dominicana, 2022. [Consulta: 16 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.tomasmarte.com/2022/02/12/que-es-open-ran/>

NUÑEZ, Camilo. “Protocolos de usuario en E-UTRAN”. *Telemática Journal* [en línea], 2013, (Cuba) 12(3), pp. 32-40. [Consulta: 20 noviembre 2023]. ISSN 1729-3804. Disponible en: <https://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/view/117>

OPEN AIR INTERFACE. *About the OpenAirInterface Software Alliance* [en línea] Francia, 2022. [Consulta: 20 octubre 2022]. Disponible en: <https://openairinterface.org/about-us/>

OPEN AIR INTERFACE. *OAI 5G RAN PROJECT GROUP* [en línea]. Francia, 2022. [Consulta: 20 octubre 2022]. Disponible en: <https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/>

PEINADO, Salvador. Despliegue de prototipo de red LTE con OpenAirInterface y Nextepc: Extensión de red y ampliación de funcionalidades [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Departamento de Ingeniería Temática y Electrónica, Madrid – España. 2019. pp.xx-xx. [Consulta: 11 noviembre 2022]. Disponible en: <https://oa.upm.es/63409/>

PÉREZ, F. 2010. *Redes móviles terrestres: 4g* [en línea]. Madrid - España: ICAI - Universidad Pontificia Comilla, 2010. [Consulta: 11 noviembre 2022]. Disponible en: https://www.academia.edu/15706294/REDES_M%C3%93VILES_TERRESTRES_4G

PICAZO, Pablo. Deployment of 5G Non-Standalone networks based on OpenAirInterface [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado). Universidad Politécnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Valencia – España. 2021. [Consulta: 12 diciembre 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/165142/Picazo%20-%20Despliegue%20de%20redes%205G%20Non-Standaone%20basadas%20en%20OpenAirInterface..pdf?sequence=1>

RIAÑO, Rubén. Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Politécnica de València. Valencia – España. 2020. [Consulta: 12 diciembre 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/152354/Ria%C3%B1o%20-%20Implementaci%C3%B3n%20de%20un%20prototipo%20de%20estaci%C3%B3n%20base%205G%20mediante%20la%20transmisi%C3%B3n%20con%20USRPs.pdf?sequence=1>

MILER DAEN, S. “Tipos de investigación científica”. *Actualización Clínica Investiga* [En línea], 2011, (Bolivia) 12, pp.621-624. [Consulta: 16 enero 2023]. ISSN 2304-3768. Disponible en: http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-37682011000900011&lng=pt&nrm=iso

SMARTGSM. *Samsung Galaxy A52s 5G* [en línea]. Argentina, 2022. [Consulta: 15 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.smart-gsm.com/moviles/samsung-galaxy-a52s-5g>.

SADIKU, M.; & AKUJUOBI, C. “Software-defined radio: a brief overview”. *IEEE Potentials* [en línea], 2004. 23(4), pp.14-15. [Consulta: 10 diciembre 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/3227747_Software-defined_radio_A_brief_overview

Software Radio Systems. *What we do* [en línea]. Irlanda. 2021. [Consulta: 21 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.srs.io/technology-what-we-do/>

TAMAYO, M. *El proceso de la investigación científica* [en línea]. 4ª ed, México: Limusa, 2004. [Consulta: 06 diciembre 2022]. ISBN 968 18-5872-7. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227860/El_proceso_de_la_investigaci_n_cient_fica_Mario_Tamayo.pdf

UIT-R M.2083-0 2015. *Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante.*

VIVAS, Adrián., & VALLEJO, Luis. Diseño de un laboratorio de comunicaciones móviles basado en la plataforma OpenAirInterface [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayán – Colombia. 2019. [Consulta: 06 noviembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/handle/123456789/1639>

XATAKA. *¿Qué significa que existan dos tipos de 5G? Diferencias y compatibilidades entre 5G NSA y 5G SA* [en línea]. España. 2019. [Consulta: 08 diciembre 2022]. Disponible en: <https://www.xataka.com/moviles/que-significa-que-existan-dos-tipos-5g-diferencias-compatibilidades-5g-nsa-5g-sa>

XUEYAN, Xiang. Estudio de plataformas SDR para LTE-5G (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. España. 2018. [Consulta: 28 noviembre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14603/410303.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

ANEXO A: RED 5G NSA EN LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA FIE



ANEXO B: PRERREQUISITOS DE INSTALACIÓN

Instalación de Kernel de baja latencia

La instalación de kernel de baja latencia es necesario para obtener una latencia baja en el flujo de la información, para ello se ejecuta el siguiente comando:

```
$ sudo apt-get install linux-image-lowlatency-hwe-20.04 linux-headers-lowlatency-hwe-20.04
```

Una vez instalado el kernel de baja latencia reiniciar el computador. Para comprobar la instalación puede escribir el comando “uname -a”

Instalación de Git y Subversion

Para poder clonar los repositorios y tener un sistema de control de versiones es necesario instalar los paquetes Git y Subversion, para ello ejecutar el siguiente comando:

```
$ sudo apt-get update  
$ sudo apt-get install subversion git
```

Configuración del modo de frecuencia de CPU

Para que los núcleos del procesador funcionen de manera óptima es necesario configurarlos en el modo “performance”, para esto se instala un paquete necesario para poder realizar esta configuración de manera permanente:

```
$ sudo apt-get install cpufrequtils  
$ sudo nano /etc/default/cpufrequtils
```

En dicho archivo vacío escribir la siguiente línea y guardar: GOVERNOR="performance". En adición se debe deshabilitar el modo bajo demanda del procesador.

```
$ sudo systemctl disable ondemand
```

Por último, reiniciar este servicio y actualizar el grub para que se apliquen los cambios:

```
$ sudo /etc/init.d/cpufrequtils restart
```



```
$ sudo update-grub
```

Para comprobar que se los núcleos del CPU están en modo “performance” ejecutar:

```
$ cat /sys/devices/system/cpu/cpu*/cpufreq/scaling_governor
```

ANEXO C: GESTIÓN DE OAI-EPC

1. Prerrequisitos

Los componentes del EPC funcionan a partir de contenedores Docker, para lo cual es necesario instalar los paquetes necesarios de Docker para poder gestionar las imágenes y contenedores.

Instalación de imágenes Docker

Como primer paso es necesario realizar una actualización del sistema:

```
$ sudo apt update
$ sudo apt upgrade
```

Posteriormente realizar la instalación de paquetes necesarios:

```
$ sudo apt-get install curl apt-transport-https ca-certificates software-properties-common
```

Luego añadir los repositorios de Docker:

```
$ curl -fsSL https://download.docker.com/linux/ubuntu/gpg | sudo apt-key add -
$ sudo add-apt-repository "deb [arch=amd64] https://download.docker.com/linux/ubuntu
$(lsb_release -cs) stable"
$ sudo apt update
```

Llegado a este punto realizar la instalación de Docker en Ubuntu.

```
$ sudo apt install docker-ce
```

Ahora se verifica si la instalación fue correcta, para ello ejecutar el siguiente comando y verificar que estén instalados los siguientes dockers:

```
$ dpkg --get-selections | grep docker

ii docker-ce                    5:20.10.18~3-0~ubuntu-bionic          amd64
   Docker: the open-source application container engine
ii docker-ce-cli                 5:20.10.18~3-0~ubuntu-bionic          amd64
   Docker CLI: the open-source application container engine
```

ii	docker-ce-rootless-extras	5:20.10.18~3-0~ubuntu-bionic	amd64
	Rootless support for Docker.		
ii	docker-scan-plugin	0.17.0~ubuntu-bionic	amd64
	Docker scan cli plugin.		

Instalación de Docker Compose

Realizarla en el caso de que en la anterior lista de contenedores no se haya instalado Docker Compose. Esta herramienta nos permite gestionar múltiples contenedores Docker. Primero se realiza la actualización del índice del paquete para instalar la última versión de Docker Compose:

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install docker-compose-plugin
```

Se verifica que Docker Compose esté instalado correctamente comprobando la versión, ejecutar el siguiente comando:

```
$ docker compose version
```

2. Instalación del EPC de OAI

Una vez instalado los paquetes e imágenes de Docker y Docker Compose ya se puede obtener las imágenes que conforman el EPC desde Docker Hub, el cual es un repositorio de imágenes de contenedores.

Instalación de imágenes base

Ubuntu necesita 3 imágenes base: “ubuntu:bionic” SO sobre el que funcionan las imágenes en el caso que se prefiera construirlas manualmente, “cassandra:2.1” la cual es la base de datos del sistema y “redis:6.0.5” el cual es un sistema de almacenamiento claves-valores en memoria. Para obtenerlos ejecutar los siguientes comandos:

```
$ docker pull ubuntu:bionic
$ docker pull cassandra:2.1
$ docker pull redis:6.0.5
```

Descarga de imágenes de los componentes del EPC

En primer lugar, se realiza la clonación del repositorio del EPC de Open Air Interface, se elige la última versión disponible y se sincronizan todos los submódulos Git que contenga este repositorio:

```
$ git clone --branch v1.2.0 https://github.com/OPENAIRINTERFACE/openair-epc-fed.git
$ cd openair-epc-fed
$ git checkout -f v1.2.0
$ ./scripts/syncComponents.sh
```

A continuación, se obtienen las imágenes de los componentes del EPC tales como HSS, MME, SPGW el cual tiene componentes separados del plano de control (SPGWC) y el plano de usuario (SPGWU). La terminación “latest” permite obtener la última versión de dichas imágenes de Docker Hub. En los casos de que las imágenes de Docker Hub no estén actualizadas conforme a los repositorios de GitHub es conveniente construir las imágenes por cuenta propia.

```
$ docker pull rdefosseoi/oai-hss:latest
$ docker pull rdefosseoi/oai-spgwc:latest
$ docker pull rdefosseoi/oai-spgwu-tiny:latest
$ docker pull rdefosseoi/magma-mme:latest
```

Es necesario etiquetar nuevamente las imágenes obtenidas para que no haya inconvenientes al momento de su ejecución.

```
$ docker image tag rdefosseoi/oai-hss:latest oai-hss:production
$ docker image tag rdefosseoi/oai-spgwc:latest oai-spgwc:production
$ docker image tag rdefosseoi/oai-spgwu-tiny:latest oai-spgwu-tiny:production
$ docker image tag rdefosseoi/magma-mme:latest magma-mme:master
```

3. Configuración del EPC

Dentro del directorio “openair-epc-fed/docker-compose/magma-mme-demo” se encuentran diferentes archivos de configuración del componente MME.

En primer lugar, se abre el archivo “mme.conf” para poder modificar los parámetros MCC, MNC, TAC con los siguientes valores:

- MCC: 505
- MNC: 01
- TAC: 1

Posteriormente abrir el archivo “docker-compose.yml”, donde también se debe configurar los parámetros MCC, MNC, TAC y además parámetros de la base de datos de HSS la cual almacena los datos del usuario que se quiere conectar a la red. Los parámetros importantes configurados son los siguientes:

- K: 0001020304050607080900AB0C0D0E0F
- OP: 0001020304050607080900AB0C0D0E0F
- IMSI: 505010000000022

Estos mismos parámetros deben ser configurados al momento de programar el chip para el COTS UE.

El APN y el Pool de direcciones IP para el UE está configurado de manera predeterminada de la siguiente manera:

- APN: oai.ipv4
- IP: 12.1.1.0/24

4. Ejecución del EPC

Inicializar Cassandra DB

En primer lugar, se debe iniciar la base de datos Cassandra, para ello dirigirse al directorio:

```
$ cd docker-compose/magma-mme-demo
```

Y luego ejecutar el siguiente comando para inicializar la base de datos:

```
$ docker compose up -d db_init
```

[+] Running 4/4		
⌘ Network demo-oai-public-net	Created	0.0s
⌘ Network demo-oai-private-net	Created	0.0s
⌘ Container demo-cassandra	Started	0.4s
⌘ Container demo-db-init	Started	0.7s

Se tiene que esperar aproximadamente 10 segundos hasta que tengamos un mensaje “OK” el cual confirma la puesta en marcha de la base de datos Cassandra. Para verificar esto escribir el siguiente comando:

```

$ docker logs demo-db-init --follow

Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
Connection error: ('Unable to connect to any servers', {'192.168.68.130': error(111, "Tried connecting to [('192.168.68.130', 9042)]. Last error: Connection refused")})
OK

```

Inicializar HSS, MME, SPGWC y SPGWU

Ejecutar el siguiente comando para inicializar los demás componentes del EPC:

```

$ docker compose up -d oai_spgwu

[+] Running 6/6
⌘ Container demo-redis Started 0.6s
⌘ Container demo-cassandra Running 0.0s

```

⌘ Container demo-oai-hss	Started	0.6s
⌘ Container demo-magma-mme	Started	0.8s
⌘ Container demo-oai-spgwc	Started	1.0s
⌘ Container demo-oai-spgwu-tiny	Started	1.3s

Comandos para el seguimiento del log de HSS, MME, SPGWC y SPGWU.

Los archivos “log” son de utilidad ya que nos muestran los procesos y mensajes de las tareas que realizan los diferentes componentes del EPC.

```
$ docker logs demo-oai-hss --follow
$ docker exec -it demo-magma-mme /bin/bash -c "tail -f /var/log/mme.log"
$ docker logs demo-oai-spgwc --follow
$ docker logs demo-oai-spgwu-tiny --follow
```

5. Detener la ejecución los componentes del EPC

Es importante que una cada vez que se apague el computador se detenga la ejecución del EPC, con esto se evita errores de comunicación la próxima vez que se ponga en marcha el EPC. Para ello es necesario dirigirse al siguiente directorio donde se encuentra el archivo Docker Compose:

```
$ cd docker-compose/magma-mme-demo
```

Luego ejecutar el siguiente comando:

```
$ docker compose down

[+] Running 9/9
⌘ Container demo-oai-spgwu-tiny   Removed          10.2s
⌘ Container demo-db-init         Removed          0.0s
⌘ Container demo-oai-spgwc       Removed          0.4s
⌘ Container demo-magma-mme       Removed          10.3s
⌘ Container demo-redis           Removed          0.8s
```

⌘ Container demo-oai-hss	Removed	0.5s
⌘ Container demo-cassandra	Removed	2.6s
⌘ Network demo-oai-private-net	Removed	0.1s
⌘ Network demo-oai-public-net	Removed	0.2s

ANEXO D: GESTIÓN DE OAI-RAN

1. Instalación de los controladores UHD

Para instalar los controladores necesarios para el funcionamiento de la USRP es oportuno agregar los repositorios de Ettus Research para posteriormente instalar la librerías e imágenes necesarias para la instalación de UHD.

```
$ apt-get update
$ apt-get upgrade
$ sudo add-apt-repository ppa:ettusresearch/uhd
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install libuhd-dev libuhd4.4.0 uhd-host
$ uhd_images_downloader
```

Con los siguientes comandos se puede comprobar si algún dispositivo USRP se encuentra conectado al computador:

```
$ uhd_find_devices
$ uhd_usrp_probe
```

2. Instalación de la RAN de OAI

Primero se debe clonar el repositorio de Open Air Interface 5G, ubicarse en el directorio donde se clonó y seleccionar la rama de desarrollador:

```
$ git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g.git
$ cd openairinterface5g/
$ git checkout develop
```

Luego se procede a construir los ejecutables del eNodeB y gNode:

```
$ source oaienv
$ cd cmake_targets/
$ sudo ./build_oai -I
$ sudo ./build_oai -w USRP --eNB --gNB
```

- La opción **-I** instala software adicional requerido y todas las librerías requeridas para su funcionamiento.
- La opción **-w** es usado para escoger la interfaz radio e instalar los requisitos de software del dispositivo radio a usar, en este caso la USRP B210.
- **--eNB** Construye las librerías para todas las funciones del eNB y crea el ejecutable ltesoftmodem
- **--gNB**: Construye las librerías para todas las funciones del gNB y crea el ejecutable nrssoftmodem

Consultar la opción **-h**, donde se despliega una lista de todas las opciones que se pueden usar, incluyendo aquellas para la construcción de lte UE y nr UE.

3. Configuración de la RAN

Para que el eNodeB y gNodeB puedan comunicarse sin problemas a los contenedores MME y SPGWU es necesario crear dos interfaces virtuales para asignarlas a estos dos componentes de la RAN ya que el usar las interfaces de Loopback no permite una comunicación bidireccional entre la red central y la parte radio debido al uso de contenedores.

Se crea una interfaz virtual para el eNodeB llamada “eth0” con una dirección IP: 10.0.0.30/24. Para esto ejecutar los siguientes comandos:

```
$ sudo ip tuntap add name eth0 mode tun
$ sudo ip addr add 10.0.0.30/24 dev eth0
$ sudo ip link set eth0 up
```

Posteriormente se crea otra interfaz virtual para el gNodeB llamada “eth1” con una dirección IP: 10.0.0.40/24. Para esto ejecutamos los siguientes comandos:

```
$ sudo ip tuntap add name eth1 mode tun
$ sudo ip addr add 10.0.0.40/24 dev eth1
$ sudo ip link set eth1 up
```

Dichas interfaces creadas se eliminarán una vez reiniciado el computador.

Para configurar los parámetros del eNodeB y gNodeB se pueden editar los archivos que se encuentran en el directorio “openairinterface5g-develop/ci-scripts/conf_files?”. El archivo

completo de configuración del eNodeB y gNodeB usado para este escenario se encuentra en el Anexo D.

Los parámetros importantes por configurar son: MCC, MNC, TAC, bandas de frecuencia, duplexación, bloque de recursos, dirección IP del MME, direcciones IP para las interfaces del eNB y gNB.

Se crea una carpeta llamada “conf” en el directorio home para colocar los archivos de configuración editados, llamándolos “enb.conf” y “gnb.conf” para posteriormente poder inicializarlos de manera más práctica y rápida.

Para este escenario NSA es importante configurar la red con los siguientes valores para lograr que el COST UE pueda conectarse a la celda 5G:

- MCC = 505
- MNC = 01
- TAC = 01

Las direcciones IP se detallan a continuación:

- IP MME = 192.168.61.149
- IP ENB = 10.0.0.30
- IP GNB = 10.0.0.40

4. Ejecución de la RAN

Inicialización del eNodeB

En una nueva ventana, únicamente conectada una USRP en un puerto USB 3.0 ejecutar los siguientes comandos (reemplazar “tony” con el nombre de su equipo):

```
$ cd openairinterface5g/cmake_targets/ran_build/build
$ sudo ./lte-softmodem -O /home/tony/conf/enb.conf
```

“enb.conf” es el archivo de configuración para el eNB, revisar el Anexo D.

Inicialización del gNB

Conectada otra USRP en otro puerto USB 3.0 ejecutar los siguientes comandos(reemplazar “tony” con el nombre de su equipo):

```
$ cd openairinterface5g/cmake_targets/ran_build/build
$ sudo ./nr-softmodem -O /home/tony/conf/gnb.conf -E
```

“gnb.conf” es el archivo de configuración para el gNB, revisar el Anexo D.

5. Herramientas de monitoreo de Open Air Interface 5G

5.1. T Tracer

Para poder utilizar esta herramienta es necesario instalar previamente un paquete adicional y posteriormente generar los archivos ejecutables, para ello ejecutar los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get install libxft-dev
$ cd openairinterface5g/common/Utils/T/tracer
$ make
```

Esta herramienta se la puede usar de dos maneras, la primera es por medio de una interfaz gráfica que proporciona OpenAirInterface y la segunda es capturar los paquetes del enlace radio para luego presentarlos en Wireshark.

5.2. Interfaz gráfica

Para usar la interfaz gráfica en primer lugar se debe añadir “--T_stdout 0” a la línea de comandos de inicialización del componente que se desea monitorear.

Para el monitoreo del eNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./lte-softmodem -O /home/tony/conf/enb.conf --T_stdout 0
```

Para el monitoreo del gNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./nr-softmodem -O /home/tony/conf/gnb.conf -E --T_stdout 0
```

Con esto el eNodeB o gNodeB se encuentran a la espera de se ejecute algún Tracer para comenzar su ejecución.

Para ejecutar el Tracer se abre otro terminal ubicándose en el directorio de la herramienta Tracer:

```
$ cd openairinterface5g/common/Utils/T/tracer
```

Y luego se escribe el siguiente comando:

```
$ ./enb -d ../T_messages.txt
```

Se muestra una interfaz gráfica mostrando información en tiempo real acerca de componente elegido, sea eNB o gNB. Para finalizar la monitorización basta con presionar las teclas “Control + C”.

5.3. Captura de datos – Wireshark

Wireshark es una herramienta que permite la captura y análisis de tráfico. Para capturar el tráfico que se trasmite dentro del EPC o de la RAN basta con instalar solo esa herramienta, para ello seguir los siguientes comandos para instalar Wireshark:

```
$ sudo apt update  
$ sudo apt install wireshark
```

Si se desea capturar el tráfico de la interface radio Uu se debe hacerlo ejecutando un Tracer. Para ejecutar el Tracer en el eNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./lte-softmodem -O /home/tony/conf/enb.conf --T_stdout 0
```

Para ejecutar el Tracer en el gNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./nr-softmodem -O /home/tony/conf/gnb.conf -E --T_stdout 0
```

Una vez inicializado el Tracer ejecutar los siguientes comandos, para poder capturar el tráfico de la interface radio Uu, extraer dicha información y mostrarlo finalmente en Wireshark:

```
$ ./record -d ../T_messages.txt -o captura.raw -on WIRESHARK
```

```
$ ./extract_config -i captura.raw > extracted_T_messages.txt
$ ./macpdu2wireshark -d extracted_T_messages.txt -i captura.raw
```

5.4. Softscope

Para usar esa herramienta se debe construir su ejecutable:

```
$ cd openairinterface5g/
$ source oaienv
$ cd cmake_targets/
$ sudo ./build_oai --build-libs all
```

Para poder inicializar el eNB o gNB con Softscope se debe añadir “-d” a la línea de comandos de inicialización del componente que desea monitorear.

Para el monitoreo del eNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./lte-softmodem -O /home/tony/conf/enb.conf -d
```

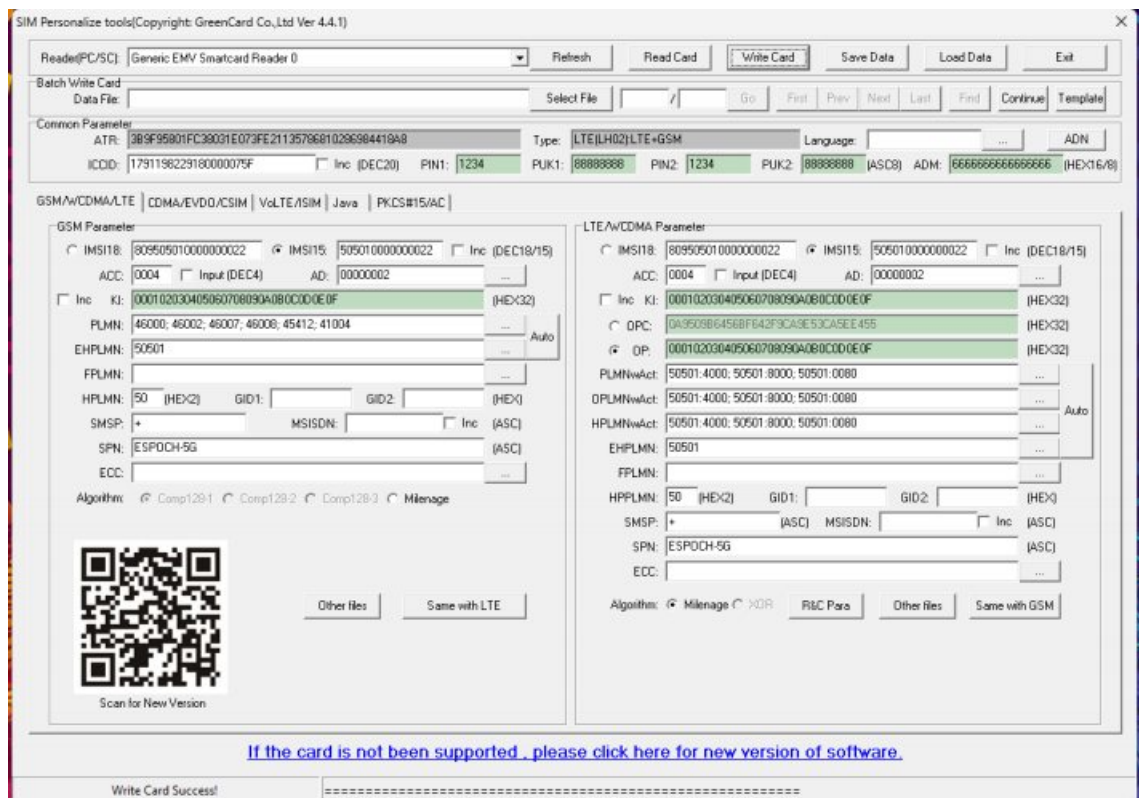
Para el monitoreo del gNB ejecutar el comando:

```
$ sudo ./nr-softmodem -O /home/tony/conf/gnb.conf -E -d
```

ANEXO E: PROGRAMACIÓN DEL SIM

Para poder programar el SIM se hizo uso del programa gratuito para Windows llamado “GRSIMWrite” que para la presente fecha se encuentra disponible para descargarla en su versión 4.4.1.

En la imagen a continuación se puede observar la interfaz gráfica de GRSIMWrite 4.4.1 con los parámetros que se usó para programar el SIM usado para la red 5G NSA.



Es importante verificar que el programa reconozca el lector/escritor de tarjetas SIM. Una vez ingresado todos los parámetros necesarios se da clic en “Write Card” para programar la SIM.

ANEXO F: ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN

Configuración del eNB de OAI

```
Active_eNBs = ( "eNB-Eurecom-LTEBox");
# Asn1_verbosity, choice in: none, info, annoying
Asn1_verbosity = "none";

eNBs =
(
{
////////// Identification parameters:
eNB_ID      = 0xe00;

cell_type   = "CELL_MACRO_ENB";

eNB_name    = "eNB-Eurecom-LTEBox";

// Tracking area code, 0x0000 and 0xffffe are reserved values
tracking_area_code = 1;
plmn_list = ( { mcc = 505; mnc = 01; mnc_length = 2; } );

tr_s_preference      = "local_mac"

////////// Physical parameters:

component_carriers = (
{
node_function          = "3GPP_eNODEB";
node_timing            = "synch_to_ext_device";
node_synch_ref         = 0;
frame_type             = "FDD";
tdd_config             = 3;
tdd_config_s           = 0;
prefix_type            = "NORMAL";
extra_band             = 7;
downlink_frequency     = 2680000000L;
uplink_frequency_offset = -120000000;
Nid_cell               = 0;
N_RB_DL               = 100;
Nid_cell_mbsfn        = 0;
nb_antenna_ports      = 1;
nb_antennas_tx        = 1;
nb_antennas_rx        = 1;
tx_gain               = 90;
rx_gain               = 125;
pbch_repetition       = "FALSE";
prach_root            = 0;
prach_config_index    = 0;
prach_high_speed      = "DISABLE";
prach_zero_correlation = 1;
prach_freq_offset     = 2;
pucch_delta_shift     = 1;
pucch_nRB_CQI         = 0;
pucch_nCS_AN          = 0;
pucch_n1_AN           = 0;
pdsch_referenceSignalPower = -29;
pdsch_p_b             = 0;
pusch_n_SB            = 1;
}
```



```

pusch_enable64QAM                = "DISABLE";
pusch_hoppingMode                 = "interSubFrame";
pusch_hoppingOffset              = 0;
pusch_groupHoppingEnabled        = "ENABLE";
pusch_groupAssignment            = 0;
pusch_sequenceHoppingEnabled    = "DISABLE";
pusch_nDMRS1                     = 1;
phich_duration                   = "NORMAL";
phich_resource                    = "ONESIXTH";
srs_enable                       = "DISABLE";
/* srs_BandwidthConfig            = ;
srs_SubframeConfig              = ;
srs_ackNackST                   = ;
srs_MaxUpPts                     = ;*/

pusch_p0_Nominal                 = -96;
pusch_alpha                      = "AL1";
pucch_p0_Nominal                 = -104;
msg3_delta_Preamble             = 6;
pucch_deltaF_Format1            = "deltaF2";
pucch_deltaF_Format1b          = "deltaF3";
pucch_deltaF_Format2            = "deltaF0";
pucch_deltaF_Format2a           = "deltaF0";
pucch_deltaF_Format2b           = "deltaF0";

rach_numberOfRA_Preambles       = 64;
rach_preamblesGroupAConfig      = "DISABLE";
/*
rach_sizeOfRA_PreamblesGroupA   = ;
rach_messageSizeGroupA          = ;
rach_messagePowerOffsetGroupB   = ;
*/
rach_powerRampingStep           = 4;
rach_preambleInitialReceivedTargetPower = -108;
rach_preambleTransMax           = 10;
rach_raResponseWindowSize       = 10;
rach_macContentionResolutionTimer = 48;
rach_maxHARQ_Msg3Tx             = 4;

pcch_default_PagingCycle        = 128;
pcch_nB                         = "oneT";
bcch_modificationPeriodCoeff    = 2;
ue_TimersAndConstants_t300      = 1000;
ue_TimersAndConstants_t301      = 1000;
ue_TimersAndConstants_t310      = 1000;
ue_TimersAndConstants_t311      = 10000;
ue_TimersAndConstants_n310      = 20;
ue_TimersAndConstants_n311      = 1;
ue_TransmissionMode              = 1;

//Parameters for SIB18
rxPool_sc_CP_Len                 = "normal";
rxPool_sc_Period                 = "sf40";
rxPool_data_CP_Len               = "normal";
rxPool_ResourceConfig_prb_Num    = 20;
rxPool_ResourceConfig_prb_Start  = 5;
rxPool_ResourceConfig_prb_End    = 44;
rxPool_ResourceConfig_offsetIndicator_present = "prSmall";
rxPool_ResourceConfig_offsetIndicator_choice = 0;
rxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_present = "prBs40";
rxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_buf =
"000000000000000000000000";
rxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_size = 5;
rxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_bits_unused = 0;
/* rxPool_dataHoppingConfig_hoppingParameter = 0;
rxPool_dataHoppingConfig_numSubbands = "ns1";

```

```

rxPool_dataHoppingConfig_rbOffset = 0;
rxPool_commTxResourceUC-ReqAllowed = "TRUE";
*/

// Parameters for SIB19
discRxPool_cp_Len = "normal"
discRxPool_discPeriod = "rf32"
discRxPool_numRetx = 1;
discRxPool_numRepetition = 2;
discRxPool_ResourceConfig_prb_Num = 5;
discRxPool_ResourceConfig_prb_Start = 3;
discRxPool_ResourceConfig_prb_End = 21;
discRxPool_ResourceConfig_offsetIndicator_present = "prSmall";
discRxPool_ResourceConfig_offsetIndicator_choice = 0;
discRxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_present = "prBs40";
discRxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_buf = "f0ffffffff";
discRxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_size = 5;
discRxPool_ResourceConfig_subframeBitmap_choice_bs_bits_unused = 0;

}
);
srb1_parameters :
{
# timer_poll_retransmit = (ms) [5, 10, 15, 20,... 250, 300, 350, ... 500]
timer_poll_retransmit = 80;

# timer_reordering = (ms) [0,5, ... 100, 110, 120, ... ,200]
timer_reordering = 35;

# timer_reordering = (ms) [0,5, ... 250, 300, 350, ... ,500]
timer_status_prohibit = 0;

# poll_pdu = [4, 8, 16, 32 , 64, 128, 256, infinity(>10000)]
poll_pdu = 4;

# poll_byte = (kB)
[25,50,75,100,125,250,375,500,750,1000,1250,1500,2000,3000,infinity(>10000)]
poll_byte = 99999;

# max_retx_threshold = [1, 2, 3, 4 , 6, 8, 16, 32]
max_retx_threshold = 4;
}

# ----- SCTP definitions
SCTP :
{
# Number of streams to use in input/output
SCTP_INSTREAMS = 2;
SCTP_OUTSTREAMS = 2;
};
////////// MME parameters:
mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.168.61.149";
ipv6 = "192:168:30::17";
port = 36412 ;
active = "yes";
preference = "ipv4";
}
);

enable_measurement_reports = "no";
//X2
enable_x2 = "yes";
t_reloc_prep = 1000; /* unit: millisecond */
tx2_reloc_overall = 2000; /* unit: millisecond */
t_dc_prep = 1000; /* unit: millisecond */
t_dc_overall = 2000; /* unit: millisecond */

```

```

NETWORK_INTERFACES :
{
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME           = "eth0";
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME            = "10.0.0.30";
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U              = "eth0";
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U                = "10.0.0.30";
    ENB_PORT_FOR_S1U                        = 2152; # Spec 2152
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_X2C                = "10.0.0.30";
    ENB_PORT_FOR_X2C                        = 36422; # Spec 36422
};
}
);

MACRLCs = (
{
    num_cc = 1;
    tr_s_preference = "local_L1";
    tr_n_preference = "local_RRC";
    phy_test_mode = 0;
    puSch10xSnr     = 160;
    puCch10xSnr    = 160;
}
);

L1s = (
{
    num_cc = 1;
    tr_n_preference = "local_mac";
}
);

RUs = (
{
    local_rf       = "yes"
    nb_tx          = 1
    nb_rx          = 1
    att_tx         = 0
    att_rx         = 0;
    bands          = [7];
    max_pdschReferenceSignalPower = -27;
    max_rxgain     = 115;
    eNB_instances = [0];
}
);

THREAD_STRUCT = (
{
    #three config for level of parallelism "PARALLEL_SINGLE_THREAD",
    "PARALLEL_RU_L1_SPLIT", or "PARALLEL_RU_L1_TRX_SPLIT"
    parallel_config = "PARALLEL_SINGLE_THREAD";
    #two option for worker "WORKER_DISABLE" or "WORKER_ENABLE"
    worker_config   = "WORKER_ENABLE";
}
);

log_config :
{
    global_log_level = "info";
    hw_log_level     = "info";
    phy_log_level    = "info";
    mac_log_level    = "info";
    rlc_log_level    = "info";
    pdcp_log_level   = "info";
    rrc_log_level    = "info";
};

```

Configuración del gNB de OAI

```
Active_gNBs = ( "gNB-Eurecom-5GNRBox");
# Asn1_verbosity, choice in: none, info, annoying
Asn1_verbosity = "none";
gNBs =
(
{
////////// Identification parameters:
gNB_ID      = 0xe00;
cell_type   = "CELL_MACRO_GNB";
gNB_name    = "gNB-Eurecom-5GNRBox";

// Tracking area code, 0x0000 and 0xffffe are reserved values
tracking_area_code = 1;
plmn_list = ({mcc = 505; mnc = 01; mnc_length = 2;});

tr_s_preference      = "local_mac"

////////// Physical parameters:

servingCellConfigCommon = (
{
#spCellConfigCommon

    physCellId                = 0;

# downlinkConfigCommon
#frequencyInfoDL
    # this is 3600 MHz + 84 PRBs@30kHz SCS (same as initial BWP)
    absoluteFrequencySSB      = 641272;
//641032; #641968; 641968=start of ssb at 3600MHz + 82 RBs 641032=center of
SSB at center of cell
    dl_frequencyBand          = 78;
    # this is 3600 MHz
    dl_absoluteFrequencyPointA = 640000;
    #scs-SpecificCarrierList
    dl_offstToCarrier          = 0;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
    dl_subcarrierSpacing      = 1;
    dl_carrierBandwidth       = 106;
#initialDownlinkBWP
#genericParameters
    # this is RBstart=84,L=13 (275*(L-1))+RBstart
    initialDLBWPlocationAndBandwidth =
6368;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
    initialDLBWPsubcarrierSpacing = 1;
#pdccch-ConfigCommon
    initialDLBWPcontrolResourceSetZero = 0;
    initialDLBWPsearchSpaceZero      = 0;

#uplinkConfigCommon
#frequencyInfoUL
    ul_frequencyBand          = 78;
    #scs-SpecificCarrierList
    ul_offstToCarrier          = 0;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
    ul_subcarrierSpacing      = 1;
    ul_carrierBandwidth       = 106;
    pMax                      = 20;
#initialUplinkBWP
#genericParameters
```

```

        initialULBWPlocationAndBandwidth =
6368;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
        initialULBWPsubcarrierSpacing = 1;
#rach-ConfigCommon
#rach-ConfigGeneric
        prach_ConfigurationIndex = 98;
#prach_msg1_FDM
#0 = one, 1=two, 2=four, 3=eight
        prach_msg1_FDM = 0;
        prach_msg1_FrequencyStart = 0;
        zeroCorrelationZoneConfig = 13;
        preambleReceivedTargetPower = -100;
#preambleTransMax (0..10) = (3,4,5,6,7,8,10,20,50,100,200)
        preambleTransMax = 6;
#powerRampingStep
# 0=dB0,1=dB2,2=dB4,3=dB6
        powerRampingStep = 1;
#ra_ReponseWindow
#1,2,4,8,10,20,40,80
        ra_ResponseWindow = 5;
#ssb_perRACH_OccasionAndCB_PreamblesPerSSB_PR
#1=oneeighth,2=onefourth,3=half,4=one,5=two,6=four,7=eight,8=sixteen
        ssb_perRACH_OccasionAndCB_PreamblesPerSSB_PR = 4;
#oneHalf (0..15) 4,8,12,16,...60,64
        ssb_perRACH_OccasionAndCB_PreamblesPerSSB = 14; //15;
#ra_ContentionResolutionTimer
#(0..7) 8,16,24,32,40,48,56,64
        ra_ContentionResolutionTimer = 7;
        rsrp_ThresholdSSB = 19;
#prach-RootSequenceIndex_PR
#1 = 839, 2 = 139
        prach_RootSequenceIndex_PR = 2;
        prach_RootSequenceIndex = 1;
        # SCS for msg1, can only be 15 for 30 kHz < 6 GHz, takes precedence over the
one derived from prach-ConfigIndex
        #
        msg1_SubcarrierSpacing = 1,

# restrictedSetConfig
# 0=unrestricted, 1=restricted type A, 2=restricted type B
        restrictedSetConfig = 0,

        msg3_DeltaPreamble = 1;
        p0_NominalWithGrant = -90;

# pucch-ConfigCommon setup :
# pucchGroupHopping
# 0 = neither, 1= group hopping, 2=sequence hopping
        pucchGroupHopping = 0;
        hoppingId = 40;
        p0_nominal = -90;
# ssb_PositionsInBursts_BitmapPR
# 1=short, 2=medium, 3=long
        ssb_PositionsInBurst_PR = 2;
        ssb_PositionsInBurst_Bitmap = 1; #0x80;

# ssb_periodicityServingCell
# 0 = ms5, 1=ms10, 2=ms20, 3=ms40, 4=ms80, 5=ms160, 6=spare2, 7=spare1
        ssb_periodicityServingCell = 2;

# dmrs_TypeA_position
# 0 = pos2, 1 = pos3
        dmrs_TypeA_Position = 0;

```

```

# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
    subcarrierSpacing = 1;

#tdd-UL-DL-ConfigurationCommon
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
    referenceSubcarrierSpacing = 1;
    # pattern1
    # dl_UL_TransmissionPeriodicity
    # 0=ms0p5, 1=ms0p625, 2=ms1, 3=ms1p25, 4=ms2, 5=ms2p5, 6=ms5, 7=ms10
    dl_UL_TransmissionPeriodicity = 6;
    nrofDownlinkSlots = 7; //8; //7;
    nrofDownlinkSymbols = 6; //0; //6;
    nrofUplinkSlots = 2;
    nrofUplinkSymbols = 4; //0; //4;

ssPBCH_BlockPower = -25;
}

);
# ----- SCTP definitions
SCTP :
{
    # Number of streams to use in input/output
    SCTP_INSTREAMS = 2;
    SCTP_OUTSTREAMS = 2;
};
////////// MME parameters:
mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.168.61.149";
                    ipv6 = "192:168:30::17";
                    port = 36412 ;
                    active = "yes";
                    preference = "ipv4";
                    }
                );

//X2
enable_x2 = "yes";
t_reloc_prep = 1000; /* unit: millisecond */
tx2_reloc_overall = 2000; /* unit: millisecond */
t_dc_prep = 1000; /* unit: millisecond */
t_dc_overall = 2000; /* unit: millisecond */

target_enb_x2_ip_address = ( { ipv4 = "10.0.0.30";
                              ipv6 = "";
                              preference = "ipv4";
                              }
                            );

NETWORK_INTERFACES :
{
    GNB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth1";
    GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "10.0.0.40";
    GNB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U = "eth1";
    GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U = "10.0.0.40";
    GNB_PORT_FOR_S1U = 2152; # Spec 2152
    GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_X2C = "10.0.0.40";
    GNB_PORT_FOR_X2C = 36422; # Spec 36422
};

}

);

MACRLCs = (
{
    num_cc = 1;
    tr_s_preference = "local_L1";
}
);

```

```

    tr_n_preference      = "local_RRC";
    pusch_TargetSNRx10  = 200;
    pucch_TargetSNRx10  = 200;
    ulsch_max_frame_inactivity = 0;
}
);

L1s = (
{
    num_cc = 1;
    tr_n_preference = "local_mac";
    ofdm_offset_divisor = 8; #set this to UINT_MAX for offset 0
}
);
RUs = (
{
    local_rf      = "yes"
    nb_tx         = 1
    nb_rx         = 1
    att_tx        = 12
    att_rx        = 12;
    bands         = [7];
    max_pdschReferenceSignalPower = -27;
    max_rxgain    = 114;
    eNB_instances = [0];
}
);
THREAD_STRUCT = (
{
    #three config for level of parallelism "PARALLEL_SINGLE_THREAD",
"PARALLEL_RU_L1_SPLIT", or "PARALLEL_RU_L1_TRX_SPLIT"
    parallel_config = "PARALLEL_RU_L1_TRX_SPLIT";
    #two option for worker "WORKER_DISABLE" or "WORKER_ENABLE"
    worker_config   = "WORKER_ENABLE";
}
);
security = {
    # preferred ciphering algorithms
    # the first one of the list that an UE supports in chosen
    # valid values: nea0, nea1, nea2, nea3
    ciphering_algorithms = ( "nea0" );

    # preferred integrity algorithms
    # the first one of the list that an UE supports in chosen
    # valid values: nia0, nia1, nia2, nia3
    integrity_algorithms = ( "nia2", "nia0" );

    # setting 'drb_ciphering' to "no" disables ciphering for DRBs, no matter
    # what 'ciphering_algorithms' configures; same thing for 'drb_integrity'
    drb_ciphering = "yes";
    drb_integrity = "no";
};
log_config :
{
    global_log_level      = "info";
    hw_log_level          = "info";
    phy_log_level         = "info";
    mac_log_level         = "info";
    rlc_log_level         = "info";
    pdcp_log_level        = "info";
    rrc_log_level         = "info";
};

uicc: {
    opc = "testopc";
};

```

Configuración de EPC Docker Compose de OAI

version: '3.8'

services:

cassandra:

```
image: cassandra:2.1
container_name: demo-cassandra
networks:
  private_net:
    ipv4_address: 192.168.68.130
environment:
  CASSANDRA_CLUSTER_NAME: "OAI HSS Cluster"
  CASSANDRA_ENDPOINT_SNITCH: GossipingPropertyFileSnitch
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "nodetool status"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5
```

db_init:

```
image: cassandra:2.1
container_name: demo-db-init
depends_on: [cassandra]
deploy:
  restart_policy:
    condition: on-failure
    max_attempts: 10
networks:
  private_net:
    ipv4_address: 192.168.68.132
volumes:
  - ../../component/oai-hss/src/hss_rel14/db/oai_db.cql:/home/oai_db.cql
entrypoint: /bin/bash -c "cqlsh --file /home/oai_db.cql 192.168.68.130 &&
echo 'OK'"
```

oai_hss:

```
image: oai-hss:production
container_name: demo-oai-hss
privileged: true
depends_on: [cassandra]
networks:
  private_net:
    ipv4_address: 192.168.68.131
  public_net:
    ipv4_address: 192.168.61.130
environment:
  TZ: Europe/Paris
  REALM: openairinterface.org
  HSS_FQDN: hss.openairinterface.org
  PREFIX: /openair-hss/etc
  cassandra_Server_IP: 192.168.68.130
  OP_KEY: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
  LTE_K: 000102030405060708090A0B0C0D0E0F
  APN1: oai.ipv4
  APN2: oai2.ipv4
  FIRST_IMSI: 50501000000022
  NB_USERS: 30
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "pgrep oai_hss"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5
```

redis:

```
image: redis:6.0.5
```



```
container_name: demo-redis
privileged: true
networks:
  public_net:
    ipv4_address: 192.168.61.148
volumes:
  - ./redis_extern.conf:/usr/local/etc/redis/redis.conf
entrypoint: /bin/bash -c "redis-server /usr/local/etc/redis/redis.conf"
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "redis-cli -h 192.168.61.148 -p 6380 ping"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5
```

```
magma_mme:
  image: magma-mme:master
  container_name: demo-magma-mme
  hostname: mme
  privileged: true
  depends_on: [oai_hss, redis]
  networks:
    public_net:
      ipv4_address: 192.168.61.149
  environment:
    TZ: Europe/Paris
    REALM: openairinterface.org
    PREFIX: /openair-mme/etc
    HSS_HOSTNAME: hss
    HSS_FQDN: hss.openairinterface.org
    HSS_REALM: openairinterface.org
    MME_FQDN: mme.openairinterface.org
    FEATURES: mme_oai
  volumes:
    - ./mme_fd.sprint.conf:/magma-mme/etc/mme_fd.conf.tmpl
    - ./mme.conf:/magma-mme/etc/mme.conf
    - ./mme-cfg.sh:/magma-mme/scripts/mme-cfg.sh
  entrypoint: /bin/bash -c "cd /magma-mme/scripts; ./mme-cfg.sh"
  healthcheck:
    test: /bin/bash -c "pgrep oai_mme"
    interval: 10s
    timeout: 5s
    retries: 5
```

```
oai_spgwc:
  image: oai-spgwc:production
  privileged: true
  depends_on: [magma_mme]
  container_name: demo-oai-spgwc
  networks:
    public_net:
      ipv4_address: 192.168.61.132
  environment:
    TZ: Europe/Paris
    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11: eth0
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SX: eth0
    DEFAULT_DNS_IPV4_ADDRESS: 192.168.18.129
    DEFAULT_DNS_SEC_IPV4_ADDRESS: 8.8.4.4
    PUSH_PROTOCOL_OPTION: 'true'
    APN_NI_1: oai.ipv4
    APN_NI_2: oai2.ipv4
    DEFAULT_APN_NI_1: oai.ipv4
    UE_IP_ADDRESS_POOL_1: '12.1.1.2 - 12.1.1.254'
    UE_IP_ADDRESS_POOL_2: '12.0.0.2 - 12.0.0.254'
    UE_MTU_IPV4: 1500
    MCC: '505'
    MNC: '01'
```

```
    MNC03: '001'
    TAC: 1
    GW_ID: 1
    REALM: openairinterface.org
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "pgrep oai_spgwc"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5

oai_spgwu:
  image: oai-spgwu-tiny:production
  privileged: true
  container_name: demo-oai-spgwu-tiny
  depends_on: [oai_spgwc]
  networks:
    public_net:
      ipv4_address: 192.168.61.133
  environment:
    TZ: Europe/Paris
    PID_DIRECTORY: /var/run
    INSTANCE: 1
    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP: eth0
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI: eth0
    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_SX: eth0
    SPGW00_IP_ADDRESS: 192.168.61.132
    NETWORK_UE_IP: '12.1.1.0/24'
    NETWORK_UE_NAT_OPTION: 'yes'
    MCC: '505'
    MNC: '01'
    MNC03: '001'
    TAC: 1
    GW_ID: 1
    REALM: openairinterface.org
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "pgrep oai_spgwu"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5

trf_gen:
  image: trf-gen:production
  privileged: true
  container_name: demo-trf-gen
  networks:
    public_net:
      ipv4_address: 192.168.61.139
  entrypoint: /bin/bash -c "ip route add 12.1.1.0/24 via 192.168.61.133 dev
eth0; sleep infinity"
healthcheck:
  test: /bin/bash -c "ping -c 2 192.168.61.133"
  interval: 10s
  timeout: 5s
  retries: 5

networks:
  private_net:
    name: demo-oai-private-net
    ipam:
      config:
        - subnet: 192.168.68.128/26
  public_net:
    name: demo-oai-public-net
    ipam:
      config:
        - subnet: 192.168.61.128/26
```

Configuración del MME de OAI

```
# generated by generate_mme_config_script.py
MME :
{
    REALM = "openairinterface.org"
    PID_DIRECTORY = "/var/run";
    MAXENB = 8; #
power of 2
    MAXUE = 16; #
power of 2
    RELATIVE_CAPACITY = 10;

    EMERGENCY_ATTACH_SUPPORTED = "no";
    UNAUTHENTICATED_IMSI_SUPPORTED = "no";

    # EPS network feature support
    EPS_NETWORK_FEATURE_SUPPORT_IMS_VOICE_OVER_PS_SESSION_IN_S1 = "no"; # DO
NOT CHANGE
    EPS_NETWORK_FEATURE_SUPPORT_EMERGENCY_BEARER_SERVICES_IN_S1_MODE = "no"; # DO
NOT CHANGE
    EPS_NETWORK_FEATURE_SUPPORT_LOCATION_SERVICES_VIA_EPC = "no"; # DO
NOT CHANGE
    EPS_NETWORK_FEATURE_SUPPORT_EXTENDED_SERVICE_REQUEST = "no"; # DO
NOT CHANGE

    # Display statistics about whole system (expressed in seconds)
    MME_STATISTIC_TIMER = 10;
    IP_CAPABILITY = "IPV4"; # UE
PDN_TYPE
    USE_STATELESS = "";

    INTERTASK_INTERFACE :
    {
        # max queue size per task
        ITTI_QUEUE_SIZE = 2000000;
    };

    S6A :
    {
        S6A_CONF = "/magma-mme/etc/mme_fd.conf"; # YOUR MME
freeDiameter config file path
        HSS_HOSTNAME = "hss.openairinterface.org";
        HSS_REALM = "openairinterface.org";
    };

    # ----- SCTP definitions
    SCTP :
    {
        # Number of streams to use in input/output
        SCTP_INSTREAMS = 8;
        SCTP_OUTSTREAMS = 8;
    };

    # ----- S1AP definitions
    S1AP :
    {
        # outcome drop timer value (seconds)
        S1AP_OUTCOME_TIMER = 10;
    };

    # ----- MME served GUMMEIs
    GUMMEI_LIST = (
        { MCC="505" ; MNC="01" ; MME_GID="32768" ; MME_CODE="3" ; }
    );
};
```

```

# ----- MME served TAIs
TAI_LIST = (
    {MCC="505" ; MNC="01" ; TAC = "1" ; },
    {MCC="505" ; MNC="01" ; TAC = "2" ; },
    {MCC="505" ; MNC="01" ; TAC = "3" ; }
);

TAC_LIST = (
    {MCC="505" ; MNC="01" ; TAC = "1" ; }
);

CSFB :
{
    NON_EPS_SERVICE_CONTROL = "OFF";
    CSFB_MCC = "505";
    CSFB_MNC = "01";
    LAC = "1";
};
NAS :
{
    ORDERED_SUPPORTED_INTEGRITY_ALGORITHM_LIST = [ "EIA2" , "EIA1" , "EIA0" ];
    ORDERED_SUPPORTED_CIPHERING_ALGORITHM_LIST = [ "EEA0" , "EEA1" , "EEA2" ];
    T3402 = 1 # in
minutes (default is 12 minutes)
    T3412 = 54 # in
minutes (default is 54 minutes, network dependent)
    T3422 = 6 # in
seconds (default is 6s)
    T3450 = 6 # in
seconds (default is 6s)
    T3460 = 6 # in
seconds (default is 6s)
    T3470 = 6 # in
seconds (default is 6s)
    T3485 = 8 #
UNUSED in seconds (default is 8s)
    T3486 = 8 #
UNUSED in seconds (default is 8s)
    T3489 = 4 #
UNUSED in seconds (default is 4s)
    T3495 = 8 #
UNUSED in seconds (default is 8s)
};

SGS :
{
    TS6_1 = 10 # in
seconds (default is 10s)
    TS8 = 4 # in
seconds (default is 4s)
    TS9 = 2 # in
seconds (default is 4s)
    TS10 = 4 # in
seconds (default is 4s)
    TS13 = 4 # in
seconds (default is 4s)
};

NETWORK_INTERFACES :
{
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.168.61.149/24";
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME = "eth0";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME = "192.168.61.149/24";
    MME_PORT_FOR_S11_MME = 2123;
};

```

```
LOGGING :
{
  OUTPUT          = "CONSOLE";
  THREAD_SAFE     = "no";
  COLOR           = "no";

  SCTP_LOG_LEVEL  = "ERROR";
  GTPV1U_LOG_LEVEL = "INFO";
  SPGW_APP_LOG_LEVEL = "INFO";
  UDP_LOG_LEVEL   = "INFO";
  S1AP_LOG_LEVEL  = "DEBUG";
  NAS_LOG_LEVEL   = "INFO";
  MME_APP_LOG_LEVEL = "DEBUG";
  GTPV2C_LOG_LEVEL = "INFO";
  S11_LOG_LEVEL   = "DEBUG";
  S6A_LOG_LEVEL   = "DEBUG";
  UTIL_LOG_LEVEL  = "INFO";
  MSC_LOG_LEVEL   = "ERROR";
  ITTI_LOG_LEVEL  = "ERROR";
  MME_SCENARIO_PLAYER_LOG_LEVEL = "ERROR";
  ASN1_VERBOSITY  = "INFO";
};

S-GW :
{
  SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11          = "192.168.61.132";
};
};
```



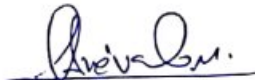
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 12 / 05 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Luis Antonio Pesantez Sanchez
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Informática y Electrónica
Carrera: Telecomunicaciones
Título a optar: Ingeniero en Telecomunicaciones
f. Analista de Biblioteca responsable:  Ing. Fernanda Arévalo M.

