

**Ambiente de prueba para una red móvil 4G
interconectada con IMS en la plataforma TELCO
2.0 de la Universidad del Cauca**



Trabajo de Grado

Yeison Stiven Murcia Calvo
Estephany Johana Argoty Solarte

Director: PhD. Oscar Mauricio Caicedo Rendón
Co-Director: Mg. Carlos Felipe Estrada Solano

Departamento de Telemática
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad del Cauca
Popayán-Cauca, 2021

**Ambiente de prueba para una red móvil 4G
interconectada con IMS en la plataforma TELCO
2.0 de la Universidad del Cauca**

Yeison Stiven Murcia Calvo
Estephany Johana Argoty Solarte

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para obtener el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Ph.D. Oscar Mauricio Caicedo Rendón
Co-Director: Mg. Carlos Felipe Estrada

*Departamento de Telemática
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad del Cauca
Popayán, Cauca, 2021*

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por demostrarnos ser nuestro refugio y fuerza"(Sal.46:1), por cada día brindarnos su ayuda en los retos presentados en nuestras vidas y en especial por sus innumerables bendiciones.

Agradecemos también a nuestros familiares, amigos y personas que estuvieron a nuestro lado compartiendo grandiosas experiencias, queremos decirles que su presencia y apoyo nos ayudó alcanzar este logro tan importante para nosotros y hoy dedicamos con gran orgullo.

Por último, agradecemos a nuestro asesor académico, el Profesor Oscar Mauricio Caicedo Rendón, Ph.D., por la confianza y apoyo en la dirección de este trabajo de grado, así como de la codirección de Carlos Felipe Estrada Solano, M.Sc., por el acompañamiento, asesorías y enseñanzas, además a todo el equipo del laboratorio Telco 2.0 por proveernos con los recursos hardware necesarios para el desarrollo del proyecto. Finalmente, queremos resaltar lo orgullosos que nos sentimos por haber realizado nuestro primer paso como ingenieros en la ilustre Universidad del Cauca, que nos brindo los mejores conocimientos en nuestra formación academica.

Resumen

Los ambientes de prueba para redes móviles permiten probar y evaluar servicios, sistemas o nuevas tecnologías, proporcionando resultados similares a los obtenidos en entornos reales. Sin embargo, los ambientes de prueba implementados por centros de investigación o empresas privadas usualmente funcionan bajo el pago de licencias para su uso o son ambientes con características definidas, lo cual los hace poco flexibles. En esta monografía es implementado un ambiente de prueba para redes móviles 4G interconectada con IMS, haciendo uso de software libre. Son implementados dos escenarios de red móvil 4G. El primero hace uso de equipos de cómputo, dispositivos SDR y equipos de usuario comerciales. El segundo escenario implementa el sistema LTE haciendo uso de máquinas virtuales. El ambiente de prueba cuenta con una aplicación web de gestión que permite a los usuarios realizar pruebas en los escenarios implementados de forma remota e intuitiva. Las pruebas realizadas con el fin de verificar la validez y el funcionamiento del ambiente de prueba son: captura y análisis de tráfico de la red, rendimiento, capacidad de usuarios y funcionalidad. Por último, contar con un ambiente de prueba propio permitirá a los estudiantes e investigadores de la FIET realizar pruebas e investigaciones que permitan afianzar los conocimientos teóricos u experimentación.

Tabla de Contenido

Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XIV
Lista de Abreviaturas	XVI
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos	4
1.3. Contribuciones	4
1.4. Estructura del Documento	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Redes Móviles	6
2.1.1. Redes inalámbricas de área amplia	6

2.1.2.	Evolución de las redes móviles	7
2.1.3.	Red móvil de cuarta generación	9
2.2.	Radio Definida por <i>Software</i>	16
2.2.1.	OpenLTE	17
2.2.2.	srsLTE	18
2.2.3.	OpenAirInterface	18
2.2.4.	AMARI LTE 100	19
2.3.	Subsistema Multimedia IP Virtualizado	20
2.3.1.	Redes de próxima generación	20
2.3.2.	Subsistema multimedia IP	21
2.3.3.	Virtualización de funciones de red	21
2.3.4.	Virtualización del subsistema multimedia IP	22
2.4.	Ambiente de Prueba	23
3.	Trabajos Relacionados	26
3.1.	Implementaciones <i>Software</i> Para Redes Móviles	26
3.2.	Brechas	30
4.	Diseño de la Arquitectura Telco 4G	32
4.1.	Metodología de Diseño Arquitectónico	32
4.2.	Vista de Escenarios	35
4.2.1.	Descripción general	35
4.2.2.	Roles	37

4.2.3.	Requisitos de alto nivel	38
4.2.4.	Historias de usuario	40
4.3.	Vista Lógica	43
4.3.1.	Paquete aplicación web de gestión	44
4.3.2.	Paquete sistema de interoperabilidad	45
4.3.3.	Paquete sistema LTE	47
4.4.	Vista de Procesos	48
4.4.1.	Establecimiento de una sesión de servicio con IMS	48
4.4.2.	Equipo de usuario inicia una solicitud de servicio al sistema LTE	51
4.4.3.	Registro de datos de prueba	53
4.4.4.	Gestión de pruebas	54
4.4.5.	Comunicación entre el sistema LTE y la aplicación web de gestión	56
5.	Implementación y Evaluación del Telco 4G	59
5.1.	Vista de Despliegue	59
5.1.1.	Selección de <i>software</i> para el sistema LTE	60
5.1.2.	Implementación de OpenAirInterface	61
5.1.3.	Implementación LTE centralizada	62
5.1.4.	Implementación LTE distribuida	66
5.2.	Vista Física y Virtual	68
5.2.1.	Plataforma Telco 2.0	69

5.2.2. Implementación LTE centralizada	71
5.2.3. Implementación LTE distribuida	73
5.3. Aplicación Web de Gestión	76
5.4. Evaluación y Análisis	81
5.4.1. Funcionalidad sistema LTE centralizado	81
5.5. Pruebas en sistema LTE Centralizado	85
5.6. Pruebas de Funcionalidad para TELCO 4G	89
5.7. Pruebas de Capacidad de Usuarios	93
6. Conclusiones y Trabajos Futuros	96
6.1. Conclusiones	96
6.1.1. Trabajos Futuros	98
Bibliografía	98
A. Diseño de la arquitectura para Telco 4G	81
A.1. Anexos de historias de usuario	81
A.2. Vista de procesos	83
A.2.1. Llamadas simultaneas	83
A.2.2. Acceso a navegación	86
A.2.3. Iniciar sesión	87
A.2.4. Sección de información y guías	88
A.2.5. Exportar resultado de pruebas	90
A.2.6. Comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG	92

B. Guía para la instalación y configuración del sistema LTE centralizado	94
B.1. Requisitos previos	94
B.1.1. Características técnicas de las máquinas virtuales	94
B.1.2. Instalación del kernel de baja latencia	95
B.1.3. Desactivación de los estados C, gestion de energia	96
B.1.4. Desactivación del escalado en frecuencia	97
B.1.5. Instalación del git client	98
B.1.6. Configuración del FQDN	98
B.2. Instalación del escenario OAI	99
B.3. Instalación del módulo <i>software</i> EPC	100
B.3.1. Instalación de MySQL	101
B.3.2. Construcción de los paquetes del EPC	102
B.3.3. Instalación del módulo software para la E-UTRAN, eNB y UE	102
B.3.4. Herramientas opcionales de OAI	104
B.4. Configuración de OAI	105
B.4.1. Configuración del EPC	105
B.4.2. Configuración PGW	110
B.4.3. Configuración de la E-UTRAN, eNB y UE	114
B.5. Compilación y Ejecución de OpenAirInterface	116
B.5.1. Verificación del EPC	116
B.5.2. Ejecución del EPC	121

B.5.3. Ejecución del eNB y UE	122
C. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN AMBIENTE DE PRUEBA PARA UNA RED MÓVIL 4G HACIENDO USO DEL <i>SOFTWARE</i> <i>OpenAirInterface</i>.	125

Lista de Figuras

2.1. Redes inalámbricas de área amplia, basado en [1]	7
2.2. Evolución de redes 2G hasta B5G, basado en [2]	8
2.3. Arquitectura de la red LTE, basado en [3]	10
2.4. Equipo de usuario, basado en [4]	12
2.5. Protocolos de plano de usuario de LTE, basado en [5]	15
2.6. Protocolos de plano de control de LTE, basado en [5]	16
2.7. Arquitectura vIMS, basado en [6]	22
2.8. Diagrama de WNT, basado en [7]	25
4.1. Modelo 4+1 de Krunchten, basado en [8]	34
4.2. Vista general del ambiente de prueba	35
4.3. Sistema LTE	36
4.4. Aplicación Web de Gestión	36
4.5. SIO	37
4.6. Diagrama de paquetes, Telco 4G.	43
4.7. Diagrama de paquetes, AWG.	44

4.8. Diagrama de paquetes, sistema de interoperabilidad.	46
4.9. Diagrama de paquetes, sistema LTE.	47
4.10. Diagrama de secuencia, establecimiento de una sesión de servicio con IMS.	49
4.11. Diagrama de secuencia, el UE inicia una solicitud de servicio al siste- ma LTE.	52
4.12. Diagrama de secuencia, registro de datos para las pruebas.	54
4.13. Diagrama de secuencia, gestion de pruebas en la AWG.	55
4.14. Diagrama de secuencia, comunicación entre el sistema LTE y la AWG.	57
5.1. Diagrama de despliegue, implementación LTE centralizada.	62
5.2. Arquitectura de OAI para un sistema LTE centralizado.	65
5.3. Diagrama de despliegue, implementación LTE distribuida.	66
5.4. Arquitectura de OAI para un sistema LTE distribuido, basada en [3].	68
5.5. Topología de red plataforma Telco 2.0.	71
5.6. Topología de red de la implementación LTE centralizada.	72
5.7. Diagrama de distribución, implementación LTE centralizada.	73
5.8. Topología de red implementación LTE distribuida.	74
5.9. Diagrama de distribución, implementación LTE distribuida.	75
5.10. AWG vista general.	76
5.11. Sección de información.	77
5.12. Pruebas y conexiones.	77
5.13. Formulario para la realización de la prueba del entorno centralizado.	78

5.14. Gráfica de los resultados del entorno centralizado.	78
5.15. Interfaz entorno remoto.	79
5.16. Acceso a la máquina virtual desde el navegador.	79
5.17. Prueba por medio de <i>framework</i> de monitorización de OAI.	80
5.18. Gestor máquinas.	81
5.19. Gestor pruebas.	81
5.20. Conexión entre el HSS y la base de datos.	82
5.21. Solicitud de conexión entre HSS y MME.	82
5.22. Estado inicial del HSS.	83
5.23. Petición de información entre HSS y MME.	83
5.24. Conexión entre MME y eNB.	84
5.25. Vinculación de usuario.	84
5.26. Verificación de conexión del UE.	84
5.27. Dirección IP del UE.	85
5.28. localización de simulador dlsim.	87
5.29. FER vs SNR de 0,2 dB.	88
5.30. FER vs SNR de 1 dB.	89
5.31. Prueba de rendimiento, gráficas de <i>throughput</i> y TRS	95
A.1. Diagrama de secuencia, llamadas simultáneas	84
A.2. Diagrama de secuencia, acceso a navegación	87
A.3. Diagrama de secuencia, iniciar sesión	87

A.4. Diagrama de secuencia, sección de información y guías	89
A.5. Diagrama de secuencia, exportar resultado de pruebas	90
A.6. Diagrama de secuencia, comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG	92
B.1. Version del kernel instalado.	96
B.2. Valores del archivo hosts.	99
B.3. Configuración del TAI IIST del archivo epc.conf.in.	106
B.4. Configuración de las credenciales de la BD en el archivo CMake- Lists.txt.	108
B.5. Configuración de las interfaces del MME en el archivo epc.conf.in. . .	109
B.6. Configuración de las interfaces del S-GW en el archivo epc.conf.in. .	110
B.7. Configuración de las interfaces del P-GW en el archivo epc.conf.in. .	111
B.8. Interfaz Web de phpMyAdmin.	112
B.9. Valores de la tabla mmeidentity.	113
B.10. Valores de la tabla pdn.	113
B.11. Valores de la tabla users.	114
B.12. Direcciones del eNB para las interfaces S1-C y S1-U.	115
B.13. Modificación de la IP del eNB.	115
B.14. Configuración del opc de oaisim.	116
B.15. Configuración del archivo hss.conf.	118
B.16. Configuración del archivo epc.conf.	119
B.17. Archivos de la carpeta freeDiameter.	119

B.18. Configuración de los archivos mme_fd.conf y hss_fd.conf.	120
B.19. Estado del nodo HSS.	121
B.20. Ejecución del módulo EPC.	122
B.21. Estado del módulo EPC.	122
B.22. Estado del módulo eNB.	123
B.23. Valores de las interfaces de red.	124

Lista de Tablas

4.1. Comparación de vistas arquitectónicas en función de las perspectivas del sistema, basado en [9]	33
4.2. Historia usuario, interconexión con IMS	41
4.3. Historia usuario, interconexión entre módulo EPC y eNB	41
4.4. Historia usuario, registro de datos de prueba	41
4.5. Historia usuario, CRUD de pruebas	41
4.6. Historia usuario, comunicación entre el sistema LTE y la AWG	42
5.1. Comparación de implementaciones <i>software</i> para LTE, basado en [3] [10] [11] [12].	61
5.2. Recursos de almacenamiento.	69
5.3. Características de servidores Blade.	70
5.4. Parámetros para las simulaciones	86
5.5. Variación de los parametros para las simulaciones	86
5.6. Parámetros para las simulaciones	87
5.7. Procesos de evaluación de funcionalidad	90
5.8. Evaluación del nivel de dificultad del proceso 1	91

5.9. Evaluación del nivel de dificultad del proceso 2	91
5.10. Evaluación del nivel de dificultad del proceso 3	92
5.11. Evaluación del nivel de dificultad del proceso 4	92
A.1. Historia usuario, llamadas simultáneas	81
A.2. Historia usuario, acceso a navegación	82
A.3. Historia usuario, iniciar sesión	82
A.4. Historia usuario, sección de información y guías	82
A.5. Historia usuario, exportar resultado de pruebas	83
A.6. Historia usuario, comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG	83
B.1. Características de las máquinas virtuales.	95
B.2. Sintaxis para configuración del FQDN	99

Lista de Abreviaturas

1G	<i>First Generation</i>
2G	<i>Second Generation</i>
3G	<i>Third Generation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Fourth Generation</i>
5G	<i>Fifth Generation</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
AuC	<i>Authentication Center</i>
B5G	<i>Beyond 5G</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRUD	<i>Create, Read, Update, Delete</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>

DL	<i>DownLink</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
eNB	<i>evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UTRAN</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
FIET	<i>Facultad Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FUSECO	<i>Future Seamless Communication Playground</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTP	<i>GPRS Tunneling Protocol</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
ICT	<i>Information and Communication Technology</i>
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>

IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
ITU-R	<i>International Telecommunications Union–Radiocommunications Sector</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCC	<i>Mobile Country Code</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
ME	<i>Mobile Equipment</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MIPv4	<i>Mobile IPv4</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MNC	<i>Mobile Network Code</i>
MRF	<i>Multimedia Resource Function</i>
MSIN	<i>Mobile Subscription Identification Number</i>
MSISDN	<i>Mobile Station Integrated Services Digital Network</i>
NAS	<i>Non Access Stratum</i>
NGN	<i>Next Generation Network</i>
OAI	<i>OpenAirInterface</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>

OSA	<i>OpenAirInterface Software Alliance</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PDCP	<i>Packet Data Control Protocol</i>
PDSCH	<i>Physical DownlinkShared Channel</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PHY	<i>Physical</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	<i>(Quality of Service</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
S1AP	<i>S1 Interface Application Protocol</i>
SACK	<i>Selective Acknowledgement</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol</i>
SDN	<i>Software-Defined Network</i>
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRS	<i>Software Radio System</i>

SS7	<i>Signaling System No. 7</i>
TA	<i>Tracking Area</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UHD	<i>USRP Hardware Driver</i>
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i>
UL	<i>UpLink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VHDL	<i>Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language</i>
vIMS	<i>virtual IP Multimedia Subsystem</i>
WISE	<i>World Innovation Summit for Education</i>
WNR	<i>Wireless Network Testbed</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
XOR	<i>Exclusive OR</i>

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

Los ambientes de prueba proporcionan una visión general del desempeño y rendimiento de un sistema de forma previa a su desarrollo e implementación, siendo útiles en varios campos que van desde la formación académica [13][14] hasta los procesos industriales [15]. En particular, en la formación académica, los ambientes de prueba son indispensables para el aprendizaje de los estudiantes, en especial de aquellos vinculados a las ICT (*Information and Communication Technology*). En este sentido, es necesario que las universidades cuenten con ambientes de prueba, que permitan a los estudiantes un acercamiento real a los problemas [16]. Sin embargo, según una encuesta realizada por WISE (*World Innovation Summit for Education*), los centros educativos carecen de dicho acercamiento [17].

Las universidades no están preparadas para adaptarse y estar en constante actualización con respecto a los sistemas de comunicación, especialmente las comunicaciones inalámbricas que evolucionan rápidamente [16]. La importancia de asegurar buenos niveles de calidad y desempeño en las redes, causa la necesidad de realizar investigaciones y pruebas por el cambio constante en infraestructura y convergencia de servicios (voz, datos y servicios sobre Internet). Los sistemas de comunicación inalámbrica son muestra del aumento progresivo de usuarios, la evolución de la red

y de la convergencia de sus servicios, por tal razón, es necesario seguir realizando estudios para su evolución. Generalmente, estos estudios son realizados a través de software de simulación y evaluación. Sin embargo, los estudios en entornos físicos/virtuales bajo escenarios similares a los reales proveen un resultado más preciso. Estos entornos pueden ser implementados utilizando *SDR (Software Defined Radio)*, GNU Radio y *USRP (Universal Software Radio Peripheral)*. SDR posibilita realizar pruebas de transmisión y recepción de señales que son ejecutadas en tiempo real, utilizando lenguajes de programación de alto nivel [18]. GNU Radio proporciona un conjunto de herramientas de desarrollo de software, útiles para construir sistemas de procesamiento de señales [19]. La USRP es un radio reconfigurable que posibilita la implementación de diferentes sistemas de comunicación, el cual permite la implementación y ejecución de diferentes ambientes de prueba [20].

Por ejemplo, un ambiente de prueba que permita la interconexión con un núcleo IMS (*IP Multimedia Subsystem*), puede proporcionar a los desarrolladores de servicios un entorno donde programar, implementar y probar la lógica de las aplicaciones SIP (*Session Initiation Protocol*) y la interacción de servicios [21]. A nivel mundial existen ambientes de prueba que integran IMS y diferentes tipos de redes. Un ejemplo es el laboratorio FUSECO (*Future Seamless Communication Playground*). La arquitectura de FUSECO está compuesta por femtoceldas, pequeñas estaciones base útiles para implementar tecnologías 2G (*Second Generation*), 3G (*Third Generation*) y 4G (*Fourth Generation*) [22]. FUSECO cuenta con unos componentes *software* como el *Open IMS Playground* [23] y la plataforma *3GPP Evolved Packet* [24], donde brindan servicios a los proveedores de red, investigadores y demás usuarios, para evaluar y experimentar las aplicaciones antes de introducirlas en el mercado. Para acceder a estos servicios, es necesario contar con una autorización por parte de los proveedores de FUSECO. Los servicios ofrecidos son limitados en cuanto a capacidad de procesamiento, almacenamiento y con características ya definidas por parte de la organización, lo que implica que estos ambientes de prueba no sean flexibles. Para obtener servicios específicos, los estudiantes e investigadores deben pagar una licencia [25].

La FIET (Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones) de la Univer-

sidad del Cauca no cuenta con un entorno de prueba para redes móviles 4G que permita la convergencia de múltiples servicios. La implementación de este entorno de pruebas ofrecería grandes beneficios, como es la realización de laboratorios, lo cual contribuiría a que los estudiantes apliquen los conocimientos teóricos y adquieran habilidades prácticas en un entorno realista. La utilización del ambiente de prueba permitirá a los estudiantes prepararse adecuadamente para la constante evolución de las tecnologías y para los grandes cambios en el mercado laboral.

El presente trabajo de grado da respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo desarrollar un ambiente de pruebas, para investigar y analizar redes móviles 4G?

Para dar solución a la anterior pregunta de investigación, este trabajo de grado diseña, implementa y evalúa Telco 4G, un ambiente de prueba para una red 4G sobre la plataforma TELCO 2.0 de la Universidad del Cauca. TELCO 2.0 es una red de telecomunicaciones convergentes que ofrece diversos servicios tales como investigación y desarrollo, servicios multimedia combinados, aplicaciones web y servicios telemáticos. El ambiente de pruebas es realizado con fines educativos, para contribuir a mejorar los conocimientos en el ámbito profesional de los estudiantes de la FIET.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

- Proponer un ambiente de pruebas para redes móviles 4G, sobre la plataforma TELCO 2.0 de la FIET.

1.2.2. Específicos

- Diseñar un ambiente de prueba de redes móviles 4G sobre la plataforma Telco 2.0 de la FIET.
- Implementar el ambiente de pruebas diseñado.
- Evaluar el ambiente de pruebas en términos de funcionalidad y capacidad de usuarios.

1.3. Contribuciones

Las principales contribuciones aportadas en este trabajo de grado son las siguientes:

- Diseño de un ambiente de prueba para redes móviles 4G interconectado con IMS.
- Implementación del ambiente de prueba diseñado sobre la plataforma TELCO 2.0 de la FIET.
- Evaluación del desempeño del ambiente de prueba de redes móviles 4G.
- Permitir que los estudiantes realicen prácticas en el ambiente de prueba, con el fin de enriquecer los conceptos adquiridos en su formación académica y prepárese para el mundo laboral.

1.4. Estructura del Documento

El resto de este documento está dividido en los capítulos que se describen a continuación.

- Capítulo 2, **Marco teórico** presenta la información sobre los temas más relevantes del trabajo de grado. Estos temas incluyen las redes móviles, la arquitectura de LTE, SDR, implementaciones software, vIMS y ambientes de prueba.
- Capítulo 3, **Trabajos relacionados** presenta la descripción y contribuciones de los trabajos más relevantes que son encontrados en la literatura con respecto a implementaciones software para redes móviles y ambientes de prueba.
- Capítulo 4, **Diseño de la arquitectura para Telco 4G** presenta el escenario motivador del presente trabajo de grado y el diseño de la arquitectura del ambiente de prueba basado en el modelo de vistas 4+1 en el cual se implementan las vista de escenarios, lógica y de procesos.
- Capítulo 5, **Implementación y evaluación Telco 4G**, primero, describe la implementación del ambiente de prueba Telco 4G tomando como referencia la vista de despliegue y la vista física y virtual del modelo de vistas 4+1. Segundo, expone los resultados de las evaluaciones realizadas al Telco 4G.
- Capítulo 6, **Conclusiones y trabajos futuros** presenta las conclusiones obtenidas en este trabajo de grado, así como también describe algunos aportes complementarios para ser realizados en un futuro.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo presenta las definiciones y conceptos que contribuyen al desarrollo del presente trabajo de grado. Primero, las redes móviles son descritas, empezando con redes inalámbricas de área amplia, evolución de las redes móviles y LTE (*Long Term Evolution*). Segundo, la radio definida por *software* y los dispositivos USRP son descritos. Tercero, las implementaciones *software* para emular y simular redes móviles son especificadas. Cuarto, el subsistema multimedia IP virtualizado es descrito, empezando por las redes de próxima generación, subsistema multimedia IP, virtualización de funciones de red y virtualización del subsistema multimedia IP. Finalmente, los ambientes de prueba y las redes definidas por *software* son descritas.

2.1. Redes Móviles

2.1.1. Redes inalámbricas de área amplia

WWAN (*Wireless Wide Area Network*) es utilizada para conectar varias redes locales de manera inalámbrica, con el objetivo de formar una red de gran cobertura geográfica. La Figura 2.1 indica que WWAN cuenta con una cobertura de aproximadamente 50 kilómetros. Las principales tecnologías que utiliza WWAN son: la telefonía móvil y los satélites electromagnéticos. La telefonía móvil actualmente es

la red más usada a nivel mundial [26], la cual ha evolucionado en varias generaciones, con el fin de mejorar y establecer servicios de voz, conectividad a Internet y acceso multimedia [1]. La red 4G actualmente está posicionada a nivel mundial como la principal red móvil debido a que es la más desplegada y cuenta con la mayor cantidad de usuarios activos [27].

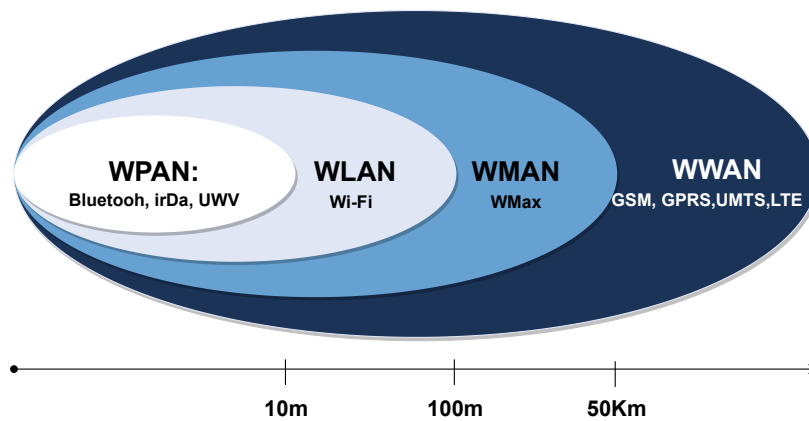


Figura 2.1: Redes inalámbricas de área amplia, basado en [1]

2.1.2. Evolución de las redes móviles

La evolución de las redes, como puede observarse en la Figura 2.2, empieza desde 1980 [1] con la 1G (*First Generation*), donde solamente ofrece el servicio de llamadas y datos a una velocidad de 2.4 Kbps de forma analógica. Luego sigue la 2G, cuyo estándar es la tecnología *GSM (Global System for Mobile communications)*, caracterizada principalmente por prestar servicios de voz y mensajes de texto. El núcleo de red de GSM funciona por conmutación de circuitos, brindando además, servicios de datos (acceso a Internet) de muy baja velocidad [1][3].

EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), GPRS (*General Packet Radio Service*) son evoluciones de GSM que ofrecen servicios de datos por medio de conmutación de paquetes. GERAN (*GSM EDGE Radio Access Network*) es la red de acceso radio y utiliza TDMA (*Time División Multiple Access*) para la transmisión

y recepción de datos, donde el acceso es realizado por tramas que están divididas en *slots*. La arquitectura está compuesta por una BTS (*Base Transceiver Station*) y un BSC (*Base Station Controller*).

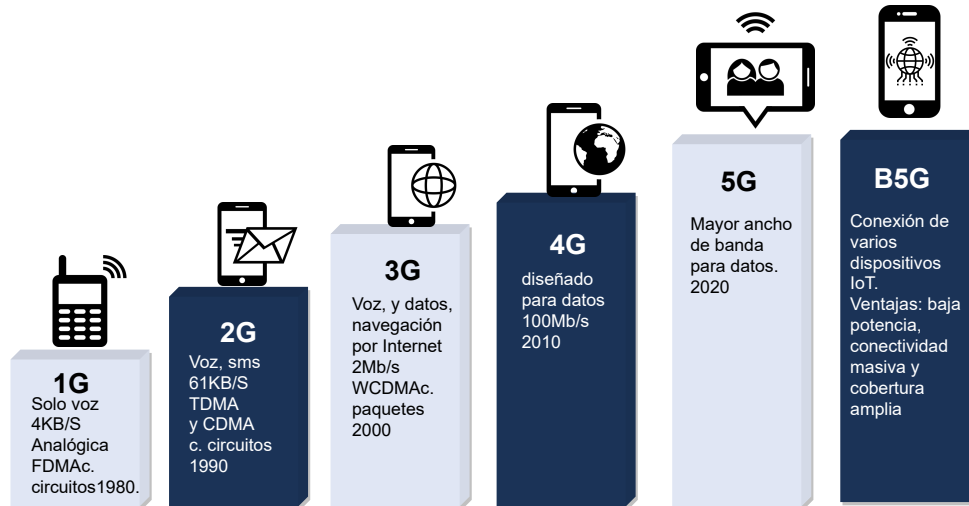


Figura 2.2: Evolución de redes 2G hasta B5G, basado en [2]

La 3G, con su estándar de tecnología *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunications System*), presenta velocidades más elevadas en transmisión y recepción de datos en comparación a las anteriores generaciones. *WCDMA* (*Wideband Code Division Multiple Access*) es la tecnología de acceso, la cual consiste en que todos los usuarios transmitan simultáneamente en el dominio del tiempo, adicionalmente asignado un código único a cada usuario. *UMTS* utiliza conmutación de paquetes para datos y conmutación de circuitos para servicios de voz. La red de acceso denominada *UTRAN* (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) está formada por el Nodo B, el cual permite la transmisión y recepción de información de red y es controlado por el *RNC* (*Radio Network Controller*). El núcleo de red de *UMTS* es el mismo que utiliza la tecnología *EDGE* [1].

La 4G, con su estándar *LTE*, aumenta sus servicios de datos brindando al usuario una velocidad de 1Gbps, una mejor calidad de servicio y baja latencia [3]. La 5G (*Fifth Generation*) presenta características como múltiples bandas de espectro, fre-

cuencias bajas (alrededor de 700Mhz), frecuencias medias (alrededor de 3,4 Mhz) y frecuencias altas (24Ghz y superiores) conocidas con el nombre de ondas milimétricas. Los cambios que propone son [28]: i) El aumento de la velocidad hasta 20 veces más que la red 4G, ii) Velocidad máxima de descarga hasta 20 Gbps, iii) Cambios de infraestructura para soportar los requerimientos, iv) Conectividad móvil confiable, v) Conexiones mejoradas de banda ancha móvil, vi) Comunicaciones masivas de tipo máquina como agricultura, vii) Hogares e IoT (*Internet of Things*) y viii) Latencia ultrarrápida y baja.

Por último, B5G (*Beyond 5G*) propone una infraestructura de red cada vez más virtualizada, programable y distribuida. B5G promete mejorar el uso de servicios y aplicaciones como seguridad pública, atención médica remota, agricultura más inteligente, servicios públicos, fabricación más autónoma, ciudades e infraestructura sostenibles y logística digitalizada. Las organizaciones de investigación como el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) patrocinan actividades de desarrollo de estándares relacionados con aplicaciones que admitan ancho de banda ultra alto, latencia ultra baja y los requisitos de energía ultra baja de las aplicaciones de redes de próxima generación o B5G, incluyendo redes vehiculares, IoT masivo y automatización industrial [29] [30].

2.1.3. Red móvil de cuarta generación

Visión general. LTE es un estándar para redes de comunicaciones de teléfonos móviles para la transmisión de altas velocidades. El 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) desarrolló la primera definición de LTE en la versión 8 como una mejora a la tecnología UMTS [2]. LTE propuso nuevos requisitos para su red de acceso, principalmente son: alta eficiencia espectral, altas velocidades de datos y bajo costo [31].

La tecnología móvil de 4G o *IMT-advanced*, está fundamentada en un estándar definido por la ITU-R (*International Telecommunications Union – Radiocommunications Sector*) que describe los requisitos, como son las mejoras en velocidad de datos, alta eficiencia espectral, baja latencia, recursos radio como ancho de banda y tecnología

MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) [32]. La tecnología LTE comercialmente es conocida como 4G-LTE de acuerdo a la versión 10 del 2010 [3].

2.1.3.1. Arquitectura

La arquitectura de LTE es conocida como EPS (*Evolved Packet System*) y está conformada por la red de acceso denominado E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), el núcleo de red denominado EPC (*Evolved Packet Core*) y el equipo de usuario denominado UE (*User Equipment*), como puede observarse en la Figura 2.3. LTE utiliza la conmutación de paquetes en la tecnología de acceso, empleando paquetes *IP* entre equipos de usuario y dejando atrás la conmutación de circuitos. El enlace descendente DL (*DownLink*) emplea OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), mientras en el enlace ascendente UL (*UpLink*) emplea SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) [2].

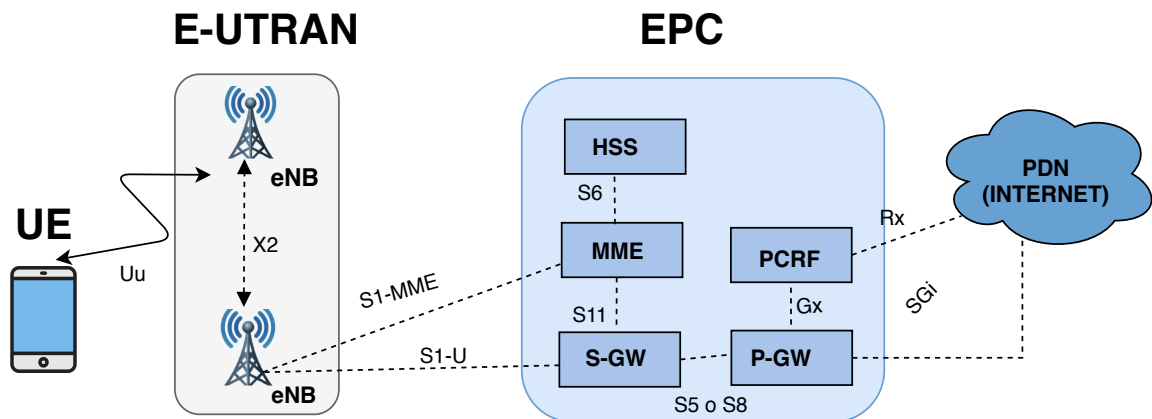


Figura 2.3: Arquitectura de la red LTE, basado en [3]

Los elementos que conforman la arquitectura de LTE son descritos a continuación:

- Equipo de usuario. El UE permite a los usuarios acceder a los servicios de la red que dispone el sistema LTE a través de la interfaz radio. Un UE es cualquier terminal que pueda ser utilizado para conectarse a la red y proveer de

comunicaciones al usuario. Los UE pueden ser representados por un dispositivo móvil comercial o un ordenador portátil con un adaptador de banda ancha móvil. La arquitectura funcional de los UE para sistemas LTE sobrepasando además GSM/UMTS puede observarse en la Figura 2.4. Los elementos que componen la arquitectura de los UE son [31] [33] [34]:

- *ME (Mobile Equipment)* es el dispositivo móvil encargado de realizar las conexiones de radiofrecuencia, la codificación, decodificación y corrección de errores. Las funcionalidades del ME están agrupadas en dos entidades: la terminal móvil *MT (Mobile Terminal)* y el equipo terminal *TE (Terminal Equipment)*. La separación de estas terminales es opcional y tiene como objetivo flexibilizar el desarrollo de los UE más complejos, para ello son definidas unas interfaces que permiten la separación física que contenga funciones de la comunicación MT y de la interacción con el usuario TE, además, aplicaciones adicionales a las que ofrece el sistema de comunicaciones móviles [4].
- *UICC (Universal Integrated Circuit Card)* es la encargada de identificar al dispositivo con el proveedor de telecomunicaciones que presta el servicio con el fin de reconocer su número y los servicios disponibles. La UICC permite guardar contactos y realizar conexiones de voz, multimedia y datos. Los diferentes procesos de identificación son realizados por medio de 3 parámetros importantes:
 - *IMEI (International Mobile Equipment Identity)* es el identificador del equipo móvil a nivel mundial y sirve al operador para identificar terminales válidos y denegar el acceso a los dispositivos con IMEI bloqueados o irregulares.
 - *IMSI (International Mobile Subscriber Identity)* es la identidad internacional del abonado móvil, constituye un código de identificación único de la línea o servicio y sirve para enrutar las llamadas.
 - *USIM (Universal Subscriber Identity Module)* es una tarjeta inteligente que almacena la clave de servicio del suscriptor, usada para identificarse ante la red. El USIM está compuesto por MCC (*Mobile Country Code*), MNC (*Mobile Network Code*) y MSIN (*Mobile*

Subscription Identification Number).

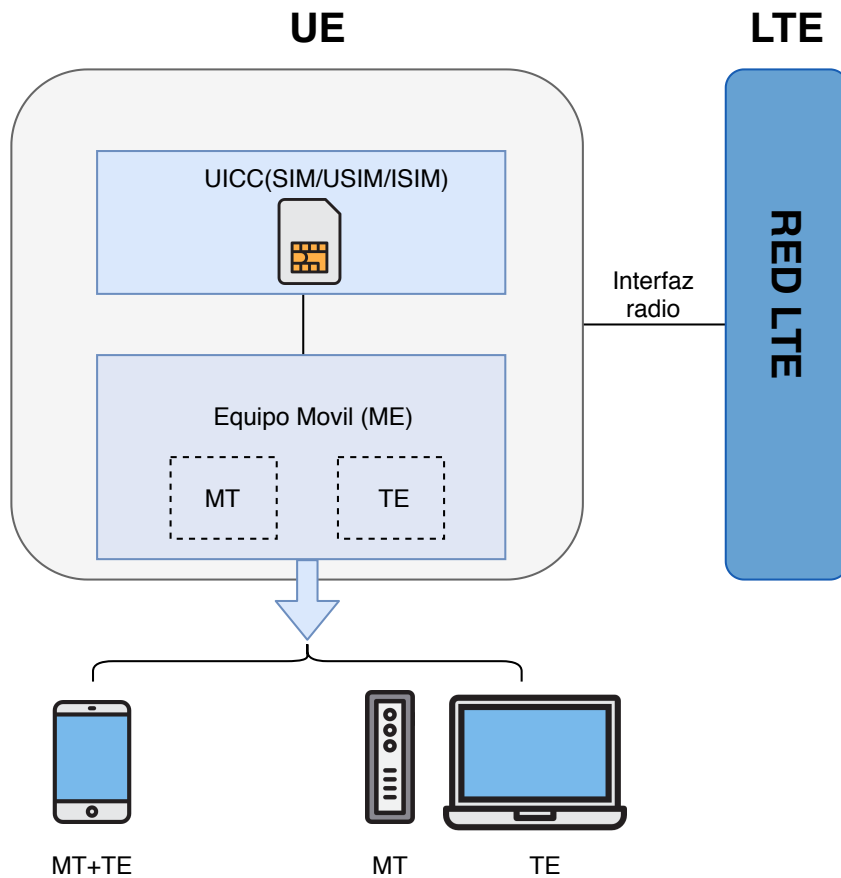


Figura 2.4: Equipo de usuario, basado en [4]

- Red de acceso radio. La E-UTRAN controla las comunicaciones radio entre el UE y el EPC. Además, está constituida por una red distribuida de estaciones base, denominadas eNB, como puede observarse en la Figura 2.3. Los eNB son interconectados entre sí a través de la interfaz X2 y están conectados con el EPC mediante la interfaz S1. La interfaz S1 está dividida en, una interfaz S1-MME para el plano de control y una interfaz S1-U para el plano de usuario. Los UE están conectados a los eNB a través de la interfaz radio Uu. Los UE pueden mantener una sola comunicación con un único eNB, por lo que no es posible

realizar *soft handover*¹. Los eNB realizan diversas tareas como [35][31][34]: i) la recepción y envío de transmisiones radio a todos los UE, ii) administración de portador radio, iii) gestión dinámica de los recursos radio de acceso de enlace UL y DL, iv) gestión de movilidad radio, v) planificación y transmisión de información radio y mensajes de *paging*², vi) seguridad de señalización de red.

- Núcleo de red evolucionado. EPC está compuesto por diferentes nodos lógicos encargados de la gestión del tráfico de la red. Este núcleo utiliza la conmutación de paquetes, empleando IP, lo que permite explotar las capacidades proporcionadas por la red de acceso. EPC está compuesto de tres nodos lógicos y una base de datos; además de un servidor de gestión de las políticas del servicio, como se observa en la Figura 2.3. Estos nodos son descritos a continuación [3][33][34][12]:

- MME (*Mobility Management Entity*) es el nodo encargado de las funciones del plano de control, procesa la señalización entre el núcleo de red y el UE. Además, gestiona la movilidad, las sesiones y la seguridad. La MME está conectada a E-UTRAN mediante la interfaz S1-MME, al HSS mediante la interfaz S6 y al S-GW mediante la interfaz S11.
- S-GW (*Serving Gateway*) actúa como enrutador y trabaja sobre el plano de usuario, transportando tráfico IP entre UE y las diferentes redes externas. La SGW es el punto que interconecta la parte radio con EPC, gestionando los procedimientos de movilidad y encaminamiento de paquetes hacia eNB; además, permite la interconexión con redes 2G y 3G. La S-GW está conectada a E-UTRAN mediante la interfaz S1-U y al P-GW por las interfaces S5/S8.
- P-GW (*Packet Data Network Gateway*) es el nodo que permite acceder a Internet o a otras redes de paquetes de datos. La P-GW asigna la QoS (*Quality of Service*) y la facturación del flujo de datos transmitido de

¹Sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones.

²Función de aviso de llamadas o mensajes entrantes para un terminal móvil

acuerdo a las políticas establecidas por el nodo PCRF (*Policy and Charging Rules Function*). La P-GW está conectada a la S-GW mediante las interfaces S5-S8, al PCRF mediante la interfaz Gx, y a la PDN mediante la interfaz SGi.

- HSS (*Home Subscriber Server*) concatena dos funciones presentes en las redes 2G y 3G, las cuales son el AuC (*Authentication center*) y el HLR (*Home Location Register*), y está conectado a la MME mediante la interfaz S6. El HSS es una base de datos central que contiene toda la información de la suscripción de los usuarios como:
 - Identificación y direccionamiento del usuario, realizado mediante la IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) y el número ISDN (*Integrated Services Digital Network*) del Suscriptor Móvil MSISDN (*Mobile Station Integrated Services Digital Network*), conocido comúnmente como el número de teléfono móvil.
 - Información de perfil de usuario, incluyendo calidad de servicio y estados de suscripción.
- Servidor PCRF encargado de gestionar las políticas del servicio, por ejemplo, la tarificación y de asignar los parámetros de calidad del servicio para las diferentes sesiones de los usuarios.

2.1.3.2. Protocolos

Los protocolos del sistema LTE permiten conocer el intercambio de información entre sus componentes. La pila de protocolos está dividida en dos tipos: plano de usuario y plano de control.

- El plano de usuario tiene como foco el intercambio de datos que genera el usuario cuando está en la transmisión de información con el sistema LTE. Los protocolos encargados de la transferencia de datos entre UE y el eNB son: PDCP (*Packet Data Control Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) y MAC (*Medium Access Control*). La interfaz encargada de la transferencia de datos

entre el eNB y el UE es la interfaz Uu. Los protocolos encargados de la transferencia de datos entre el eNB y EPC son: GTP (*GPRS Tunneling Protocol*) basado en IP para el nivel de red y UDP (*User Datagram Protocol*) para el nivel de transporte [3] [5].

Los protocolos del plano de usuario de LTE pueden observarse en la Figura 2.5.

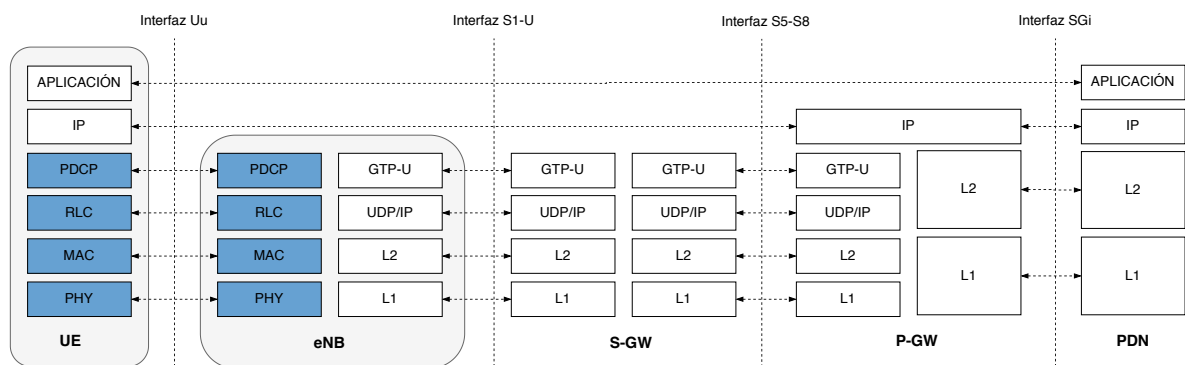


Figura 2.5: Protocolos de plano de usuario de LTE, basado en [5]

- El plano de control es responsable del intercambio de la información NAS (*Non Access Stratum*) generada entre el UE y la MME; y la información AS (*Access Stratum*), generada entre el UE y el eNB. La capa RRC (*Radio Resource Control*) es la capa principal de este conjunto de protocolos, realiza la configuración de los niveles AS (PDCP, RLC, MAC) y transporta la información NAS por medio de la interfaz radio entre el UE y el eNB. Los protocolos entre el eNB y el MME son: S1AP (*S1 Interface Application Protocol*), SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) e IP, donde es intercambiada la información NAS por medio de la interfaz S1-MME [3][5]. Los protocolos del plano de control de LTE pueden observarse en la Figura 2.6.

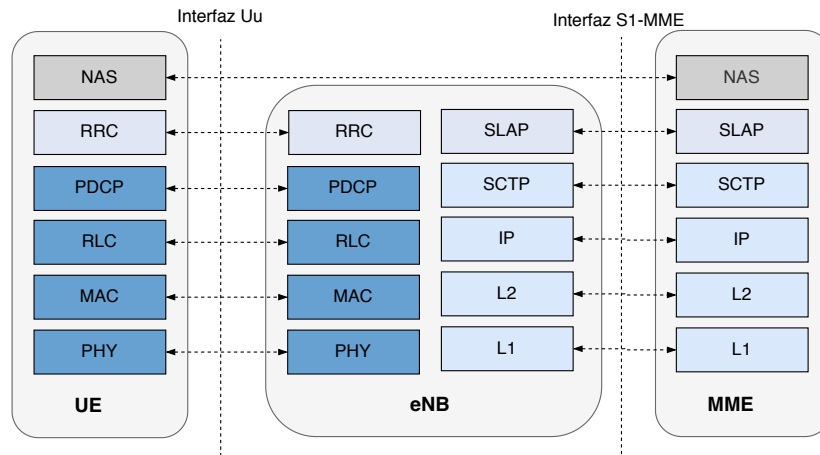


Figura 2.6: Protocolos de plano de control de LTE, basado en [5]

2.2. Radio Definida por *Software*

La tecnología de SDR permite procesar señales de radio frecuencia por medio de *software*; este procesamiento es tradicionalmente realizado mediante hardware. Aplicando el concepto de SDR es posible diseñar un transceptor de radio reprogramable y adaptable mediante *software*. Este transceptor cuenta con circuitos internos al igual que en un transceptor de radio tradicional, pero con la ventaja de permitir la reconfiguración de sus parámetros. Los circuitos internos son los encargados de la recepción/trasmisión de las señales de RF (*Radio Frequency*) y de la respectiva conversión análogo/digital y viceversa. Los circuitos electrónicos programables en los dispositivos SDR son FPGA (*Field Programmable Gate Array*), cuya programación es realizada mediante lenguajes de descripción, como VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*) [3] [36].

Actualmente existen equipos que implementan la tecnología SDR, los cuales provienen de diferentes fabricantes con características y funcionalidades específicas, dependiendo de factores como el precio y el público objetivo. Las familias de dispositivos de SDR más importantes son: USRP, SDRplay y LimeSDR. Las USRP son el hardware más utilizado y conocido en el mercado [3].

USRP es una plataforma de *software* de radio desarrollada por Ettus Research y su empresa matriz, National Instruments. Los USRP realizan el procesamiento de señales en la CPU (*Central Processing Unit*) de los dispositivos y están diseñados para aplicaciones de RF. Los dispositivos USRP permiten a los usuarios crear sus propias implementaciones SDR, creando así prototipos de sistemas completos de comunicación inalámbrica. Los USRP son utilizados comúnmente por investigadores y universidades, destacando áreas de trabajo como telefonía móvil, monitorización del espectro de radiofrecuencia, radio amateur, navegación por satélite y sistemas radar. Los dispositivos USRP más usados son los que cuentan con interfaz USB (*Universal Serial Bus*), particularmente para el despliegue de prototipos de redes móviles, debido a su elevado ancho de banda y su rango de frecuencia (de 70 MHz a 6 GHz), el cual permite trabajar en las diferentes generaciones de las redes móviles [31][3][37].

2.2.1. OpenLTE

OpenLTE es una implementación *software* de código abierto desarrollada por Ben Wojtowicz, basado en las especificaciones 3GPP LTE. OpenLTE está desarrollada en lenguajes de programación C++ y Python, y enfocado en la transmisión y recepción de datos de DL. Los últimos desarrollos incluyen herramientas basadas en GNU Radio que permiten capturar y escanear las señales LTE [3][36][11].

OpenLTE implementa diversas funcionalidades en sus nodos [3][31]:

- E-UTRAN, enfocado en la transmisión y recepción de PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) usando FDD (*Frequency Division Duplexing*). Además, permite utilizar un UE, para realizar pruebas de rendimiento y funcionalidades de la red implementada. El E-UTRAN de OpenLTE permite configurar el ancho de banda entre 1.4, 3, 5, 10 y 20 MHz, e incluye herramientas para el análisis de tráfico como *Wireshark* [38].
- EPC, incluye las funcionalidades del HSS y del MME; además, de una implementación sencilla para las funcionalidades del SGW y el PGW.

- OpenLTE cuenta con herramientas para pruebas y simulación de la parte radio, y utiliza la USRP B200 y B210 para proveer las funciones del eNB.

2.2.2. srsLTE

srsLTE es un *software* de código abierto desarrollado por la compañía SRS (*Software Radio System*) que implementa las especificaciones LTE del 3GPP, *release* 8. srsLTE está diseñado para experimentar con redes LTE y funciona bajo el concepto de SDR [31].

srsLTE cuenta con una librería de alto rendimiento para aplicaciones SDR, permite tener una red de acceso radio compuesta por el eNB y los UE, y tiene un núcleo de red EPC simplificado. La librería está disponible como código abierto o bajo licencia comercial, implementada en el lenguaje de programación C. srsLTE incluye *software* de la implementación OpenLTE, como es la seguridad y análisis de mensajes RRC/NAS [3][39][40].

srsLTE incluye [31][40]:

- Módulo srsUE, una aplicación completa que permite emular un UE y que soporta todas las capas de red desde el nivel PHY (Physical), hasta el nivel de red IP.
- Módulo srsENB, una aplicación completa que permite la creación de un eNB.
- Módulo srsEPC, una implementación ligera y simplificada del núcleo de red EPC, incluyendo HSS, MME y S/P-GW.

2.2.3. OpenAirInterface

OAI (*OpenAirInterface*) es una plataforma de código abierto creada por la fundación OSA (*OpenAirInterface Software Alliance*). OAI brinda herramientas para la investigación y desarrollo del EPC, la E-UTRAN y el UE. La red está implementada

con base en los estándares 3GPP. Actualmente es compatible con el *release* 10 LTE para UE, eNB, MME, HSS, SGW y PGW. OAI tiene como objetivo actualizar la plataforma y continuar con el proceso de estandarización 3GPP a partir del *release* 13 y de las redes 5G [41].

La instalación de OAI puede realizarse centralizada en un mismo computador o de forma distribuida. El *software* está escrito en C para sistema operativo Linux con *lowlatency kernel* y optimizado para procesadores Intel x86 y ARM [2][41]; además, la instalación está dividida en dos proyectos distintos, uno para EPC y otro para E-UTRAN[3]:

- Openair-cn es la red principal de OAI (OAI-CN) o EPC, la cual contiene los archivos *software* necesarios para HSS, MME, S-GW y P-GW.
- Openairinterface5g contiene los archivos *software* necesarios para el despliegue de un eNB y la emulación de un UE.

OAI ofrece diferentes características para su utilización e implementación las cuales son listadas a continuación [3] [42] [43]:

- Compatible con la versión 8.6 de LTE e implementa un subconjunto de la versión 10.
- Configuraciones FDD y TDD.
- Ancho de banda: 5, 10 y 20 MHz.
- Número máximo de antenas: 2.
- Incluye un *framework* propio llamado *T Tracer* para la monitorización del eNB y captura del tráfico de red.

2.2.4. AMARI LTE 100

Amarisoft LTE and NR network software suite [10] es un *software* completamente funcional de LTE y NR que puede operar como implementación independiente o

integrada a una red más grande. Los componentes que incluye Amarisoft son: eNB, gNB en modo SA o NSA, 5G Core, EPC y un servidor IMS. Amarisoft LTE es ejecutado en hardware genérico x86, pero es un *software* comercializado como un producto pago y cerrado, con altos costos de implementación [10]. Algunas características ofrecidas por Amarisoft son [44]: i) red central compacta que incluye MME, S-GW, P-GW y HSS, ii) admite varios servidores IMS con interfaz Rx, iii) monitor de línea de comando, iv) soporte de tarjetas USIM usando el algoritmo de autenticación XOR (*Exclusive OR*), Milenage o TUAKE, v) LTE-A: MIMO 4 x 4 [45], CA hasta 5 celdas en DL y 3 en UL, vi) Implementa LTE versión 14, y vii) simulación de cientos de UE, viii) anchos de banda: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.

2.3. Subsistema Multimedia IP Virtualizado

2.3.1. Redes de próxima generación

NGN (*Next Generation Network*) es usada como plataforma para prestar servicios integrados de telecomunicación utilizando el mayor ancho de banda con múltiples tecnologías y está basada en conmutación de paquetes IP. NGN brinda la convergencia de redes y servicios de alta calidad como voz, datos y multimedia en una sola infraestructura con la ayuda de IMS, para que estos servicios sean independientes de la red [46] [47].

NGN cuenta con dos arquitecturas funcionales, la arquitectura de Softswitch/MGC y la arquitectura IMS/MGC. La arquitectura de Softswitch/MGC es un dispositivo que provee el control de las llamadas y los servicios inteligentes para redes de conmutación de paquetes. La arquitectura Softswitch/MGC maneja el control de las pasarelas de medio (Acceso y/o Enlace) utilizando el protocolo H.248; además, realiza la función de una pasarela de señalización para trabajar conjuntamente con la red de señalización SS7 (*Signaling System No. 7*) de la PSTN (*Public switched telephone network*). La arquitectura IMS/MGC está compuesta por servidores de aplicación, los cuales son responsables de identificar la señalización requerida y de invocar los servicios de valor agregado [48].

2.3.2. Subsistema multimedia IP

IMS, definido por el 3GPP, es una arquitectura integrada en el núcleo de red, para ofrecer servicios multimedia, sobre una infraestructura común. IMS fue introducida por los operadores móviles con el fin de facilitar el acceso ubicuo a los servicios multimedia en redes de acceso móviles e inalámbricas, con calidad de servicio garantizada. La arquitectura IMS tiene influencia en tres planos de la NGN (transporte, control y servicios), y está ubicada en el plano de control con el fin de facilitar la gestión de los servicios multimedia.

IMS está estructurada en capas: acceso, transporte, control y aplicación. La capa de acceso soporta cualquier tipo de acceso de alta velocidad y realiza la conversión de protocolos. La capa de transporte, está compuesta de enrutadores (*edge routers* y *core routers*) y reglas de filtrado. La capa de control contiene controladores de sesión encargados de la señalización entre usuarios y de la invocación de los servicios. La capa de aplicación introduce las aplicaciones propuestas a los usuarios y consta de AS (*Application Server*) y MRF (*Multimedia Resource Function*) los cuales son, conocidos como servidores multimedia IP [49] [50].

2.3.3. Virtualización de funciones de red

NFV (Network Function Virtualization) fue diseñado con el propósito de desacoplar las funciones de red de los equipamientos *hardware* en las que tradicionalmente funcionan. Este desacople permitió la consolidación de múltiples funciones en un servidor físico, y que los operadores de red puedan definir su propia arquitectura. Las funciones de red están controladas por un hipervisor responsable de proveer a los sistemas operativos invitados una plataforma operativa virtual (*hardware* virtual). La implementación de funciones de red virtuales en centros de datos, permite la migración transparente entre máquinas virtuales o máquinas reales, y con esto una mayor flexibilidad de gestión, asignación y escalado de los recursos [51][52]. Los ambientes de prueba hacen uso de NFV debido a que reduce la estructura física sin

modificar la calidad del servicio [53].

2.3.4. Virtualización del subsistema multimedia IP

Un IMS virtualizado (o vIMS), usualmente es desplegado en una plataforma de nube (privada, pública, o híbrida). vIMS permite a las redes de telecomunicaciones ser más eficientes y flexibles, como también ofrecer más servicios de comunicaciones de voz avanzadas y confiables. Al virtualizar el núcleo de IMS y ejecutarlo en la nube permite reducir la dificultad de despliegue, optimizar los recursos y proporcionar la posibilidad de expansión de la capacidad del sistema sin causar una interrupción de los servicios [6][54].

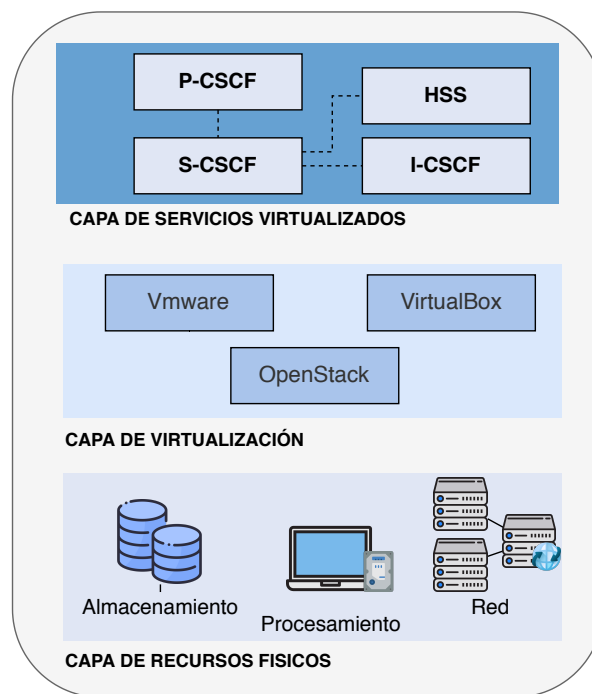


Figura 2.7: Arquitectura vIMS, basado en [6]

La arquitectura vIMS con sus diferentes capas puede observarse en la Figura 2.7. La capa inferior, cuenta con un *Datacenter* y está compuesta por dispositivos de

almacenamiento, procesamiento y de red. La capa intermedia es la encargada de la virtualización, utiliza un hipervisor que permite realizar el control de la virtualización de los recursos físicos disponibles. La capa superior es la encargada de los servicios virtuales en donde las funciones de red de los nodos del núcleo IMS son desplegadas en instancias de máquinas virtuales [55].

2.4. Ambiente de Prueba

Un ambiente de prueba es una plataforma que permite la experimentación de proyectos de amplio desarrollo. El propósito del ambiente de prueba es describir un entorno real, donde sea posible evaluar varios módulos de forma independiente o conjunta sobre un requerimiento en particular [56]. Los entornos que proporcionan los ambientes de prueba son similares a los del mundo real, por ejemplo, incluyendo parámetros de interferencia y desvanecimiento de señal inalámbrica para que los investigadores puedan obtener demostraciones claras y repetibles sobre estudios, sistemas o nuevas tecnologías [57].

Las grandes infraestructuras en la actualidad hacen que los ambientes de prueba estén constituidos por un gran número de elementos para poder implementar un funcionamiento similar de cada parte o requerimiento a evaluar. Los elementos que conforman los ambientes de prueba pueden ser virtuales, lo que permite minimizar los recursos. Los ambientes de prueba pueden desarrollarse como programas o páginas Web [56]. Los entornos del ambiente de prueba son versátiles de acuerdo a las necesidades del usuario, pueden ser entornos híbridos porque combinan las ventajas de la simulación y la emulación o entornos que permiten realizar pruebas con *hardware* real [58]. Las pruebas realizadas permiten evaluar el comportamiento y los resultados antes de una implementación en el mundo real.

Las redes requieren estudios e investigaciones exhaustivas que ayuden a mejorar el comportamiento, maximizar la capacidad del sistema y aumentar el rendimiento; una alternativa para realizar la validación de los resultados obtenidos es el uso de los ambientes de prueba. La configuración de un ambiente de prueba inalámbrico es

esencial para poder realizar investigaciones experimentales de protocolos y evaluaciones de diseños de sistemas. El uso de las simulaciones en los ambientes de prueba inalámbrico pueden generar resultados poco confiables, por lo que es recomendable utilizar dispositivos inalámbricos del mundo real [59]. Los ambientes de prueba son caracterizados en dos tipos: definidos por *software* y basados en tiempo real de alto rendimiento. Los ambientes de prueba definidos por *software* son utilizados para generar datos *offline*, transmisiones inalámbricas y luego procesar la señal recibida; una característica común es la utilización del *software* MATLAB, el cual permite procesar la transmisión y recepción de datos de manera *offline*. Este tipo de ambiente permite proporcionar un marco para la validación rápida de un algoritmo. Los ambientes de prueba basados en tiempo real de alto rendimiento son más complejos y hacen uso de dispositivos como son las FPGA para procesar datos de forma integrada; una desventaja de este tipo de ambiente de prueba es que un algoritmo debe primero codificarse y depurarse en la plataforma integrada para poder habilitar la transmisión en tiempo real. La selección de cada ambiente depende de los requisitos de investigación de cada proyecto [57].

Los sistemas inalámbricos presentan algunas complicaciones entre el control de acceso físico y las capas de red, por lo que un ambiente de prueba puede ayudar a mejorar los prototipos, capturando los requisitos *hardware* para ser implementados en tiempo real. Los requisitos de un ambiente de prueba favorecen la investigación en comunicaciones inalámbricas, puesto que habilitan la modularidad, flexibilidad, escalabilidad, mayor cantidad de número de antenas, desarrollo de lenguaje de alto nivel [60]. Los ambientes de pruebas deben permitir realizar pruebas que cubran la necesidad de investigación con una anticipación a los próximos 5 o 10 años, ser escalables y ser ajustables a un número considerable de problemas de investigación [59]. Un ejemplo de un ambiente de prueba real es el implementado por la Universidad de Surrey, llamado WNT (*Wireless Network Testbed*) que puede observarse en la Figura 2.8 [7]. Los componentes de WNT son: red de acceso, red central y plataforma de prestación de servicios.

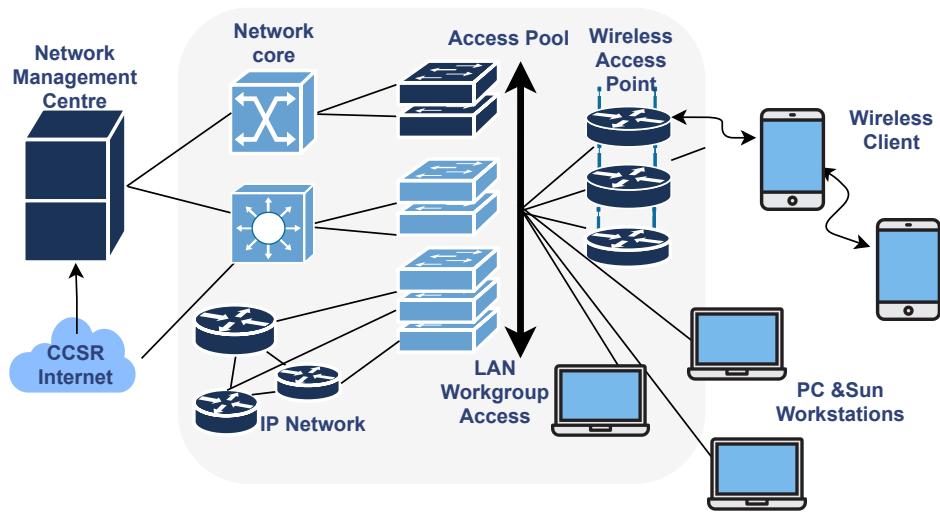


Figura 2.8: Diagrama de WNT, basado en [7]

Capítulo 3

Trabajos Relacionados

Este capítulo presenta una revisión de los trabajos relacionados con el desarrollo de ambientes de prueba para redes móviles 4G interconectadas con IMS. En primer lugar, son presentados los trabajos que realizan implementaciones *software* para redes móviles. Segundo, son presentados los trabajos que implementan ambientes de pruebas para redes inalámbricas. Finalmente, son descritas las brechas de los trabajos relacionados encontrados en la revisión de la literatura.

3.1. Implementaciones *Software* Para Redes Móviles

[35] realizan la implementación de una red LTE basada en la plataforma de *software* libre OpenAirInterface. Los autores utilizan dispositivos USRP para poner en funcionamiento la red LTE, permitiendo la conexión de teléfonos móviles comerciales. La red de LTE es sometida a pruebas, en un sistema de telecomunicaciones en redes de misión crítica, donde los autores evalúan las capacidades de QoS en usuarios asignados con prioridad alta respecto a usuarios comunes.

El trabajo [33] realiza la simulación de la capa física de una red LTE mediante la implementación de una plataforma amigable con el usuario. La plataforma permite

experimentar y realizar simulaciones sobre el análisis del BER (*Bit Error Rate*), gráficas de constelaciones, codificación, modulación y efectos de canal entre otras. A su vez los autores interconectan la plataforma con un USRP N210 que permite el envío de datos estructurados, tanto para UL como para DL. La plataforma permite realizar variaciones en los parámetros como el ancho de banda, modulación y tasa de codificación lo cual posibilita tener un acercamiento al comportamiento de la señal transmitida en un entorno real.

En el trabajo [12], los autores plantean dos escenarios para redes móviles de 4G haciendo uso del *software* libre OpenAirInterface. El primer escenario es realizado sobre dos máquinas virtuales desplegadas en un computador de escritorio. El segundo escenario es implementado utilizando un computador de escritorio conectado con un dispositivo USRP B210 y dos UE comerciales, que les permite desplegar una red LTE. Los autores realizan pruebas de los escenarios implementados. Para el primer escenario, son analizados los mensajes de señalización básicos intercambiados, cuando se activa un UE emulado con un eNodeB. Para el segundo, es analizada la parte radio de la red LTE generada y es realizado un análisis profundo de las trazas; además, son realizadas pruebas de velocidad de la red haciendo uso de los UE comerciales.

El trabajo [36] realiza la implementación del *handover* para una red de 2G y la primera fase de una estación base de 4G. Para ello, los autores utilizan una SDR Ettus N210, cuatro antenas VERT900, una *SIM* (*subscriber identity module*) LTE, programador de tarjetas inteligentes y el sistema operativo Ubuntu para el despliegue de las BTS. Para la implementación de la BTS de 4G, los autores utilizan el *software* OpenLTE, y para la estación de 2G, utilizan el *software* OpenBTS. Los autores realizan pruebas con dos UE, para la visualización de la conexión de las llamadas realizadas en la red de 2G.

El trabajo [37] aborda la implementación de dos estaciones de comunicación móvil, una 2G y otra 4G. La implementación de la red de 2G utiliza el *software* de comunicación móvil de código abierto OpenBTS y las USRP que son dispositivos *hardware* de bajo costo. Para la implementación de estaciones de 4G los autores utilizan el

software de código abierto OAI. Los autores realizan pruebas sobre el envío de datos a través de la computadora hacia la USRP, concluyendo que no es suficientemente rápido; esto significa que la transferencia de datos no es realizada en tiempo real.

El trabajo [61] aplica la técnica SDR para la recepción de señales LTE. Los autores, primero, crean dos diferentes montajes para la captura de la señal LTE. El primer montaje utilizó el sistema operativo Windows, el driver UHD *USRP Hardware Driver* integrado en MATLAB y la USRP B210, con esta implementación no fue posible la captura de la señal de LTE debido a problemas de rendimiento. El segundo montaje utilizó el sistema operativo Ubuntu, el *software* MATLAB y un *software* desarrollado por el grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña, el cual permitió la captura de la señal de LTE. La señal recibida es convertida en digital y pasa a la FPGA, donde es procesada y analizada. Por último, la GUI de Matlab permite el procesamiento y visualización de las pruebas realizadas.

El trabajo [62] implementa un eNB LTE compatible con el *release* 9. Los recursos utilizados para la implementación son: un dispositivo USRP N210 como radio *frontend* y el *software* Amari LTE 100 que es implementado en un computador estándar. El *software* Amari LTE 100 contiene al EPC y al eNB, cuyos parámetros y procedimientos son configurados y validados por los autores para su correcto funcionamiento. La ejecución del eNB permite la realización de pruebas de funcionalidad: pruebas para varias frecuencias, anchos de banda y tasas de transmisión; además, son realizadas pruebas de autenticación y del envío de mensajes de alerta.

El trabajo [63] realiza la configuración y puesta en marcha de una BTS de LTE, utilizando el kit de Amari LTE 100 de la empresa Amarisoft, el cual es basado en la tecnología SDR. Los autores realizan el despliegue de una red LTE de fácil configuración y compatible con la versión 13 especificada por la 3GPP. El *software* utilizado provee de una herramienta que permite visualizar las tramas MAC y el alcance, entre el eNB y el UE; además, les permitió realizar estudios de la potencia captada por el UE procedente de la eNB. Los autores realizan pruebas para diferentes

servicios de datos con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la red y la conexión con el terminal móvil.

El trabajo [64] realiza un estudio de las diferentes soluciones para la transmisión, y recepción de señales LTE y 5G; además, es realizado el análisis de programas utilizados para simulación. Los autores desarrollaron diferentes funciones en el *software* Matlab que permiten simular modelos de canal, y generar y recibir señales de un sistema LTE. El programa desarrollado posibilita transmitir las señales generadas utilizando un generador de funciones vectoriales Rohde y Schwarz SMBV100A y una USRP B210 o Nuand BladeRF. Los autores manifiestan problemas en la conexión de las USRP y en el manejo de las señales con Matlab; además, no fue posible la experimentación con OAI en una sola máquina debido a que no consiguieron realizar la conexión entre los distintos módulos de OAI.

El trabajo [65] presenta un ambiente de pruebas de la red radio, desarrollado para una evaluación escalable y reproducible de los protocolos de red inalámbrica de próxima generación. El ambiente de pruebas llamado ORBIT está formado por un emulador de red radio para interiores y una red de prueba de campo exterior para evaluaciones de usuarios finales en entornos reales.

El trabajo [66] ofrece una visión general de los trabajos de investigación llevados a cabo en los últimos años en el WNT de la universidad de Surrey. El WNT descrito por los autores proporciona una plataforma flexible, reconfigurable para redes inalámbricas y soporta una amplia variedad de escenarios de redes, y servicios de aprovisionamiento. Las investigaciones realizadas en este trabajo son enfocadas en la gestión de la movilidad, gestión de redes de reconfiguración, descubrimiento de servicios y enrutamiento de servicios, y redes de área personal.

3.2. Brechas

Los trabajos [35, 12] implementan una red LTE basada en la plataforma de *software* libre OpenAirInterface. Los autores en sus escenarios utilizan dispositivos USRP para permitir la conexión de UE comerciales a la red desplegada, permitiendo analizar los mensajes intercambiados y realizar pruebas de velocidad. Sin embargo, estas propuestas no realizan una interconexión con un sistema externo IMS y no implementan una interfaz gráfica para el manejo del sistema LTE de forma remota.

Los trabajos [33, 61, 64] analizan la recepción de señales LTE y realizan pruebas por medio de un entorno de simulación de la capa física para obtener resultados en cuanto a calidad y comportamiento de la señal transmitida en un entorno real. Las pruebas son realizadas por medio de una interfaz gráfica que permite variar los parámetros de la red LTE. No obstante, estas propuestas no realizan la implementación de estaciones 4G completas. Los autores simplemente realizan implementaciones y pruebas en la capa física de LTE haciendo uso de los *toolbox* de Matlab.

Las propuestas [36, 37] implementan estaciones 2G y 4G. Los autores realizan pruebas para comprobar el funcionamiento de una llamada en las estaciones de 2G. No obstante, estas propuestas no implementan una estación de 4G completa, por tanto no realizan pruebas de funcionamiento de la red debido a problemas de conexión entre los módulos de LTE; además, no realizan interconexión con un sistema externo IMS.

Los trabajos [62, 63] utilizan el software Amari LTE 100 de la empresa Amarisoft con el fin de implementar estaciones de 4G y realizar pruebas de funcionamiento, de autenticación y de envío de mensajes. los autores implementan un software completo, pero con la desventaja del elevado costo de las licencias de funcionamiento para su uso. Estas propuestas no realizan una interconexión con IMS y tampoco cuentan con una interfaz de usuario para el manejo remoto del sistema implementado.

Los trabajos [65] [66] construyen un ambiente de prueba para redes inalámbricas

donde pueden obtenerse resultados similares a los de entornos reales. Los autores proporcionan una plataforma flexible con red de acceso radio para pruebas reconfigurables. Sin embargo, estas propuestas no realizan una interconexión con IMS, ni contienen una interfaz de usuario para la realización remota de las pruebas.

La revisión de la literatura permite concluir que los trabajos relacionados no incluyen una interfaz de usuario intuitiva para el uso de los ambientes de prueba de forma remota. Respecto a las implementaciones de estaciones móviles 4G, es utilizado *software* de código abierto y cerrado. Las implementaciones realizadas con *software* libre en su mayoría, son enfocadas al análisis de la capa física. Las implementaciones realizadas bajo licencia de uso permiten contar con una estación móvil 4G completa y estable, pero representan una gran inversión debido a la adquisición de los elementos y licencias para su uso.

Nuestro trabajo de grado realiza el despliegue de un ambiente de pruebas para redes móviles interconectadas con IMS sobre la plataforma TELCO de la FIET, en escenarios físicos y virtualizados, que permitan ser escalables, reconfigurables y adaptables a las necesidades del usuario. El ambiente de prueba contará con un sistema LTE implementado bajo *software* libre que sea estable, replicable y cuente con todos los módulos de una red 4G. El sistema LTE contará con dispositivos USRP que permitan a los UE conectarse a la red desplegada. Los usuarios podrán hacer uso de una aplicación web de gestión que les permitirá realizar pruebas, y cambios en el sistema LTE de forma remota y de manera fácil e intuitiva. La experimentación en el ambiente de prueba permitirá a los usuarios realizar investigaciones, obtener un acercamiento a los entornos reales y prepararse adecuadamente para los grandes cambios en el mercado laboral.

Capítulo 4

Diseño de la Arquitectura Telco 4G

Este capítulo presenta el diseño de la arquitectura del ambiente de prueba para redes móviles 4G interconectadas con IMS, denominado Telco 4G. El diseño de la arquitectura es descrito utilizando el modelo de vistas 4+1. En el presente capítulo, primero, las metodologías de diseño arquitectónico son descritas y es realizada la elección del modelo a utilizar. Segundo, la vista de escenarios, la vista lógica y la vista de procesos que componen el diseño de vistas 4+1 de la arquitectura Telco 4G son descritas. La vista de despliegue y la vista física son descritas en el capítulo 5.

4.1. Metodología de Diseño Arquitectónico

El modelado arquitectónico es una representación de las decisiones de diseño que comprende un sistema de arquitectura a través de vistas arquitectónicas. En el desarrollo de un sistema son diversas las partes involucradas; por tanto, es necesario contar con diferentes perspectivas. Las vistas permiten representar una perspectiva o un punto de vista concreto de un sistema. La técnica de representación de una arquitectura de vistas es realizada dependiendo del *stakeholder* [67].

Los modelos y nombres de las vistas de un mismo sistema varían de acuerdo a los planteamientos y perspectivas de autores. En la Tabla 4.1 son representadas las

similitudes observadas entre las vistas propuestas por autores destacados como: Rick Kazman, Len Bass, Christine Hofmeister y Philippe Kruchten [67].

Perspectiva	Kazman	Kruchten	Hofmeister	Bass	Parte interesada
Abstracción de requerimientos funcionales del sistema	Vista Funcional	Vista Lógica	Vista Conceptual	Vista conceptual o Lógica	-Cliente -Usuario final -Analista
Creación de procesos e hilos de ejecución, comunicación entre ellos y recursos compartidos	Vista de Concurrencia	Vista de Proceso	Vista de ejecución	-Vista de Procesos o Coordinación + -Vista de Llamadas	-Arquitectos -Desarrolladores -Equipo de pruebas -Mantenimiento
Organización de los elementos Arquitectónicos implementados	Vista de Desarrollo	Vista de Implementación	-Vista de Código	-Vista Física + -Vista de Módulos	-Programadores -Mantenimiento -Gerentes de Configuración -Gerentes de Desarrollo
Distribución de procesos en la plataforma	Vista Física + Vista de Concurrencia	Vista de Desarrollo	Vista de Módulos y Vista de Ejecución	Vista de Flujo de Control	-Arquitectos -Desarrolladores -Equipo de Pruebas -Mantenimiento -Ing. Hardware
Escenarios y casos de uso	-	Vista de Casos de uso	Vista Conceptual	Vista de Usos	-Cliente -Usuario final -Analista
Especificación abstracta de clases, objetos, funciones y procedimientos	Vista de Código	-	-	-Vista de Clases + - Vista de Flujo de datos	-Diseñadores -Desarrolladores

Tabla 4.1: Comparación de vistas arquitectónicas en función de las perspectivas del sistema, basado en [9]

El diseño de la arquitectura Telco 4G, utiliza el modelo de Kruchten, conocido como modelo de vistas 4+1, porque es el más ampliamente utilizado [67]; además, de ajustarse al estándar IEEE 1471-2000 (*Recommended Practice for Architecture Description of software-Intensive Systems*) [8]. El profesor Philippe Kruchten argumentó que un sistema *software*, puede documentarse y mostrarse por medio de 5 vistas concurrentes. Las vistas deben estar debidamente diferenciadas y son relacionadas entre sí por una vista que relaciona las otras 4 vistas la cual es denominada vista +1. Como puede observarse en la Figura 4.1, los nombres de las 4 vistas son:

vista lógica, vista de procesos, vista de despliegue y vista física; la vista +1 es la vista de escenario [67] [8]. El modelo de Kruchten describe diferentes diagramas que pueden ser utilizados para cada vista, pero no necesariamente nos limita a la utilización de ellos. Las vistas del modelo 4+1 son descritas a continuación [8]:

- Vista lógica representa la funcionalidad que el sistema proporcionará a los usuarios finales, lo que el sistema debe hacer, y las funciones y servicios que ofrece.
- Vista de procesos encargada de los aspectos dinámicos del sistema, explicando los procesos y su comunicación. La vista de procesos está enfocada en el comportamiento del sistema en ejecución y es representada desde la perspectiva de un integrador de sistemas.
- Vista de despliegue ilustra el sistema desde la perspectiva de un programador y es la encargada de la gestión del *software*. La vista de despliegue describe como está dividido el sistema *software* en componentes y sus dependencias.
- Vista Física describe el sistema desde la perspectiva de un ingeniero de sistemas. Esta vista incluye los componentes físicos del sistema y sus conexiones.
- Vista de escenario es representada por los casos de uso *software* y tiene la función de unir y relacionar las 4 vistas restantes.

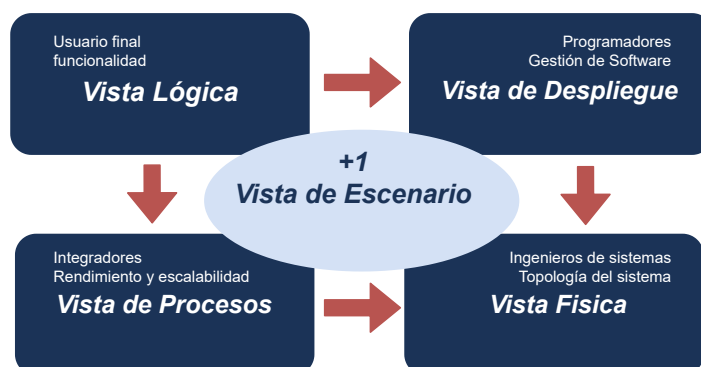


Figura 4.1: Modelo 4+1 de Krunchten, basado en [8]

4.2. Vista de Escenarios

La vista de escenarios describe el problema de negocio, los roles de los actores involucrados y los diferentes requisitos (funcionales y no funcionales) de los sistemas que conforman la arquitectura del ambiente de prueba Telco 4G. Los requisitos de los sistemas son detallados por medio de las historias de usuario de la metodología de desarrollo de software ágil Scrum [68]. Es utilizada la metodología Scrum debido a que es flexible a los cambios que van sucediendo en la fase de desarrollo y por su proceso de retroalimentación continua [69] [70]. De la metodología SCRUM tomaremos apartes para la retroalimentación, planificación y diseño del presente trabajo de grado.

4.2.1. Descripción general

El ambiente de pruebas Telco 4G consta de tres sistemas principales: un sistema LTE, una Aplicación Web de Gestión (AWG) y un Sistema de Interoperabilidad (SIO). El SIO permite interconectar el sistema LTE y la AWG. El sistema LTE habilita la interconexión con un sistema externo IMS como puede observarse en la Figura 4.2.

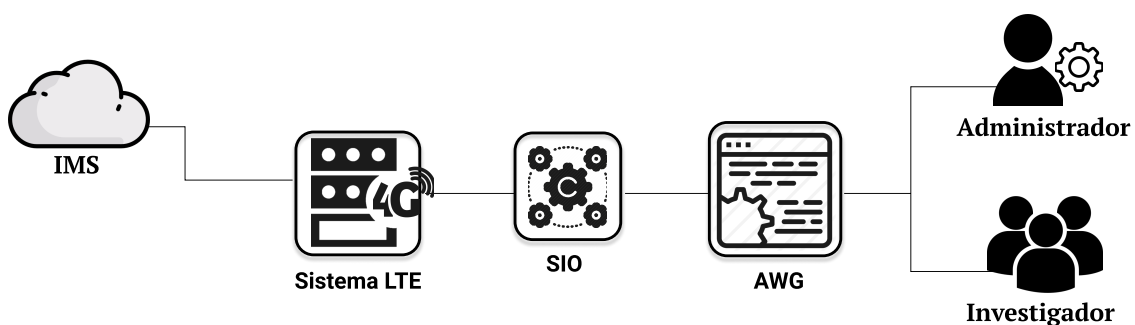


Figura 4.2: Vista general del ambiente de prueba

- **Sistema LTE** compuesto por un EPC, una E-UTRAN y un UE, como puede observarse en la Figura 4.3. El EPC, contiene el MME, HSS, S-GW, P-GW

y PCRF. La E-UTRAN, conformada por una eNB que permite al usuario conectarse a la red. El UE accede al servicio de la red a través de la interfaz de radio. La IMS es un sistema externo que proporciona servicios a los UE.

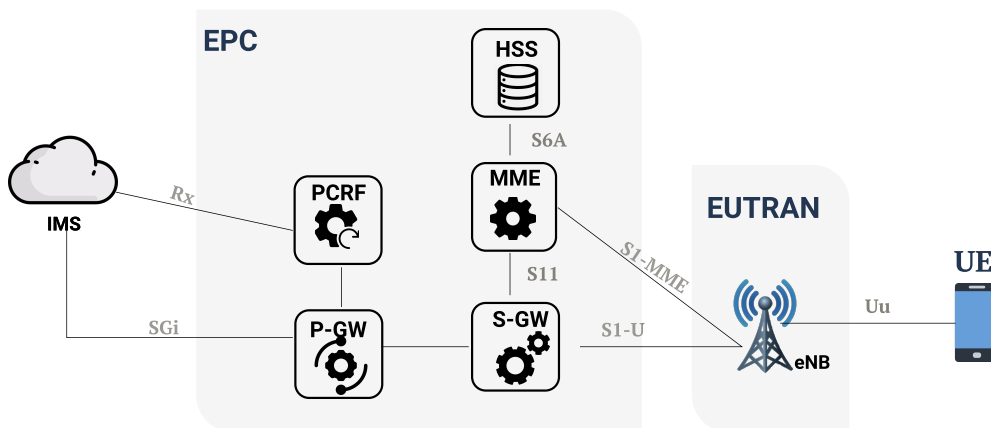


Figura 4.3: Sistema LTE

- **AWG** permite gestionar las cuentas de los usuarios para administrar la información de las pruebas. Adicionalmente, por medio de la interfaz de la AWG, cada cuenta de usuario puede modificar los parámetros de configuración de los componentes del sistema LTE para realizar diversas pruebas. Finalmente, la AWG permite que cada cuenta de usuario pueda visualizar y exportar los resultados y estadísticas de las pruebas realizadas.

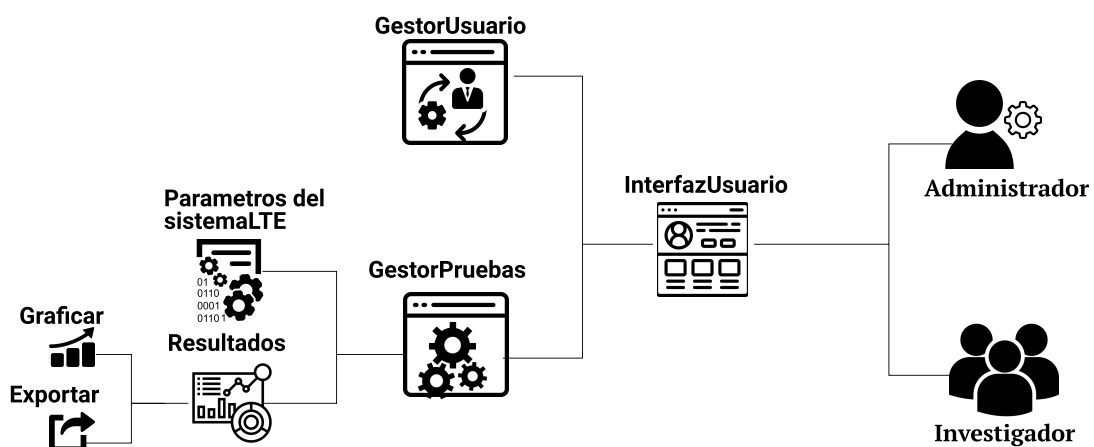


Figura 4.4: Aplicación Web de Gestión

- **SIO** permite la interconexión entre la AWG y el sistema LTE. De esta forma, los usuarios por medio de la AWG pueden ejecutar, configurar y administrar de manera remota acciones sobre el sistema LTE. De forma similar, los resultados de estas pruebas son enviados por medio del SIO a la AWG. Los componentes del SIO pueden observarse en la Figura 5.15.

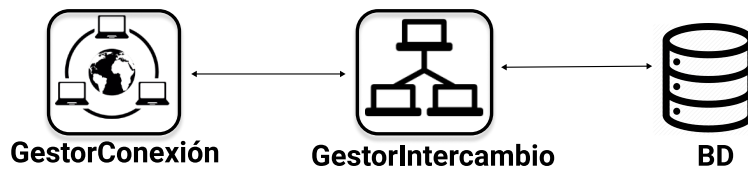


Figura 4.5: SIO

- **IMS** brinda conectividad al sistema LTE a través de la P-GW. El sistema IMS utilizado fue realizado en el trabajo de grado “UN AMBIENTE DE PRUEBAS IMS BASADO EN VIRTUALIZACION DE FUNCIONES DE RED” sobre la plataforma Telco 2.0 de la FIET [71]. Es realizada la habilitación de conexión hacia el sistema LTE estableciendo un canal de comunicación de datos.

4.2.2. Roles

El ambiente de prueba Telco 4G involucra dos roles: investigador y administrador.

- **Investigador**, la actividad principal del investigador es configurar y ejecutar las pruebas en el sistema LTE a través de la AWG. Los investigadores obtienen una cuenta de acceso, para la gestión de las pruebas y de sus resultados. Los investigadores pueden ser estudiantes de pregrado y posgrado de una institución educativa e investigadores externos pertenecientes al sector privado de las telecomunicaciones.
- **Administrador** es el encargado de gestionar los usuarios y la información de las pruebas realizadas; además, es quien verifica el estado del sistema LTE y corrige las posibles fallas.

4.2.3. Requisitos de alto nivel

Para definir adecuadamente los requisitos es necesario tener claro el problema de estudio, así como también especificar los requisitos funcionales y no funcionales.

Problema de estudio, la FIET de la Universidad del Cauca no cuenta con un ambiente de prueba para experimentación en redes móviles. Los investigadores y estudiantes al contar con un ambiente de prueba tendrán un acercamiento a la experimentación sobre diferentes sistemas de comunicación. Para los estudiantes este ambiente de prueba permitirá profundizar los conocimientos adquiridos a lo largo del ámbito educativo y estar más preparados para el mundo laboral.

Requisitos funcionales

- **Requisitos funcionales del Telco 4G** son representados por las acciones que este puede realizar. El Telco 4G cuenta con la interconexión entre la AWG, el SIO y el sistema LTE; además, el sistema LTE se conecta con un sistema IMS externo.
 - **Requisito 1:** el ambiente de pruebas debe permitir la interconexión entre el sistema LTE y un sistema externo IMS.

- **Requisitos funcionales del sistema LTE** son representados por las diferentes configuraciones e interconexiones entre los nodos y módulos del sistema. Los nodos del módulo EPC deben interconectarse de forma correcta con el fin de realizar una conexión exitosa con el módulo eNB. La conexión entre el módulo eNB y EPC, permitirá la generación de una red LTE. Los usuarios al conectarse a la red pueden realizar llamadas y consumir datos.
 - **Requisito 2:** el sistema LTE debe permitir la interconexión entre el módulo EPC con el módulo eNB, para lograr el despliegue de la red LTE y permitir que el UE inicie la solicitud de un servicio.
 - **Requisito 3:** el sistema LTE debe permitir la realización de llamadas 4G simultáneas. Las llamadas son realizadas desde los UE, sobre la red LTE generada.

- **Requisito 4:** el sistema LTE debe permitir a los dispositivos de usuario acceder al servicio de datos.
- **Requisitos funcionales de la AWG** permiten el uso de un sistema LTE de forma más interactiva y simple. El usuario investigador puede ingresar con una cuenta (usuario y contraseña), acceder a la información del sistema LTE y además crear, configurar, eliminar pruebas y visualizar el resultado.
 - **Requisito 5:** la AWG debe permitir al usuario ingresar los datos de configuración de la prueba y guardarlos en la base de datos. Los datos ingresados por el usuario deben enviarse al sistema LTE con el fin de realizar las pruebas pertinentes y obtener los resultados de la prueba.
 - **Requisito 6:** la AWG debe permitir al usuario investigador realizar un CRUD (*Create, Read, Update, Delete*) de pruebas y guardar de forma individual la configuración junto con el resultado de cada prueba.
 - **Requisito 7:** la AWG debe permitir iniciar sesión con un correo y contraseña personal.
 - **Requisito 8:** la AWG debe contar con una sección de información que sirva de ayuda a los usuarios para el manejo del Telco 4G.
 - **Requisito 9:** la AWG debe permitir exportar los resultados de las pruebas.
- **Requisitos funcionales del SIO** permiten conectar el sistema LTE y la AWG; además, de procesar los datos recibidos, direccionarlos y enviarlos al sistema LTE o a la AWG.
 - **Requisito 10:** el SIO debe permitir el envío de los parámetros de las pruebas establecidas en la AWG hacia el sistema LTE. Los resultados obtenidos son enviados por medio del SIO hacia la AWG.
 - **Requisito 11:** el SIO debe permitir el uso remoto del sistema LTE a través de la AWG para realizar acciones y configuraciones en los módulos que conforman el sistema LTE.

Requisitos no funcionales

▪ Requisitos no funcionales del Telco 4G

- **Requisito 1:** el Telco 4G debe contar con un tiempo de respuesta eficiente de comunicación entre el sistema LTE y la AWG; además, debe permitir un rápido despliegue de los resultados obtenidos al configurar, modificar y ejecutar una prueba.

▪ Requisitos no funcionales del sistema LTE

- **Requisito 2:** el sistema LTE debe brindar el servicio de llamadas y de datos.
- **Requisito 3:** el sistema LTE debe proporcionar un tiempo de respuesta acorde al servicio de datos y llamadas.

▪ Requisitos no funcionales del SIO

- **Requisito 4:** el SIO debe proporcionar un tiempo de respuesta acorde para la transmisión y recepción de los datos enviados por la AWG y el sistema LTE.

4.2.4. Historias de usuario

Las historias de usuario permiten organizar las funcionalidades de los sistemas teniendo en cuenta criterios como estimación, prioridad, riesgos, responsables y validaciones [68]. La realización de cada historia de usuario tendrá en cuenta un requisito funcional. Esta sección describe las principales historias de usuario, las restantes son descritas en el Anexo A.1.

Historia de usuario: Basada en requisito 1	
Número: 1	Usuario: Administrador
Nombre de historia:	Interconexión con IMS
Prioridad: Alta	Riesgo en desarrollo: Alto
Puntos estimados: 5	Estimación: 4 semanas
Responsable: Yeison Stiven Murcia	
Descripción: Interconectar el sistema LTE con un sistema externo IMS para proveer diferentes servicios al sistema LTE.	
Validación: El sistema LTE puede ofrecer servicios brindados por el sistema IMS.	

Tabla 4.2: Historia usuario, interconexión con IMS

Historia de usuario: Basada en requisito 2	
Número: 2	Usuario: Investigador
Nombre de historia:	Interconexión entre módulo EPC y eNB
Prioridad: Alta	Riesgo en desarrollo: Alto
Puntos estimados: 5	Estimación: 3 semanas
Responsable: Estephany Argoty	
Descripción: Interconectar el módulo EPC con el módulo eNB para intercambiar los datos entre los módulos, con el fin de realizar el despliegue de la red LTE y permitir que el UE inicie la solicitud de un servicio.	
Validación: -Los módulos EPC y eNB, deben interconectarse de forma correcta -El usuario puede conectar su UE a la red desplegada.	

Tabla 4.3: Historia usuario, interconexión entre módulo EPC y eNB

Historia de usuario: Basada en requisito 5	
Número: 3	Usuario: Investigador
Nombre de historia:	Registro de datos de prueba
Prioridad: Alta	Riesgo en desarrollo: Alto
Puntos estimados: 5	Estimación: 5 semanas
Responsable: Yeison Stiven Murcia	
Descripción: El usuario investigador debe llenar un formulario con la información de configuración para poder ejecutar la prueba. Los datos son suministrados por teclado para ser enviados posteriormente hacia el sistema LTE.	
Validación : -La AWG debe guardar la información suministrada por el usuario en sus bases de datos.	

Tabla 4.4: Historia usuario, registro de datos de prueba

Historia de usuario: Basada en requisito 6	
Número: 4	Usuario: Investigador
Nombre de historia:	CRUD de pruebas
Prioridad: Alta	Riesgo en desarrollo: Alto
Puntos estimados: 5	Estimación: 5 semanas
Responsable: Estephany Argoty	
Descripción: El usuario investigador puede crear, editar, eliminar y visualizar los resultados de las pruebas que realice, las pruebas tienen un identificador único para ser accedidas solo por sus propietarios.	
Validación: -El usuario puede acceder a las funciones del CRUD de sus pruebas. -El usuario puede crear diferentes pruebas. -El usuario puede realizar cambios en las pruebas y Así mismo eliminarlas si desea.	

Tabla 4.5: Historia usuario, CRUD de pruebas

Historia de usuario: Basada en requisito 10	
Número: 5	Usuario: Investigador
Nombre de historia: Comunicación entre el sistema LTE y la AWG	
Prioridad: Alta	Riesgo en desarrollo: Alto
Puntos estimados: 5	Estimación: 4 semanas
Responsable: Estephany Argoty	
Descripción: El SIO debe permitir el envío de los parámetros de las pruebas establecidas en la AWG hacia el sistema LTE para ejecutar las pruebas y los resultados enviarse por medio del SIO hacia la AWG.	
Validación: -El SIO debe recibir y enviar la información hacia la AWG y el sistema LTE. -El sistema LTE debe ejecutar los parámetros que son enviados por la AWG a través del SIO. -En la AWG debe ser posible visualizar los resultados de las pruebas enviados por medio del SIO.	

Tabla 4.6: Historia usuario, comunicación entre el sistema LTE y la AWG

4.3. Vista Lógica

Esta vista describe la funcionalidad que el sistema proporciona en términos de servicios a sus usuarios por medio de diagrama de paquetes. El diagrama de paquetes del Telco 4G está formado por cuatro paquetes que representan los sistemas antes definidos en la vista de escenarios. Los paquetes principales son: la aplicación web de gestión, el sistema interoperabilidad, el sistema LTE y el sistema IMS como puede observarse en la Figura 4.6. Los paquetes cuentan con subpaquetes, clases, atributos, métodos y están relacionados por medio de una dependencia de acceso la cual indica que un paquete requiere la asistencia de las funciones de otro.

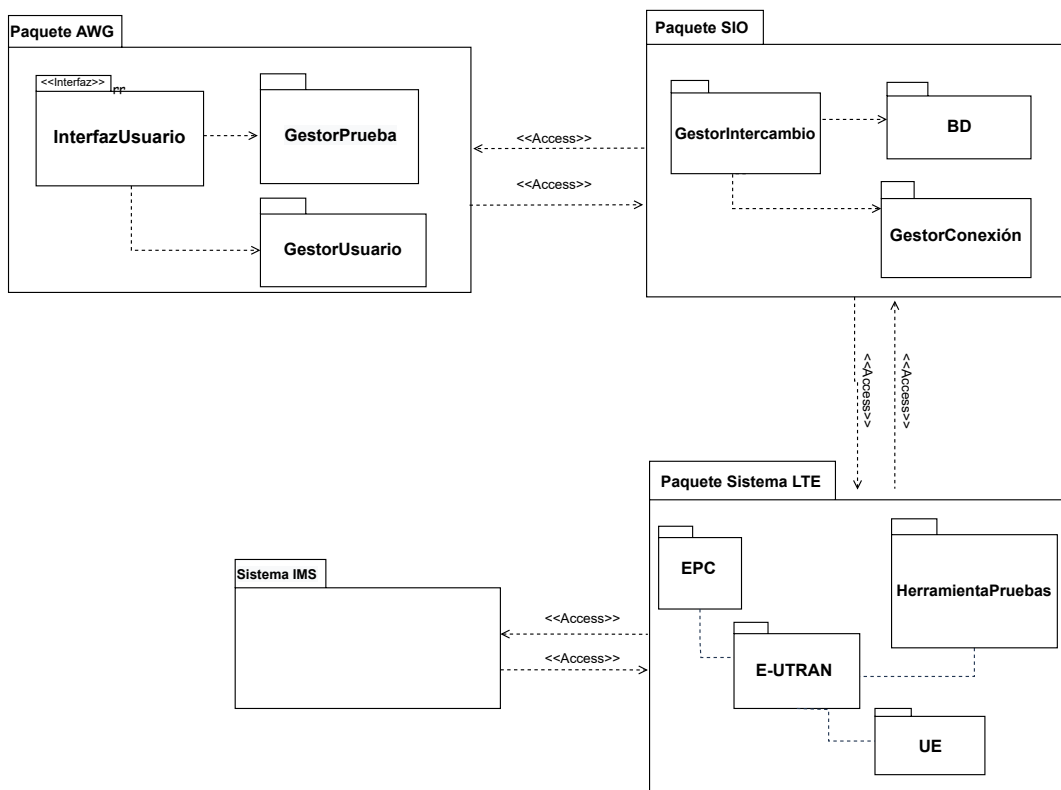


Figura 4.6: Diagrama de paquetes, Telco 4G.

4.3.1. Paquete aplicación web de gestión

Este paquete cuenta con una interfaz gráfica que permite un manejo fácil y eficiente del sistema LTE. La interfaz gráfica concede al usuario investigador realizar pruebas hacia el sistema LTE y permite configurar los datos de cada prueba. El usuario investigador tendrá acceso al aplicativo por medio de una cuenta para gestionar las pruebas realizadas y sus correspondientes resultados. El usuario administrador también accede por medio de una cuenta para poder gestionar todas las pruebas y las cuentas de los usuarios. La AWG adicionalmente proporciona al usuario la posibilidad de visualizar los resultados de las pruebas y exportarlas. Los subpaquetes y clases que componen la AWG pueden observarse en la Figura 4.7.

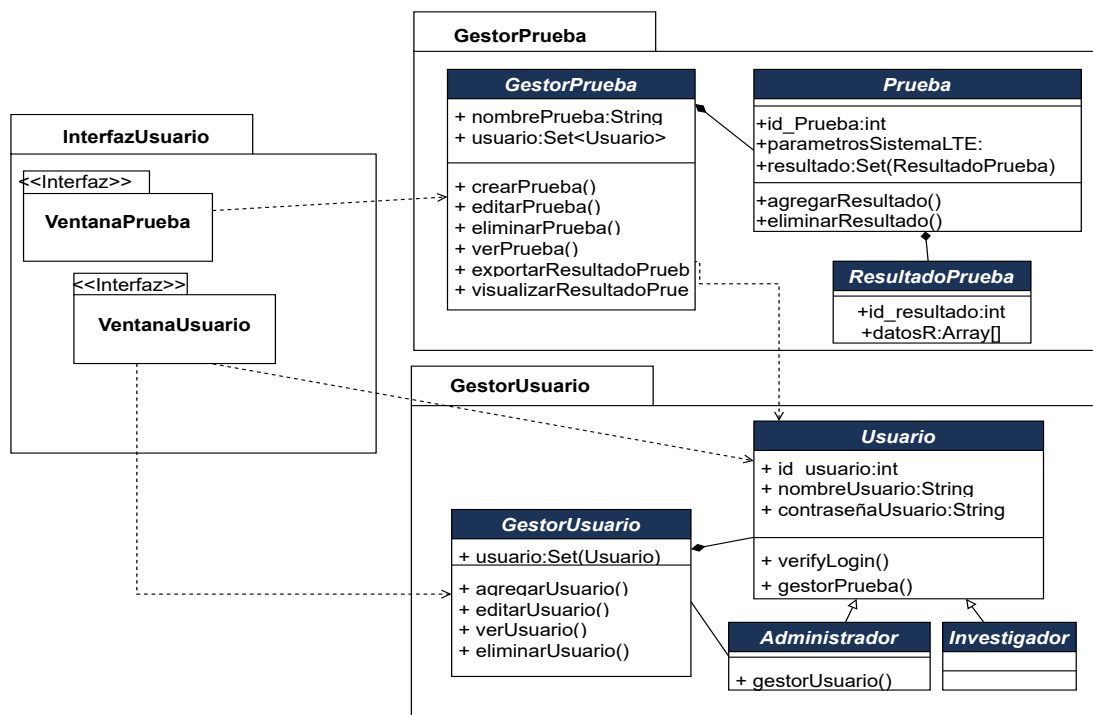


Figura 4.7: Diagrama de paquetes, AWG.

InterfazUsuario es el entorno visual que permite controlar el sistema LTE de forma intuitiva y amigable para el usuario investigador y administrador. Los paquetes que

conforman la interfaz de usuario son: la ventana de prueba y la ventana de usuario cada uno contiene archivos de diseño, información, gráficas y formularios.

GestorPrueba es el encargado de la administración de las pruebas y sus resultados, cuenta con funciones básicas para la gestión de los datos. El paquete está compuesto por tres clases relacionadas entre sí. La primera clase llamada GestorPrueba, tiene las funciones para crear, editar, eliminar, visualizar una prueba; además, de exportar y visualizar los resultados. Las pruebas cuentan con un número de identificación, un nombre de la prueba y la identificación del usuario para ser accedidas únicamente por sus propietarios. La segunda clase llamada Prueba contiene los parámetros que permiten modificar el sistema LTE; además, por cada prueba realizada es obtenido un resultado, el cual puede ser guardado o eliminado. La última clase llamada ResultadoPrueba cuenta con un identificador único y los datos del resultado de la prueba.

GestorUsuario es el encargado de la administración de los usuarios y cuenta con funciones básicas para el almacenamiento de los datos; además, está compuesto por cuatro clases relacionadas entre sí. La primera clase llamada GestorUsuario, tiene las funciones para crear, editar, eliminar y visualizar los usuarios. La segunda clase llamada Usuario contiene el nombre y la contraseña de cada usuario, sus funcionalidades son verificar el inicio de sesión para acceder a la AWG y gestionar las pruebas. La tercera clase llamada Investigador hereda todos los atributos y métodos de la clase Usuario. La cuarta clase llamada Administrador tiene los atributos y métodos de la clase Usuario con una tarea adicional, la de gestionar los usuarios.

4.3.2. Paquete sistema de interoperabilidad

El paquete SIO es el encargado de proveer servicios que permiten establecer una interconexión entre el sistema LTE y la AWG, posibilitando un manejo remoto del sistema LTE por medio de la AWG. El SIO es el encargado de recibir y enviar tanto los parámetros para la realización de las pruebas como sus resultados; además, permite realizar una conexión remota desde el navegador hacia el sistema LTE con el fin de tener un acceso total para realizar cambios y configuraciones. Los subpaquetes

del SIO pueden observarse en la Figura 4.8.

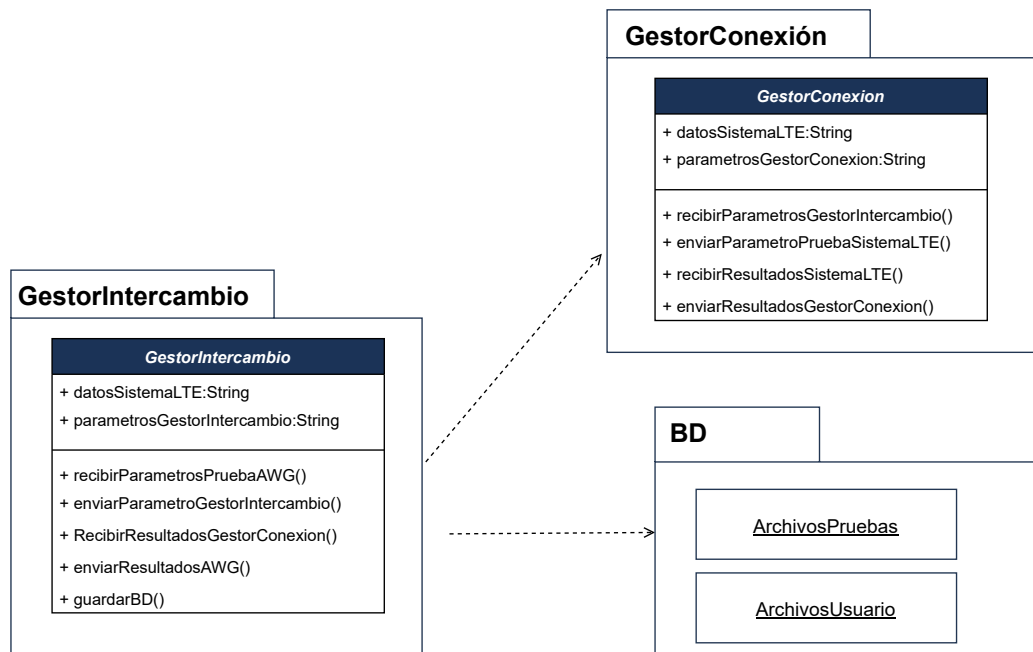


Figura 4.8: Diagrama de paquetes, sistema de interoperabilidad.

GestorIntercambio es el encargado de recibir los parámetros de configuración de las pruebas y de generar la solicitud de conexión remota que envía la AWG; además, los procesa para enviarlos hacia el sistema LTE a través del subpaquete **GestorConexión**. Los parámetros recibidos por el subpaquete **GestorIntercambio** referente a pruebas y cambios del sistema LTE son enviados a la AWG para ser visualizados por el usuario.

GestorConexión, recibe los parámetros de las pruebas y solicitudes de conexión remota enviados por la AWG a través del subpaquete **GestorIntercambio**. Los parámetros recibidos son enviados al sistema LTE, el cual realiza los diferentes procesos requeridos por el usuario. Los resultados obtenidos al realizar las pruebas y la respuesta de la conexión remota son enviados al subpaquete **GestorConexión** para su posterior envío hacia la AWG.

BD es la encargada de almacenar las pruebas y los usuarios para su posterior uso. El

ArchivosUsuario guarda la información de los usuarios y el ArchivosPrueba guarda la información sobre las pruebas realizadas por los usuarios.

4.3.3. Paquete sistema LTE

Este paquete es el encargado de desplegar la red LTE que sirve para la transmisión de datos y el servicio de llamadas, permitiendo a los usuarios conectarse a esta red por medio de un terminal móvil y realizar llamadas entre los usuarios. Este paquete cuenta con una herramienta de prueba que permite monitorear los datos intercambiados entre los diferentes subpaquetes. Los subpaquetes que componen el SistemaLTE pueden observarse en la Figura 4.9.

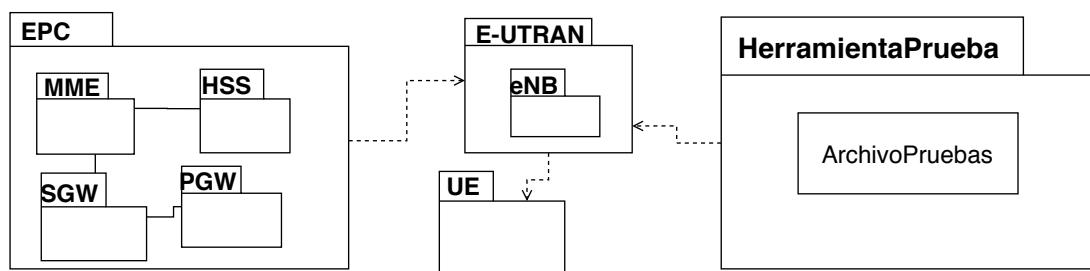


Figura 4.9: Diagrama de paquetes, sistema LTE.

EPC es el núcleo de red y está formado por los subpaquetes MME, HSS, SGW y PGW. Estos paquetes son interconectados para permitir gestionar el tráfico de la red.

E-UTRAN es la encargada de controlar las comunicaciones entre el UE y el EPC. Además, está constituido por un subpaquete llamado eNB que corresponde a la estación base.

UE es el terminal que permite a los usuarios acceder a la red LTE desplegada a través de la interfaz radio: consume los servicios ofertados por la red, en este caso voz y datos.

HerramientaPrueba es la encargada de capturar el tráfico de red producido entre los paquetes EPC, E-UTRAN y UE para monitorizar y analizar los protocolos intercambiados entre ellos. La realización de las pruebas genera un archivo de texto el cual se guarda en el sistema LTE. Estos resultados son enviados hacia la AWG por medio del SIO con el fin de que el usuario mediante la AWG visualice y exporte las gráficas de las pruebas realizadas.

4.4. Vista de Procesos

La vista de procesos explica los comportamientos y procesos del ambiente de prueba en tiempo de ejecución, los diagramas utilizados para describir esta vista son los diagramas de secuencia. Los requisitos más importantes del TELCO 4G son representados por medio de diagramas de secuencia, los diagramas restantes son documentados en el anexo A.2.

4.4.1. Establecimiento de una sesión de servicio con IMS

Requisito 1: El ambiente de prueba debe permitir la conexión entre el sistema LTE y un sistema externo IMS para proporcionar servicios. En la Figura 4.10 puede observarse los procesos del establecimiento de una sesión de servicio [72].

1.[UE → MME] Solicitud conectividad PDN: el UE envía un mensaje de solicitud de conexión PDN al MME para solicitar acceso a la red IMS. El mensaje es utilizado para solicitar la IP del *P-CSCF* (*Proxy Call Session Control Function*).

2.[MME → P-GW] Solicitud de creación de sesiones de voz: el MME prepara un mensaje de petición de creación de sesión, el mensaje contiene el ID del canal por defecto, un APN, el PCO y el perfil de suscripción QoS para enviarlo al P-GW. El MME obtiene el APN y el perfil de suscripción del HSS durante una actualización de localización. El APN hace que el MME tenga la necesidad de crear un canal por defecto para el servicio de voz y un ID para el canal.

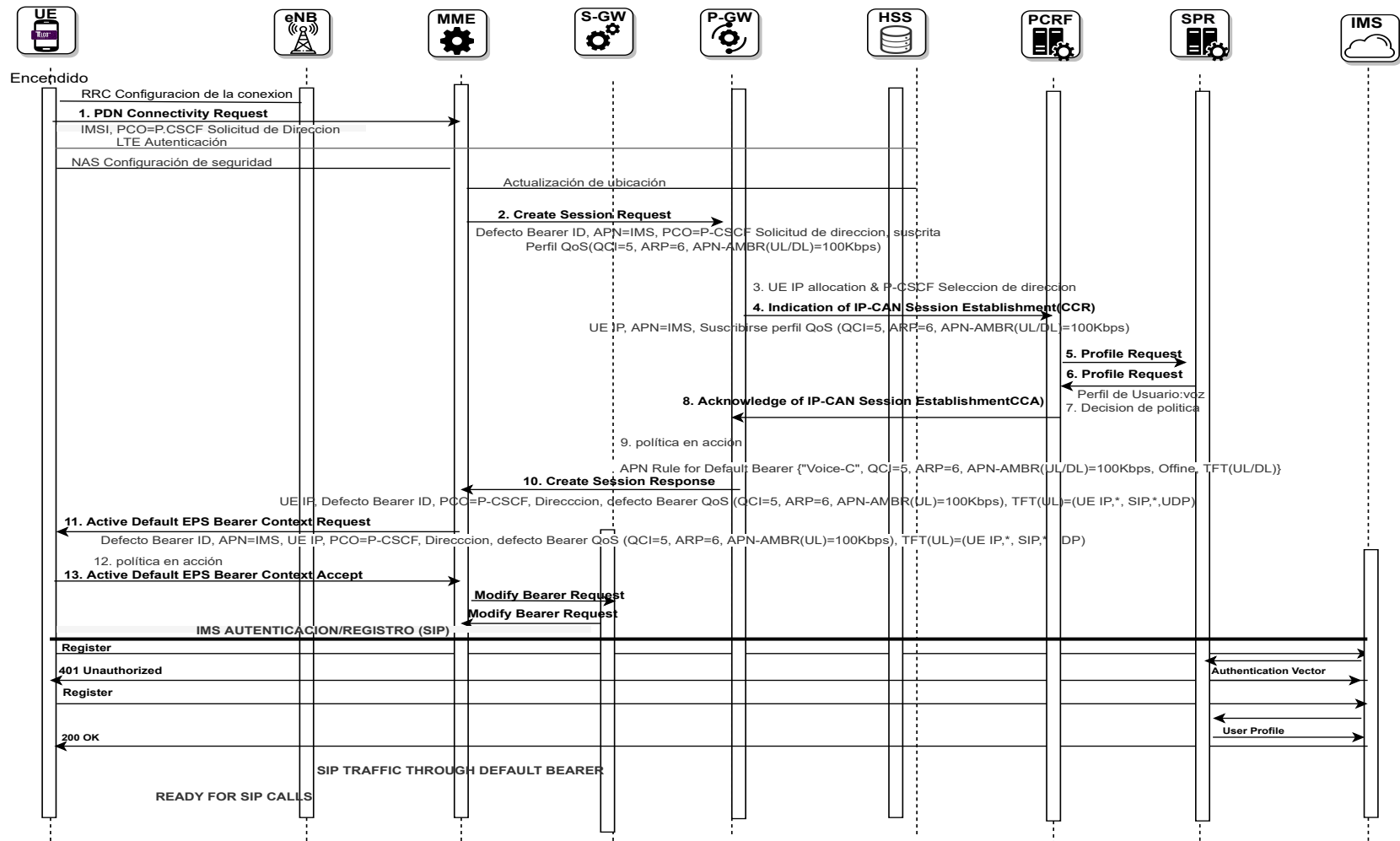


Figura 4.10: Diagrama de secuencia, establecimiento de una sesión de servicio con IMS.

3.[UE ← P-GW] Asignación de direcciones: P-GW asigna una IP al UE para el APN IMS.

4.[P-GW → PCRF] Notificación de EPS para sesión de establecimiento: P-GW envía el perfil de suscripción QoS del usuario al PCRF para solicitar autorización, con un mensaje de petición de control de crédito(CCR).

5 y 6.[PCRF → SPR] Obtención del perfil de usuario: PCRF obtiene del SPR un perfil de suscripción del usuario para determinar una política PCC para el servicio de voz.

7.[PCRF] Decisión de política: el PCRF decide la política para la sesión EPS según el perfil de suscripción, en este caso la regla seleccionada es "voice-c".

8.[P-GW ← PCRF] Provisión de regla PCC: PCRF envía la regla PCC "voice-c.^a P-GW por medio de la interfaz Gx.

9.[P-GW] Política de cumplimiento: el PGW forzará a los parámetros de la política y mapea los parámetros QoS del SDF al canal por defecto cuando recibe la regla PCC "voice-c".

- Parametros Qos del SDF:

P-GW (SDF): QCI = 5, ARP = 6, MBR (UL/DL) = 100 Kbps/100 Kbps, SDF Plantilla (UL/DL) = (UE IP, *, SIP, *, UDP)/(*, UE IP, SIP, *, UDP)

- Son mapeados a:

P-GW (*Default portador*): QCI = 5, ARP = 6, la APN = AMBR (UL/DL) = 100 Kbps/100 Kbps, TFT (UL/DL) = (UE IP, *, SIP, *, UDP)/(*, UE IP, SIP, *, UDP)

10.[MME ← P-GW] Respuesta a la creación de sesiones de voz: el P-GW envía un mensaje de respuesta por la creación de sesión al MME, respuesta de la petición enviada en el proceso número 2. El mensaje contiene el perfil aprobado de Qos y los parámetros de la política UL para ser reenviado al UE.

11.[UE ← MME] Solicitud de contexto de activación del canal por defecto: el MME le envía al UE un mensaje de petición para la activación del canal EPS por defecto. El mensaje ESM, contiene un APN, un UE-IP, la dirección P-CSCF y los parámetros de política enviados por el P-GW en un mensaje de aceptación de la conexión.

12.[UE] Política de forzado: UE forzó la política de UL y activa el contexto portador por defecto.

13.[UE → MME] Notificación de contexto de activación del canal por defecto: el UE notifica al MME por medio de un mensaje de aceptación que el canal por defecto necesario para la entrega de mensajes de señalización SIP ha sido activado.

Una vez realizados los diferentes procesos, es activado el canal para la señalización SIP, el registro en la red IMS puede realizarse a través del canal.

4.4.2. Equipo de usuario inicia una solicitud de servicio al sistema LTE

Requisito 2: el sistema LTE debe permitir la interconexión entre el módulo EPC con el módulo eNB, para lograr el despliegue de la red LTE y permitir que el UE inicie la solicitud de un servicio. La Figura 4.11 presenta los procesos donde el UE Inicia la solicitud de servicio al sistema LTE.

1.[MME ← S-GW] Ejecución, petición y servicio: S-GW envía un mensaje "*Down-Link Data Notification*" al MME informando de las conexiones de señalización y *bearers* que necesitan para establecer comunicación con el UE.

2.[eNB ← MME] *Paging*: el MME conoce la localización del UE en uno de sus TA (*Tracking Area*) pero no sabe en cual celda está ubicado, entonces el MME envía un mensaje de *Paging* a todas las eNB por donde estuvo el UE. El eNB hace *broadcast* del mensaje a través del *PCH* (*Paging Channel*), así el UE puede recibirlos durante su conexión regular.

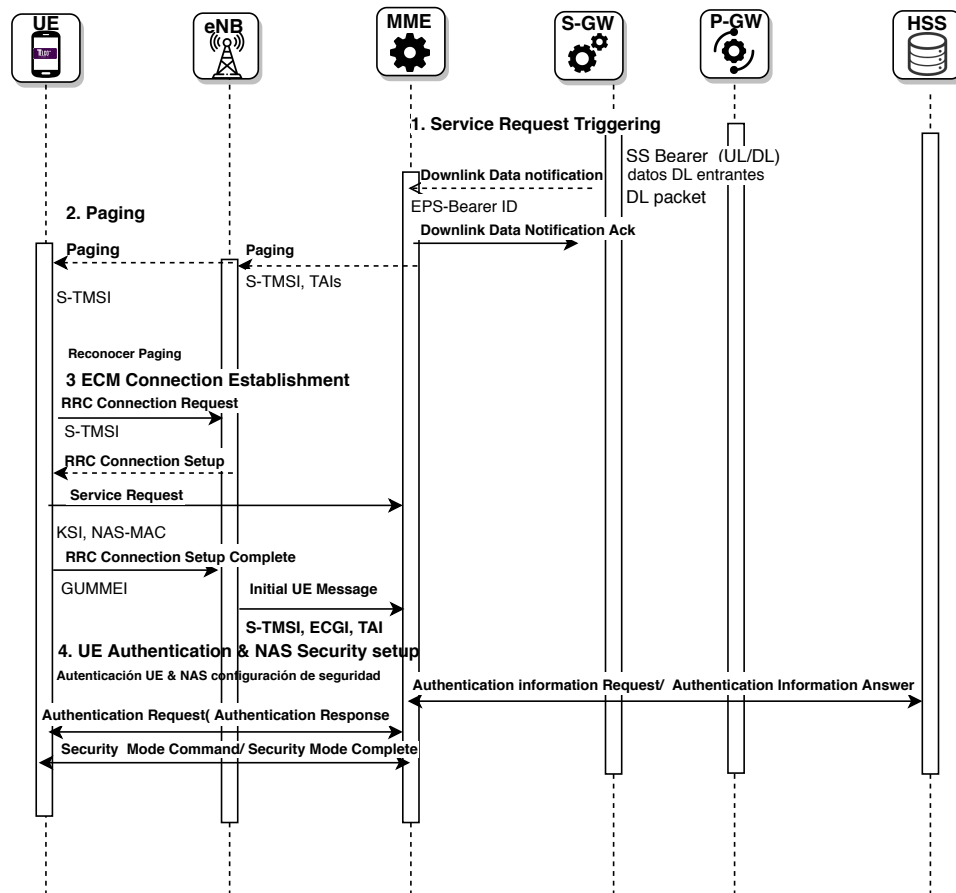


Figura 4.11: Diagrama de secuencia, el UE inicia una solicitud de servicio al sistema LTE.

3.[UE] Establecimiento conexión ECM: cuando identifica que existe tráfico, el UE envía un mensaje *Service Request* para establecer la conexión ECM. Los procesos para establecer la conexión ECM comienzan cuando el UE accede a la celda a través del canal de enlace radio, y envía un mensaje *RRC Connection Request* para establecer la conexión.

4.[MME] Autenticación UE y configuración seguridad NAS: el MME, una vez es recibido el mensaje, ejecuta los procesos de autenticación.

5.[UE ← MME] Establecimiento E-RAB: el MME Después de recibir el mensaje

Service Request del UE, establece un DRB y un *bearer* S1 de bajada.

Una vez realizados los diferentes procesos, el UE puede acceder a los servicios ofrecidos por el sistema LTE.

4.4.3. Registro de datos de prueba

Requisito 5: la AWG debe permitir al usuario ingresar los datos de configuración de la prueba y guardarlos en la base de datos. Los datos ingresados por el usuario investigador deben enviarse al sistema LTE para realizar las pruebas. En la Figura 4.12 puede observarse los procesos de registro de datos para las pruebas.

1.[Investigador → InterfazUsuario] Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos de su usuario y contraseña a la InterfazUsuario para iniciar sesión. La InterfazUsuario direcciona los datos hacia el GestorUsuario para validarlos y buscarlos en la base de datos, si son válidos la interfazUsuario desplegar la ventana de prueba.

2.[InterfazUsuario → GestorUsuario] Crear prueba: el usuario investigador envía la petición de la creación de una prueba a la InterfazUsuario para verificar el estado del sistema LTE. InterfazUsuario direcciona la petición al GestorPrueba para guardar y enviarla al SIO el cual verifica si el sistema LTE está activo.

3.[InterfazUsuario ← GestorPrueba] Desplegar el formulario de prueba: el sistema LTE envía un mensaje de *OK* al SIO para que el GestorPrueba permita el acceso al formulario de la prueba en la InterfazUsuario.

4.[Investigador → InterfazUsuario] Seleccionar la prueba: el usuario investigador selecciona una prueba y la envía al Gestor Prueba.

5.[Investigador → InterfazUsuario] Digitar los datos de una prueba: el Gestor de la prueba confirma la selección y envía el permiso para digitar los parámetros de la prueba seleccionada.

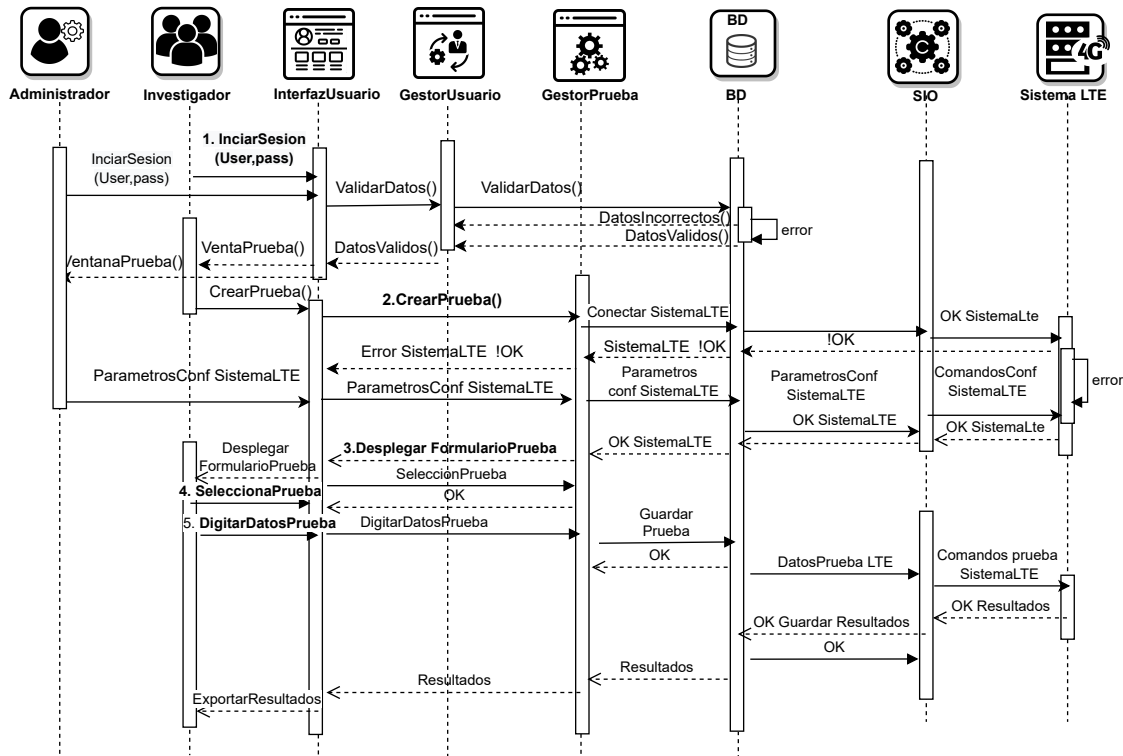


Figura 4.12: Diagrama de secuencia, registro de datos para las pruebas.

4.4.4. Gestión de pruebas

Requisito 6: El sistema AWG debe permitir que el usuario investigador pueda realizar un CRUD de pruebas y guardar de forma individual la configuración junto con el resultado de cada prueba. La Figura 4.13 presenta los procesos de la gestión de datos de la prueba en el sistema AWG.

1.[Investigador → InterfazUsuario] Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos de su usuario y contraseña a la InterfazUsuario para iniciar sesión. La InterfazUsuario direcciona los datos hacia el GestorUsuario para validarlos y buscarlos en la base de datos, si son válidos la interfazUsuario desplegará la ventana de prueba.

2.[InterfazUsuario → GestorUsuario] Crear prueba: el usuario investigador envía la petición de crear una prueba a la InterfazUsuario para verificar el estado

del sistema LTE. La InterfazUsuario direcciona la petición al GestorPrueba para guardar y enviarla al SIO que verifica si el sistema LTE se encuentra activo.

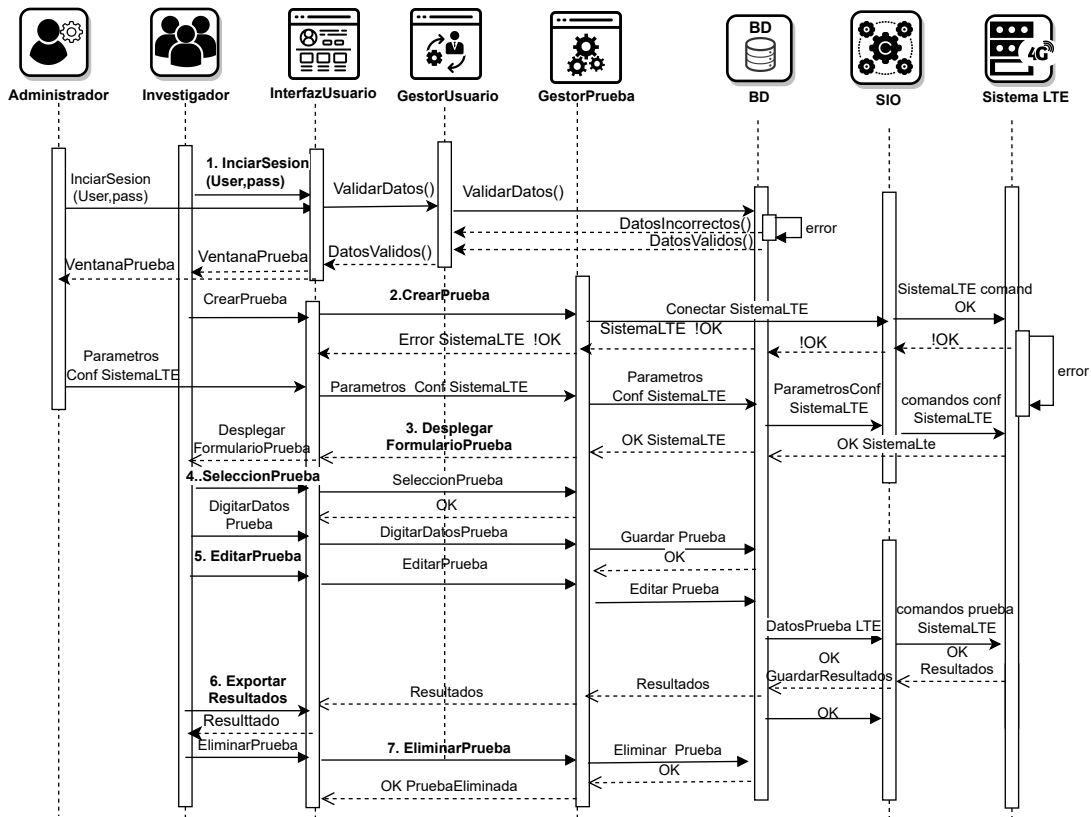


Figura 4.13: Diagrama de secuencia, gestión de pruebas en la AWG.

3.[InterfazUsuario ← GestorPrueba] Desplegar el formulario de prueba: el sistema LTE envía un mensaje de OK al SIO para que el GestorPrueba permita el acceso al formulario de la prueba en la InterfazUsuario.

4.[Investigador → InterfazUsuario] Seleccionar la prueba: el usuario investigador selecciona una prueba y la envía al GestorPrueba. El GestorUsuario otorga los permisos para que el usuario investigador envíe los parámetros de la prueba al GestorPrueba y sean guardados en la base de datos.

5.[Investigador → InterfazUsuario] Editar prueba: el usuario investigador envía una petición para la edición de la prueba al GestorPrueba y son realizados los

cambios de los parámetros en la base de datos.

6.[Investigador → InterfazUsuario] Exportar resultados: el usuario investigador envía la petición para exportar los resultados de la prueba a la interfazUsuario.

7.[InterfazUsuario → GestorPrueba] Eliminar prueba: el usuario investigador solicita a la interfazUsuario eliminar la prueba realizada en el proceso número 2. El GestorPrueba elimina la prueba de la base de datos.

4.4.5. Comunicación entre el sistema LTE y la aplicación web de gestión

Requisito 10: el SIO debe permitir el envío de los parámetros de las pruebas establecidas en la AWG hacia el sistema LTE Y los resultados obtenidos deben enviarse por medio del SIO hacia la AWG. La Figura 4.14 presenta los procesos donde es comunicada la AWG con el sistema LTE por medio del SIO.

1.[Investigador → AWG] Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos de su usuario y contraseña a la AWG.

2.[AWG → GestorIntercambio] Crear prueba: la AWG hace la petición al GestorIntercambio para solicitar la realización de una prueba.

3.[GestorIntercambio → GestorConexión] Solicitar estado del sistema LTE: el GestorIntercambio realiza una petición al GestorConexión para que valide el estado de disponibilidad del SistemaLTE.

4.[GestorConexión → SistemaLTE] Confirmar estado del sistema LTE: el GestorConexión realiza una petición al sistema LTE para verificar su estado de disponibilidad.

5.[GestorConexión ← SistemaLTE] SistemaLTE disponible: el sistemaLTE envía una respuesta al GestorConexión indicando que está disponible para realizar las pruebas.

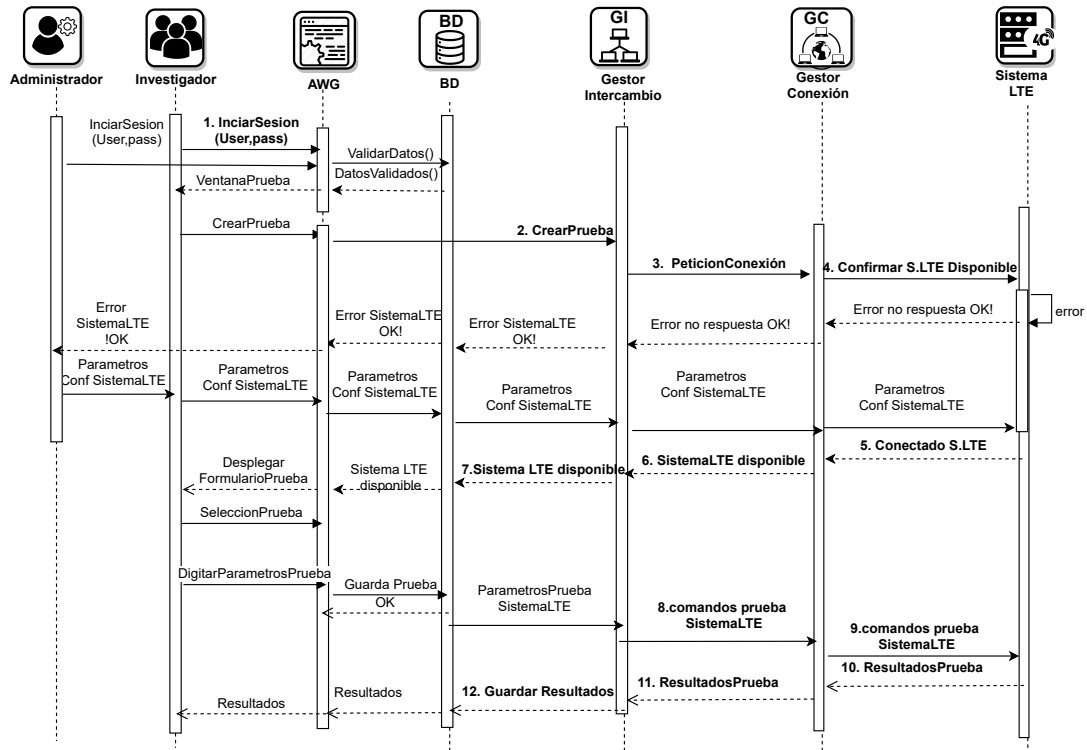


Figura 4.14: Diagrama de secuencia, comunicación entre el sistema LTE y la AWG.

6.[GestorIntercambio ← GestorConexión] Respuesta de disponibilidad del SistemaLTE: el GestorConexión envía una respuesta al GestorIntercambio indicando que el SistemaLTE está disponible para realizar las pruebas.

7.[BD → GestorIntercambio] Parámetros de la prueba del SistemaLTE: la base de datos tiene almacenado los parámetros de la prueba y los envía al GestorIntercambio.

8.[GestorIntercambio → GestorConexión] Comandos de prueba SistemaLTE: el GestorIntercambio envía los comandos de la prueba al GestorConexión para ser enviados hacia el Sistema LTE.

9.[GestorConexión → SistemaLTE] ejecución de prueba SistemaLTE: el GestorConexión envía los comandos de la prueba al SistemaLTE para la ejecución de la prueba.

10.[GestorConexión ← SistemaLTE] Resultado de prueba: el SistemaLTE envía los resultados obtenidos al realizar la prueba hacia el GestorConexión para ser enviado hacia la AWG a través del GestorIntercambio.

11.[GestorIntercambio ← GestorConexión] Resultado de prueba: el GestorConexión envía los resultados de la prueba al GestorIntercambio.

12.[BD ← GestorIntercambio] Guardar el resultado: el GestorIntercambio envía los resultados de la prueba hacia la BD para su almacenamiento.

Capítulo 5

Implementación y Evaluación del Telco 4G

Este capítulo presenta la implementación y evaluación del Telco 4G. La implementación es descrita tomando como referencia la vista de despliegue y la vista física del modelo 4+1. En el presente capítulo, primero, la vista de despliegue es descrita, además, es seleccionado el *software* a utilizar para el sistema LTE y son especificadas las características *software* para las implementaciones realizadas. Segundo, la vista física y virtual es presentada, en esta vista es descrita la plataforma a utilizar y las características *hardware* para las diferentes implementaciones. Por último, las evaluaciones realizadas al Telco 4G son descritas.

5.1. Vista de Despliegue

La vista de despliegue describe como está dividido el sistema *software* en componentes y sus dependencias. Primero, el *software* a utilizar para el sistema LTE es seleccionado. Segundo, las configuraciones a implementar para el Telco 4G son elegidas. Por último, las implementaciones seleccionadas son descritas; además, son realizados los diagramas de despliegue que permiten visualizar los diferentes componentes con los que cuenta el Telco 4G.

5.1.1. Selección de *software* para el sistema LTE

Para el despliegue del ambiente de pruebas son tomados como referencia los *software* descritos en el marco teórico. De las implementaciones especificadas, AMARI LTE 100 es la más destacada, debido a que posibilita desplegar un prototipo de red completo y a nivel de redes comerciales. AMARI LTE 100 puede ser implementado de forma independiente o integrado a una red comercial más grande [10]. Aunque AMARI LTE 100 es el *software* más completo, presenta una desventaja debido a que es un software de código cerrado y que está sujeto a la compra de una licencia para su utilización [10] [44].

Respecto a los *software* OpenLTE y srsLTE, puede concluirse que son implementaciones modulares, pero que están centradas en la simulaciones y emulaciones de redes 4G-LTE, y no son especializados en la experimentación real con equipos de usuario [3] [11] [39] [40]. Ambos *software* constituyen soluciones sencillas, fáciles de implementar y son de código abierto, pero no permiten poner en funcionamiento una red LTE completa y algunas características de las implementaciones no son estables [3] [11].

OpenAirInterface proporciona una solución modular, configurable y actualizable; además, es de código abierto y es patrocinado por Eurocom¹, cuenta con una comunidad creciente de apoyo formada por centros educativos, operadoras, fabricantes y aficionados [41]. OAI es escrita en C e implementa la red troncal y la red de acceso de una red móvil LTE proporcionando flexibilidad para la evaluación de distintos escenarios [3]. OAI presenta características estables y probadas que son adaptables a las distintas versiones de las especificaciones LTE del 3GPP; además, tiene como objetivo proporcionar implementaciones de prototipos de redes futuras como 5G, cloud-RAN o massive MIMO [2]. OAI es seleccionado como el *software* a implementar en este trabajo, debido a que constituye la mejor solución para el despliegue de prototipos de red 4G-LTE como puede observarse en la Tabla 5.1.

¹“EURECOM es una escuela de ingeniería y un centro de investigación en ciencias digitales organizado, GIE (Grupo de Interés Económico), que reúne a socios académicos e industriales internacionales”.

Software	Estabilidad	Escalabilidad	Uso de UE comerciales	Código abierto	Comunidad de soporte	Sistema LTE completo
OpenLTE				✓		
srsLTE				✓		
AMARI LTE	✓	✓	✓		✓	✓
OAI	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 5.1: Comparación de implementaciones *software* para LTE, basado en [3] [10] [11] [12].

OAI permite realizar una implementación basada en *software* del sistema LTE incluyendo toda la pila de protocolos del estándar 3GPP para E-UTRAN y EPC. En OAI es posible emular una estación base LTE (OAI eNodeB) y una red troncal (OAI CN) [2]. Las implementaciones pueden realizarse sobre un único computador (todo en uno) o distribuido (varios computadores). Los dispositivos móviles comerciales son conectados a la red permitiendo realizar pruebas en distintas configuraciones y monitoreo en tiempo real [12]. La plataforma OAI puede ser implementada y utilizada en diferentes configuraciones, para la simulación y emulación de los componentes. OAI presenta las siguientes configuraciones posibles [12]: i) UE comercial + eNB comercial + OAI EPC, ii) UE comercial + OAI eNB + EPC comercial, iii) UE comercial + OAI eNB + OAI EPC, iv) OAI UE + OAI eNB + OAI EPC, v) OAI UE + OAI eNB + comercial EPC y vi) OAI UE + eNB comercial + EPC comercial.

5.1.2. Implementación de OpenAirInterface

Para el desarrollo del presente trabajo de grado utilizaremos dos de las configuraciones mencionadas anteriormente, teniendo en cuenta que la plataforma Telco 2.0 no cuenta con una eNB y un EPC comercial. La configuración OAI UE + OAI eNB + OAI EPC, la cual denominaremos como sistema LTE centralizado, es realizado en una máquina virtual, en la cual son instalados los diferentes módulos para el despliegue de la red LTE. La segunda configuración es UE comercial + OAI eNB + OAI

EPC, la cual denominaremos como sistema LTE distribuido, es desarrollado utilizando dos computadores de escritorio: en el primer computador es instalado el OAI eNB, y en el segundo, el OAI EPC. Esta implementación hace uso de dispositivos USRP y UE comerciales.

Las anteriores configuraciones producen despliegues diferentes debido a que sus requerimientos de *software* son distintos. Por lo tanto, esta sección presenta un diagrama de despliegue para la implementación LTE centralizada y uno para la implementación LTE distribuida.

5.1.3. Implementación LTE centralizada

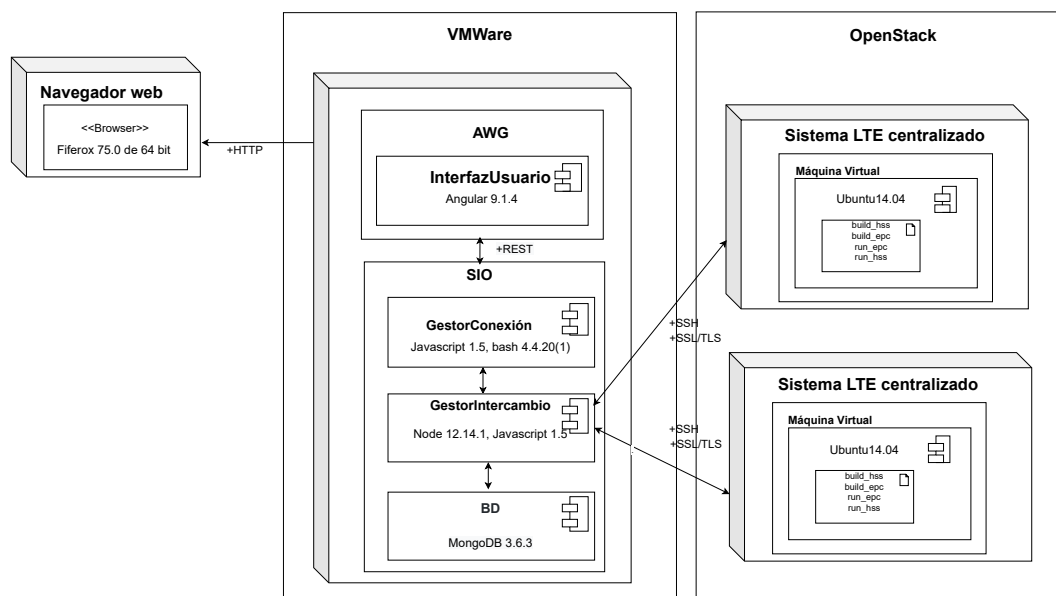


Figura 5.1: Diagrama de despliegue, implementación LTE centralizada.

La implementación LTE centralizada cuenta con tres módulos principales: la AWG, el SIO y el sistema LTE centralizado como puede observarse en la Figura 5.1. El sistema LTE centralizado utiliza la configuración OAI UE + OAI eNB + OAI EPC que

corresponde a la implementación sobre un mismo computador. Esta implementación hace uso de la interfaz S1, la cual permite la conexión de los módulos eNB con el UE y con el EPC de OAI. La Figura 5.2 muestra la arquitectura proporcionada por OAI que corresponde al sistema LTE centralizado. La arquitectura de OAI al igual que la arquitectura de LTE cuenta con módulos como el EPC y eNB con características similares a las de un entorno real. A continuación, describiremos cada uno de esos módulos, involucrados en la implementación centralizada [3] [5]:

- OAI EPC corresponde al núcleo de la red de LTE. En los repositorios *software* para implementación de OAI es conocido como openair-cn. Dependiendo del sistema a implementar es escogida la versión, la cual contiene los archivos específicos para el sistema seleccionado. Los diferentes comandos y versiones utilizados para esta implementación pueden observarse en la guía para la instalación y configuración de la implementación LTE centralizada, dispuesta en el Anexo B. Openair-cn está compuesta de los siguientes nodos:
 - nodo EPC encargado de implementar las funcionalidades del MME y del S-PGW, el cual es la unión de dos nodos de la red LTE como es el S-GW y P-GW e implementa las funcionalidades de ambos.
 - nodo HSS encargado de implementar las funcionalidades del HSS de LTE.
- OAI eNB implementa las funcionalidades del eNB de la red de LTE. En los repositorios *software* para implementación de OAI es conocido como openairinterface-5g. En este repositorio es escogida la versión más conveniente para la implementación centralizada. Los ejecutables para la implementación centralizada y las versiones escogidas pueden observarse en el Anexo B.
- OAI UE implementa las funcionalidades del UE de la red de LTE. Los archivos para la ejecución del OAI UE están ubicados en el repositorio *software* openairinterface-5g. En este repositorio es implementada la versión OASIM, la cual cuenta con los ejecutables para la emulación de los UE como puede observarse en el Anexo B.

Los módulos del sistema LTE tienen diferentes interfaces para el intercambio de información. El módulo EPC cuenta con interfaces internas para la comunicación entre los nodos que lo conforman. Las interfaces implementadas en OAI son [3]:

- Interfaz S1, está dividida en dos, para el plano de control la interfaz S1-MME y para el plano de usuario la interfaz S1-U.
 - S1-MME corresponde a la interfaz S1-MME de la red LTE y es la encargada de comunicar el MME y el eNB.
 - S1-U corresponde a la interfaz S1-U de la red LTE. La interfaz S1-U conecta al S-PGW con el eNB. En OAI la S-PGW representa la unión entre el S-GW y P-GW de LTE.
- Interfaz S6a es una interfaz virtual y hace analogía a la interfaz S6 entre el MME y el HSS del núcleo de red de LTE.
- Interfaz S11 es una interfaz virtual que interconecta el nodo MME con el S-PGW y hace analogía a la interfaz S11 entre el MME y el S-GW del núcleo de red de LTE.
- Interfaz SGi es una interfaz física que interconecta el S-PGW con Internet, en este caso es realizada la conexión con un sistema IMS externo. Esta interfaz hace analogía a la interfaz SGi entre el P-GW del núcleo de red LTE y la PDN o Internet.

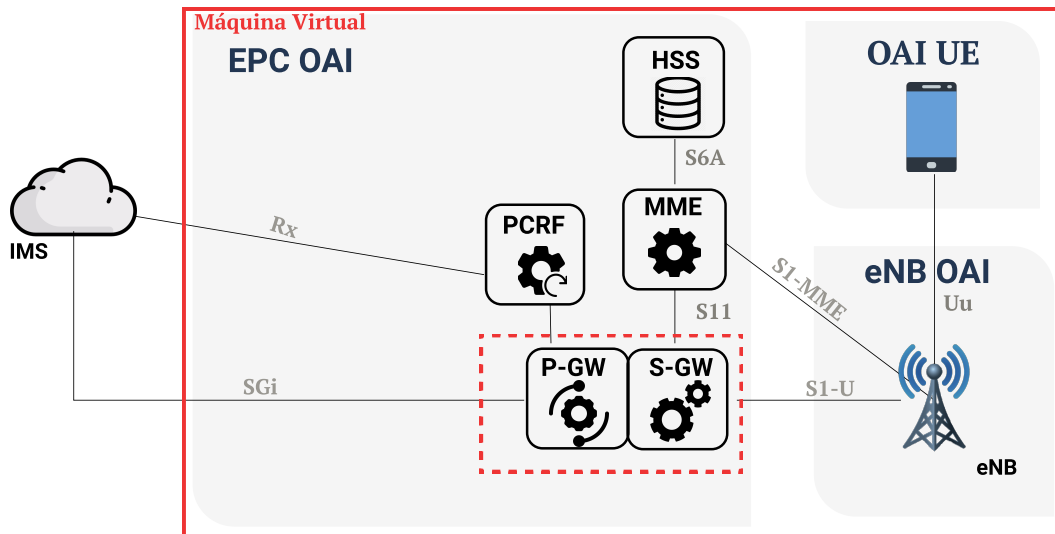


Figura 5.2: Arquitectura de OAI para un sistema LTE centralizado.

La implementación es llevada a cabo sobre el centro de datos de la Universidad del Cauca llamado Plataforma Telco 2.0, debido a que esta plataforma cuenta con los recursos necesarios para dicho desarrollo. El centro de datos como virtualizadores cuenta con los *software* OpenStack y VMware, los cuales permiten crear máquinas virtuales y en ellas realizar la implementación LTE centralizada. En máquinas virtuales alojadas en OpenStack están implementados los diferentes sistemas LTE centralizado. En VMware está alojada la máquina virtual que cuenta con la implementación de la AWG y el SIO.

La Figura 5.1 presenta la implementación LTE centralizada con la respectiva comunicación que hay entre sus nodos. El primer nodo es el navegador web, es utilizado un navegador Firefox Browser versión 75.0 de 64-bit, este permite acceder a la AWG para su visualización y la configuración de los parámetros. El segundo nodo es la AWG, una aplicación web elaborada sobre el *framework* Angular 9.1.4 que utiliza la base de datos MongoDB 3.6.3 presente en el SIO. La AWG cuenta con una interfaz gráfica, que permite al usuario visualizar, configurar, exportar y ejecutar pruebas que serán enviadas hacia el sistema LTE por medio del SIO; además, la AWG cuenta con un sistema que permite la conexión remota al sistema de LTE por medio de una VPN de OpenStack y el SIO.

El SIO está formado por una API REST elaborada sobre Node.js versión 12.16.3 y cuenta con una base de datos MongoDB 3.6.3. EL sistema LTE centralizado está implementado sobre una máquina virtual con un sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS sobre el cual son implementados los módulos EPC, eNB y son emulados los UE.

5.1.4. Implementación LTE distribuida

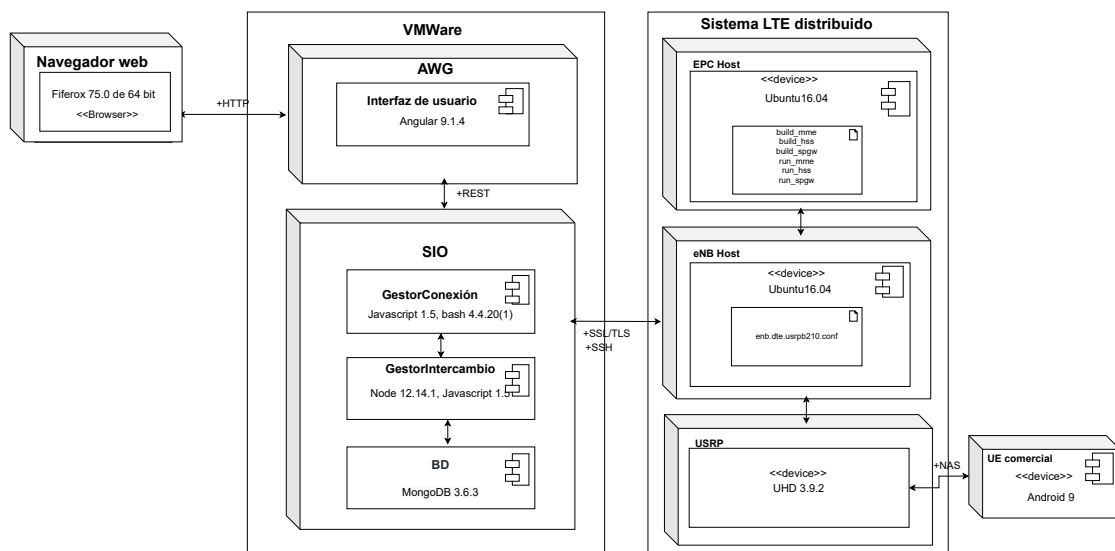


Figura 5.3: Diagrama de despliegue, implementación LTE distribuida.

La implementación LTE distribuido cuenta con tres módulos principales: la AWG, el SIO y el sistema LTE distribuido. El sistema LTE distribuido utiliza la configuración UE comercial + OAI eNB + OAI EPC que corresponde a la implementación sobre diferentes computadores haciendo uso de la interfaz S1. La Figura 5.4 muestra la arquitectura proporcionada por OAI que corresponde al sistema LTE distribuido. El sistema LTE distribuido cuenta con módulos para el EPC, eNB y UE. Los módulos EPC y eNB son los especificados en la anterior implementación, pero desplegados en diferentes equipos, además, son utilizados UE comerciales para conectarse a la red desplegada. A continuación, describiremos los módulos adicionales utilizados para el sistema LTE distribuido [3] [5]:

- OAI EPC corresponde al núcleo de la red de LTE, la versión escogida para esta implementación contiene, al nodo MME y S-PGW de manera separada, a continuación, son descritos los componentes de openair-cn:
 - nodo MME encargado de implementar las funcionalidades del MME de LTE.
 - nodo HSS encargado de implementar las funcionalidades del HSS de LTE.
 - nodo S-PGW conformado por la unión de dos nodos de la red LTE, como es el S-GW y P-GW. Implementa las funcionalidades de ambos.
- eNB hace referencia a la E-UTRAN de LTE y está compuesto de:
 - OAI eNB implementa las funcionalidades del eNB de la red de LTE.
El módulo eNB permite al usuario conectarse a la red desplegada a través de la USRP.
 - USRP es un dispositivo físico de radio definido por *software*, es el encargado de la transmisión y recepción de las señales de radiofrecuencia.
- UE corresponde al equipo de usuario, el cual es utilizado para acceder a la red LTE generada.

Los módulos del sistema LTE tienen diferentes interfaces para el intercambio de información. Las interfaces adicionales para esta implementación son descritas a continuación [3]:

- Interfaz radio es conocida como LTE-Uu, encargada de la interconexión entre el UE y el eNB y hace analogía a la interfaz radio de LTE.
- Interfaz S1 está dividida en dos, para el plano de control la interfaz S1-MME y para el plano de usuario la interfaz S1-U.

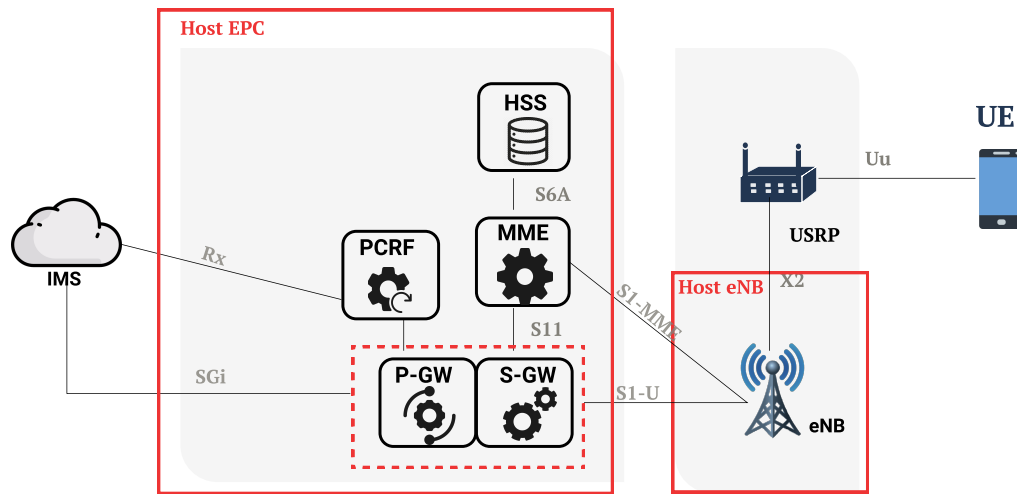


Figura 5.4: Arquitectura de OAI para un sistema LTE distribuido, basada en [3].

La implementación es realizada sobre dos computadores de escritorio presentes en el laboratorio Telco 2.0 de la FIET. La implementación distribuida cuenta con nodos comunicados entre sí como puede observarse en la Figura 5.3. Los tres primeros nodos son iguales a los descritos en la implementación centralizada lo que varía en las implementaciones es el sistema LTE. EL sistema LTE distribuido está compuesto por diferentes nodos, el primero llamado EPC Host, el cual es un computador de escritorio que emplea un sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS de 64 bits. El segundo nodo llamado eNB Host, el cual es un computador de escritorio que emplea un sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS de 64 bits y un kernel 3.19 de baja latencia. El tercer nodo es una plataforma de radiofrecuencia, es utilizada una USRP B210 y para su óptimo funcionamiento es instalado el controlador UHD versión 3.9.2. El último nodo es el equipo de usuario, donde es utilizado un teléfono móvil con sistema operativo Android versión 9.

5.2. Vista Física y Virtual

En esta vista son descritos los componentes y características, tanto físicos como virtuales del ambiente de prueba y sus diferentes conexiones. Primero, es descrita la plataforma Telco 2.0, sobre la cual es implementado el Telco 4G. Segundo, son

describas las topologías de red utilizadas para la implementación LTE centralizada y LTE distribuida.

5.2.1. Plataforma Telco 2.0

Esta plataforma está ubicada en la FIET de la universidad del Cauca, fue implementada con fines investigativos y de desarrollo por el Grupo de Ingeniería Telemática (GIT). Esta plataforma está formada por una agrupación de recursos de computo de altas capacidades y funciona basada en la prestación de infraestructura como servicio. La plataforma implementa tecnologías de NFV sobre OpenStack y VMware, lo que permite el despliegue de múltiples máquinas virtuales. Las máquinas virtuales son usadas para laboratorios y proyectos de investigación tanto de pregrado como de posgrado.

La plataforma Telco 2.0 cuenta con recursos de almacenamiento, servidores HPE Blade, dispositivos de red y la estructura general de alojamiento como puede observarse en la Figura 5.5. La plataforma Telco 2.0 está conformada por los elementos que son descritos a continuación:

- Exqueleto HPE BladeSystem c7000, estructura encargada de la alimentación eléctrica, la refrigeración, almacenamiento, interconexión y permite alojar los componentes modulares del servidor.
- Almacenamiento HPE MSA 2040 SFF, permite la agrupación de discos de almacenamiento de gran capacidad. La plataforma dispone del almacenamiento mostrado en la Tabla 5.2.

Cantidad de Discos	Capacidad	Redundancia	Capacidad Total
6	600 GB	1 TB	2,6 TB
11	2 TB	2 TB	20 TB

Tabla 5.2: Recursos de almacenamiento.

- Servidores HPE Blade, la plataforma Telco 2.0 cuenta con 5 servidores Blade HPE BL460c Gen 9-10 con las características presentadas en la Tabla 5.3.

Bahia	Dispositivo	Procesador	Procesadores	RAM	Almacenamiento
1	Blade Gen9	Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12	192GB(12x16GB)	SSD 2X300GB
		Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12		
2	Blade Gen9	Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12	192GB(12x16GB)	SSD 2X300GB
		Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12		
3	Blade Gen10	Intel Xeron Gold 5120 @2.20 GHz	14	352GB(11x32GB)	SSD 2X480GB
		Intel Xeron Gold 5120 @2.20 GHz	14		
4	Blade Gen10	Intel Xeron Gold 5120 @2.20 GHz	14	352GB(11x32GB)	SSD 2X480GB
		Intel Xeron Gold 5120 @2.20 GHz	14		
9	Blade Gen9	Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12	128GB(8x16GB)	SSD 2X300GB
		Intel Xeron E5-2670 @2.30 GHz	12		
TOTAL			128	1216GB	1.8TB

Tabla 5.3: Características de servidores Blade.

- HPE 6125XLG Blade Switch es un elemento de red diseñado para la conexión de alta velocidad de los servidores con el sistema de almacenamiento y la virtualización de las interfaces de red de salida a Internet.
- Dispositivos de red, la plataforma Telco 2.0 cuenta con dispositivos de red de alta velocidad, los cuales permiten la interconexión hacia algunos salones de la FIET.
 - Switch HP 5500 (24 puertos) Capa 2/3.
 - Switch HP 2920 (48 puertos) Capa 2/3.
 - 2 X Switch Cisco 2960 (24 puertos) Capa 2/3.
 - Router Cisco 2621 XM.

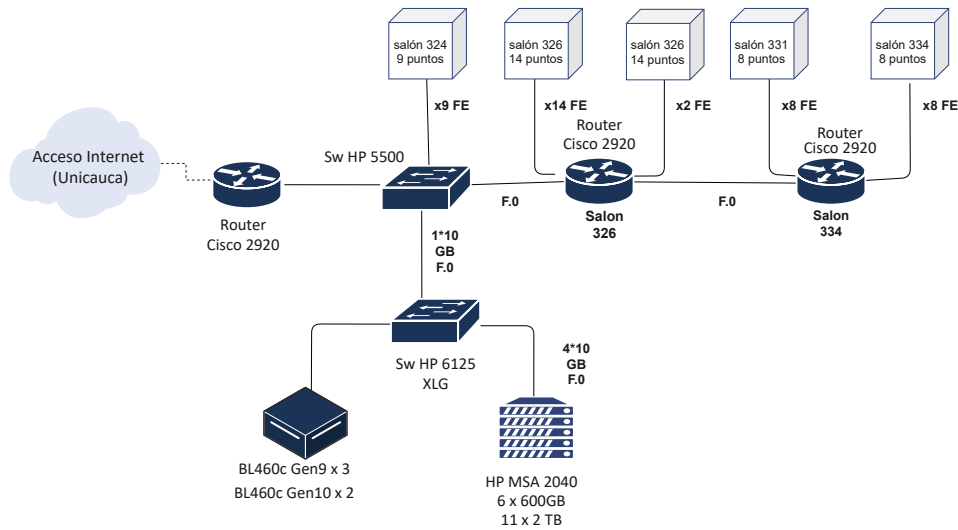


Figura 5.5: Topología de red plataforma Telco 2.0.

5.2.2. Implementación LTE centralizada

La topología de red para la implementación centralizada sobre la plataforma Telco 2.0, cuenta con dispositivos de almacenamiento, servidores HPE Blade y dispositivos de red como puede observarse en la Figura 5.6. La Blade 1 contiene OpenStack, sobre el cual van a estar alojadas las máquinas virtuales utilizadas para soportar las funciones del sistema LTE centralizado. El sistema LTE centralizado utiliza una máquina virtual la cual contendrá el nodo EPC y el nodo eNB, funcionando en una sola máquina.

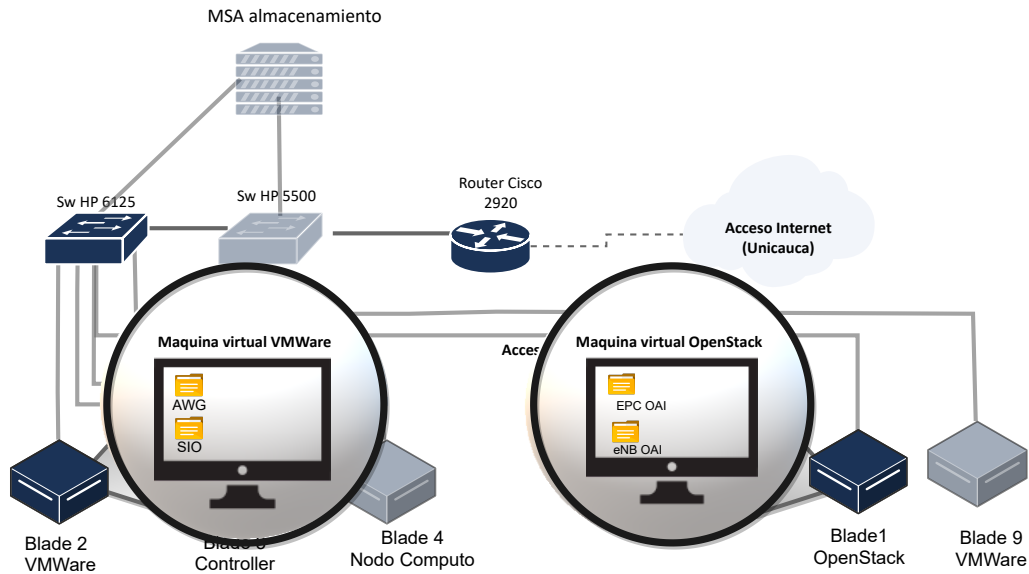


Figura 5.6: Topología de red de la implementación LTE centralizada.

La implementación LTE centralizada cuenta con dos nodos comunicados entre sí. El nodo del SIO y el nodo del sistema LTE centralizado son implementados sobre máquinas virtuales con capacidades de 16 GB de RAM y 50 GB de disco duro. Las características de las máquinas virtuales utilizadas para la implementación del sistema LTE centralizado, AWG y el SIO pueden observarse en la Figura 5.7.

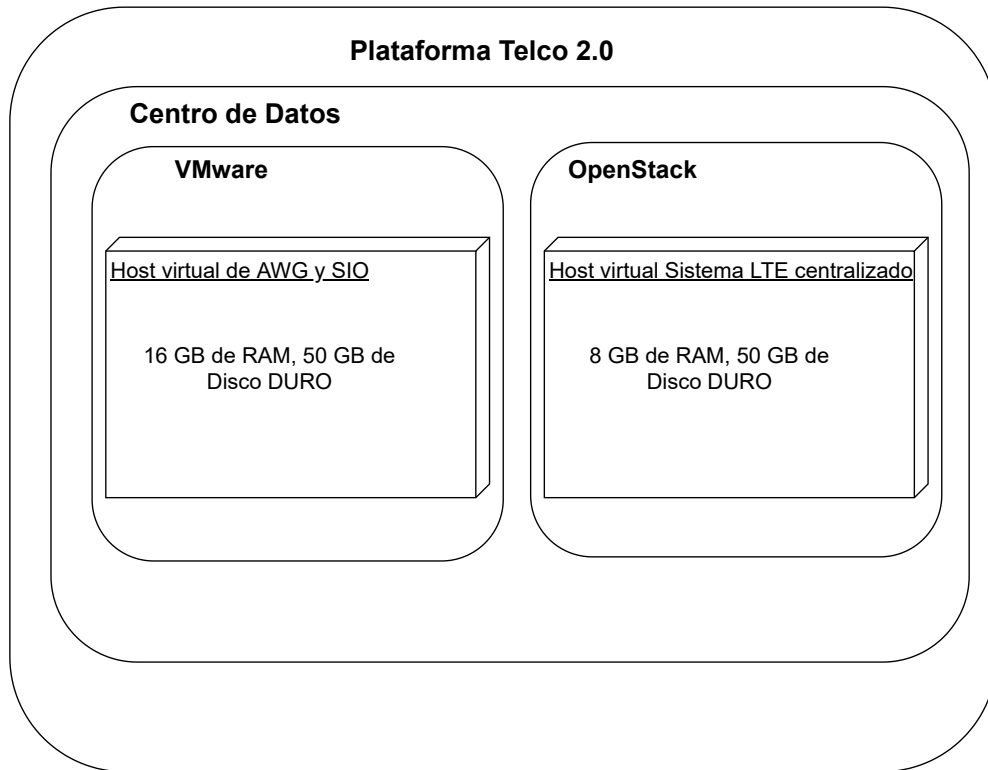


Figura 5.7: Diagrama de distribución, implementación LTE centralizada.

5.2.3. Implementación LTE distribuida

La topología de red para la implementación LTE distribuida sobre la plataforma Telco 2.0, cuenta con dispositivos de almacenamiento, servidores HPE Blade, dispositivos de red y computadores de escritorio como puede observarse en la Figura 5.8. La implementación del sistema LTE distribuido utiliza un computador para el nodo de EPC y otro para el nodo eNB. La Blade 2 contiene el hipervisor de VMware sobre el cual va a estar alojada la máquina virtual utilizada para soportar las funciones de la AWG y el SIO.

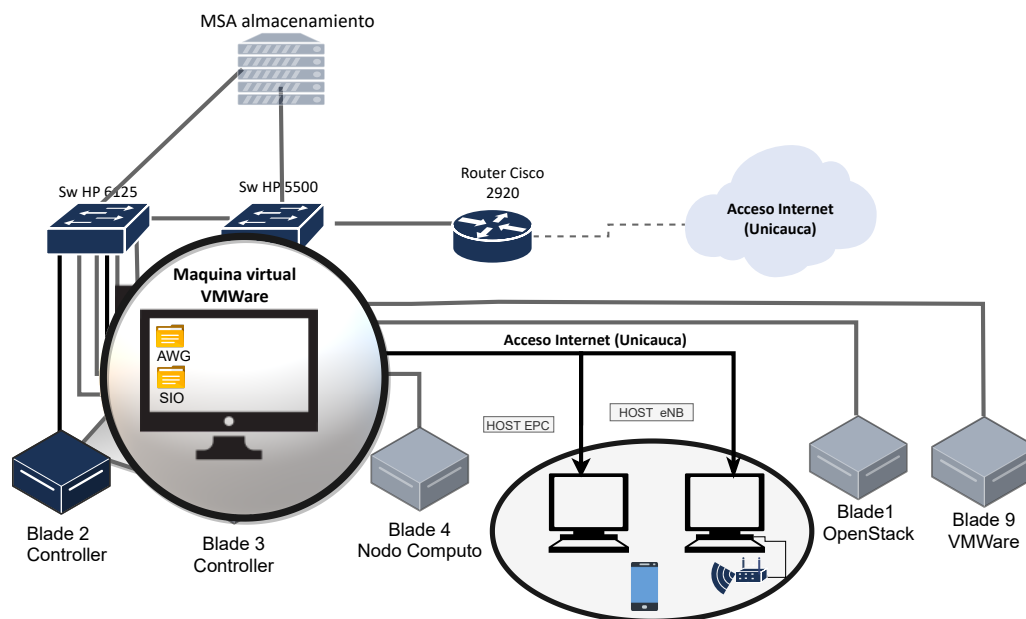


Figura 5.8: Topología de red implementación LTE distribuida.

La implementación distribuida es llevada a cabo sobre la plataforma Telco 2.0 y cuenta con diferentes nodos comunicados entre sí. El nodo del SIO es implementado sobre una máquina virtual con capacidad de 16 GB de RAM y 50 GB de disco duro. El nodo sistema LTE distribuido utiliza para su implementación dos computadores de escritorio con un procesador Intel i7 de quinta generación, memoria RAM de 8 GB y 500 GB de disco duro; además, es utilizada la plataforma de radio frecuencia llamada USRP B210. El nodo UE es implementado mediante un dispositivo móvil con capacidad de 4 GB de RAM y 64 GB de almacenamiento. Las características de la máquina virtual y los equipos utilizados para la implementación LTE distribuida pueden observarse en la Figura 5.9.

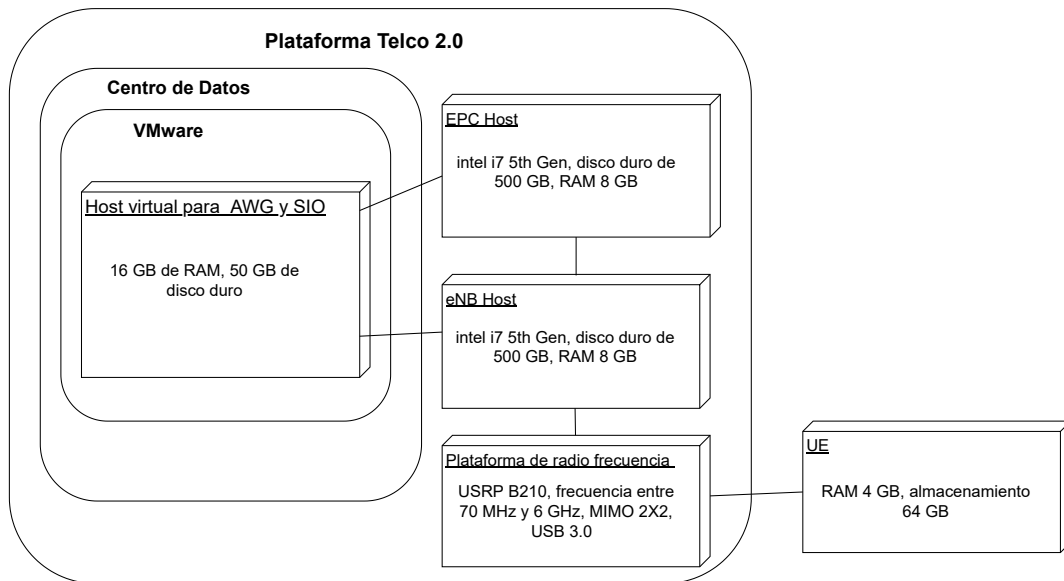


Figura 5.9: Diagrama de distribución, implementación LTE distribuida.

El sistema LTE, además de los dispositivos mencionados necesita para su funcionamiento una antena para 4G, un lector grabador de tarjetas inteligentes y tarjetas USIM, estos elementos son descritos a continuación:

- **Antena:** este dispositivo es conectado a la USRP para proporcionar al dispositivo conectividad LTE, es utilizada en la implementación una antena Andven SK-030 con conector SMA (SubMiniature Version A). La antena Andven SK-030 permite trabajar varias bandas de frecuencia LTE, tiene radiación omnidireccional, posee una ganancia de 35 dBi, una impedancia de 10 ohmios y una potencia de entrada máxima de 10 W.
- **Lector grabador de tarjetas inteligentes:** es un dispositivo que permite programar las USIMs con los parámetros de la red desplegada. El Lector grabador utilizado es el programador de tarjetas inteligentes SCR3310 v2 de la compañía SCM PC-Card GmbH.
- **Tarjetas USIM:** son utilizadas para permitir que el UE pueda registrarse y conectarse a la red. Las tarjetas utilizadas deben ser compatibles con el algoritmo

de autenticación MILENAGE. Estas tarjetas permiten configurar diversos parámetros y cuentan con diferentes tamaños ajustables a las ranuras del UE.

5.3. Aplicación Web de Gestión

La AWG es utilizada con el fin de gestionar las pruebas realizadas por los usuarios, además, permite la modificación de los parámetros del sistema LTE por medio del SIO. Adicionalmente la AWG permite realizar pruebas, gestionar máquinas virtuales previamente configuradas con el sistema LTE y acceder de forma remota al sistema LTE. La AWG cuenta con la secciones de: información, pruebas y conexión, guías y gestor como puede observarse en la Figura 5.10.

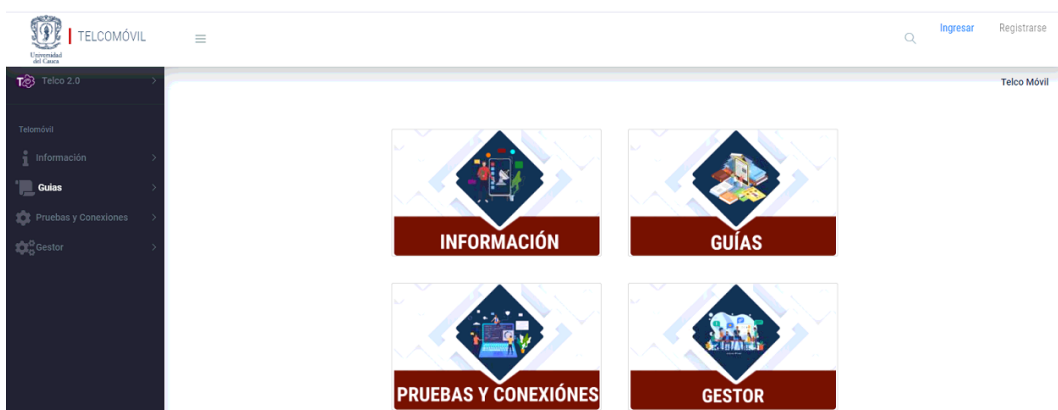


Figura 5.10: AWG vista general.

- Información, esta sección cuenta con la descripción de los conceptos básicos referentes a las redes 4G, respecto a su arquitectura y protocolos que contribuyen al conocimiento necesario para la realización de las pruebas. La Figura 5.11 ilustra los diferentes elementos que componen la sección de información.
- Guías, son presentadas las guías de usuario para la utilización del Telco 4G, las guías para la implementación del sistema LTE sobre una máquina virtual y las de utilización de OpenStack.

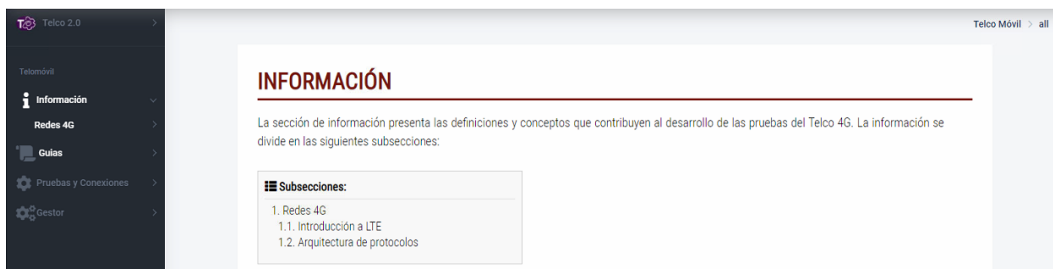


Figura 5.11: Sección de información.

- Pruebas y conexiones, contiene una subsección para la realización de pruebas sobre el sistema LTE centralizado y una subsección para la conexión de forma remota al sistema LTE, estas implementaciones permiten realizar cambios a través de la conexión remota por medio del SIO.



Figura 5.12: Pruebas y conexiones.

La subsección, entorno centralizado, permite la ejecución de pruebas en el sistema LTE centralizado mediante la utilización de un formulario como puede observarse en la Figura 5.13. El formulario permite configurar los parámetros para la realización de las pruebas en el sistema LTE. Las pruebas son ejecutadas y los resultados obtenidos son enviados hacia la AWG para su posterior visualización y descarga como puede observarse en la Figura 5.14.

Figura 5.13: Formulario para la realización de la prueba del entorno centralizado.



Figura 5.14: Gráfica de los resultados del entorno centralizado.

La subsección, entorno remoto permite al usuario acceder a la máquina virtual que contiene el sistema LTE centralizado desde un navegador. Adicionalmente

permite encender y apagar las máquinas virtuales, y crear una instantánea para el manejo de versiones como puede observarse en la Figura 5.15. La conexión remota permite realizar cualquier modificación y configuración de los archivos del sistema LTE. El entorno remoto brinda la posibilidad de ingresar a la interfaz gráfica de la máquina virtual desde el navegador como puede observarse en la Figura 5.16. Además, pueden realizarse pruebas haciendo uso de los *framework* de monitorización de OAI como puede observarse en la Figura 5.17.



Figura 5.15: Interfaz entorno remoto.

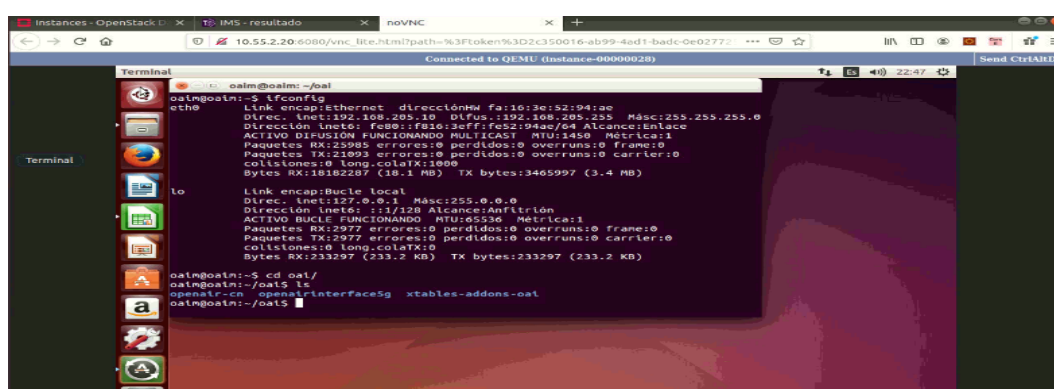


Figura 5.16: Acceso a la máquina virtual desde el navegador.

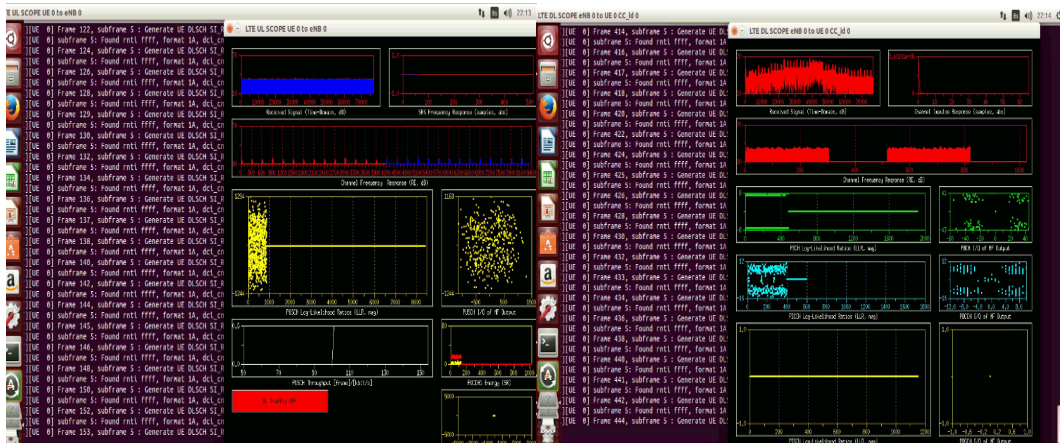


Figura 5.17: Prueba por medio de *framework* de monitorización de OAI.

- Gestor, contiene al gestor máquinas y gestor pruebas, el gestor maquinas permite a los usuarios la creación de máquinas virtuales y su eliminación. El proceso de creación y eliminación es realizado por medio de una *API REST* del SIO la cual es conectada a una *API REST* que brinda OpenStack permitiendo la ejecución de los *script* necesarios para la creación y eliminación de las máquinas virtuales. Además, permite acceder de forma remota para su gestión y configuración como puede observarse en la Figura 5.18. Las máquinas virtuales creadas pueden ser máquinas que ya contienen previamente instalado y configurado el sistema LTE o máquinas virtuales utilizadas para implementar el sistema LTE desde cero. El gestor pruebas permite tanto al administrador como al investigador visualizar los resultados de las pruebas, las gráficas obtenidas pueden ser exportadas y eliminadas como puede observarse en la Figura 5.19.



Figura 5.18: Gestor máquinas.



Figura 5.19: Gestor pruebas.

5.4. Evaluación y Análisis

Esta sección evalúa la funcionalidad del sistema LTE centralizado, incluyendo los canales físicos y de transporte. La AWG también es sometida a pruebas con el fin de validar la capacidad de usuarios que soporta.

5.4.1. Funcionalidad sistema LTE centralizado

El sistema LTE centralizado es evaluado respecto al correcto funcionamiento del mismo por medio de la validación de los protocolos empleados por los nodos HSS, MME y eNB [12] [73].

- Ejecución del HSS.

La validación del módulo HSS es realizada mediante un *script*, el cual inicializa el módulo HSS realizando el establecimiento de una conexión TCP entre el puerto 57596 utilizado por el HSS y el 3306 utilizado para el sistema de gestión de bases de datos, los cuales pertenecen a la interfaz de *loopback*. Después de realizada la conexión TCP (*Transmission Control Protocol*), ingresa al servidor especificando la base de datos la cual es “oai_db” solicitando ingreso con los parámetros configurados previamente de contraseña y usuario. En la Figura 5.20 puede observarse que después de cada procedimiento es enviado un ACK entre los puertos, lo cual indica que los procesos se han realizado con éxito.

25 9.579507997	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	74 57596 → 3306 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=12700472 TSecr=...
26 9.579547970	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	74 3306 → 57596 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=127...
27 9.579573473	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66 57596 → 3306 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=44032 Len=0 TSval=12700472 TSecr=12700472
28 9.579962976	127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	161 Server Greeting proto=10 version=5.5.62-0ubuntu0.14.04.1
29 9.580013144	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66 57596 → 3306 [ACK] Seq=1 Ack=96 Win=44032 Len=0 TSval=12700473 TSecr=12700472
30 9.581949834	127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	157 Login Request user=root db=oai_db
31 9.581967969	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66 3306 → 57596 [ACK] Seq=96 Ack=92 Win=44032 Len=0 TSval=12700475 TSecr=12700475
32 9.582027605	127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	77 Response OK

Figura 5.20: Conexión entre el HSS y la base de datos.

Después de realizada la conexión entre el HSS y la base de datos, es enviada una solicitud de consulta *Request Query* con el fin de obtener parámetros como el IMS, Key y OPc de los usuarios que han sido registrados en la base de datos. Además, es actualizado el OPc de cada uno de los usuarios. Posteriormente, es realizado el establecimiento de la conexión TCP entre el puerto 37288 correspondiente al HSS y 3870 correspondiente al MME. Debido a que aún no ha inicializado todo el módulo EPC el puerto 3870 no está abierto, por tanto, es enviada una respuesta indicando que se debe reiniciar la conexión. Estas peticiones pueden visualizarse en la Figura 5.21.

133 9.860332083	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	74 37287 → 3870 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=12700753 T...
134 9.860360920	127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	54 3870 → 37287 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=0 Len=0
181 38.203076334	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	74 37288 → 3870 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=12729096 T...
182 38.203111141	127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	74 3870 → 37288 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=...

Figura 5.21: Solicitud de conexión entre HSS y MME.

El HSS permanece en *STATE CLOSED* hasta que el puerto 3870 perteneciente al MME este en estado abierto, lo cual permite iniciar nuevamente el proceso

de establecimiento de la conexión TCP como puede observarse en la Figura 5.22.

```

01/30/21,12:27:55.554634 DBG oaim.openair4G.eur: Connecting...
01/30/21,12:27:55.554667 DBG Initializing s6a layer: DONE
'STATE_CLOSED' -> 'STATE_WAITCNXACK' 'oaim.openair4G.eur'
01/30/21,12:27:55.556227 DBG Prepared 1 sets of connection parameters to peer oaim.openair4G.eur
01/30/21,12:27:55.556282 DBG Connecting to TCP 127.0.1.1(3870)...
01/30/21,12:27:55.556443 DBG TCP connection to 127.0.1.1(3870) failed: Connection refused
01/30/21,12:27:55.556480 DBG Connection to 'oaim.openair4G.eur' failed: All connection attempts failed, will retry
later
01/30/21,12:27:55.556841 DBG 'STATE_WAITCNXACK' -> 'STATE_CLOSED' 'oaim.openair4G.eur'

```

Figura 5.22: Estado inicial del HSS.

- Conexión entre EPC y HSS

Primero, es ejecutado el *script* el cual inicia el proceso para establecer la conexión TCP por parte del HSS, para esta conexión son utilizados los puertos 37288 para el HSS y el 3870 para la MME. Segundo es enviado un mensaje por parte del HSS hacia la MME indicando por medio de la bandera PSH que debe enviarse información apenas esté disponible, y no almacenarla en un *buffer*. Los mensajes intercambiados para esta conexión pueden visualizarse en la Figura 5.23.

181	38.203076334	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	74	37288	-	3870	[SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=12729096 TSecr=12729096
182	38.203111141	127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	74	3870	-	37288	[SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=12729096 TSecr=12729096
183	38.203135776	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	66	37288	-	3870	[ACK] Seq=1 Ack=1 Win=44032 Len=0 TSval=12729096 TSecr=12729096
184	38.203743326	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	330	37288	-	3870	[PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=44032 Len=264 TSval=12729096 TSecr=12729096
185	38.203812909	127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	66	3870	-	37288	[ACK] Seq=1 Ack=265 Win=45056 Len=0 TSval=12729096 TSecr=12729096
186	38.204662516	127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	330	3870	-	37288	[PSH, ACK] Seq=1 Ack=265 Win=45056 Len=264 TSval=12729097 TSecr=12729097
187	38.204830741	127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	66	37288	-	3870	[ACK] Seq=265 Ack=265 Win=45056 Len=0 TSval=12729097 TSecr=12729097

Figura 5.23: Petición de información entre HSS y MME.

- Conexión de E-UTRAN.

E-UTRAN y el UE son puestos en funcionamiento mediante la ejecución de un *script*, con el cual inicia una SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) la cual emplea un enlace a 4 vías, los primeros 4 mensajes permiten el establecimiento de una conexión TCP. En seguida, es realizada la solicitud para la configuración S1 mediante el protocolo S1AP por parte del eNB, la MME envía un SACK (*Selective Acknowledgement*) confirmando la solicitud y generando una respuesta para la configuración del S1. El eNB solicita la conectividad de la PDN y la vinculación para un UE. Los mensajes intercambiados pueden observarse en la Figura 5.24.

245	85.091971982	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	82 INIT
246	85.092030195	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	306 INIT ACK
247	85.092053813	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	278 COOKIE_ECHO
248	85.092099239	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	58 COOKIE_ACK
249	85.092473718	192.170.0...	192.170.0.1	S1AP	122 S1SetupRequest
250	85.092497226	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	62 SACK
251	85.093073349	192.170.0...	192.170.0.2	S1AP	94 S1SetupResponse
252	85.093110102	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	62 SACK
266	90.368124527	192.170.0...	192.170.0.1	S1AP...	158 InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request

Figura 5.24: Conexión entre MME y eNB.

La MME debe enviar peticiones de configuración de activación de los portadores radio, además, envía el indicador de aprobación para la vinculación del usuario. El eNB envía información del usuario y la respuesta para la configuración del contexto con el fin de recibir mensajes donde es validada la vinculación del usuario por parte de la MME. En la Figura 5.25 pueden observarse los mensajes mencionados.

324	102.431158059	192.170.0...	192.170.0.1	S1AP/NAS-EPS	158 InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request
336	102.630955347	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	62 SACK
374	128.818963833	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	98 HEARTBEAT
375	128.818986306	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	98 HEARTBEAT_ACK
384	133.304709040	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	98 HEARTBEAT
385	133.304741765	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	98 HEARTBEAT_ACK
411	160.307097267	192.170.0...	192.170.0.2	SCTP	98 HEARTBEAT
412	160.307123630	192.170.0...	192.170.0.1	SCTP	98 HEARTBEAT_ACK

Figura 5.25: Vinculación de usuario.

Para validar la correcta vinculación del UE es mostrada una tabla generada por el módulo EPC en el terminal donde es ejecutado, la cual evidencia que sea vinculado un UE y las portadoras radio como puede observarse en la Figura 5.26.

```

===== Statistics =====
001452 00180:794832 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0037
| Global | Since last display |
001453 00180:794837 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0038
UE | 1 | 0 |
001454 00180:794842 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0039
Bearers | 1 | 0 |

```

Figura 5.26: Verificación de conexión del UE.

La dirección IP que la MME asigna para el UE es 192.188.0.2 como puede observarse en la Figura 5.27.

```
▼ PDN address
  Length: 5
  0000 0... = Spare bit(s): 0x00
  PDN type: IPv4 (1)
  PDN IPv4: 192.188.0.2
  ▶ APN aggregate maximum bit rate
  ▶ Protocol Configuration Options
```

Figura 5.27: Dirección IP del UE.

Las figuras presentadas permiten validar que es realizada una conexión exitosa entre el MME, el HSS y el S-PGW, que conforman el módulo de EPC lo que permite validar su correcto funcionamiento. El módulo EPC es conectado con el módulo eNB y con el UE de forma exitosa lo que permite validar el correcto funcionamiento entre los diferentes módulos. De lo anterior podemos concluir que el sistema LTE centralizado funciona correctamente debido a que los módulos y los nodos de OAI son conectados con éxito como pudimos evidenciar en las diferentes figuras.

5.5. Pruebas en sistema LTE Centralizado

Las pruebas son realizadas sobre el sistema LTE centralizado con el fin de probar las funcionalidades y características que esta implementación ofrece. Son realizadas simulaciones de los distintos canales físicos, por medio de la variación de parámetros y la definición de las características de cada transmisión. Estas simulaciones son realizadas con el fin de analizar el desempeño de los canales físicos de acuerdo a las variaciones de los parámetros configurados.

Para la implementación del bloque de canales físicos y de transporte son escogidos los pares de canales DLSCH/PDSCH y ULSCH/PUSCH, debido a que son los encargados de transportar los datos de usuario para el DL y UL respectivamente. OAI cuenta con dos simuladores, dlsim y ulsim, los cuales al ser ejecutados proporcionan un archivo de salida CSV (*Comma-Separated Values*), que contiene valores del número de tramas enviadas y erradas. Para la realización de las simulaciones pueden variarse los parámetros presentes en la Tabla 5.4.

Opción	Simulador	
	dlsim	ulsim
-h	Desplegar el menú de opciones.	
-n	Establecer el número de tramas a simular.	
-s	Asignar el valor inicial de SNR (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>).	
-g	Escoger el Modelo de canal (SCM-D, EPA, EVA, ETU).	
-x	Seleccionar el modo de transmisión (1, 2, 5, 6).	
-y	Determinar el número de antenas en el eNB.	
-a	Activa modelo de canal AWGN.	
-m	Selecciona MCS (Modulation and Coding Scheme), de 0 a 28.	
-B	Número de bloques de recursos (6, 25, 50, 100).	
-f	Pasos de simulación de la SNR.	
-z	Número de antenas en el UE (1, 2).	
-q	Número de puertos de antena en el eNB (1, 2).	

Tabla 5.4: Parámetros para las simulaciones

Para realizar las simulaciones son fijados valores para el número de tramas y los pasos del SNR con el fin de comparar los resultados obtenidos en cada gráfica. Las simulaciones son realizadas para el caso específico de DL, variando los parámetros como puede observarse en la Tabla 5.5.

Parámetro	Valores
Número de tramas	1000, 2000 y 10000
Pasos de SNR	0,2 y 1

Tabla 5.5: Variación de los parametros para las simulaciones

Los comandos introducidos para generar las simulaciones son ejecutados en el módulo Openairinterface5g de OAI como se muestra a continuación:

- Primero debemos ingresar a la carpeta donde está ubicado el simulador:

```
cd /openairinterface5g/cmake_targets/ltesimulators/build
```

- Segundo verificamos que el simulador dlsim este en la carpeta correspondiente como puede visualizarse en la Figura 5.28 :

```
oain@oain:~/oai$ cd openairinterface5g/
oain@oain:~/oai/openairinterface5g$ cd cmake_targets/lte
lte_build_oai/      lte_no5l_build_oai/ lte-simulators/
oain@oain:~/oai/openairinterface5g$ cd cmake_targets/lte-simulators/
oain@oain:~/oai/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators$ ls
build CMakeLists.txt pruebav02.log
oain@oain:~/oai/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators$ cd build/
oain@oain:~/oai/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators/build$ ls
bler_tx2_chan5_nrx2_ncs20.csv  cmake_install.cmake  libLFDS7.a  libSCHED_LIB.a  Makefile  pdccchsim  pruebav09.log
CMakeCache.txt                dlsim                libLFDS.a  libSIMU.a      nbsssim  prachsim  pucchsim
CMakeFiles                    dlsim_tm4           libPHY.a   libUTIL.a      pbchsim  pruebav03.log  ulsim
oain@oain:~/oai/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators/build$ ./dlsim -n2000 -m20 -gE -f1 -x2 -q2 -y2 -z2 -R3 | tee pruebav07.csv
```

Figura 5.28: localización de simulador dlsim.

- Por ultimo debemos ejecutar el comando con los diferentes parámetros estipulados en la Tabla 5.6:
- ```
./dlsim -n10000 -m20 -gE -f0.1 -x2 -q2 -y2 -z2 -R3
```

| Parámetro | Significado                                        |
|-----------|----------------------------------------------------|
| dlsim     | es utilizado el simulador dlsim                    |
| -n10000   | cantidad de tramas a simular, para este caso 10000 |
| -m20      | MCS para este caso 20                              |
| -gE       | modelo de canal correspondiente a la opción E      |
| -f0.1     | Steps de 0.1 para SNR                              |
| -x2       | modo de TX 2                                       |
| -y2       | son utilizadas 2 antenas en el eNB                 |
| -z2       | son utilizadas 2 antenas en el UE                  |
| -R3       | son realizadas 3 retransmisiones                   |

Tabla 5.6: Parámetros para las simulaciones

Las pruebas ejecutadas en el simulador dlsim y las variaciones mencionadas son realizadas un total de 30 veces por cada configuración, con el fin de obtener un dato estadístico valido. Los valores promedio de las pruebas realizadas pueden observarse en la Figura 5.29. Del archivo de salida son tenidos en cuenta los valores de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) y el número de tramas con errores. Para calcular la FER (*Frame Error Rate*) es aplicada la ecuación (1).

$$FER = \frac{\text{Cantidad de tramas con errores}}{\text{Cantidad de tramas enviadas}} \quad (1)$$

En la configuración realizada con pasos de simulación de 0,2 dB y un número de tramas de 1000 o 2000 son obtenidas graficas con mucho rizado. Para las simulaciones con tramas mayores o iguales a 10000 son obtenidas graficas más suavizadas. Cuando son utilizados los pasos de simulación de 1 dB para el SNR como puede observarse en la Figura 5.30, al igual que en el caso anterior son obtenidos mejores resultados con tramas de 10000. En las pruebas realizadas son obtenidos parámetros para el FER aceptables lo cual permite evidenciar el correcto funcionamiento del sistema LTE centralizado.

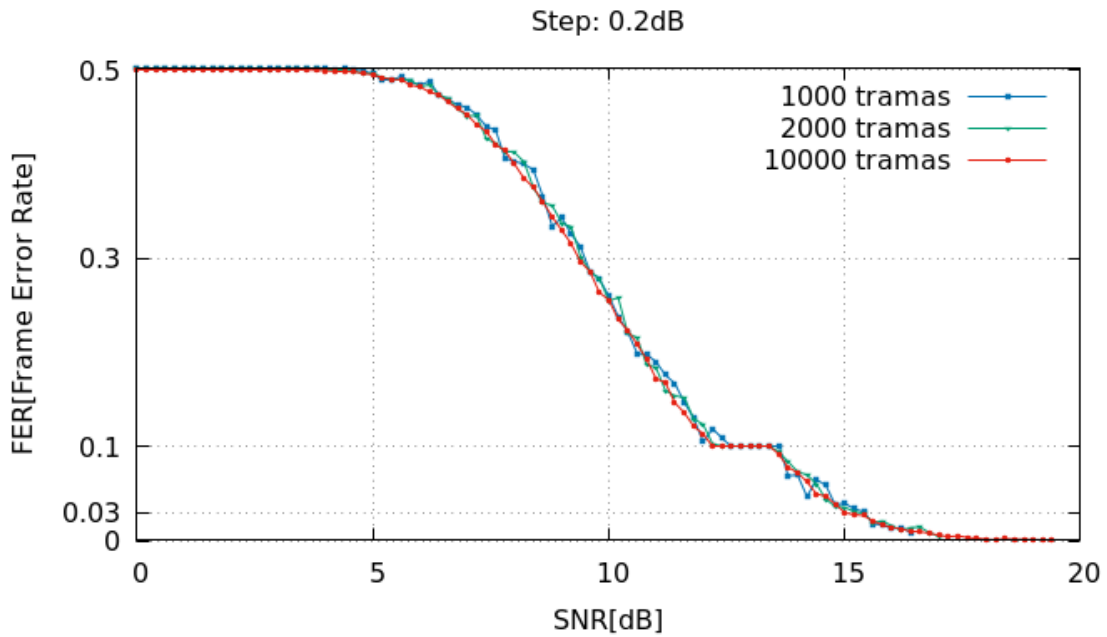


Figura 5.29: FER vs SNR de 0,2 dB.

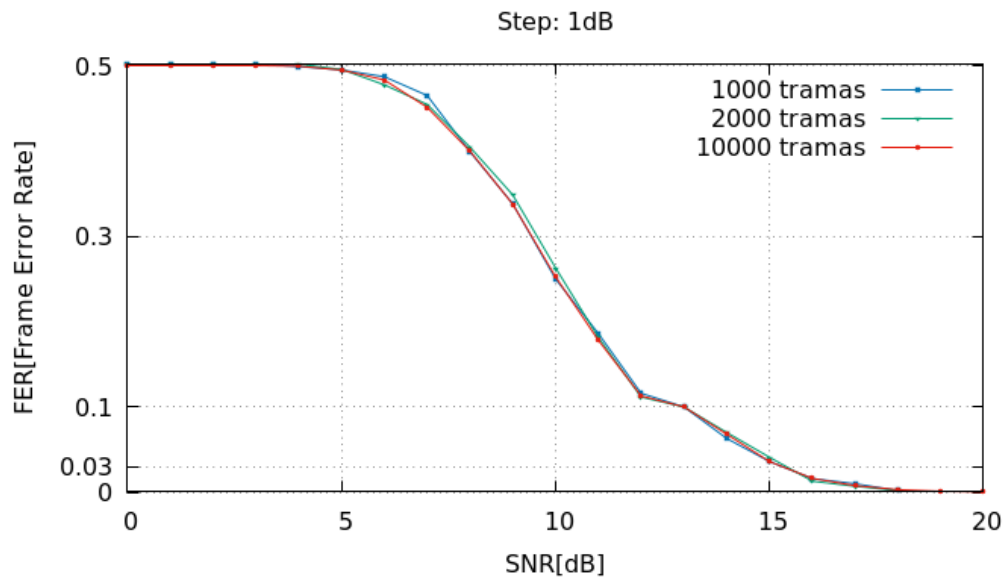


Figura 5.30: FER vs SNR de 1 dB.

## 5.6. Pruebas de Funcionalidad para TELCO 4G

Las pruebas son realizadas con el fin de validar el correcto funcionamiento de las principales características que ofrece el TELCO 4G. La aplicación de estas pruebas busca que los usuarios validen las funcionalidades y el nivel de dificultad para realizar ciertos procesos. Las funcionalidades evaluadas en estas pruebas son los principales requisitos funcionales del TELCO 4G y de la AWG descritos en el diseño del ambiente de prueba. Las funcionalidades evaluadas son: la creación de máquinas virtuales, la conexión remota a las máquinas virtuales del sistema LTE, pruebas en sistema LTE centralizado y la gestión de las pruebas realizadas. Las pruebas son realizadas por estudiantes, profesores y egresados de la FIET, por medio de un cuestionario que permite que los usuarios validen la dificultad y la funcionalidad de los requisitos mencionados. La Tabla 5.7 lista los diferentes procesos realizados por los usuarios con el fin de validar el correcto funcionamiento del TELCO 4G.

| Ítem | Procesos                                                                                                                                                           |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | crear una máquina virtual desde la subsección gestor máquinas de la AWG especificando las características mínimas para el soporte de OAI.                          |
| 2    | realizar la conexión remota hacia las máquinas virtuales del sistema LTE, desde la subsección entorno remoto de la AWG especificando las respectivas credenciales. |
| 3    | realizar una prueba en el sistema LTE centralizado, proporcionando los valores del formulario de prueba.                                                           |
| 4    | visualizar las pruebas realizadas desde la subsección gestor pruebas de la AWG, en donde los resultados pueden observarse y realizar su respectiva exportación.    |

Tabla 5.7: Procesos de evaluación de funcionalidad

La prueba fue realizada a un total de 12 usuarios de los cuales 8 son estudiantes, 2 profesores y 2 egresados; quienes realizaron la validación de funcionalidad y la respectiva calificación en términos del nivel de dificultad de los principales requisitos funcionales del TELCO 4G. Los usuarios por medio del cuestionario podrían evaluar el nivel de dificultad (muy fácil, fácil, intermedio, difícil y muy difícil) para realizar un proceso del TELCO 4G, además, sugerencias que permitieran mejorar el TELCO 4G.

En la Tabla 5.8 puede visualizarse la calificación realizada por los diferentes usuarios respecto a la dificultad de realizar el proceso 1. Los resultados indican que los usuarios pudieron realizar con éxito la creación de las máquinas virtuales y sin mayor dificultad. El éxito de este proceso es debido a la interfaz de la AWG que permite la creación rápida y fácil de las máquinas virtuales simplemente especificando las características de procesamiento y almacenamiento de dichas máquinas. Al realizar este proceso por medio de la AWG permite a los usuarios replicar máquinas ya configuradas y crear máquinas virtuales de forma fácil mejorando el proceso manual, el cual es tedioso y complejo para usuarios sin experiencia.



| Ítem : 1   | Nivel de dificultad |       |            |         |             |       |
|------------|---------------------|-------|------------|---------|-------------|-------|
| Usuario    | muy fácil           | fácil | intermedio | difícil | muy difícil | Total |
| estudiante | 5                   | 2     | 1          | 0       | 0           | 8     |
| profesor   | 0                   | 2     | 0          | 0       | 0           | 2     |
| egresados  | 1                   | 1     | 0          | 0       | 0           | 2     |

Tabla 5.8: Evaluación del nivel de dificultad del proceso 1

En la Tabla 5.9 presenta los resultados del proceso 2 en el cual puede evidenciarse que los usuarios pudieron conectarse desde la interfaz de la AWG al sistema LTE de forma remota a través del navegador sin mayor dificultad y de manera correcta. El éxito de este proceso es debido a que por medio del navegador y a través de la AWG un usuario puede acceder a configurar o realizar cambios en las maquinas del sistema LTE de forma remota, unicamente haciendo clic en el boton consola. Al realizar este proceso por medio de la AWG, permite que los usuarios puedan conectarse de forma remota sin necesidad de instalar *software* externos que en algunos casos producen interferencia en la ejecución de los módulos de OAI por los puertos utilizados por ambos *software*.

| Ítem : 2   | Nivel de dificultad |       |            |         |             |       |
|------------|---------------------|-------|------------|---------|-------------|-------|
| Usuario    | muy fácil           | fácil | intermedio | difícil | muy difícil | Total |
| estudiante | 6                   | 2     | 0          | 0       | 0           | 8     |
| profesor   | 1                   | 1     | 0          | 0       | 0           | 2     |
| egresados  | 1                   | 1     | 0          | 0       | 0           | 2     |

Tabla 5.9: Evaluación del nivel de dificultad del proceso 2

En la Tabla 5.10 puede visualizarse la calificación realizada por los diferentes usuarios respecto a la dificultad de realizar el proceso 3. Los resultados indican que los usuarios pudieron realizar con éxito las pruebas en el sistema LTE a través de un cuestionario presente en la AWG. De las calificaciones obtenidas puede concluirse que este proceso si genera una mayor dificultad en los usuarios debido a los conocimientos previos necesarios para definir los valores del cuestionario.

| Ítem : 3   | Nivel de dificultad |       |            |         |             | Total |
|------------|---------------------|-------|------------|---------|-------------|-------|
| Usuario    | muy fácil           | fácil | intermedio | difícil | muy difícil | Total |
| estudiante | 2                   | 3     | 2          | 1       | 0           | 8     |
| profesor   | 0                   | 2     | 0          | 0       | 0           | 2     |
| egresados  | 1                   | 1     | 0          | 0       | 0           | 2     |

Tabla 5.10: Evaluación del nivel de dificultad del proceso 3

En la Tabla 5.11 presenta los resultados obtenidos del proceso 4, del cual puede evidenciarse que los usuarios pudieron visualizar los resultados de las pruebas y realizar su respectiva exportación a través de la AWG. Este proceso fue realizado con éxito y sin presentar mayor dificultad en su realización. Al realizar este proceso por medio de la AWG va a permitir que los usuarios puedan acceder de forma fácil y remota a los resultados de las pruebas realizadas sobre el sistema LTE, permitiendo así obtener las respectivas gráficas, además, de poder realizar la exportación de estos resultados.

| Ítem : 4   | Nivel de dificultad |       |            |         |             | Total |
|------------|---------------------|-------|------------|---------|-------------|-------|
| Usuario    | muy fácil           | fácil | intermedio | difícil | muy difícil | Total |
| estudiante | 2                   | 5     | 1          | 0       | 0           | 8     |
| profesor   | 0                   | 2     | 0          | 0       | 0           | 2     |
| egresados  | 0                   | 2     | 0          | 0       | 0           | 2     |

Tabla 5.11: Evaluación del nivel de dificultad del proceso 4

El cuestionario, adicional a los procesos para la validación del funcionamiento del TELCO 4G cuenta con una pregunta en la cual los usuarios pueden describir las mejoras que pudiesen realizarse para facilitar o mejorar los procesos realizados. Las recomendaciones principales de los usuarios son en la interfaz de la AWG para lo cual sugieren:

- mejorar los botones por medio del uso de *tooltips* para proveer más información y que sea más fácil distinguir la función de cada botón.

- para la realización de las pruebas mejorar la información de las guías para tener un mayor entendimiento de las pruebas a realizar.
- realizar validaciones en las casillas de los cuestionarios para evitar introducir valores erróneos por parte del usuario.

Las sugerencias realizadas por los usuarios fueron corregidas con el fin de mejorar la interfaz y el funcionamiento del TELCO 4G. Estas mejoras permitirán a los posteriores usuarios del TELCO 4G poder realizar de una manera más fácil e intuitiva los procesos y generar menos dificultad.

## 5.7. Pruebas de Capacidad de Usuarios

Las pruebas son realizadas con el fin de medir el rendimiento o *throughput* en el TELCO 4G en base al número de peticiones o transacciones que responde por segundo [74] [75]. El rendimiento del TELCO 4G es medido en *Kilobytes* por segundo, teniendo en cuenta el TRS, el cual es el tiempo de respuesta promedio que tarda un servidor *Web* en atender una solicitud [76].

Para la ejecución de las pruebas es usado el *software* de código libre Jmeter [77] el cual permite realizar pruebas de carga y estrés en el TELCO 4G. Además, jmeter brinda la posibilidad de generar tráfico simulado de datos sobre las diferentes secciones de la AWG a partir de un conjunto de usuarios simulados llamados grupos de hilo los cuales envían peticiones HTTP hacia la AWG y el SIO [77][78]. Jmeter posibilita la evaluación de rendimiento con base al tiempo de respuesta que tarda el TELCO 4G para procesar con éxito un grupo de hilos [71]. Los datos obtenidos en la realización de las pruebas pueden verse afectados debido a características del computador en el cual son realizadas las peticiones, como son la CPU y la RAM, además, de la capacidad de la red. Las pruebas de rendimiento son realizadas en una máquina virtual la cual cuenta con una capacidad de 8 núcleos de procesamiento, 16 GB de RAM y 300 GB de almacenamiento con un sistema operativo Ubuntu 18.

Para la ejecución de las pruebas de rendimiento solo son tenidos en cuenta cierta cantidad de usuarios a emular, tomando un intervalo de 1 a 1500 posibles usuarios

que pueden acceder a la AWG. Las pruebas son realizadas sobre la AWG evaluando el acceso a la sección de información, de pruebas y conexión, Guías y gestión de máquinas. Las pruebas en las cuales son realizadas las consultas de información y estados de las máquinas pudieron ser realizadas con normalidad. Sin embargo las pruebas de creación de máquinas virtuales no pudieron llevarse a cabo debido a las restricciones en cuanto a la RAM y almacenamiento que provee la plataforma TELCO 2.0, lo que provoco que OpenStack presentara fallas y el SIO estuviera saturado.

En la Figura 5.31, pueden observarse los resultados obtenidos al realizar la prueba de rendimiento y TRS cuando es realizado el proceso para acceder a la sección de información. Para este proceso son simulados 1, 10, 50, 100, 150, 500, 1000 y 1500 usuarios los cuales generan las peticiones HTTP. La prueba de carga es realizada un total de 30 veces para cada valor de los usuarios y los resultados son promediados con el fin de obtener datos estadísticos confiables. La cantidad de usuarios es proporcional al rendimiento del TELCO 4G, a medida que aumenta la cantidad de usuarios el rendimiento debe aumentar para asegurar la transferencia de la información. Sin embargo, el aumento de los usuarios genera una mayor cantidad de peticiones lo que ocasiona un mayor tiempo de respuesta del servidor. En el punto a de la gráfica puede observarse que para 500 usuarios la curva empieza a estabilizarse en valores cercanos a los 2900 Kb/s lo que indica que la capacidad del servidor empieza a hacer saturada y las peticiones empiezan a encolarse. En el punto d para un total de 1000 usuarios podemos observar que la gráfica es estabilizada en un valor de aproximadamente 3000 Kb/s el cual es el valor máximo soportado.

Respecto al TRS según la gráfica podemos analizar que el tiempo promedio para la petición de los 10 usuarios es de 20 milisegundos, a medida que aumenta la cantidad de usuarios aumenta el TRS. En el punto c2 el tiempo de respuesta promedio es de aproximadamente 1100 milisegundos lo que equivale a 1,1 segundos tiempo en el cual el servidor procesa las peticiones de 800 usuarios, el cual es un tiempo óptimo para dar respuesta por parte del servidor. El punto c1 está ubicado en el valor máximo de rendimiento por parte del servidor para la solicitud de peticiones de 800 usuarios, por tanto, podemos concluir que este sería el valor máximo de usuarios simultáneos recomendado para la utilización del TELCO 4G.

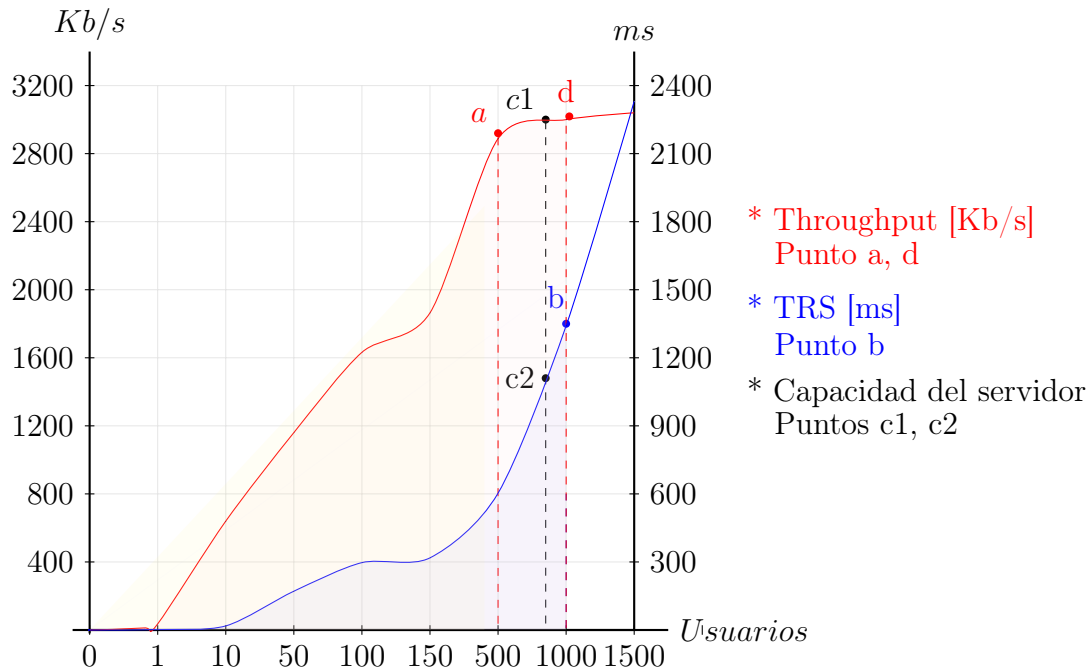


Figura 5.31: Prueba de rendimiento, gráficas de *throughput* y TRS

En el proceso de realizar pruebas para la creación de las máquinas virtuales podemos concluir que el sistema no soporta la creación de más de 10 máquinas virtuales de forma simultánea debido al alto nivel de procesamiento que se lleva a cabo para la creación de una sola máquina. Además, el otro limitante son los recursos proporcionados por parte de la plataforma TELCO 2.0 para este proyecto. Por tanto, el servidor era totalmente saturado con este proceso lo que generó que OpenStack dejara de funcionar y no permitiría continuar con la realización de las pruebas.

# Capítulo 6

## Conclusiones y Trabajos Futuros

Este capítulo presenta las conclusiones obtenidas en el trabajo desarrollado, respecto a las pruebas realizadas sobre el ambiente de prueba para redes móviles interconectado con IMS llamado Telco 4G. Finalmente, son propuestos los trabajos futuros.

### 6.1. Conclusiones

Este trabajo responde a la pregunta de investigación **¿Cómo desarrollar un ambiente de pruebas, para investigar y analizar redes móviles 4G?**. Para responder la pregunta de investigación, este trabajo de grado propone el diseño e implementación de un ambiente de pruebas para redes móviles 4G interconectados con IMS. El diseño de la arquitectura es realizado haciendo uso del modelo de Kruchten “4+1”, el cual permitió describir el ambiente de prueba por medio de diferentes vistas. Son diseñados dos escenarios, uno centralizado y otro distribuido, los cuales son implementados haciendo uso del *software* de código abierto OAI.

EL primer diseño implementado es un escenario centralizado el cual cuenta con un sistema LTE desarrollado sobre una máquina virtual en la cual son instalados los módulos correspondientes para una implementación de OAI con OAI UE + OAI eNB + OAI EPC, este escenario fue implementado con éxito y es sobre el cual

son realizadas pruebas de funcionalidad del mismo y análisis en los canales físicos y de transporte de la red LTE. El segundo diseño implementado es un escenario distribuido desarrollado sobre dos computadores de escritorio del laboratorio Telco 2.0 Universidad del Cauca en los cuales son instalados los módulos correspondientes para una implementación de OAI con UE comercial + OAI eNB + OAI EPC.

De la realización del presente trabajo de grado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- OAI es una plataforma robusta y adecuada para la implementación y despliegue de una red LTE, además, cuenta con proyección futura hacia tecnologías de 5G lo que posibilita contar con implementaciones escalables. Sin embargo, la documentación dispuesta para la implementación en la *wiki* de OAI presenta algunas fallas y algunas funcionalidades aún son experimentales. Pero cabe destacar el gran apoyo brindado por la comunidad por medio del *Mailing list* de OAI para la resolución de problemas.
- El sistema LTE centralizado es evaluado respecto a la funcionalidad del mismo, donde fue posible comprobar las diferentes conexiones entre los módulos y validar el correcto funcionamiento del sistema LTE por medio de la captura de paquetes con el programa Wireshark y parámetros de validación ofrecidos al ejecutar los módulos de OAI.
- El TELCO 4G es evaluado respecto a la capacidad de usuarios y a la funcionalidad del mismo. De la capacidad de usuarios pudo comprobarse que el sistema puede ser utilizado en simultáneo siempre y cuando no sean generadas grandes cantidades de peticiones simultáneas sobre la creación de máquinas virtuales debido al alto procesamiento que es generado. La evaluación respecto a la funcionalidad por parte de los usuarios del TELCO 4G fue satisfactoria por lo que puede concluirse que el prototipo funcional es intuitivo y fácil de utilizar.

### 6.1.1. Trabajos Futuros

En base al diseño e implementación del Telco 4G desarrollado en el presente trabajo de grado, son presentadas algunas propuestas para continuar avanzando en la investigación de trabajos futuros.

- Implementar un sistema distribuido completamente funcional que permita la conexión de un UE a la red desplegada por OAI.
- Permitir la conexión con otros sistemas externos con el fin de realizar experimentaciones con otras tecnologías.
- Sustituir el EPC de OAI y hacer uso de un EPC de terceros que permita la integración de nuevas funcionalidades o conexiones con otros sistemas.



# Bibliografía

- [1] S. Jordi, *REDES INALÁMBRICAS*, Std., 2014.
- [2] J. J. Hernández Carlón, ““la tecnología lte y su implementación en redes de seguridad pública”,” 2017.
- [3] G. D. Martínez, “Despliegue de un prototipo de red 4g-lte con openairinterface para entorno didáctico,” 2018. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/53088/>
- [4] J. A. Nuñez Coral, “Diseño de una red de nueva generación lte-a para una zona urbana en bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación itu-r m.1457,” 2013.
- [5] X. Xiang, “Estudio de plataformas sdr para lte-5g,” 2018.
- [6] G. Americas, *Bringing Network Function Virtualization to LTE*, Std., 2014.
- [7] M. Z. S. R. M.Georgiades, N.Akhtar, “Surrey’s next generation wireless network testbed,” 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/237367767\\_Surrey’s\\_Next\\_Generation\\_Wireless\\_Network\\_Testbed/citations](https://www.researchgate.net/publication/237367767_Surrey’s_Next_Generation_Wireless_Network_Testbed/citations)
- [8] P. Kruchten, “Architectural Blueprints—The “4+1” View Model of Software Architecture,” 1995.
- [9] E. Camacho, F. Cardeso, G. Nuñez, “ARQUITECTURAS DE SOFTWARE,” 2004.
- [10] Amarisoft, “Amari lte 100 - software suite solutions,” 2020. [Online]. Available: <https://www.amarisoft.com/products/custom-projects/>

- 
- [11] B. Wojtowicz, *OpenLTE*, Std. [Online]. Available: <http://openlte.sourceforge.net/>
- [12] G. E. Francisco, *Prototipo de una estación base 4G usando Open Air Interface*, Std., 2017.
- [13] N. J. Alirio, *testbed Design for Wireless Communications Systems Assessment*, Std., 2010.
- [14] D. Staessens, “Large-scale rina experimentation on fire+. deliverable 4.2 report on available experimental infrastructure,” *ARCFIRE*, vol. v0.1, pp. 1–16, 2016. [Online]. Available: [http://ict-arcfire.eu/wp-content/uploads/2017/10/arcfire\\_d42-final.pdf](http://ict-arcfire.eu/wp-content/uploads/2017/10/arcfire_d42-final.pdf)
- [15] J. GSRCÍA-NAYA, H. PÉREZ-IGLESIAS, A. DAPENA, and M. GONZÁLEZ-LÓPEZ, *Digital Communications Learning Tools gtTAL: Graphical Tool for Testbed-assisted Learning.*, Std., 01 2010.
- [16] M. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones | de Colombia, *Boletín trimestral de las TIC*, Std., Primer Trimestre de 2017. [Online]. Available: [https://colombiatic.mintic.gov.co/602/articles-55212\\_archivo\\_pdf.pdf](https://colombiatic.mintic.gov.co/602/articles-55212_archivo_pdf.pdf)
- [17] GALLUP, (*Encuesta wise 2015: CONECTANDO LA EDUCACIÓN CON EL MUNDO REAL*), Std.
- [18] W. Alexander and G. Robin, *Software-Defined Radio for Engineers*, Std., 2018.
- [19] T. G. R. Foundation, *GNU Radio*, Std., 2019. [Online]. Available: <https://www.gnuradio.org/about/>
- [20] P. D. Iván and M. F. J. José, *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*, Std., 2011.
- [21] C. C and S. J, *An IMS testbed for SIP applications*, Std., 2013.
- [22] FED4FIRE, *Future Internet Research and Experimentation*, Std., 2015. [Online]. Available: <https://old.fed4fire.eu/fuseco/>

- [23] T. Magedanz, P. Weik, D. Vingarzan, F. C. de Gouveia, and S. Wahle, “Experiences on the Establishment and Provisioning of NGN/IMS Testbeds - The FOKUS Open IMS Playground and the Related Open Source IMS Core,” <https://www.researchgate.net/-publication/45174945>, pp. 1–6, 2007.
- [24] F. Firmin, *The Evolved Packet Core*, Std., 2018. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [25] A. M. P. M. Almudena Diaz, CesarA. Garcia-Perez and A. Rios, “Performnetworks: A testbed for exhaustive interoperability and performance analysis for mobile networks,” pp. 189–209, 2017. [Online]. Available: [https://www.riverpublishers.com/pdf/ebook/chapter/RP\\_9788793519114C6.pdf](https://www.riverpublishers.com/pdf/ebook/chapter/RP_9788793519114C6.pdf)
- [26] M. E. de la GSMA, “Mobile economy de la gsma,” 2020. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/mobileeconomy/>
- [27] L. 3G Americas, “5g americas.org,” p. pagina web, 18/02/2020. [Online]. Available: <https://www.5gamericas.org/>
- [28] H. Treasury, “Next generation mobile technologies: A 5g strategy for the uk,” 2017. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/next-generation-mobile-technologies-a-5g-strategy-for-the-uk>
- [29] KTH, “5g and beyond.”
- [30] J. K. R. M. B. T. G. L. J. N. S. Z. By Paul Nikolich, Chih-Lin I, “Standards for 5g and beyond: Their use cases and applications.”
- [31] P. M. Gomez, “Despliegue de un prototipo de red 3g/4g con openumts/openlte y openairinteface para entorno didáctico,” nov 2018.
- [32] U. I. de Telecomunicaciones, *Estrategias de transición de las redes actuales a las redes de la próxima generación en los países en desarrollo*, Std., 2010.
- [33] R. Madrigal and J. Alexander, *Modelamiento y simulación de la capa física de una red LTE*, Std., 2015.
- [34] X. Xiang, “Estudio de plataformas sdr para lte-5g,” 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/14603>

- [35] J. HERNANDEZ, *La tecnología LTE y su implementación en redes de seguridad pública*, Std., 2017.
- [36] M. O. Julian and T. M. Angie, *Desarrollo de guías de laboratorio aplicando radio definido por software para la implementación de un handover con estaciones base de segunda generación y la primera fase de una estación base de cuarta generación*, Std., 2017.
- [37] S. PAUDEL, *Investigation, Analysis and Implementation of Open Source Mobile Communication Software*, Std., 2016.
- [38] W. Foundation, (*About-Wireshark*), Std., 2018. [Online]. Available: <https://www.wireshark.org/about.html>
- [39] S. R. S. (SRS), (*Products*), Std. [Online]. Available: <https://www.softwareradiosystems.com/products/#srslte>
- [40] —, (*Open source SDR LTE software suite*), Std. [Online]. Available: <https://github.com/srsLTE/srsLTE>
- [41] OpenAirInterface, “Openairinterface – 5g software alliance for democratising wireless,” 2020.
- [42] —, “Openairinterface, “gitlab eurecom - openairinterface - evolved core network implementation,” 2020. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openair-cn>
- [43] —, “Openairinterface, “oai features - openairinterface wiki - gitlab eurecom,” 2020. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/wikis/OpenAirFeatures>
- [44] Amarisoft, “Tecnología,” 2020. [Online]. Available: <https://www.amarisoft.com/technology/>
- [45] E. CORRALES and W. GOMEZ, *TECNOLOGIA MIMO*, Std., 2007.
- [46] R. UIT-T, *Redes de la próxima generación – Marcos y modelos arquitecturales funcionales*, Std., 2004.

- [47] G. E. M, *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SERVICIO IPTV PARA UN OPERADOR MÓVIL CELULAR QUE TIENE UNA RED DE ACCESO HSDPA SOBRE CORE IMS*, Std., 2012.
- [48] S. W. Fernando, *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DE INTERCONEXIÓN DE REDES NGN MEDIANTE EL PROTOCOLO SIP*, Std., 2013.
- [49] W. F. Sanchez Pacheco, “Diseño e implementación de una solución de interconexión de redes ngn mediante el protocolo sip,” *Pontificia Universidad Javeriana*, pp. 1–174, 2013. [Online]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12740/SanchezPacheco-WilliamFernando2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [50] E. A. Cipagauta Pedraza and R. Ferro Escobar, “Sistemas multimedia basados en protocolo ip ims aplicados a servicios lte de 4g,” *Redes de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, vol. 3, pp. 100–108, 2013.
- [51] J. CÁRDENAS, *Estudio de la tecnología NFV aplicada al núcleo EPC en redes LTE Y análisis de entorno de orquestación OSM para su gestion*, Std., 2016.
- [52] M. W. S. CHIOSI and C. D. LANE JOHNSON, *Network Functions Virtualisation (NFV)*, Std., 2013.
- [53] “Network Functions Virtualisation An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges Call for Action,” “*SDN and OpenFlow World Congress*”, Darmstadt - Germany, pp. 1–16, 2012. [Online]. Available: [https://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper.pdf](https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf)
- [54] M. NISHIHAMA, Yuusuke SHINOZUKA and T. N. T. TOKUYOSHI, *Virtual.Solutions f.m Carriers*, Std., 2016.
- [55] P. Bocciarelli, A. D’Ambrogio, A. Falcone, and A. Giglio, “A model-driven approach to enable the distributed simulation of complex systems,” *INCOSE*, pp. 245–257, 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/286202302\\_A\\_Model-Driven\\_Approach\\_to\\_Enable\\_the\\_Distributed\\_Simulation\\_of\\_Complex\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/286202302_A_Model-Driven_Approach_to_Enable_the_Distributed_Simulation_of_Complex_Systems)

- [56] D. L. OBANDO JARRÍN, “Implantación de un testbed para una red inalámbrica utilizando sdn (open flow),” 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14855>
- [57] B. N. A. O. Rohit Budhiraja, Bhaskar Ramamurthi, “End-to-end india-uk transnational wireless testbed,” 2011. [Online]. Available: [http://ictactjournals.in/paper/IJCT\\_V2\\_I2\\_Paper\\_4\\_323\\_328.pdf](http://ictactjournals.in/paper/IJCT_V2_I2_Paper_4_323_328.pdf)
- [58] J. F.-N. J. R.-M. E. A. V. J. I. A. José Ma Saldaña, Jenifer Murillo, “Emulación de escenarios de red mediante un testbed,” 2010. [Online]. Available: [http://diec.unizar.es/~jsaldana/personal/testbed\\_URSI\\_2010\\_in\\_proc.pdf](http://diec.unizar.es/~jsaldana/personal/testbed_URSI_2010_in_proc.pdf)
- [59] M. O. S. G. K. R.-H. K. R. S. H. L. D. Raychaudhuri, I. Seskar and M. Singh, “Overview of the orbit radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols),” 2005. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1386209>
- [60] J. A. G. Naya, “Testbed design for wireless communications systems assessment,” 2010. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=42017>
- [61] E. K. Alvarez, “Recepcion de señal lte mediante técnicas de radio definida por software,” pp. 1–64, 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9489/388066.pdf?sequence=1>
- [62] N. E. TINAJERO TERÁN, “Implementacion de un enodeb lte release 9 utilizando sdr.”
- [63] S. Robusté, “Configuración y puesta en marcha de una estación base LTE,” 2017.
- [64] A. Gaitán, “Desarrollo de un sistema para simulación, generación y recepción de señales 4G y 5G,” 2017.
- [65] M. O. S. G. K. R.-H. K. R. S. H. L. D. Raychaudhuri, I. Seskar and M. Singh, “Overview of the orbit radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols,” pp. 1–6, 2005. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1424763>

- [66] M. Georgiades, M. Ghader, N. Akhtar, R. Tafazolli, "Surrey's Next Generation Wireless Network Testbed," 2014.
- [67] R. Sánchez, M. Acevedo, "ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA APLICACIÓN WEB MEDIANTE JAVA PARA LA GESTIÓN DE FAVORITOS DE SPOTIFY," 2015.
- [68] M. Gallego, "Metodología Scrum," 2014.
- [69] O. Gómez, P. Rosales, J. Salas, "Criterios de selección de metodologías de desarrollo de software," 2010.
- [70] P. K. J. Howard Lei, Farnaz Ganjeizadeh and P. Ozcan, "A statistical analysis of the effects of scrum and kanban on software development projects," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 1–9, 2017.
- [71] J. Galindez, R. Morales, "UN AMBIENTE DE PRUEBAS IMS BASADO EN VIRTUALIZACION DE FUNCIONES DE RED," 2020.
- [72] J. G. Muñoz, "Estudio de la arquitectura de protocolos de lte," 2016. [Online]. Available: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98231/pfc\\_build.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98231/pfc_build.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [73] A. Vivas, L Vallejo, "DISEÑO DE UN LABORATORIO DE COMUNICACIONES MÓVILES BASADO EN LA PLATAFORMA OPENAIRINTERFACE," 2019.
- [74] B. Re, M Philippe, A. Olmedo, "Análisis del impacto en la performance de una web app utilizando un lenguaje compilado y un lenguaje interpretado," 2019.
- [75] K. Gupta and M. Mathuria, "Improving performance of web application approaches using connection pooling," in *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, vol. 2017-Janua. IEEE, apr 2017, pp. 355–358. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8212833/>
- [76] M. Gajewski and W. Zabierowski, "Analysis and Comparison of the Spring Framework and Play Framework Performance, Used to Create Web

- Applications in Java,” in *2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. IEEE, may 2019, pp. 170–173. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8817390/>
- [77] R. K. Lenka, S. Mamgain, S. Kumar, and R. K. Barik, “Performance Analysis of Automated Testing Tools: JMeter and TestComplete,” in *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*. IEEE, oct 2018, pp. 399–407. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8748521/>
- [78] You Jing, Zhang Lan, Wang Hongyuan, Sun Yuqiang, and Cao Guizhen, “JMeter-based aging simulation of computing system,” in *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, vol. 5. IEEE, aug 2010, pp. 282–285. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5609969/>



**Ambiente de prueba para una red móvil 4G  
interconecta con IMS en la plataforma TELCO 2.0  
de la Universidad del Cauca**



**Anexos**

Trabajo de Grado

**Yeison Stiven Murcia**

**Stephany Johana Argoty Solarte**

Director: PhD. Oscar Mauricio Caicedo Rendón

Co-Director: Mg. Carlos Felipe Estrada Solano

*Departamento de Telemática  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Universidad del Cauca  
Popayán, Cauca, 2021*

# Anexos A

## Diseño de la arquitectura para Telco 4G

### A.1. Anexos de historias de usuario

En esta sección son descritas las historias de usuario restantes para el Telco 4G. Estas historias están elaboradas en base a los requisitos funcionales faltantes de los diferentes sistemas del ambiente de prueba.

| Historia de usuario: Requisito 3                                                                                                                                                                                                               |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Número: 6                                                                                                                                                                                                                                      | Usuario: Investigador      |
| Nombre de historia:                                                                                                                                                                                                                            | Llamadas simultaneas       |
| Prioridad: Alta                                                                                                                                                                                                                                | Riesgo en desarrollo: Alto |
| Puntos estimados: 4                                                                                                                                                                                                                            | Estimación: 5 semanas      |
| Responsable: Yeison Stiven Murcia                                                                                                                                                                                                              |                            |
| Descripción: El usuario podrá conectar su dispositivo móvil a la red dispuesta por el sistema LTE para la realización de llamadas 4G simultáneas. Las llamadas son realizadas desde un equipo de usuario comercial, sobre la red LTE generada. |                            |
| Validación: -Las tarjetas USIM programadas con los parámetros de la red deben funcionar en el UE permitiendo así conectarse a la red.<br>-El terminal mostrara que está conectado a la red exitosamente.                                       |                            |

Tabla A.1: Historia usuario, llamadas simultáneas

| Historia de usuario: Basada en requisito 4                                                                                                                                     |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Número: 7                                                                                                                                                                      | Usuario: Investigador      |
| Nombre de historia:                                                                                                                                                            | Acceso a navegación        |
| Prioridad: Alta                                                                                                                                                                | Riesgo en desarrollo: Alto |
| Puntos estimados: 4                                                                                                                                                            | Estimación: 5 semanas      |
| Responsable: Yeison Stiven Murcia                                                                                                                                              |                            |
| Descripción: El sistema LTE debe permitir a los dispositivos de usuario acceder al servicio de datos.                                                                          |                            |
| Validación: -El usuario podrá ingresar a la página de la universidad o ver un vídeo de internet para verificar si es posible consumir datos de la red del ambiente de pruebas. |                            |

Tabla A.2: Historia usuario, acceso a navegación

| Historia de usuario: Basada en requisito 7                                                                                          |                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Número: 8                                                                                                                           | Usuario: Investigador      |
| Nombre de historia:                                                                                                                 | Iniciar sesión             |
| Prioridad: Baja                                                                                                                     | Riesgo en desarrollo: Baja |
| Puntos estimados: 3                                                                                                                 | Estimación: 3 semanas      |
| Responsable: Yeison Stiven Murcia                                                                                                   |                            |
| Descripción: El usuario investigador puede iniciar sesión con un correo y contraseña personal para poder entrar y realizar pruebas. |                            |
| Validación: - El usuario ingresara a la plataforma de manera exitosa haciendo uso de su correo y contraseña asignada                |                            |

Tabla A.3: Historia usuario, iniciar sesión

| Historia de usuario: Basada en requisito 8                                                                                                                                                                                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Número: 9                                                                                                                                                                                                                                        | Usuario: Investigador          |
| Nombre de historia:                                                                                                                                                                                                                              | Sección de información y guías |
| Prioridad: Media                                                                                                                                                                                                                                 | Riesgo en desarrollo: Media    |
| Puntos estimados: 3                                                                                                                                                                                                                              | Estimación: 2 semanas          |
| Responsable: Yeison Stiven Murcia                                                                                                                                                                                                                |                                |
| Descripción: El usuario investigador puede observar las definiciones sobre el sistema LTE, su arquitectura y guías sobre la forma adecuada de realizar las pruebas. Las guías tendrán pasos muy detallados para realizar pruebas personalizadas. |                                |
| Validación: -El usuario investigador puede acceder y observar la información alojada en la AWG.                                                                                                                                                  |                                |

Tabla A.4: Historia usuario, sección de información y guías

| Historia de usuario: Basada en requisito 9                                                                                                                       |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Número: 10                                                                                                                                                       | Usuario: Investigador      |
| Nombre de historia: Exportar resultado de pruebas                                                                                                                |                            |
| Prioridad: Alta                                                                                                                                                  | Riesgo en desarrollo: Alta |
| Puntos estimados: 3                                                                                                                                              | Estimación: 2 semanas      |
| Responsable: Estephany Argoty                                                                                                                                    |                            |
| Descripción: El usuario investigador puede exportar sus resultado. El resultado de la prueba se exporta de forma individual con los parámetros de configuración. |                            |
| Validación: El archivo se descargara con éxito en el computador donde se están realizando las pruebas para su posterior visualización.                           |                            |

Tabla A.5: Historia usuario, exportar resultado de pruebas

| Historia de usuario: Basada en requisito 11                                                                                                                                                       |                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Número: 11                                                                                                                                                                                        | Usuario: Investigador      |
| Nombre de historia: Comunicación remota entre el sistema LTE y AWG                                                                                                                                |                            |
| Prioridad: Baja                                                                                                                                                                                   | Riesgo en desarrollo: Bajo |
| Puntos estimados: 3                                                                                                                                                                               | Estimación: 3 semanas      |
| Responsable: Yeison Stiven Murcia                                                                                                                                                                 |                            |
| Descripción: El sistema de interoperabilidad debe permitir el uso remoto del sistema LTE a través de la AWG para realizar acciones y configuraciones en los módulos que conforman el sistema LTE. |                            |
| Validación: -El usuario puede acceder al sistema LTE por medio de la AWG<br>-El usuario puede realizar acciones sobre el sistema LTE a través de la AWG.                                          |                            |

Tabla A.6: Historia usuario, comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG

## A.2. Vista de procesos

En esta sección son ilustrados los diagramas de secuencia restantes para los requisitos del Telco 4G.

### A.2.1. Llamadas simultaneas

**Requisito 3:** El sistema LTE debe permitir la realización de llamadas 4G simultáneas. Las llamadas se realizan desde Los UE, sobre la red LTE generada.

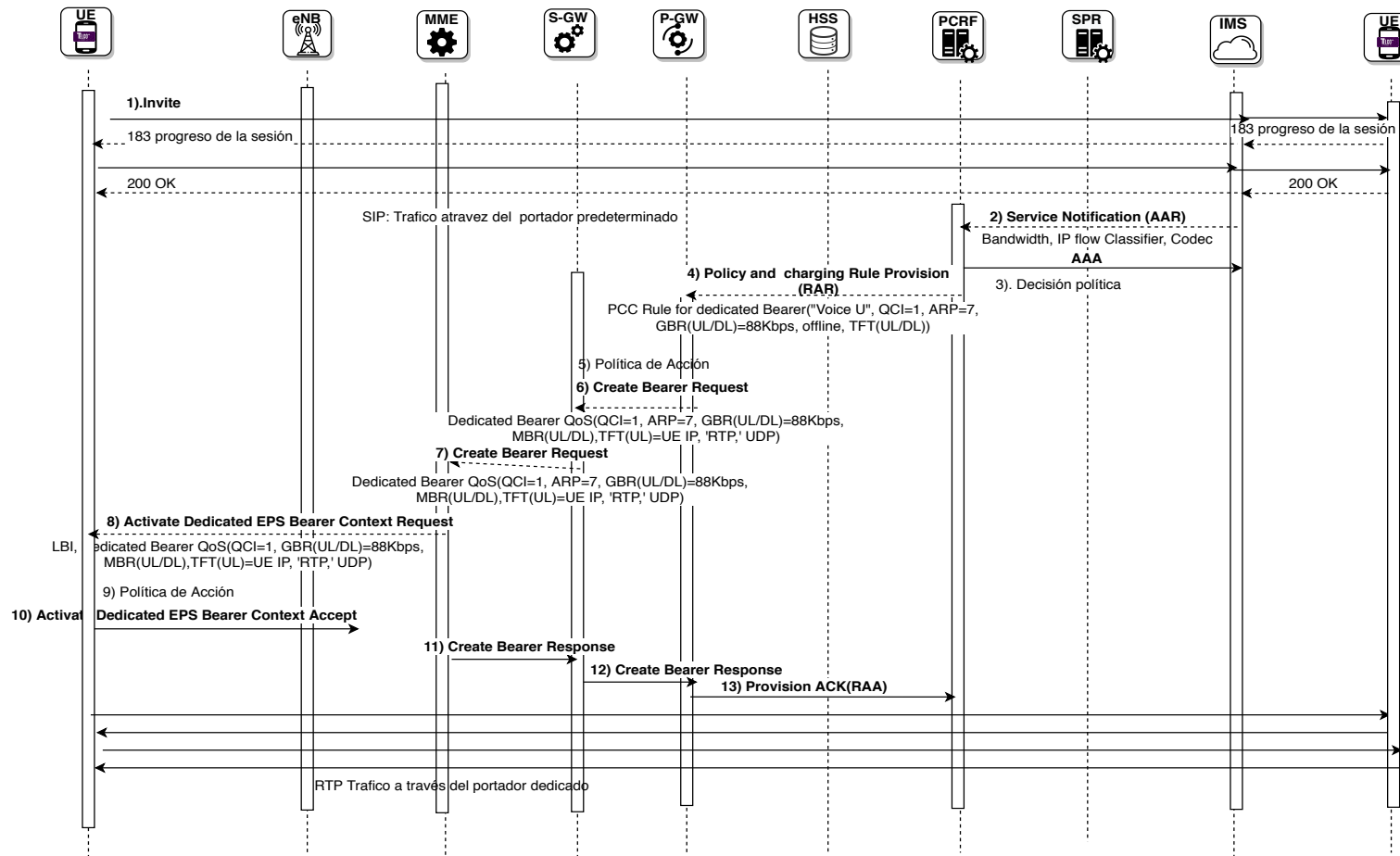


Figura A.1: Diagrama de secuencia, llamadas simultáneas

1.[UE → P-CSCF] Generación de la Llamada de voz: el UE solicita una llamada de voz enviando un mensaje *Invite* al P-CSCF (red IMS).

2.[PCRF ← P-CSCF] Información de entrega de servicios: el P-CSCF envía un mensaje AAR al PCRF cuando recibe el mensaje SIP, porque el P-CSCF (red IMS) sabe que una llamada de voz ha sido solicitada. El mensaje AAR contiene información como máximo/mínimo ancho de banda, identificador de flujo IP, etc..

3.[PCRF] Decisión de política: el PCRF determina la política a aplicar a la sesión EPS seleccionando una regla PCC y un canal basado en la información recibida del P-CSCF. La regla PCC seleccionada es 'Voice-U' que soporte paquetes de voz, para la clase QoS y el canal seleccionado es QCI=1. El canal por defecto como no puede soportar este nivel, se crea un canal dedicado con un QoS deferente, modificando la sesión EPS existente

- Regla 'Voice-U': QCI = 1, ARP = 7, GBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, MBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, la regla de carga: desconectado, RTP Packet Filter.

4.[P-GW ← PCRF] Regla PCC Provisión: PCRF entrega la regla PCC ('Voice-U') al P-GW sobre la interfaz Gx.

5.[P-GW] Forzado de Política: una vez recibida la regla PCC('Voice-U'), el P-GW configura los parámetros Qos y la política de facturación, y mapea los parámetros Qos de SDF a los parámetros del canal dedicado

- P-GW (SDF): QCI = 1, ARP = 7, GBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, MBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, SDF Plantilla (UL / DL) = (UE IP, \*, RTP, \*, UDP) / (\*, UE IP, RTP, \*, UDP)
- P-GW (Canal Dedicado): QCI = 1, ARP = 7, GBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, MBR (UL / DL) = 88 Kbps / 88 Kbps, TFT (UL / DL) = (UE IP, \*, RTP, \*, UDP) / (\*, UE IP, RTP, \*, UDP)

**6 y 7.**[MME ← S-GW] ← P-GW Solicitud para la creación de un canal dedicado: P-GW envía al MME un mensaje de solicitud de creación de canal para solicitar un canal dedicado. El mensaje contiene un Identificador de canal enlazado EPS (LBI), con el ID del canal dedicado, el QoS del canal y la información del TFT para el enlace de bajada. Los mensajes relacionados con el canal por defecto contienen el LBI, que indican el ID del canal al cual cada canal pertenece, y juega el papel de s.

**8.**[UE ← MME] Solicitud de activación de contexto del canal dedicado: MME solicita la activación del canal dedicado enviando al UE un mensaje de Activación del contexto del canal EPS dedicado. En este mensaje, se envían los parámetros de la política por el P-GW.

**9.**[UE] Política de cumplimiento: La activación de *Dedicated Contexto Portador* UE fuerza la política de UL y activa el canal dedicado.

- UE: QCI = 1, GBR (UL) = 88 Kbps, MBR (UL) = 88K bps, TFT (UL) = (UE IP, \*, RTP, \*, UDP)

**10.**[UE → MME] Notificación de activación del contexto del canal dedicado: UE notifica al MME que el canal dedicado para los paquetes de voz ha sido activado enviando un mensaje de aceptación de activación del canal EPS dedicado.

**11 y 12.**[MME → S-GW → P-GW] Notificación de la creación canal dedicado: MME notifica al P-GW que el canal dedicado ha sido creado.

**13.**[P-GW → PCRF] Notificación de la regla aplicada PCC: P-GW notifica al PCRF que la regla de PCC ha sido forzada.

### A.2.2. Acceso a navegación

**Requisito 4:** El sistema LTE debe permitir a los dispositivos de usuario acceder al servicio de datos.

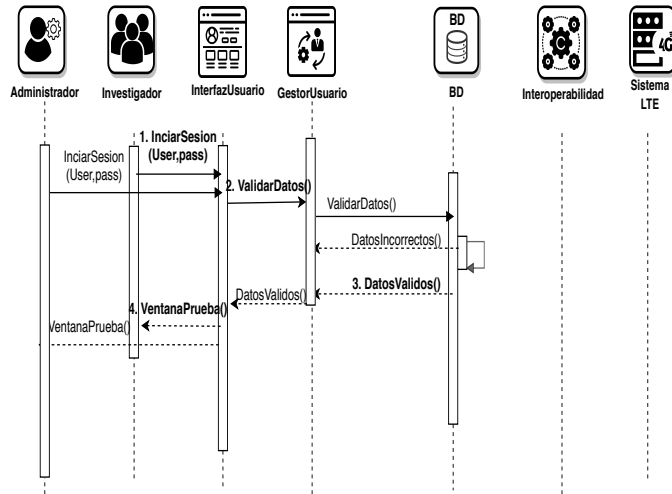


Figura A.2: Diagrama de secuencia, acceso a navegación

### A.2.3. Iniciar sesión

**Requisito 7:** La AWG debe permitir iniciar sesión con un correo y contraseña personal.

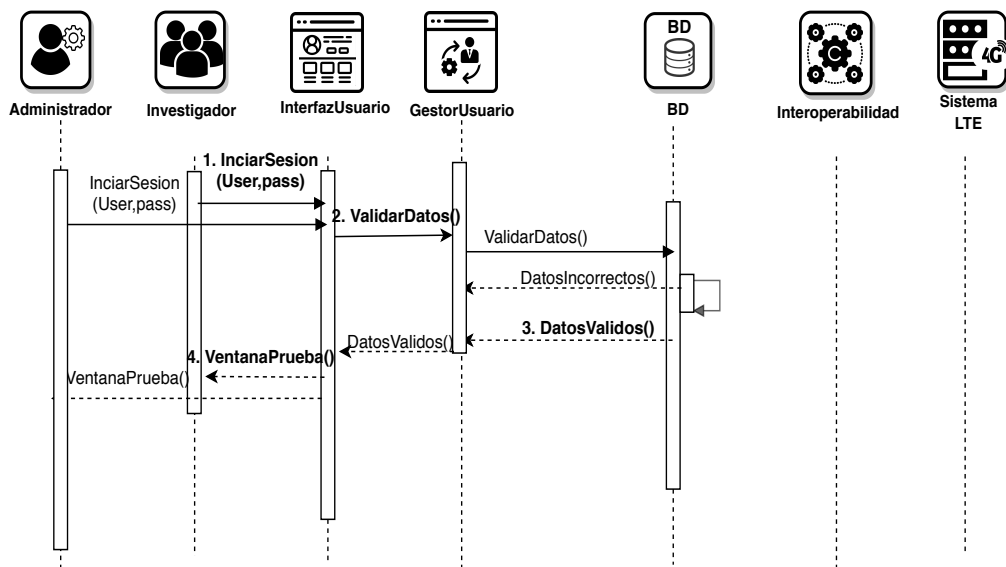


Figura A.3: Diagrama de secuencia, iniciar sesión



1. **[Investigador → InterfazUsuario]** Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos usuario y contraseña a InterfazUsuario para iniciar sesión..
2. **[InterfazUsuario → GestorUsuario]** Validar datos: La InterfazUsuario direcciona los datos hacia el GestorUsuario para validarlos y buscarlos en la base de datos, si son válidos los datos usuario y contraseña.
3. **[GestorUsuario ← BD]** Datos validos: la base de datos si tiene registrado el usuario y contraseña envía los datos encontrados a GestorUsuario para realizar la validación y desplegar la ventana.
4. **[Investigador → InterfazUsuario]** Desplegar ventanaPrueba: la interfazUsuario envía la VentanaPrueba al usuario cuando se encuentra registrado en la base de datos para que pueda realizar las pruebas.

#### A.2.4. Sección de información y guías

**Requisito 8:** La AWG debe contar con una sección de información que sirva de ayuda a los usuarios para el manejo del ambiente de pruebas.

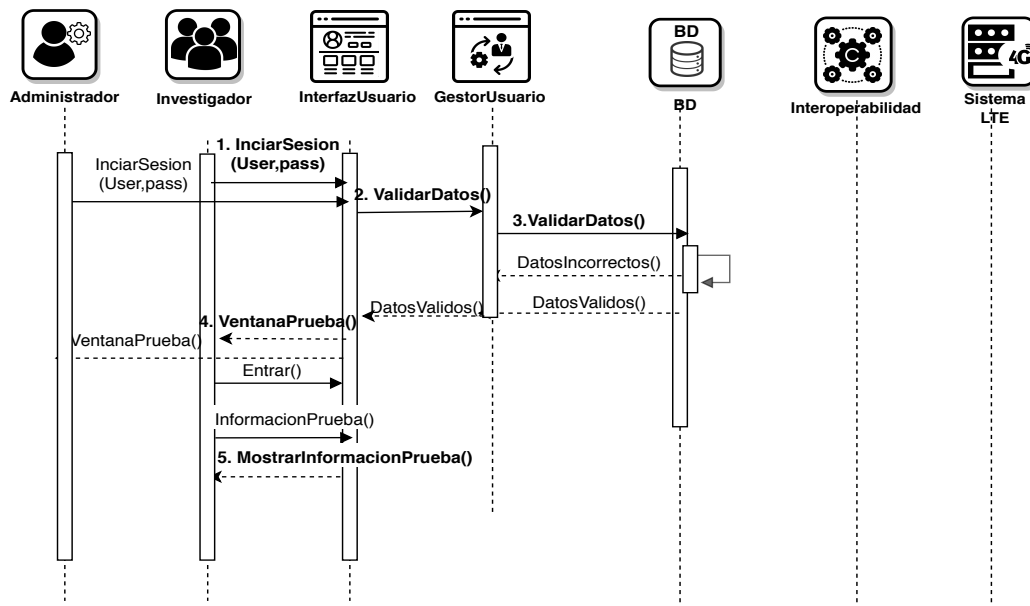


Figura A.4: Diagrama de secuencia, sección de información y guías

**1.[Investigador → InterfazUsuario]** Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos usuario y contraseña a InterfazUsuario para iniciar sesión..

**2.[InterfazUsuario → GestorUsuario]** Validar datos: La InterfazUsuario direcciona los datos hacia el GestorUsuario para validarlos y buscarlos en la base de datos, si son válidos los datos usuario y contraseña.

**3.[GestorUsuario ← BD]**Datos validos: la base de datos si tiene registrado el usuario y contraseña envía los datos encontrados a GestorUsuario para realizar la validación y desplegar la ventana.

**4.[Investigador → InterfazUsuario]**Desplegar ventanaPrueba: la interfazUsuario envía la VentanaPrueba al usuario cuando se encuentra registrado en la base de datos para que pueda realizar las pruebas.

**5.[Investigador → InterfazUsuario]**Desplegar Información: la interfazUsuario envía la información de la prueba al usuario cuando la solicita.

### A.2.5. Exportar resultado de pruebas

**Requisito 9:** La AWG debe permitir exportar los resultados de las pruebas.

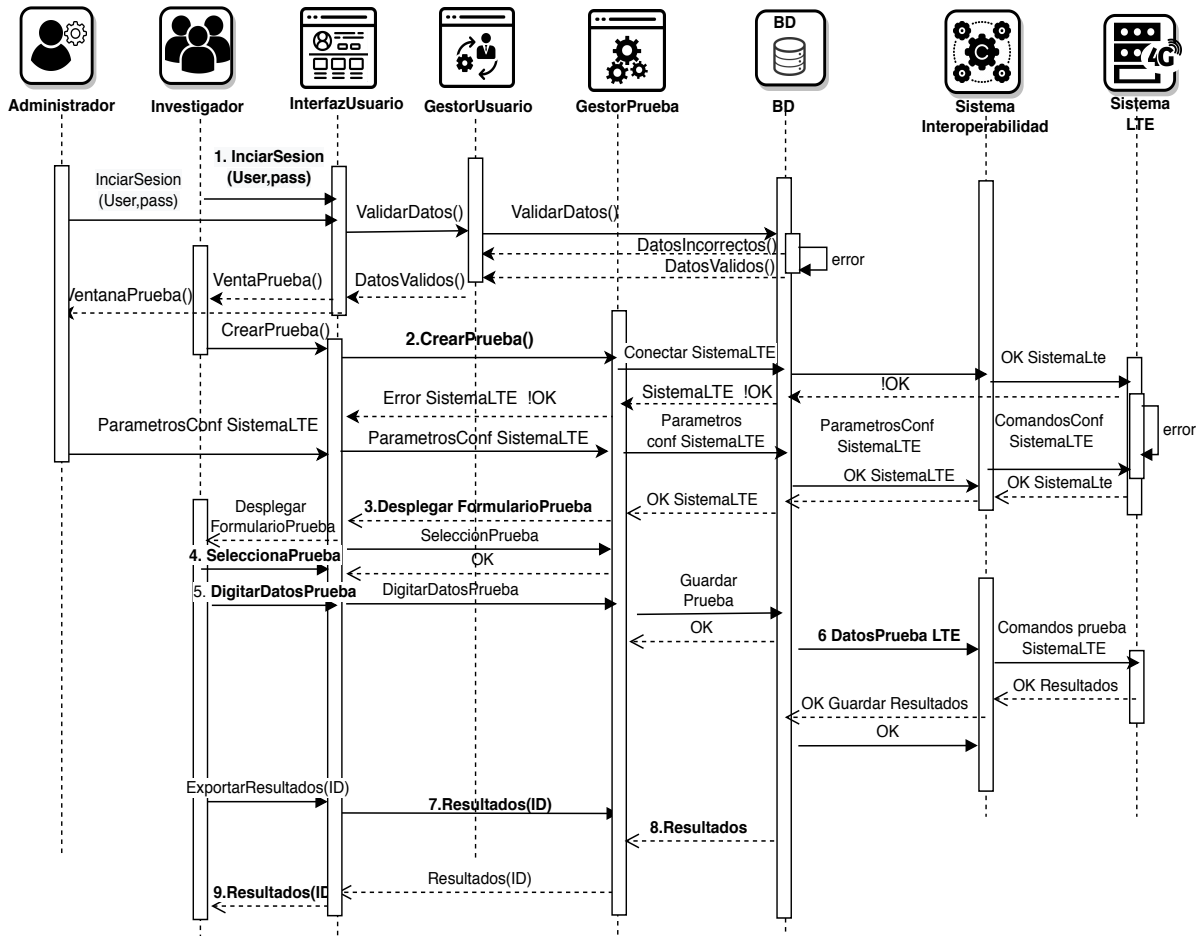


Figura A.5: Diagrama de secuencia, exportar resultado de pruebas

**1.[Investigador → InterfazUsuario]** Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos usuario y contraseña a InterfazUsuario para iniciar sesión. La InterfazUsuario direcciona los datos hacia el GestorUsuario para validarlos y buscarlos en la base de datos, si son válidos la interfazUusuario desplegar la ventana de prueba.

**2.[InterfazUsuario → GestorUsuario]** Crear prueba: el usuario investigador envía la petición de crear una prueba a InterfazUsuario para verificar el estado del

sistema LTE. InterfazUsuario direcciona la petición al GestorPrueba para guardar y enviarla al sistema Interoperabilidad que verificara si el sistema LTE se encuentra activo.

**3.[InterfazUsuario ← GestorPrueba]**Desplegar el formulario de prueba: el sistema LTE envía un mensaje de OK al sistema Interoperabilidad para que el gestor-Prueba despliegue el formulario de la prueba en la InterfazUsuario.

**4.[Investigador → InterfazUsuario]** Seleccionar la prueba: el usuario investigador elije una prueba y la envía al Gestor Prueba. El gestor usuario da los permisos para que el usuario investigador envié los datos de la prueba al GestorPrueba y guardarlos en la base de datos.

**5.[Investigador → InterfazUsuario]** Digitar los datos de una prueba: el Gestor de la prueba confirma la selección y envía el permiso para digitar los datos de la prueba que selecciono.

**6.[BD → SistemaInteroperabilidad]** Envio de datos de prueba: la base de datos envia los datos de la prueba al SistemaInteroperabilidad para realizar las pruebas en el SistemaLTE.

**7.[InterfazUsuario ← GestorPrueba]** Peticion Exportar: el usuario investigador envia la peticion de exportar los resultados de la prueba a la interfazUusario. La interfazUsuario envia la peticion al GestorPrueba para solicitar el resultad.

**8. [GestorPrueba → BD]** Resultados: la base de datos envia el resultado de la prueba al GestorPrueba para uso del investigador que anteriormente habia sido solicitado.

**9.[ Investigador → InterfazUsuario]** Exportar resultados: la interfazUsuario envia el resultado al usuario. Los resultados son eviados al usuario investigador en un formato de texto.

### A.2.6. Comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG

**Requisito 11:** el sistema de interoperabilidad debe permitir el uso remoto del sistema LTE a través de la AWG para realizar acciones y configuraciones en los módulos que conforman el sistema LTE.

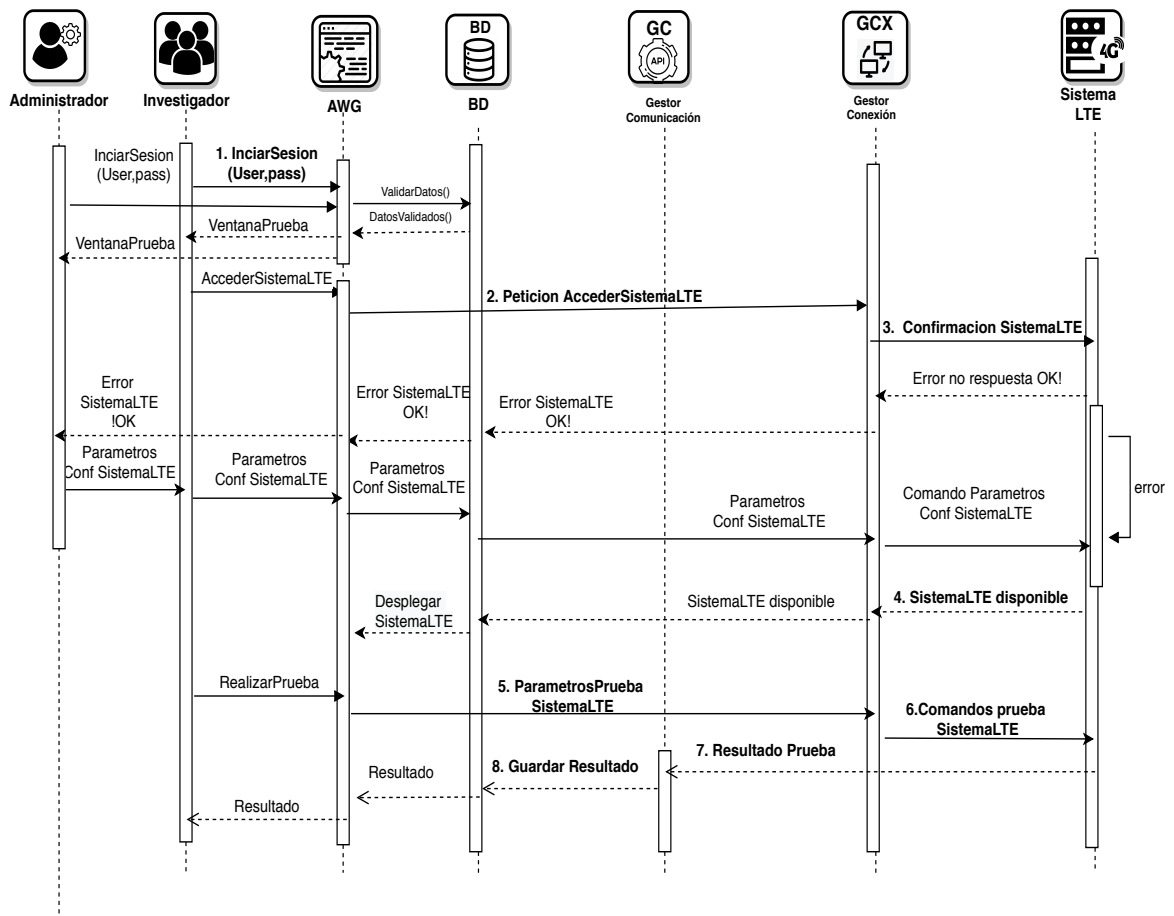


Figura A.6: Diagrama de secuencia, comunicación remota entre el sistema LTE y la AWG

1.[Investigador → AWG] Iniciar sesión: el usuario investigador envía los datos de su usuario y contraseña a la AWG.

2.[AWG → GestorConexión] Petición de acceso al SistemaLTE: la AWG hace la

petición al GestorConexión para solicitar la conexión con el SistemaLTE

**3.[GestorConexión → SistemaLTE]** Confirmar estado del sistema LTE: el GestorConexión realiza una petición al sistema LTE para verificar su estado de disponibilidad.

**4.[GestorConexión ← SistemaLTE]** SistemaLTE disponible: el sistemaLTE envía una respuesta al GestorConexión indicando que está disponible para realizar la conexión.

**5.[AWG → GestorConexión]** Datos de prueba SistemaLTE: la AWG envía los datos de los cambios realizados a través AWG hacia el GestorConexión.

**6.[GestorConexión → SistemaLTE]** Comandos de prueba SistemaLTE: el GestorComunicación envía los comandos de la prueba al SistemaLTE para la ejecución de la prueba.

**7.[GestorConexión ← SistemaLTE]** Resultado de prueba: el SistemaLTE envía los resultados obtenidos al realizar la prueba hacia el GestorComunicación.

**8.[BD ← GestorConexión]** Guardar el resultado: el GestorConexión envía los resultados de la prueba hacia la BD para su almacenamiento.

## Anexos B

# Guía para la instalación y configuración del sistema LTE centralizado

La instalación llevada a cabo es realizada sobre un único equipo el cual contará con los diferentes módulos de OAI, para implementar un escenario con interfaz S1 sobre un mismo equipo.

### B.1. Requisitos previos

En primer lugar, para la implementación es necesario la instalación del sistema operativo ubuntu con la versión 14.04 LTS de 64 bits debido a que es la versión más estable y recomendada por la comunidad de OAI.

#### B.1.1. Características técnicas de las máquinas virtuales

Las máquinas utilizadas para la instalación del sistema LTE centralizado cuentan con las características de la Tabla B.1.

| Nombre | Sistema Operativo           | CPU    | Memoria | Almacenamiento |
|--------|-----------------------------|--------|---------|----------------|
| oai    | Ubuntu 14.04 LTS de 64 bits | 4vcore | 8 GB    | 40 GB          |

Tabla B.1: Características de las máquinas virtuales.

Antes de proceder con la instalación de OAI, debemos de realizar las siguientes tareas: instalación de un kernel de baja latencia, desactivación del escalado en frecuencia de la CPU, y de la desactivación de los estados C de la BIOS.

### B.1.2. Instalación del kernel de baja latencia

El kernel que es recomendado para la instalación de OAI haciendo uso de Ubuntu 14.04 LTS es el kernel 3.19 de baja latencia. Para la instalación de este kernel, primero se actualizan los diferentes paquetes:

```
$sudo apt-get update.
$sudo apt-get upgrade.
```

Segundo, procedemos a instalar el kernel de baja latencia ejecutando los siguientes comandos:

```
$sudo apt-get install linux-lowlatency-lts-vivid -y
$dpkg --get-selections | grep linux-image
$sudo apt-get purge linux-image-4.4.0-31-generic
linux-image-extra-4.4.0-31-generic
linux-image-generic-lts-xenial
$sudo update-grub2
$sudo reboot
```

**NOTA:** deben borrarse los diferentes kernel que estén con el nombre de linux-image y solo dejar el del kernel 3.19.

Para comprobar si es instalada la versión, de manera correcta es ejecutado el siguiente comando y debe observarse lo presentado en la Figura B.1:



```
$uname -a
```

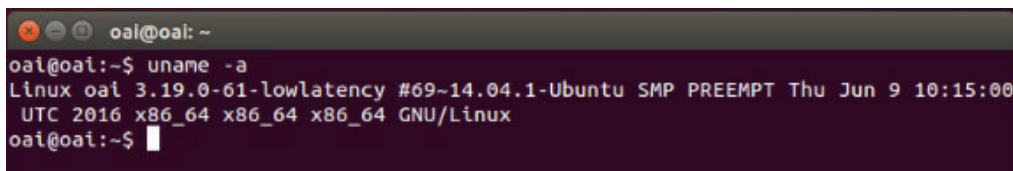
A terminal window with a dark background and light text. The prompt is 'oai@oai: ~'. The command 'uname -a' has been executed, and the output is: 'Linux oai 3.19.0-61-lowlatency #69~14.04.1-Ubuntu SMP PREEMPT Thu Jun 9 10:15:00 UTC 2016 x86\_64 x86\_64 x86\_64 GNU/Linux'. The prompt is now 'oai@oai:~\$' with a cursor.

Figura B.1: Version del kernel instalado.

### B.1.3. Desactivación de los estados C, gestión de energía

Primero, procedemos a la desactivación de los estados C de la BIOS, desactivando las funciones de administración de energía. Para ello abrimos el siguiente archivo:

```
$sudo nano etc/default/grub
```

Segundo, escribimos la siguiente línea en dicho fichero y actualizamos nuevamente:

```
GRUB LINUX DEFAULT= "quiet intel_pstate=disable
processor.max_cstate=1
intel_idle.max_cstate=0 idle=poll"
```

```
$sudo update-grub
```

Por último, añadiremos al final del archivo `/etc/modprobe.d/backlist.conf` la siguiente línea para poner en la lista negra el módulo

```
blacklist intel_powerclamp
```

### B.1.4. Desactivación del escalado en frecuencia

Primero, es desactivado el escalado en frecuencia para poder comprobar la información de la CPU, para ello es instalada la herramienta `i7z` por medio de los siguientes comandos:

```
$sudo apt-get install i7z
$sudo i7z
$sudo apt-get install cpufrequtils
$sudo apt-get install cpufrequtils
```

Segundo, es editado el archivo que está ubicado en la ruta `/etc/default/cpufrequtils`, agregando la siguiente línea:

```
$sudo nano /etc/default/cpufrequtils
GOVERNOR="performance"
```

Tercero, es deshabilitado el estado `ondemand` por medio de los siguientes comandos:

```
$sudo update-rc.d ondemand disable
$sudo /etc/init.d/cpufrequtils restart
```

Por último, después de haber realizado todos estos pasos reiniciamos el equipo, y comprobamos que todo este configurado correctamente, ejecutando lo siguientes comandos:

```
$ cpufreq-info
$ sudo i7z
```

### B.1.5. Instalación del git client

Primero, antes de realizar la instalación de los módulos deben actualizarse los diferentes paquetes, además de instalar un git client que permitirá obtener los módulos correspondientes para OAI mediante los siguientes comandos:

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

Segundo, debe agregarse el nombre y correo personal para poder acceder a los repositorios mediante los siguientes comandos:

```
$git config --global user.name "tu nombre"
$git config --global user.email "tu correo"
```

Tercero, debe Crearse una carpeta para guardar toda la información relacionada con OAI mediante el comando:

```
$mkdir oai
```

### B.1.6. Configuración del FQDN

Para el correcto funcionamiento de OAI, primero debe configurarse un nombre de dominio para el EPC, llamado FQDN (*Full Qualified Domain Name*). Para configurar el FQDN debe modificarse el archivo `/etc/hosts` en el equipo llamado “oaim” de acuerdo al nombre de usuario y dominio local como puede observarse en la Figura B.2:

```
$ sudo nano /etc/hosts
```

Segundo, debe guardarse el archivo y reiniciar el equipo para que el sistema guarde los cambios, luego, abrir un terminal y digitar el comando `hostname -f`, que mostrará el FQDN configurado:

```
$ hostname -f
```

```

GNU nano 2.2.6 Archivo: /etc/hosts
127.0.0.1 localhost
127.0.1.1 oaim.openair4G.eur oaim
oaim@oaim:~$ hostname -f
oaim.openair4G.eur
oaim@oaim:~$

```

Figura B.2: Valores del archivo hosts.

**NOTA:** para este caso debido a que el nombre de la máquina es oaim el FQDN es oaim.openair4G.eur en caso de que la máquina tenga otro nombre debe seguir la sintaxis observada en la Tabla B.2, los módulos que utilizan el FQDN son el MME y el HSS.

|                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| (nombre_del_dominio.eur)    | openair4G.eur      |
| (nombre_de_máquina.dominio) | oaim.openair4G.eur |

Tabla B.2: Sintaxis para configuración del FQDN

## B.2. Instalación del escenario OAI

Para la implementación de OAI deben instalarse dos instancias de software las cuales son descargadas del repositorio oficial con acceso público de gitlab, estas instancias son:

- Openair-cn: es el módulo software encargado de la implementación de los distintos componentes de la red troncal EPC. Openair-cn consta de las entidades

MME, HSS y S-PGW; las cuales son ejecutadas y configuradas para la instalación del EPC de OAI

- OpenAirInterface5g: es el módulo software encargado de la implementación la red de acceso radio de LTE, ejecución de un eNB y la ejecución de los UE, el cual proporciona datos de la señalización de la pila de radio y del protocolo NAS.

### B.3. Instalación del módulo *software* EPC

El módulo contiene scripts para la instalación de todos los componentes y dependencias para el despliegue del sistema del núcleo de red. Para la instalación es descargado el modulo del sitio oficial de OAI del repositorio de GitLab de eurecom.

Primero, es agregado un certificado de gitlab.eurecom.fr ejecutando el siguiente comando:

```
$ echo -n | openssl s_client -showcerts -connect
gitlab.eurecom.fr:443 2>/dev/null | sed -ne '/-BEGIN
CERTIFICATE -/,/-END CERTIFICATE-/p' | sudo
tee -a /etc/ssl/certs/ca-certificates.crt
```

Segundo, es desactivada la verificación del certificado si el usuario no tiene acceso al directorio `/etc/ssl`:

```
$ git config --global http.sslverify false
```

Tercero, al ejecutar el comando para clonar el `openair-cn` nos va a solicitar los valores introducidos de nuestro *git client*, después de introducirlos clonamos el repositorio e ingresamos a la carpeta para escoger la rama indicada, mediante los siguientes comandos:

```
$ git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openair-cn.git
$ cd openair-cn
$ git checkout v0.3.2
```

### B.3.1. Instalación de MySQL

Primero, debemos instalar la herramienta de mysql la cual es la base de datos que utilizara el HHS mediante los siguientes comandos:

```
$sudo apt-get install mysql-server
$sudo apt-get install mysql-server mysql-common mysql-client
```

Segundo, reiniciamos MySQL y procedemos a instalar phpMyAdmin mediante los siguientes comandos:

```
$sudo /etc/init.d/mysql restart
$sudo apt-get install phpmyadmin
```

Tercero, en el proceso de instalacion de phpMyAdmin debe escogerse la opción si para la configuración de la base de datos con dbconfig-common. Además, debe escogerse la opción para el servidor, el web apache2 e ingresar como usuario y contraseña la palabra root. Los datos que son colocados en el usuario y contraseña del script deben coincidir con los proporcionados en la instalación de MYSQL-server y en el phpmyadmin en nuestro caso quedo como usuario y contraseña la palabra root. Son ejecutados los siguientes comando para finalizar el proceso de instalacion de phpMyAdmin y MySQL:

```
$sudo ln -s /etc/phpmyadmin/apache.conf /etc/apache2/conf-
available/phpmyadmin.conf
$sudo a2enconf phpmyadmin
$sudo /etc/init.d/apache2 reload
$sudo /etc/init.d/mysql restart
```

**NOTA:** con la ejecución de los comandos es instalado automáticamente el MySQL y el phpMyAdmin, si tiene algún problema con el servidor elimine el mysql-server y el phpMyAdmin e instale de nuevo los paquetes.

### B.3.2. Construcción de los paquetes del EPC

Para la construcción de los paquetes del epc debemos ingresar a la carpeta openair-cn y habilitar las variables del entorno. Además, ingresar a la carpeta SCRIPTS y ejecutar los constructores mediante los siguientes comandos:

```
$cd openair-cn
$source oaienv
$ cd SCRIPTS
$./build_hss -i
$./build_epc -i
```

**NOTA:** La opción “-i” establecida en la ejecución de los anteriores comandos debe ser utilizada solo la primera vez, ya que instala una serie de paquetes necesarios para la instalación. Los comandos pueden presentar errores cuando son ejecutan con la opción -i, es recomendado volverlo a ejecutar sin especificar esta opción.

### B.3.3. Instalación del módulo software para la E-UTRAN, eNB y UE

El módulo contiene scripts para la instalación de todos los componentes y dependencias para el despliegue del sistema del núcleo de red. Para la instalación es descargado el módulo del sitio oficial de OAI a través del repositorio de GitLab de eurecom.

Primero, es descargado el módulo OpenAirInterface5g del sitio oficial de OAI del repositorio de GitLab de eurecom mediante la ejecución de los siguientes comandos:

```
$git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g.git
$cd openairinterface5g
$git reset --hard 67df8e0e7b46200b2ee43a2705def3340ddfd719
```

Segundo, ingresamos a la carpeta `oai/openairinterface5g/` habilitamos las variables de entorno y realizamos la construcción del módulo mediante los siguientes comandos:

```
$source oaienv
$cd cmake_targets
$./ build_oai -I
```

Nota: Ejecutar `-I` solamente la primera vez para la instalación de paquetes

Tercero, procedemos a instalar los paquetes adicionales para el correcto funcionamiento de `oai` mediante los siguientes comandos:

```
$/build_oai -c -C -I --install-system-files --eNB -w USRP
--UE --install-optional-packages -x.
 Compilar los simuladores unitarios:
$/build_oai --phy_simulators -r Rel14
 Compilar el simulador oaisim sin soporte S1:
$/build_oai --oaisim --noS1 -r Rel14.
 Compilar el simulador oaisim:
$/build_oai --oaisim --UE -r Rel14
 Compilar el eNB:
$/build_oai --eNB -w USRP -r Rel14
 Compilar el UE:
$/build_oai --UE -w USRP -r Rel14
 Compilar para la construcción del framework de monitorización
 T Tracer:
$/build_oai -I --eNB -x --install-system-files -w USRP --T-tracer
```



NOTA: La primera vez que es ejecutado el comando, es necesario especificar las siguientes opciones

`-I`: instala los paquetes software requeridos.

`--eNB`: especifica la instalación del eNodeB.

`-x`: instala un osciloscopio `\textit{software}` que permite monitorizar e

`--install-system-files`: instala los ejecutables de OAI en el sistema.

`-w`: especifica la plataforma SDR que va ser utilizada. En este caso USRP.

`--T-tracer`: habilita la utilización del framework de monitorización T Tracer de OAI.

### B.3.4. Herramientas opcionales de OAI

Primero, procedemos a realizar la instalación de las herramientas adicionales para OAI mediante la ejecución del siguiente comando:

```
$ git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/xtables-addons-oai.git
```

Segundo, realizamos la instalación del framework de monitorización T Tracer mediante la ejecución de los siguientes comandos:

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

#### B.3.4.1. Herramienta Wireshark

Para capturar y analizar tráfico de red es necesario instalar la herramienta Wireshark. Es instalada la última versión de Wireshark y las dependencias requeridas para su correcto funcionamiento mediante la ejecución de los siguientes comandos:

```
$ sudo add-apt-repository ppa:wireshark-dev/stable
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install wireshark
```

Para la captura de tráfico en una interfaz del sistema determinada, debe ejecutarse el siguiente comando:

```
$ wireshark -i <nombre_de_interfaz> -k
```

Debido a que no es recomendable capturar tráfico utilizando el usuario root, debe hacerse una reconfiguración para permitir capturar tráfico a los demás usuarios. Por tanto, debe reconfigurarse el paquete wireshark-common ejecutando el siguiente comando:

```
$ sudo dpkg-reconfigure wireshark-common
```

Debe aceptarse la opción del cuadro de diálogo la cual indica que los usuarios no root puedan capturar paquetes. Debido a que el usuario no pertenece al grupo wireshark para su ejecución debe usarse el siguiente comando:

```
$ sudo usermod -a -G wireshark nombre_usuario
```

Para verificar si el usuario ya pertenece al grupo de Wireshark debe ejecutarse el siguiente comando y visualizar que Wireshark ya aparezca como grupo:

```
$id
```

## B.4. Configuración de OAI

### B.4.1. Configuración del EPC

Para la configuración del EPC deben modificarse los archivos del módulo MME, PGW Y SPW. Primero, procedemos a modificar el archivo epc.conf.in mediante los

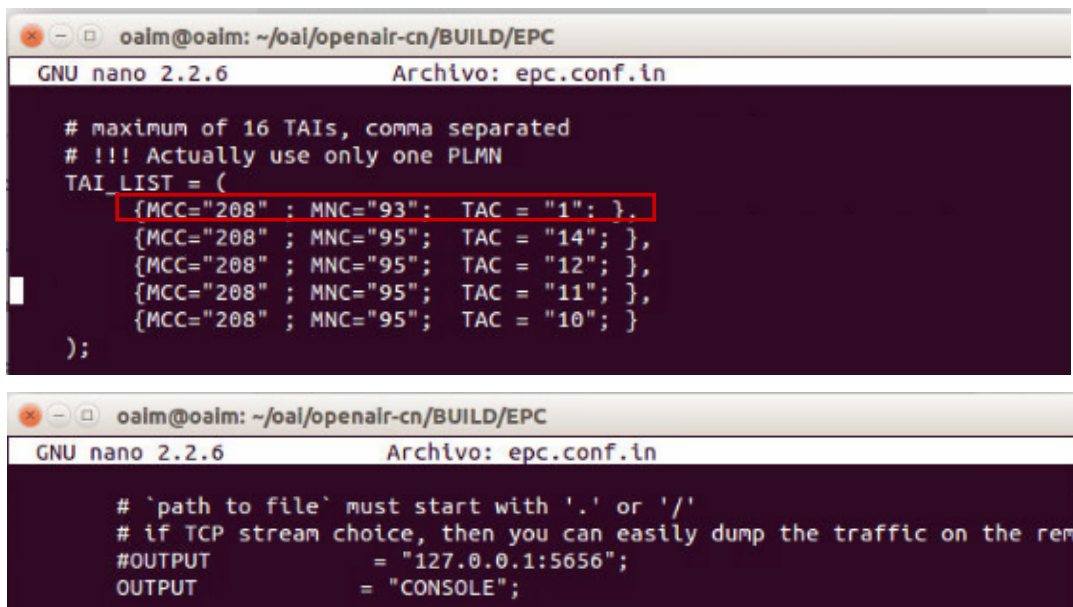
siguientes comandos:

```
$nano openair-cn/BUILD/EPC/epc.conf.in
```

En dicho documento deben modificarse el valor del TAI LIST el cual especifica la identidad del Área de Seguimiento. Este valor está formado por el MCC, el MNC y el TAC. Estos valores deben coincidir con los valores configurados en el eNodeB. Debido a que solo contamos con una red móvil y un único eNodeB, son configurados los siguientes valores:

```
TAI_LIST = (
{MCC="208" ; MNC="93"; TAC = "1"; },
```

Debe revisarse el documento que el comando OUTPUT tenga como valor la palabra `CONSOLE` como puede observarse en la Figura B.3, ya que la salida por defecto que es la dirección de localhost y el puerto 5656 y esta no genera ninguna conexión y queda en un bucle.



The image shows two screenshots of a terminal window. The top screenshot shows the configuration of the TAI\_LIST parameter in the file epc.conf.in. The first entry in the list is highlighted with a red box: {MCC="208" ; MNC="93"; TAC = "1"; },. The bottom screenshot shows the configuration of the OUTPUT parameter, which is set to "CONSOLE".

```
oalm@oalm: ~/oal/openair-cn/BUILD/EPC
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf.in

maximum of 16 TAIs, comma separated
!!! Actually use only one PLMN
TAI_LIST = (
 {MCC="208" ; MNC="93"; TAC = "1"; },
 {MCC="208" ; MNC="95"; TAC = "14"; },
 {MCC="208" ; MNC="95"; TAC = "12"; },
 {MCC="208" ; MNC="95"; TAC = "11"; },
 {MCC="208" ; MNC="95"; TAC = "10"; }
);

oalm@oalm: ~/oal/openair-cn/BUILD/EPC
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf.in

`path to file` must start with '.' or '/'
if TCP stream choice, then you can easily dump the traffic on the rem
#OUTPUT = "127.0.0.1:5656";
OUTPUT = "CONSOLE";
```

Figura B.3: Configuración del TAI LIST del archivo epc.conf.in.

#### B.4.1.1. Configuración del HSS

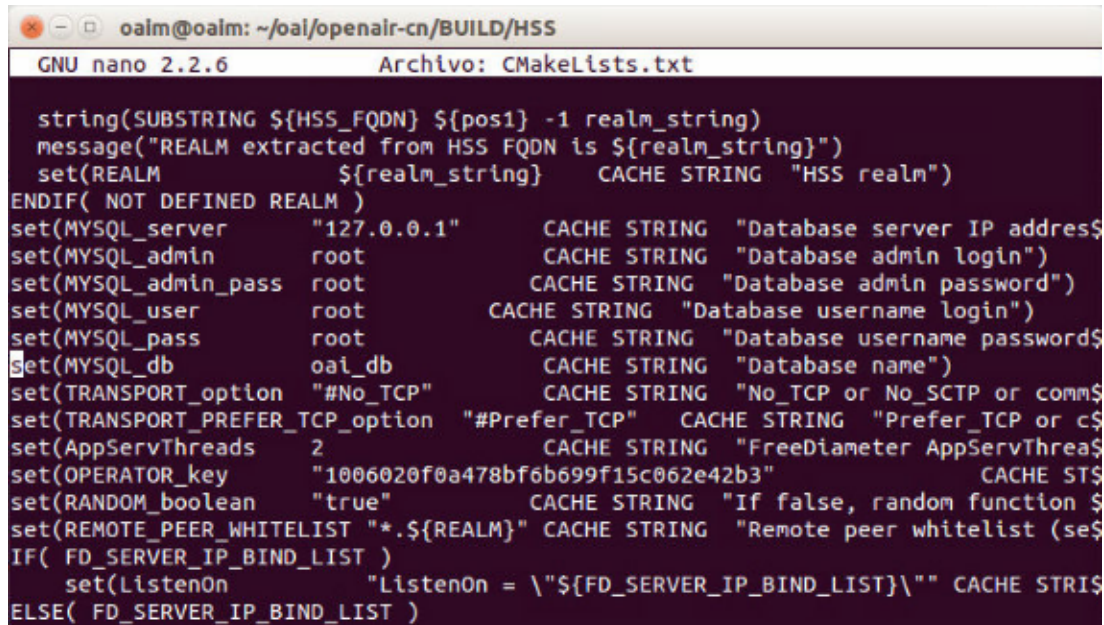
Para la configuración del HSS es necesario editar dos ficheros de texto. El primer es el archivo CMakeLists.txt ubicado en la ruta /openair-cn/BUILD/HSS para lo cual ingresamos los siguientes comandos:

```
$cd ~/openair-cn
$source oaienv
$nano openair-cn/BUILD/HSS/CMakeList.txt
```

Las variables admin password, username, login, username, password y operator key deben cambiarse por los valores configurados al realizar la instalación de mysql y de phpmyadmin como puede observarse en la Figura B.4:

```
MYSQL_server: 127.0.0.1
MYSQL_admin: root
MYSQL_admin_pass: root
MYSQL_user: root
MYSQL_pass: root
MYSQL_db: oai_db
OPERATOR_KEY: 1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3
RANDOM_BOOLEAN: true
FD_conf: $(FREEDIAMETER_PATH)/../etc/oai/freeDiameter
/hss_fd.conf
```

**NOTA:** habilitar las variables de entorno con source oaienv cada vez que entre a configurar, compilar y ejecutar.



```

oalm@oalm: ~/oai/openair-cn/BUILD/HSS
GNU nano 2.2.6 Archivo: CMakeLists.txt

string(SUBSTRING ${HSS_FQDN} ${pos1} -1 realm_string)
message("REALM extracted from HSS FQDN is ${realm_string}")
set(REALM ${realm_string} CACHE STRING "HSS realm")
ENDIF(NOT DEFINED REALM)
set(MYSQL_server "127.0.0.1" CACHE STRING "Database server IP address")
set(MYSQL_admin root CACHE STRING "Database admin login")
set(MYSQL_admin_pass root CACHE STRING "Database admin password")
set(MYSQL_user root CACHE STRING "Database username login")
set(MYSQL_pass root CACHE STRING "Database username password")
set(MYSQL_db oai_db CACHE STRING "Database name")
set(TRANSPORT_option "#No_TCP" CACHE STRING "No_TCP or No_SCTP or comm$")
set(TRANSPORT_PREFER_TCP_option "#Prefer_TCP" CACHE STRING "Prefer_TCP or c$")
set(AppServThreads 2 CACHE STRING "FreeDiameter AppServThrea$")
set(OPERATOR_key "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3" CACHE ST$)
set(RANDOM_boolean "true" CACHE STRING "If false, random function $")
set(REMOTE_PEER_WHITELIST ".*${REALM}" CACHE STRING "Remote peer whitelist (se$")
IF(FD_SERVER_IP_BIND_LIST)
 set(ListenOn "ListenOn = \"${FD_SERVER_IP_BIND_LIST}\"" CACHE STRIS$)
ELSE(FD_SERVER_IP_BIND_LIST)

```

Figura B.4: Configuración de las credenciales de la BD en el archivo CMakeLists.txt.

#### B.4.1.2. Configuración del MME

Debemos revisar la configuración de las interfaces de la MME en el archivo `epc.conf.in` que está ubicado en la siguiente ruta :

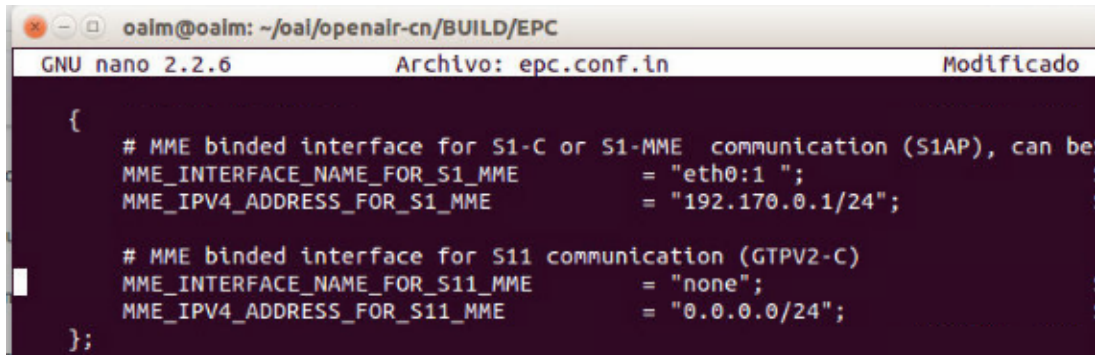
```
$nano openair-cn/BUILD/EPC/epc.conf.in
```

Procedemos a modificar el archivo como puede observarse en la Figura B.5 cambiando las siguientes líneas:

```

MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0:1 ";
MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.170.0.1/24";
MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME = "none";
MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME = "0.0.0.0/24";

```



```
oalm@oalm: ~/oai/openair-cn/BUILD/EPC
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf.in Modificado
{
MME binded interface for S1-C or S1-MME communication (S1AP), can be
MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0:1 ";
MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.170.0.1/24";

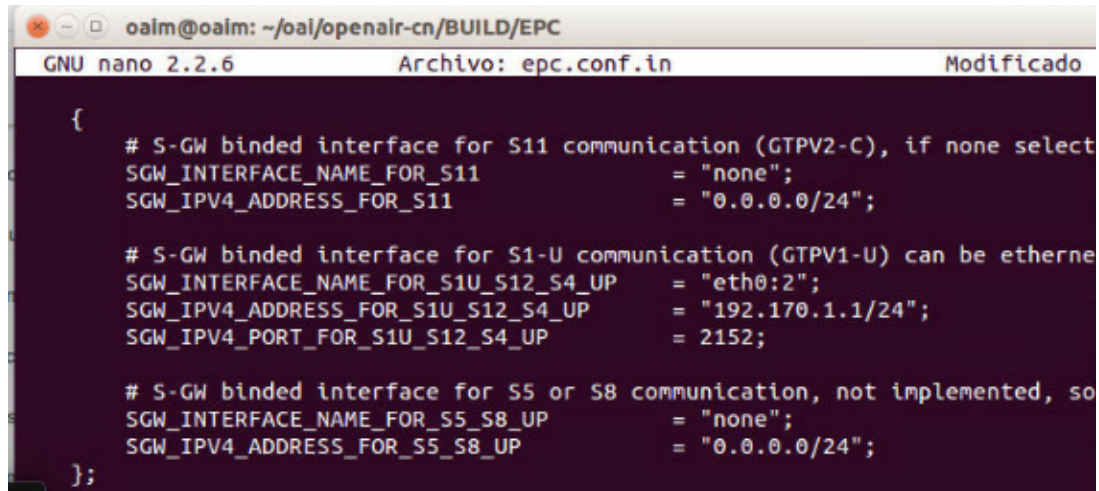
MME binded interface for S11 communication (GTPV2-C)
MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME = "none";
MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME = "0.0.0.0/24";
};
```

Figura B.5: Configuración de las interfaces del MME en el archivo epc.conf.in.

#### B.4.1.3. Configuración del S-GW

Revisamos las configuraciones de las interfaces de la S-GW, las direcciones IP de las interfaces S11, S5 y S8 no deben cambiarse y debe dejarse el puerto por defecto 2152 como puede observarse en la Figura B.6:

```
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11 = "none";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11 = "0.0.0.0/24";
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "eth0:2";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP = "192.170.1.1/24";
SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP = 2152;
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP = "none";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP = "0.0.0.0/24";
```



```

oaim@oaim: ~/oai/openair-cn/BUILD/EPC
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf.in Modificado
{
S-GW binded interface for S11 communication (GTPV2-C), if none select
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11 = "none";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11 = "0.0.0.0/24";

S-GW binded interface for S1-U communication (GTPV1-U) can be etherne
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "eth0:2";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP = "192.170.1.1/24";
SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP = 2152;

S-GW binded interface for S5 or S8 communication, not implemented, so
SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP = "none";
SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP = "0.0.0.0/24";
};

```

Figura B.6: Configuración de las interfaces del S-GW en el archivo epc.conf.in.

### B.4.2. Configuración PGW

Revisar la configuración de las interfaces de la P-GW, las direcciones IP de las interfaces S5 y S8 no deben cambiarse, configurar la dirección IP para la interfaz SGI correspondiente a la eth0 del equipo y luego configurar las direcciones IP para los DNS, por facilidad son usados los de google.

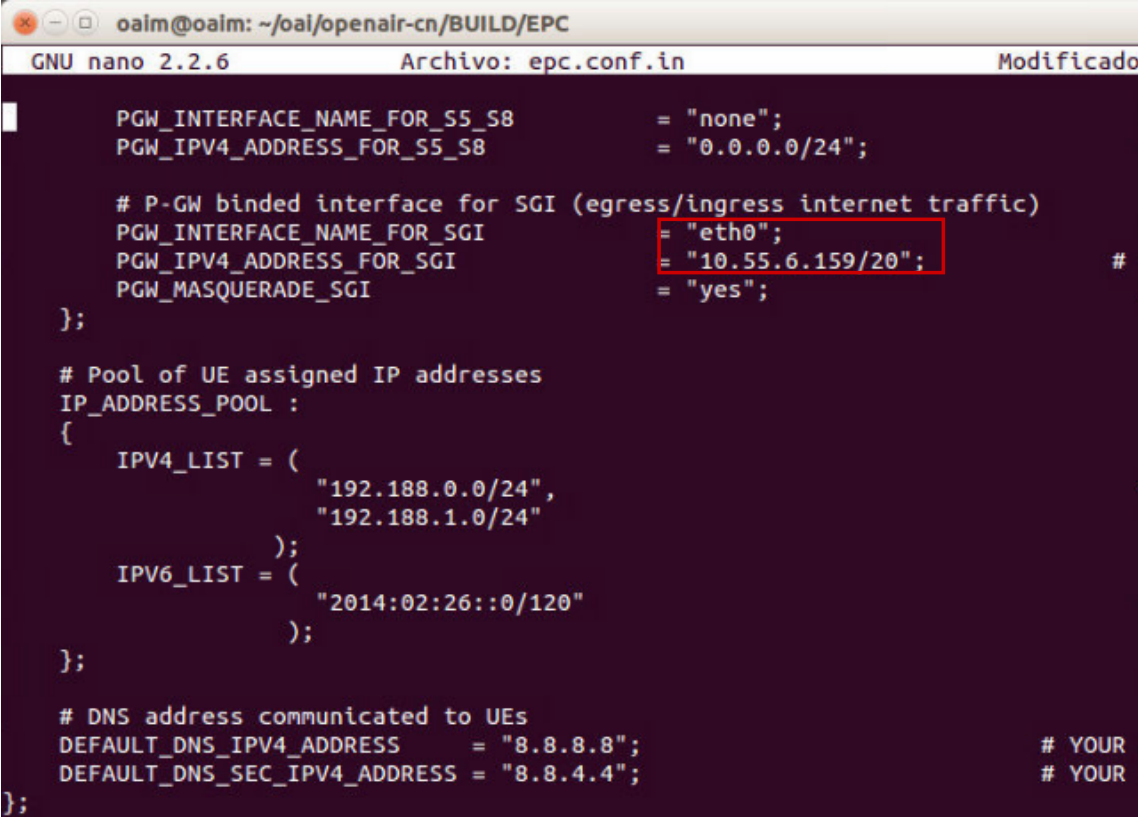
```

PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8 = "none";
PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8 = "0.0.0.0/24";
PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI = "eth0";
PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_SGI = "10.55.6.159/20";
PGW_MASQUERADE_SGI = "yes";
DNS=8.8.8.8
DNS=8.8.4.4

```

La PGW IPV4 ADDRESS FOR SGI = "10.55.6.159/20" debe ser la misma IP del acceso a internet, este valor puede verificarse con el comando ifconfig. La configuración

realizada puede observarse en la Figura B.7.



```
oaim@oaim: ~/oai/openair-cn/BUILD/EPC
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf.in Modificado

PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8 = "none";
PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8 = "0.0.0.0/24";

P-GW binded interface for SGI (egress/ingress internet traffic)
PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI = "eth0";
PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_SGI = "10.55.6.159/20";
PGW_MASQUERADE_SGI = "yes";
};

Pool of UE assigned IP addresses
IP_ADDRESS_POOL :
{
 IPV4_LIST = (
 "192.188.0.0/24",
 "192.188.1.0/24"
);
 IPV6_LIST = (
 "2014:02:26::0/120"
);
};

DNS address communicated to UEs
DEFAULT_DNS_IPV4_ADDRESS = "8.8.8.8";
DEFAULT_DNS_SEC_IPV4_ADDRESS = "8.8.4.4";
};
```

Figura B.7: Configuración de las interfaces del P-GW en el archivo epc.conf.in.

#### B.4.2.1. Configuración y gestión de la base de datos del HSS

Para la configuración primero, debe accederse a la interfaz Web de phpMyAdmin visitando la dirección <http://localhost/phpmyadmin> en un navegador Web en la máquina. Segundo, digitamos el usuario y la contraseña correspondientes que hayamos establecido durante la instalación. Si la base de datos `oai_db` no se encuentra, se debe crear mediante el siguiente comando:

```
$./create_hss_database root root root root oai_db
```



La interfaz web de phpMyAdmin debe visualizar los archivos presentes en la Figura B.8.

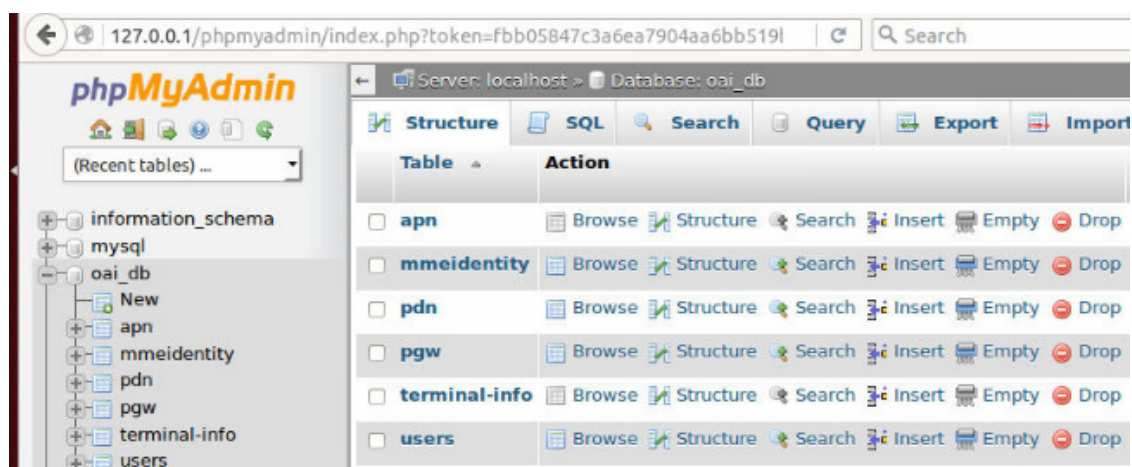


Figura B.8: Interfaz Web de phpMyAdmin.

#### B.4.2.2. mmeidentity

Debe ingresarse en la tabla mmeidentity de phpMyAdmin y corroborarse que en el mmehost y en el mmerealm, estén configurados los valores definidos anteriormente como puede observarse en la Figura B.9:

```
idmmeidentity: 43
mmehost: oaim.openair4G.eur
mmerealm: openair4G.eur
```

| idmmeidentity | mmehost                | mmerealm      |
|---------------|------------------------|---------------|
| 2             | mme2.openair4G.eur     | openair4G.eur |
| 43            | oaim.openair4G.eur     | openair4G.eur |
| 5             | abeille.openair4G.eur  | openair4G.eur |
| 4             | yang.openair4G.eur     | openair4G.eur |
| 3             | mme3.openair4G.eur     | openair4G.eur |
| 6             | calisson.openair4G.eur | openair4G.eur |

Figura B.9: Valores de la tabla mmeidentity.

#### B.4.2.3. pdn

Debe Ingresarse a la tabla pdn de phpMyAdmin y modificar el id del pgw y el número de imsi como puede observarse en la Figura B.10:

```
pgw_id: 3
user_imsi: 208930100001111
```

| id | apn      | pdn_type | pdn_ipv4 | pdn_ipv6      | aggregate_ambr_ul | aggregate_ambr_dl | pgw_id | users_imsi      |
|----|----------|----------|----------|---------------|-------------------|-------------------|--------|-----------------|
| 33 | oai.ipv4 | IPv4     | 0.0.0.0  | 0:0:0:0:0:0:0 | 50000000          | 100000000         | 3      | 208930100001111 |
| 46 | operator | IPv4     | 0.0.0.0  | 0:0:0:0:0:0:0 | 50000000          | 100000000         | 3      | 208930100001111 |

Figura B.10: Valores de la tabla pdn.

#### B.4.2.4. users

Debe ingresarse a la tabla users de phpMyAdmin y realizar una búsqueda ingresando el IMSI del UE y observar que el OPc coincide con el generado en la compilación de OASIM. Los valores de la tabla users pueden observarse en la Figura B.11.

```
imsi: 208930100001111
opc: e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c
```

**NOTA:** el número imsi: 208930100001111, contiene en los primeros dígitos el código del país y la red, en este caso contiene los siguientes códigos MCC=208 Y MNC=93

| <b>imsi</b><br><small>IMSI is the main reference key.</small> | <b>msisdn</b><br><small>The basic MSISDN of the UE (Presence of MSISDN is optional).</small> | <b>imei</b><br><small>International Mobile Equipment Identity</small> | <b>sqn</b>           | <b>rand</b>                      | <b>OPc</b><br><small>Can be computed by HSS</small> |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 208930100001111                                               | 33638030011                                                                                  | 35609304079211                                                        | 00000000000000006775 | 3cf83d1330d761166b95e37a186562d4 | e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c                    |

Figura B.11: Valores de la tabla users.

### B.4.3. Configuración de la E-UTRAN, eNB y UE

#### B.4.3.1. Configuración eNB

Para la parte de EUTRAN debe configurarse el archivo `enb.band7.generic.oaisim_local_mme.conf` teniendo en cuenta que la PLMN y la dirección IP de la MME deben coincidir con las del archivo `epc.conf`, además, deben configurarse las direcciones del eNB para las interfaces S1-C y S1-U mediante el siguiente comando y especificando los valores ya definidos:

```
$nano targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/
enb.band7.generic.oaisim.local_mme.conf
```

MCC: 208.

MNC: 93.

TAI: 1.

ipv4: 192.170.0.1

```

GNU nano 2.2.6 Archivo: enb.band7.generic.oaisim.local_mme.conf
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";

mobile_country_code = "208";

mobile_network_code = "93";
}
)

```

Figura B.12: Direcciones del eNB para las interfaces S1-C y S1-U.

Modificación de la IP del eNB.

```

GNU nano 2.2.6 Archivo: enb.band7.generic.oaisim.local_mme.conf

SCTP_INSTREAMS = 2;
SCTP_OUTSTREAMS = 2;
};

////////// MME parameters:
mme_ip_address = ({ ipv4 = "192.170.0.1";
 ipv6 = "192:168:30::17";
 active = "yes";
 preference = "ipv4";
 }
);

NETWORK_INTERFACES :
{
ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0:3";
ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.170.0.2/24";

ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U = "eth0:4";
ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U = "192.170.1.2/24";
ENB_PORT_FOR_S1U = 2152; # Spec 2152
};

```

Figura B.13: Modificación de la IP del eNB.

#### B.4.3.2. Configuración OAISIM

Para modificar el opc de oaisim debe ingresarse el siguiente comando, los datos deben coincidir con los modificados en la base de datos, los cambios pueden visualizarse en

la Figura B.14.

```
$nano /oai/openairinterface5g/openair3/NAS/TOOLS/$nano
ue_eurecom_test_sfr.conf
```

```
imei: 35609304079211
opc: e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c
key: 8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862
```



```
GNU nano 2.2.6 Archivo: ue_eurecom_test_sfr.conf
};
};
UE0:
{
 USER: {
 IMEI="35609304079211";
 MANUFACTURER="EURECOM";
 MODEL="LTE Android PC";
 PIN="0000";
 };

 SIM: {
 MSIN="0100001111";
 USIM_API_K="8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862";
 OPC="e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c";
 MSISDN="33638030011";
 };
};
```

Figura B.14: Configuración del opc de oaisim.

## B.5. Compilación y Ejecución de OpenAirInterface

### B.5.1. Verificación del EPC

Después de modificar los scripts debe compilarse los ejecutables, para ello debe ejecutarse los siguientes comandos dentro de /openair-cn/SCRIPTS, las opciones l y c son para hacer uso de la base de datos local, en el mismo host y para limpiar compilaciones anteriores .

```
$/build_hss -i -c
$/build_epc -i -c
```

Compilamos de nuevo con `l` y `-c`

```
$/build_hss -l -c
$/build_epc -l -c
```

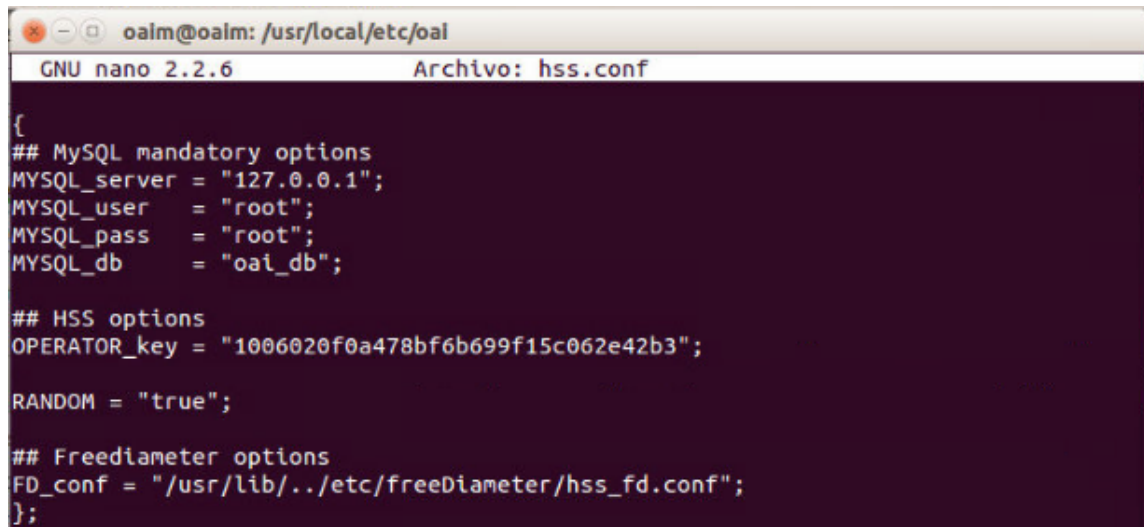
**NOTA:** la `(-l)` ayuda a que sean compilados archivos que quedan del cache o también puede usarse la opción `-d`.

Segundo, debe revisarse la configuración de los archivos de la ruta `/usr/local/etc/oai/` que son los que son generados cuando es realizada la compilación, estos dos archivos `epc.conf` y `hss.conf`, deben contener los datos modificados anteriormente de la carpeta `BUILD`

#### B.5.1.1. `hss.conf`

Este archivo debe contener el usuario y contraseña del `MYSQL`, el nombre de la base de datos y el operador `key`:

```
MYSQL_server: 127.0.0.1
MYSQL_user: "root"
MYSQL_pass: "root"
MYSQL_db: oai_db
OPERATOR_KEY: 1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3
```



```
oalm@oalm: /usr/local/etc/oai
GNU nano 2.2.6 Archivo: hss.conf
{
MySQL mandatory options
MYSQL_server = "127.0.0.1";
MYSQL_user = "root";
MYSQL_pass = "root";
MYSQL_db = "oai_db";

HSS options
OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3";


RANDOM = "true";

Freediameter options
FD_conf = "/usr/lib/./etc/freeDiameter/hss_fd.conf";
};
```

Figura B.15: Configuración del archivo hss.conf.

### B.5.1.2. epc.conf

En este archivo debe configurarse el REALM el cual debe contener los valores previamente configurados y el valor del hostname como puede observarse en la Figura B.16.



```
oaim@oaim: /usr/local/etc/oai
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf
MME :
{
REALM = "openair4G.eur";

oaim@oaim: /usr/local/etc/oai
GNU nano 2.2.6 Archivo: epc.conf Modificado
S6A :
{
S6A_CONF = "/usr/lib/./etc/freeDiameter/mme_fd.conf";
HSS_HOSTNAME = "oaim";
```

Figura B.16: Configuración del archivo epc.conf.

Finalmente, en la ruta `/usr/etc/freeDiameter/` deben aparecer los archivos `acl.conf`, `hss_fd.conf`, `mme_fd.conf` y los certificados generados como puede observarse en la Figura B.17.

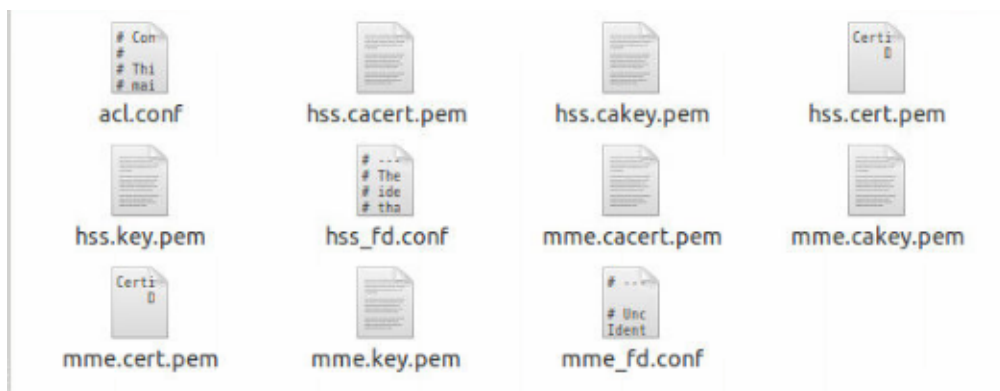


Figura B.17: Archivos de la carpeta freeDiameter.

Revisar la configuración de los archivos `mme_fd.conf` y `hss_fd.conf`, teniendo en cuenta su identidad y su dominio local, además, los FQDNs y las direcciones IP



de la MME y el HSS deben ser iguales como puede observarse en la Figura B.18.

```

GNU nano 2.2.6 Archivo: mme_fd.conf Modificado
The framework will actively attempt to establish and maintain a connection
with the peers listed here.
For only accepting incoming connections, see the acl_wl.fx extension.

ConnectPeer
Declare a remote peer to which this peer must maintain a connection.
In addition, this allows specifying non-default parameters for this peer only
(for example disable SCTP with this peer, or use RFC3588-flavour TLS).
Note that by default, if a peer is not listed as a ConnectPeer entry, an
incoming connection from this peer will be rejected. If you want to accept
incoming connections from other peers, see the acl_wl.fx extension which
allows exactly this.
#ConnectPeer = "oaim.openair4G.eur" { ConnectTo = "127.0.1.1"; No_IPv6; No_TLS ; port = 3868; Realm = "openair4G.eur";

oaim@oaim: /usr/etc/freeDiameter
GNU nano 2.2.6 Archivo: hss_fd.conf Modificado

Load the Diameter EAP server extension (requires diameap.conf)
#LoadExtension = "app_diameap.fdx" : "diameap.conf";

Load the Accounting Server extension (requires app_acct.conf)
#LoadExtension = "app_acct.fdx" : "app_acct.conf";

----- Peers -----

The framework will actively attempt to establish and maintain a connection
with the peers listed here.
For only accepting incoming connections, see the acl_wl.fx extension.

#ConnectPeer = "ubuntu.localdomain" { ConnectTo = "127.0.0.1"; No_TLS; };
#ConnectPeer = "oaim.openair4G.eur" { ConnectTo = "127.0.1.1"; Realm = "openair4G.eur"; No_IPv6; No_TLS;

```

Figura B.18: Configuración de los archivos mme\_fd.conf y hss\_fd.conf.

Debe realizarse la construcción de las interfaces virtuales mediante la ejecución de los siguientes comandos:

```

$ sudo ifconfig eth0:1 192.170.0.1/24 up
$ sudo ifconfig eth0:2 192.170.1.1/24 up
$ sudo ifconfig eth0:3 192.170.0.2/24 up
$ sudo ifconfig eth0:4 192.170.1.2/24 up

```

Para el rango de las loopback no hay necesidad de construir interfaces, basta con utilizar direcciones que estén dentro del rango 127.0.0.0 - 127.255.255.255.

NOTA: Si es realizada alguna modificación deben volverse a compilar los comandos y limpiar los archivos.

## B.5.2. Ejecución del EPC

Al realizar la ejecución del nodo HSS puede observarse en la Figura B.19 que el nodo está en STATE\_CLOSED debido a que la MME todavía no ha sido ejecuta, apenas es realizada la ejecución del EPC entonces aparece un STATE-OPEN.

```
$cd open-cn/SCRIPT/
$./run_hss
```

```
01/30/21,12:27:55.553133 NOTI Loaded extensions: '/usr/lib/freeDiameter/acl_wl.fdx'[/usr/lib/./etc/freeDiameter/acl
.conf], loaded
01/30/21,12:27:55.553139 NOTI Loaded extensions: '/usr/lib/freeDiameter/dict_nas_mip6.fdx'[(no config file)], load
ed
01/30/21,12:27:55.553145 NOTI Loaded extensions: '/usr/lib/freeDiameter/dict_s6a.fdx'[(no config file)], loaded
01/30/21,12:27:55.553160 DBG Core state: 1 -> 2
01/30/21,12:27:55.554485 NOTI Local server address(es): 10.55.6.159{---L-} 192.168.0.2{---L-} 192.170.0.1{---
L-} 192.170.0.2{---L-} 192.170.1.1{---L-} 192.170.1.2{---L-}
01/30/21,12:27:55.554549 DBG Core state: 2 -> 3
01/30/21,12:27:55.554634 DBG oaim.openair4G.eur: Connecting...
01/30/21,12:27:55.554667 DBG Initializing s6a layer: DONE
'STATE_CLOSED' -> 'STATE_WAITCNXACK' 'oaim.openair4G.eur'
01/30/21,12:27:55.556227 DBG Prepared 1 sets of connection parameters to peer oaim.openair4G.eur
01/30/21,12:27:55.556282 DBG Connecting to TCP 127.0.1.1(3870)...
01/30/21,12:27:55.556443 DBG TCP connection to 127.0.1.1(3870) failed: Connection refused
01/30/21,12:27:55.556480 DBG Connection to 'oaim.openair4G.eur' failed: All connection attempts failed, will retry
later
01/30/21,12:27:55.556841 DBG STATE_WAITCNXACK' -> 'STATE_CLOSED' 'oaim.openair4G.eur'
```

Figura B.19: Estado del nodo HSS.

Para continuar con la ejecución del módulo EPC, abrimos una nueva terminal y ejecutamos el nodo MME el resultado obtenido puede visualizarse en la Figura B.20 el cual nos arroja una tabla con los UE y las portadoras asociadas.

```
$cd open-cn/SCRIPT/
$./run_epc
```

```

===== Statistics =====
001452 00180:794832 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0037
 | Global | Since last display |
001453 00180:794837 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0038
UE | | 1 | | 0 |
001454 00180:794842 7FF597FFF700 DEBUG MME-AP SRC/MME_APP/mme_app_statistics.c:0039
Bearers | | 1 | | 0 |

```

Figura B.20: Ejecución del módulo EPC.

Cuando el HSS y la MME estén conectados, aparecerá el estado OPEN, tanto en el terminal del HSS como en el EPC el cual evidencia la correcta conexión de todos los módulos.

```

01/30/21,12:29:25.737661 NOTI Connected to 'oain.openair4G.eur' (TCP,soc#10), remote capabilities:
01/30/21,12:29:25.737674 NOTI 'Capabilities-Exchange-Answer'
01/30/21,12:29:25.737680 NOTI Version: 0x01
01/30/21,12:29:25.737686 NOTI Length: 280
01/30/21,12:29:25.737691 NOTI Flags: 0x00 (----)
01/30/21,12:29:25.737696 NOTI Command Code: 257
01/30/21,12:29:25.737701 NOTI ApplicationId: 0
01/30/21,12:29:25.737706 NOTI Hop-by-Hop Identifier: 0x536DCDCA
01/30/21,12:29:25.737712 NOTI End-to-End Identifier: 0x71897DAD
01/30/21,12:29:25.737718 NOTI {internal data}: src:oain.openair4G.eur(18) rwb:(nil) rt:2 cb:(nil),(nil)((nil))
qry:0x7f6c2400a00 asso:0 sess:(nil)
01/30/21,12:29:25.737724 NOTI AVP: 'Result-Code'(268) l=12 f=-M val='DIAMETER_SUCCESS' (2001 (0x7d1))
01/30/21,12:29:25.737729 NOTI AVP: 'Origin-Host'(264) l=26 f=-M val="oain.openair4G.eur"
01/30/21,12:29:25.737735 NOTI AVP: 'Origin-Realm'(296) l=21 f=-M val="openair4G.eur"
01/30/21,12:29:25.737741 NOTI AVP: 'Origin-State-Id'(278) l=12 f=-M val=1612027751 (0x60159767)
01/30/21,12:29:25.737747 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=10.55.6.159
01/30/21,12:29:25.737758 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=192.168.0.2
01/30/21,12:29:25.737763 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=192.170.0.1
01/30/21,12:29:25.737769 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=192.170.0.2
01/30/21,12:29:25.737775 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=192.170.1.1
01/30/21,12:29:25.737780 NOTI AVP: 'Host-IP-Address'(257) l=14 f=-M val=192.170.1.2
01/30/21,12:29:25.737786 NOTI AVP: 'Vendor-Id'(266) l=12 f=-M val=0 (0x0)
01/30/21,12:29:25.737792 NOTI AVP: 'Product-Name'(269) l=20 f=- val="freeDiameter"
01/30/21,12:29:25.737797 NOTI AVP: 'Firmware-Revision'(267) l=12 f=- val=10200 (0x27d8)
01/30/21,12:29:25.737803 NOTI AVP: 'Vendor-Specific-Application-Id'(260) l=32 f=-M val=(grouped)
01/30/21,12:29:25.737808 NOTI AVP: 'Auth-Application-Id'(258) l=12 f=-M val=16777251 (0x1000023)
01/30/21,12:29:25.737814 NOTI AVP: 'Vendor-Id'(266) l=12 f=-M val=10415 (0x28af)
01/30/21,12:29:25.737820 NOTI AVP: 'Supported-Vendor-Id'(265) l=12 f=-M val=10415 (0x28af)
01/30/21,12:29:25.737837 NOTI No TLS protection negotiated with peer 'oain.openair4G.eur'.
01/30/21,12:29:25.737884 NOTI 'STATE_WAITCEA' -> 'STATE_OPEN' 'oain.openair4G.eur'

```

Figura B.21: Estado del módulo EPC.

### B.5.3. Ejecución del eNB y UE

Al Ejecutar el E-UTRAN puede observarse en la terminal del EPC que hay un equipo de usuario conectado como puede validarse en la Figura B.22.

```
$cd ~/openair-cn/cmake_targets/tools
$sudo -E ./run_enb_ue_virt_s1 -x
```

```
[PHY][I][UE 0] Frame 142, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 144, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 145, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 146, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 148, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 150, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 152, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
[PHY][I][UE 0] subframe 5: Found rnti ffff, format 1A, dci_cnt 0
[PHY][I][UE 0] Frame 153, subframe 5 : Generate UE DL SCH SI_RNTI format 1A
```

Figura B.22: Estado del módulo eNB.

Cuando es realizada la compilación debe aparecer el nombre oaip1 que significa que un usuario ha sido conectado con la dirección IP que proporciona el MME para conectarse a internet.

```
eth0 Link encap:Ethernet direcciónHW 00:0c:29:ff:a3:88
 Direc. inet:10.55.6.159 Difus.:10.55.15.255 Másc:255.255.240.0
 Dirección inet6: fe80::20c:29ff:feff:a388/64 Alcance:Enlace
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
 Paquetes RX:2365314 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
 Paquetes TX:1768627 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
 colisiones:0 long.colaTX:1000
 Bytes RX:330544610 (330.5 MB) TX bytes:421125279 (421.1 MB)

eth0:1 Link encap:Ethernet direcciónHW 00:0c:29:ff:a3:88
 Direc. inet:192.170.0.1 Difus.:192.170.0.255 Másc:255.255.255.0
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1

eth0:2 Link encap:Ethernet direcciónHW 00:0c:29:ff:a3:88
 Direc. inet:192.170.1.1 Difus.:192.170.1.255 Másc:255.255.255.0
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1

eth0:3 Link encap:Ethernet direcciónHW 00:0c:29:ff:a3:88
 Direc. inet:192.170.0.2 Difus.:192.170.0.255 Másc:255.255.255.0
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1

eth0:4 Link encap:Ethernet direcciónHW 00:0c:29:ff:a3:88
 Direc. inet:192.170.1.2 Difus.:192.170.1.255 Másc:255.255.255.0
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1

lo Link encap:Bucle local
 Direc. inet:127.0.0.1 Másc:255.0.0.0
 Dirección inet6: ::1/128 Alcance:Anfitrión
 ACTIVO BUCLE FUNCIONANDO MTU:65536 Métrica:1
 Paquetes RX:1052742 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
 Paquetes TX:1052742 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
 colisiones:0 long.colaTX:0
 Bytes RX:97205011 (97.2 MB) TX bytes:97205011 (97.2 MB)

oip1 Link encap:AMPR NET/ROM direcciónHW
 Direc. inet:192.168.0.2 Difus.:192.168.0.255 Másc:255.255.255.0
 ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
 Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
 Paquetes TX:0 errores:0 perdidos:11 overruns:0 carrier:0
 colisiones:0 long.colaTX:100
 Bytes RX:0 (0.0 B) TX bytes:0 (0.0 B)
```

Figura B.23: Valores de las interfaces de red.

Anexos C

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN  
DE UN AMBIENTE DE PRUEBA  
PARA UNA RED MÓVIL 4G  
HACIENDO USO DEL  
*SOFTWARE* OpenAirInterface.