



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

Implementación y análisis de una Red 4G/LTE basada en la herramienta Open Air Interface y un dispositivo
USRP B210

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA:
Ing. Claudia Liset Stincer Torres

TUTOR
Dr. Víctor Rangel Licea Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, CD. MX.
enero de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Papi ...

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación** por la oportunidad de superación ofrecida. Por la confianza depositada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la ayuda económica otorgada.

A los proyectos:

- Papiit IN116316 “Diseño y evaluación de técnicas de calendarización aplicadas a los sistemas de transporte inteligente”.
- SECTEI No. 10507C19 “Desarrollo de infraestructura para la implementación de una red celular 5G utilizando un fronthaul basado en multiplexación por división de longitud de onda en fibra óptica”.
- “Predicción de Inundación utilizando Redes de Información de Emergencia Pluvial de detección en tiempo real con redes de telefonía móvil y WiFi” (EWIN).

Al Dr. Rangel por permitirme formar parte de su equipo de trabajo. Por la dedicación y enseñanzas ofrecidas.

A los miembros del jurado por sus consensos y preocupación en el desarrollo de este trabajo.

A Acriter por la paciencia y comprensión demostradas durante todo este tiempo.

A Axel el hermoso que siempre me motiva a dar lo mejor de mí.

A mis padres y hermana por fomentar mi base y hacerme desear esto.

A Dení, Julia y mami porque sé que están ahí cuando las necesite.

RESUMEN

Al evolucionar a redes inalámbricas 4G y con el constante progreso de las tecnologías SDR, se han creado muchos programas experimentales y de desarrollo de redes. Tal es el caso de Open Air Interface (OAI), una plataforma de hardware y software para redes 4G que se puede utilizar para diversos experimentos y desarrollos.

La plataforma ofrece una implementación basada en software de código abierto del sistema LTE que abarca la pila completa de protocolos del estándar 3GPP tanto en E-UTRAN como en EPC. Ésta se puede usar para construir y personalizar una estación base LTE (OAI eNB), un equipo de usuario (OAI UE) y una red central (OAI EPC) en una PC.

Actualmente no existe documentación alguna que ofrezca información respecto al rendimiento de OAI en un entorno real. Mediciones del indicador de intensidad de señal recibida, potencia de señal recibida de referencia o calidad de señal de referencia recibida son algunas de los experimentos que no se han realizado aun, los cuales serían de mucha ayuda para poder medir el alcance que se obtiene con esta herramienta.

Por lo anterior, se define como objetivo general: Analizar el comportamiento de una red 4G/LTE implementada con Open Air Interface utilizando un equipo USRP B210.

ABSTRACT

With the development of 4G wireless networks and the constant progress of SDR technologies, many experimental and network development programs have been created. This is the case of Open Air Interface (OAI), a hardware and software platform for 4G networks that can be used for various experiments and developments.

This platform offers an open-source software-based implementation of the LTE system that consists of the full protocol stack of the 3GPP standard in both E-UTRAN and EPC. It can be used to build and customize an LTE base station (OAI eNB), a user equipment (OAI UE) and a central network (OAI EPC) into a PC.

Nowadays, there is no documentation that provides information regarding OAI performance in a real environment. Measurements of the received signal strength indicator, reference signal received power or reference signal received quality are some of the experiments that have not been performed.

Therefore, the general objective is defined as: To analyze the behavior of a 4G / LTE network implemented with the Open Air interface using a USRP B210 device.

Acrónimos

3GPP 3rd Generation Partnership Project

AM Acknowledged Mode

APN Access Point Name

ARP Allocation and Retention Priority

AS Access Stratum

CA Carrier Agregation

CC Component Carrier

CDMA Code Division Multiple Access

CN Core Network

CoMP Coordinated Multipoint

CQI Channel Quality Indicator

C-RNTI Cell Radio Network Temporary Identifier

DL Downlink

DRB Dedicated Radio Bearer

DRS Discovery Reference Signal

EDGE Enhanced Data Rates for Global Evolution

EIR Equipment Identity Register

eMBMS evolved Multimedia Broadcast Multicast Services

EMM EPS Mobility Management

eNB E-UTRAN Node B

EPC Evolved Packet Core

ePDG evolved Packet Data Gateway

EPS Evolved Packet System

E-RAB E-UTRAN Radio Access Bearer

ESM EPS Session Management

FAPI Femto Application Platform Interface

FDD Frequency Division Duplexing

FQDN Fully Qualified Domain Name

FPGA Field-Programmable Gate Array

GBR Guaranteed Bit Rate

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile Communications

GTP GPRS Tunneling Protocol

GUMMEI Globally Unique MME Identifier

GUTI Globally Unique Temporary Identifier

HARQ Hybrid Automatic Repeat Request

HSDPA High Speed Downlink Packet Access

HSS Home Subscriber Server

HSUPA High-Speed Uplink Packet Access

IMS IP Multimedia Subsystem

IMSI International Mobile Subscriber Identity

IP Internet Protocol

LTE Long Term Evolution

MAC Media Access Control

MBMS Multimedia Broadcast Multicast Services

MBR Maximum Bit Rate

MCC Mobile Country Code

MCCH Multicast Control Channel

MCH Multicast Channel

MIMO Multiple Input Multiple Output

MME Mobility Management Entity

MMEC MME Code

MMEGI MME Group Identifier

MMEI MME Identifier

MNC Mobile Network Code

MSIN Mobile Subscriber Identification Number

MTCH Multicast Traffic Channel

M-TMSI MME Temporary Mobile Subscriber Identity

NAS Non-access Stratum

NB Narrowband

NI National Instrument

NR New Radio

OAI Open Air Interface

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

OSA Open Air Interface Software Alliance

PBCH Physical Broadcast Channel

PCFICH Physical Control Format Indicator Channel

PCI Physical Cell Identity

PCRF Policy Control and Charging Rules Function

PDCCH Physical Downlink Control Channel

PDCH Physical Downlink Channel

PDCP Packet Data Convergence Protocol

PDN Packet Data Networks

PDSCH Physical DL Shared Channel

P-GW Packet Data Network Gateway

PHICH Physical Hybrid Indicator Channel

PLMN Public Land Mobile Network

PMCH Physical Multicast Channel

PRACH Physical Random Access Channel

PSS Primary Synchronisation Signal

PUCCH Physical Uplink Control Channel

PUSCH Physical Uplink Shared Channel

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QCI QoS Class Identifier

QoS Quality of Service

R10 Release 10

R8 Release 8

R9 Release 9

RAN Radio Access Network

RF Radio Frecuencia

RLC Radio Link Control

RRC Radio Resource Control

RSRQ Reference Signal Received Quality

RSRP Reference Signals Received Power

RSSI Received Signal Strength Indicator

Rx Recepción

SAE System Architecture Evolution

SCTP Stream Control Transmission Protocol

SDN Software Defined Networking

SDR Software Defined Radio

SDU Service Data Unit

S-GW Serving Gateway

SISO Single-Input, Single-Output

SON self-organizing Network

SPR Subscription Profile Repository

SRB Signalling Radio Bearer

SRS Sounding Reference Signal

SSS Secondary Synchronisation Signal

S-TMSI Serving Temporary Mobile Subscriber Identity

TAL Tracking Area List

TAU Tracking Area Update

TDD Time División Duplexing

TIN Temporary Identifier

TM Transmission Mode

TTI Transmission Time Interval

Tx Transmisión

UE User Equipment

UHD USRP Hardware Driver

UL Uplink

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

USIM Universal Subscriber Identity Module

USRP Universal Software Radio Peripheral

UTRAN Universal Terrestrial Radio Access

VoLTE Voice over LTE

Índice general

Agradecimientos	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
Acrónimos	VI
Índice de figuras	XV
1 Introducción	1
§1.1 Antecedentes	1
§1.2 Problema a resolver	4
§1.3 Objetivos	4
§1.4 Metodología	5
§1.5 Contribuciones y relevancia	6
§1.6 Estructura de la tesis	6
2 Estado del arte	8
§2.1 Introducción	8
§2.2 Evolución de LTE	8
§2.3 Herramientas de software para la implementación de redes 4G/LTE	14
§2.3.1 Amarisoft LTE	14
§2.3.2 srsLTE	16
§2.3.3 Mymo Wireless	17
§2.3.4 Labview para LTE	19

§2.3.5 Open Air Interface	20
§2.4 Trabajos relacionados	22
3 Estándar LTE	27
§3.1 Introducción	27
§3.2 Arquitectura LTE	28
§3.3 Equipo de Usuario (UE)	31
§3.3.1 Gestión de llamadas y movilidad	31
§3.3.2 Gestión de sesiones/identidad	33
§3.3.3 Categorías de UE	34
§3.3.4 Identidad del UE	35
§3.3.5 Interfaz Uu	39
§3.4 Componentes del E-UTRAN	39
§3.4.1 Intefaces	41
§3.5 Componentes del EPC	41
§3.5.1 Intefaces	43
§3.6 Protocolos de la arquitectura	44
§3.6.1 Plano de usuario	44
§3.6.2 Plano de control	45
4 Herramientas	47
§4.1 Introducción	47
§4.2 USRP B210	47
§4.2.1 Introducción a SDR	47
§4.2.2 Introducción a USRP	50
§4.2.3 USRP B210	51
§4.2.4 USRP Hardware Driver (UHD)	52
§4.3 Open Air Interface	53
§4.3.1 Objetivos	54
§4.3.2 Plataforma de software	55
§4.3.3 Plataforma de hardware	58

5 Desarrollo e implementación	59
§5.1 Introducción	59
§5.2 Componentes de hardware utilizados	59
§5.3 Requisitos de software previos a la instalación	61
§5.4 Instalación de dependencias	62
§5.5 Configuración de componentes	63
§5.6 Configuración de UE y registro de usuario en la red LTE	67
§5.6.1 Insertar datos en USIM	68
§5.6.2 Registro de datos de usuario en el HSS	69
6 Pruebas y análisis	70
§6.1 Introducción	70
§6.2 Selección de ganancia	71
§6.3 Conexión del UE a la red LTE. Navegación por Internet	73
§6.4 Reference Signal Strength Indicator (RSSI)	74
§6.5 Reference Signals Received Power (RSRP)	77
§6.6 Reference Signal Received Quality (RSRQ)	80
7 Conclusiones	84
§7.1 Trabajos futuros y recomendaciones	85
Anexos	91
Anexo 1: Relación Ancho de Banda - PRB	91
Anexo 2: Valores de RSSI	91
Anexo 3: Valores de RSRP para BW = 5 MHz	92
Anexo 4: Valores de RSRP para BW = 10 MHz	92
Anexo 5: Valores de RSRQ para BW = 5 MHz	93
Anexo 6: Valores de RSRQ para BW = 10 MHz	93

Índice de figuras

2.1	Agregación de portadores - FDD	10
2.2	Agregación de operadores: alternativas intra e interbandas	11
2.3	Formas de hacer CoMP	13
2.4	Arquitectura del sistema con OAI	24
3.1	Arquitectura del EPS	29
3.2	División funcional entre E-UTRAN y EPC	30
3.3	Tracking area list	32
3.4	Conexión PDN y portador EPS	33
3.5	Formato del identificador PLMN ID	35
3.6	Formato del IMSI	36
3.7	Asignación del IMSI	36
3.8	Formato del GUTI	37
3.9	Arquitectura del E-UTRAN	40
3.10	Pila de protocolos del plano de usuario del E-UTRAN	45
3.11	Pila de protocolos del plano de control	46
4.1	Arquitectura SDR ideal	49
4.2	Ecosistema de software USRP	51
4.3	Tarjeta USRP B210	52
4.4	Pila de protocolos de OAI	57
5.1	Arquitectura de red LTE diseñada con OAI	61
5.2	Elementos para grabar datos de red	68
5.3	SIM personalize tool	68

6.1 Rohde & Schwarz NRP-Z91 average power sensor	71
6.2 Valores de potencia de salida	72
6.3 UE navegando por Internet mediante la red OAI LTE	73
6.4 Herramienta OAI soft scope	74
6.5 RSSI en un PRB	75
6.6 RSRP en un PRB	78
6.7 Valores RSSI y RSRP para $BW = 5$ MHz	80

Índice de tablas

3.1 Categorías de UE [16]	34
5.1 Parámetros de la red para usuario	67
6.1 Parámetros de la red OALLTE	71
6.2 Valores de potencia de salida	72
6.3 Valores de RSSI	76
6.4 Mapeo del informe de medición RSRP	79
6.5 Valores de RSRP para BW = 5 MHz	79
6.6 Valores de RSRP para BW = 10 MHz	79
6.7 Mapeo del informe de medición RSRQ	81
6.8 Valores de RSRQ para BW = 5 MHz	82
6.9 Valores de RSRQ para BW = 10 MHz	82

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La Universidad de Colima en conjunto con la Universidad de Loughborough y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) conforman el proyecto “Predicción de Inundación utilizando Redes de Información de Emergencia Pluvial de detección en tiempo real de redes de telefonía móvil y Wi-Fi” (EWIN). Estas universidades proporcionan una capacidad única en los campos de ingeniería hidráulica y propagación de radio en el Reino Unido e ingeniería hidráulica, ciencias ambientales y redes de datos en México.

La UNAM, como centro de redes inalámbricas en el proyecto EWIN, aporta las fortalezas de diseño de algoritmos de encaminamiento para redes ad hoc, control de energía para redes de sensores, calidad del servicio para red celular móvil y redes de acceso inalámbrico de banda ancha. Recientemente la UNAM, como integrante del proyecto EWIN, ha optado por la implementación de “Protocolos de comunicación inalámbrica y celular basado en Radios Definidos por Software (SDR)”. Tal es el caso de la implementación del protocolo 802.11p y de una radio base UMTS/3G, ambos basados en SDR. En el ámbito de la comunicación celular, se encuentra como sucesor de las redes UMTS, Long Term Evolution (LTE) el cual aún no ha sido implementado para el proyecto EWIN.

LTE, comúnmente conocido como un tipo de servicio de comunicación inalámbrico 4G, apunta a mejorar la Red de Acceso de Radio Terrestre Universal (UTRAN, por sus

siglas en inglés Universal Terrestrial Radio Access) y optimizar la arquitectura de acceso de radio.

Las especificaciones de LTE son muy estables, con el beneficio adicional de las mejoras que se han introducido en todas las versiones posteriores de 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Los principales requisitos para la nueva red de acceso son alta eficiencia espectral, altas tasas de datos pico, tiempo de ida y vuelta corto, así como flexibilidad en frecuencia y ancho de banda. La arquitectura de red LTE está diseñada para admitir el tráfico mediante conmutación de paquetes con movilidad sin interrupciones, calidad de servicio y latencia mínima. [1]

Por otra parte, se hace necesario también realizar una breve introducción hacia los sistemas de Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés Software Defined Radio). SDR hace referencia a un tipo de radio reprogramable o reconfigurable que otorga al software la tarea de configurar el comportamiento de la radio, dejando al hardware solo la implementación del front-end de Radio Frecuencia (RF). Por lo tanto, la radio ya no es estática y definida por sus circuitos, sino que se convierte en un elemento dinámico, que puede cambiar sus características de funcionamiento, como el ancho de banda, la modulación, la velocidad de codificación, incluso modificada durante el tiempo de ejecución de acuerdo con la configuración del software. [2]

Los dispositivos Universal Software Radio Peripheral (USRP) son radios definidos por software que combinan procesadores basados en host, Field-Programmable Gate Array (FPGA) y frontales de RF para ayudar a diseñar, crear prototipos e implementar sistemas inalámbricos rápidamente. La línea de productos USRP ofrece una amplia gama de SDR que van desde opciones de bajo costo hasta radios de gama alta de 160 MHz de ancho de banda instantáneo. Los SDR de USRP son ideales para desarrollar y crear prototipos de diseños inalámbricos complejos. También son adecuados para aplicaciones como la monitorización espectral y la búsqueda de dirección debido a sus amplios anchos de banda y sus frontales RF flexibles. [3]

USRP B210 es uno de los modelos SDR gestionados por National Instrument (NI). Éste permite experimentar en una amplia gama de aplicaciones que incluyen: transmisión de

FM y TV, celular, GPS, WiFi, ISM y más. Los usuarios pueden comenzar inmediatamente a crear prototipos en GNURadio y participar en la comunidad SDR de código abierto. El soporte completo del software USRP Hardware Driver (UHD) permite la reutilización de código de los diseños existentes, la compatibilidad con aplicaciones de código abierto como HSDR y OpenBTS, y una ruta de actualización a sistemas USRP listos en la industria para cumplir con los requisitos de la aplicación. [4]

Al evolucionar a redes 4G y con el constante progreso de las tecnologías SDR, se han creado muchos programas experimentales y de desarrollo de redes. Tal es el caso de Open Air Interface (OAI), una plataforma de hardware y software para redes 4G que se puede utilizar para diversos experimentos y desarrollos[5]. OAI se basa en una arquitectura de frontend de radio definido por software alojada en PC. Con OAI, la funcionalidad del transceptor se realiza a través de una interfaz de SDR conectada a una computadora host para su procesamiento. Puede ser configurado para trabajar con diversos tipos de SDR, entre los que se encuentra el USRP B210, uno de los SDR con el cual OAI ha sido probado en disímiles ocasiones.

OAI está escrito en el lenguaje C para varias distribuciones de Linux y lanzado como software libre bajo el modelo de licencia OAI. Open Air Interface Software Alliance (OSA) promueve la contribución al desarrollo de software y proporciona una colaboración abierta para trabajar en el futuro diseño de redes 5G. La plataforma ofrece una implementación basada en software de código abierto del sistema LTE que abarca la pila completa de protocolos del estándar 3GPP. Se puede usar para construir y personalizar una estación base LTE (OAI eNB), un equipo de usuario (OAI UE) y una red central (OAI EPC) en una PC. [6]

OAI ha sido utilizada hasta hoy en ambientes de absoluta investigación, pero, considerando el hecho de que es una implementación libre de costos, de código abierto y que se puede conectar con componentes comerciales, ¿por qué no utilizar OAI en entornos reales? OAI sería una opción de bajo costo para llevar conexión hacia aquellos lugares donde las compañías telefónicas privadas no invierten en el despliegue de redes, ya sea por las pocas personas que habitan la localidad o por lo difícil que les resultaría mover tanto equipa-

miento, representando, para dichas compañías, una pérdida de capital y recursos o más bien una inversión que no podría ser recuperada.

Actualmente existen un conjunto de trabajos ([13], [14], [15]) de investigación que describen el correcto funcionamiento de la herramienta OAI a partir de la usabilidad de esta. En estos trabajos se demuestra que los diversos componentes son capaces de conectarse entre sí correctamente y de hacer una adecuada gestión de los recursos. A pesar de las distintas publicaciones e investigaciones realizadas, no existe documentación alguna que ofrezca información respecto al rendimiento de OAI en un entorno real. Mediciones del indicador de intensidad de señal recibida, potencia de señal recibida de referencia o calidad de señal de referencia recibida son algunas de los experimentos que no se han realizado aun, los cuales serían de mucha ayuda para poder medir el alcance que se obtiene con esta herramienta.

1.2. Problema a resolver

A partir de lo planteado se presenta como problema a resolver la siguiente incógnita: ¿Cómo saber qué tan eficiente es una red 4G/LTE implementada con Open Air Interface utilizando un equipo USRP B210?

1.3. Objetivos

Para esta investigación se define como objetivo general: Analizar el comportamiento de una red 4G/LTE implementada con Open Air Interface utilizando un equipo de Radio Definido por Software USRP B210.

Partiendo del objetivo general propuesto se tienen como objetivos específicos los siguientes:

- Estudiar el principio operacional de los equipos USRP B210.
- Comprender el estándar LTE.
- Estudiar la herramienta OAI y sus diversos componentes.

- Instalar, compilar y configurar los componentes de una red 4G/LTE (MME, HSS, SGW, PGW, eNB) con la herramienta OAI.
- Lograr transmitir y recibir datos desde un celular conectado a la red celular implementada.
- Realizar el conjunto de pruebas establecidas a la red celular.
- Analizar los resultados obtenidos durante las pruebas.

1.4. Metodología

Para alcanzar un resultado satisfactorio se hace necesario definir un conjunto de tareas o pasos. Estos son descritos a continuación:

1. Preparación del ambiente de desarrollo: selección del hardware e instalación y configuración del software (sistema operativo y dependencias) a utilizar de acuerdo con las especificaciones y requisitos establecidos por la plataforma.
2. Verificación de detección y correcto funcionamiento del dispositivo USRP B210.
3. Instalación y configuración de los componentes del EPC (HSS, MME y SP-GW) y la estación base.
4. Verificar la correcta conexión de la estación base con el EPC.
5. Quemar tarjeta Universal Subscriber Identity Module (USIM) con datos de usuario: se graban en una tarjeta USIM los datos correspondientes al usuario y a la red celular para lograr la conexión de un User Equipment (UE) con la estación base.
6. Registro de datos de usuario en la red celular: se registran los datos del usuario en la red LTE para que el UE se pueda conectarse a la misma.
7. Verificación de conexión de UE comercial a la red celular. Verificación de navegación por Internet.

8. Realización de las disímiles pruebas establecidas a la conexión.
9. Análisis de las pruebas realizadas.

1.5. Contribuciones y relevancia

Con Open Air Interface se logra obtener la implementación de una red celular gratuita sobre software libre que no genera costos de licencias o patentes. Una red que puede ser utilizada para llevar conexión a Internet a cualquier lugar donde exista éste tipo de brecha tecnológica. Es por ello que se hace necesario verificar qué tan estable y confiable sería esta red.

Con el análisis de la red se hace una contribución a las investigaciones llevadas a cabo por la comunidad de OAI con nuevas evidencias de qué tan útil es la herramienta y de qué tanto cumple los estándares establecidos por la 3GPP para LTE.

1.6. Estructura de la tesis

El *Capítulo 2: Estado del arte*, está dividido en tres ramas principales. En la primera parte se realiza un estudio de la evolución que ha tenido el estándar LTE desde su surgimiento, haciendo un resumen de las versiones de liberaciones hasta la actualidad. La segunda parte se trata de una breve descripción de algunas herramientas de software que implementan componentes de una red LTE. Por último se documenta el estudio llevado a cabo sobre los trabajos relacionados con la implementación de redes LTE a partir del uso de la herramienta OAI.

El *Capítulo 3: Estándar LTE*, está orientado a profundizar en el estándar LTE. Se analizan sus diversos componentes, interfaces, protocolos y otras características distintivas del mismo. Es un resumen del estándar y de cómo opera.

El *Capítulo 4: Herramientas*, hace un estudio de las herramientas de software y hardware a utilizar: OAI y el radio definido por software USRP B210. Se explican aspectos

fundamentales de estas herramientas y de sus componentes para lograr un mejor entendimiento de ellos antes de usarlos.

En el *Capítulo 5: Desarrollo e implementación*, se llevan a cabo los pasos necesarios para la implementación de una red LTE a partir del uso de la herramienta Open Air Interface. Se muestran los requisitos de hardware y software, así como ejemplos de las configuraciones utilizadas durante el desarrollo de la red.

Finalmente, el *Capítulo 6: Pruebas al sistema. Análisis de las pruebas*, refleja la serie de pruebas aplicadas al sistema así como un análisis del significado de las mismas. En éste capítulo se muestra qué tan efectivo y eficiente es OAI en entornos libres y en entornos controlados.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

El estándar Long Term Evolution (LTE) aparece por primera vez en 2008 pero ha continuado en constante perfección de sus componentes desde entonces. Sus liberaciones van desde la versión 8 hasta la 14, donde cada una de estas trae una nueva mejora. Para el correcto entendimiento de éste trabajo se hace necesario realizar una concreta explicación de la evolución del estándar.

Por otra parte, se hace necesario también hacer un estudio de las diversas herramientas que implementan el estándar de las cuales se realiza un breve resumen en la segunda parte de éste capítulo.

Finalmente se muestra una recolección de algunos de los trabajos sobre la implementación de LTE a partir de Open Air Interface que han sido publicados actualmente.

2.2. Evolución de LTE

La versión 8 (R8 por Release8) de LTE se liberó en diciembre de 2008 y esta ha sido la base de la primera ola de equipos LTE. Las especificaciones LTE son muy estables, con el beneficio adicional de las mejoras que se han introducido en todas las versiones posteriores de 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Evolved Universal Terrestrial Radio Access

(E-UTRAN) es la parte de acceso al Evolved Packet Core (EPC). Los requisitos principales para la nueva red de acceso son la alta eficiencia espectral, las altas tasas de datos pico, el corto tiempo de ida y vuelta y la flexibilidad en frecuencia y ancho de banda. [1]

El Evolved Packet Core (EPC) está basado exclusivamente en IP. Tanto los servicios en tiempo real como los servicios de comunicación de datos serán transportados por el protocolo IP. La dirección IP se asigna cuando el móvil se enciende y se libera cuando se apaga. [1]

La nueva solución de acceso, LTE, se basa en Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDM) y en combinación con una modulación de orden superior (hasta 64 QAM), grandes anchos de banda (hasta 20 MHz) y multiplexación espacial en el enlace descendente (hasta 4x4), se pueden lograr altas velocidades de datos. La velocidad de datos máxima teórica en el canal de transporte es de 75 Mbps en el enlace ascendente, y en el enlace descendente, usando multiplexación espacial, la velocidad puede ser tan alta como 300 Mbps. [1]

La versión 9 (R9 o Release 9) presenta la integración completa del concepto Femto-cell (Home eNB¹) y características importantes evolucionadas como redes autoorganizadas (SON, por sus siglas en inglés self-organizing Network), transmisión multimedia evolucionada y servicio de multidifusión (eMBMS, por sus siglas en inglés evolved Multimedia Broadcast Multicast Services), soporte de posicionamiento (LCS, por sus siglas en inglés Location Services) y también agregó nuevas bandas de espectro (p. Ej. 800 MHz y 1500 MHz) para operación LTE. [7]

La fuerza impulsora para desarrollar LTE hacia LTE-Advanced - LTE Release10 era proporcionar velocidades de bits más altas de una manera rentable y, al mismo tiempo, cumplir por completo los requisitos establecidos por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) para 4G. [8]

La forma más directa de aumentar la capacidad es agregar más ancho de banda. Dado que es importante mantener la compatibilidad con las versiones anteriores de los dispositi-

¹Home eNode B (HeNB) proporciona cobertura de radio LTE para dispositivos LTE dentro de un área de cobertura residencial o empresarial. Un HeNB incorpora las capacidades de un eNodo estándar B.

tivos móviles R8 y R9, el aumento del ancho de banda en LTE-Advanced se proporciona mediante la agregación de operadores R8 / R9. La agregación de portadores se puede usar tanto para Frequency Division Duplexing (FDD) como para Time División Duplexing (TDD). [8]

Cada portador agregado se conoce como portador de componentes. El portador de componentes puede tener un ancho de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz y se puede agregar un máximo de cinco portadores de componentes. Por lo tanto, el ancho de banda máximo es de 100 MHz. El número de portadores agregados puede ser diferente en Downlink (DL) y Uplink (UL), sin embargo, el número de portadores de componentes UL nunca es mayor que el número de portadores de componentes DL. Los portadores de componentes individuales también pueden tener diferentes anchos de banda. [8]

En la figura 2.1 se observa que al UE Release 10 (R10) se le pueden asignar recursos DL y UL en hasta cinco portadores de componentes (CC, por sus siglas en inglés Component Carrier). A los UE R8 / R9 se les pueden asignar recursos en cualquiera de los CC. Los CC pueden ser de diferentes anchos de banda.

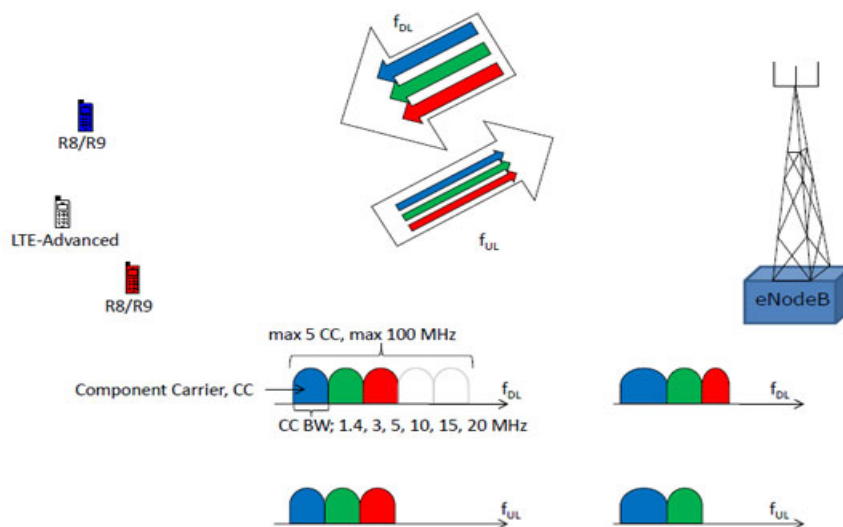


Figura 2.1: Agregación de portadores - FDD [8]

La forma más fácil de organizar la agregación es usar portadores de componentes contiguos dentro de la misma banda de frecuencia operativa, llamada intrabanda contigua. Esto

puede no ser siempre posible, debido a los escenarios de asignación de frecuencia. Para la asignación no contigua, podría ser intrabanda, es decir, las portadoras componentes pertenecen a la misma banda de frecuencia operativa, pero están separadas por un intervalo de frecuencia, o podría ser entre bandas, en cuyo caso las portadoras componentes pertenecen a diferentes bandas (Ver figura 2.2).

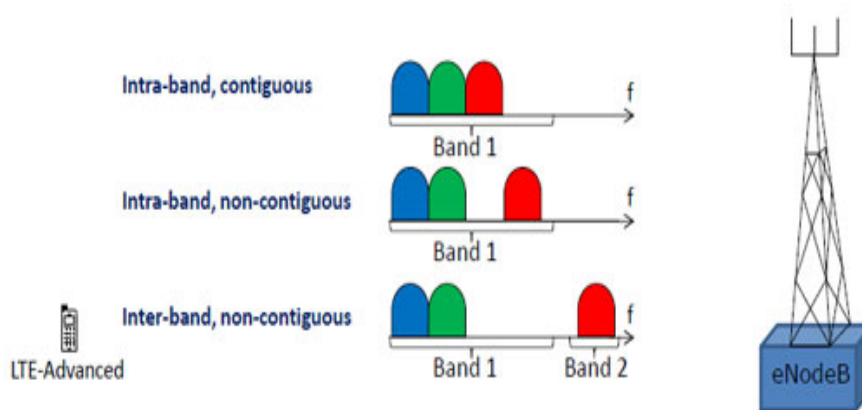


Figura 2.2: Agregación de operadores: alternativas intra e interbandas [8]

Agregar portadores actúa no solo sobre la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, por sus siglas en inglés Media Access Control) o Física, sino también sobre el búfer Radio Link Control (RLC), el cual debe ser mayor y debe ser capaz de tomar decisiones sobre la adición / eliminación de CC secundario.

Otra de las nuevas funcionalidades que se introducen en LTE Avanzado es Multiple Input Multiple Output (MIMO). Éste se usa para aumentar la tasa de bits general mediante la transmisión de dos (o más) flujos de datos diferentes en dos (o más) antenas diferentes. Para ello se utilizan los mismos recursos en frecuencia y tiempo, separados solo mediante el uso de diferentes señales de referencia, para recibir por dos o más antenas.

Para poder ajustar el tipo de esquema de transmisión de múltiples antenas, de acuerdo con el entorno de radio, se han definido varios modos de transmisión (TM, por sus siglas en

inglés Transmission Mode). El User Equipment (UE) a través de la señalización de Radio Resource Control (RRC) será informado sobre el modo de transmisión a utilizar. En el DL hay nueve modos de transmisión diferentes, donde se introdujeron TM1-7 en R8, TM8 en R9 y TM9 en R10. En UL hay TM1 y TM2, donde TM1, el valor predeterminado, se introdujo en R8 y TM2 se introdujo en R10. [8]

En Long Term Evolution-Advanced (LTE-Advanced), la posibilidad de una planificación eficiente y heterogénea de la red, es decir, una combinación de celdas grandes y pequeñas se incrementa mediante la introducción de nodos de retransmisión (RN, por sus siglas en inglés Relay Node). Los nodos de retransmisión son estaciones base de baja potencia que proporcionarán una cobertura y capacidad mejoradas en los bordes de las celdas y áreas de puntos calientes y también se pueden usar para conectarse a áreas remotas sin conexión de fibra.

El nodo de retransmisión está conectado al Donor eNB (DeNB²) a través de una interfaz de radio, Un, que es una modificación de la interfaz aérea E-UTRAN Uu. Por lo tanto, en la celda Donante, los recursos de radio se comparten entre los UE servidos directamente por el DeNB y los RN. [8]

Más adelante, en Release 11 (R11), se agregan nuevas configuraciones de Carrier Aggregation (CA) y hay nuevas características introducidas como el multipunto coordinado (CoMP, por sus siglas en inglés Coordinated Multipoint). La razón principal para introducir CoMP es mejorar el rendimiento de la red en los bordes de la celda. En CoMP, varios puntos TX (transmisión) proporcionan transmisión coordinada en el DL, y varios puntos RX (recepción) proporcionan recepción coordinada en el UL.

Un punto TX / RX constituye un conjunto de antenas TX / RX ubicadas conjuntamente que proporcionan cobertura en el mismo sector. El conjunto de puntos TX / RX utilizados en CoMP puede estar en diferentes ubicaciones o en conjunto, pero al proporcionar cobertura en diferentes sectores, también pueden pertenecer al mismo o diferentes E-UTRAN Node B (eNB). [8]

²El DeNB aloja las funciones de eNB además de la funcionalidad proxy S1 / X2 para soportar RNs y la funcionalidad Serving Gateway (S-GW) / Packet Data Network Gateway (P-GW) para admitir RN.

Coordinated Multipoint (CoMP) se puede hacer de varias maneras, y la coordinación se puede hacer tanto para redes homogéneas como para redes heterogéneas. En la figura 2.3 se muestran dos ejemplos simplificados para DL CoMP. En ambos casos, los datos DL están disponibles para su transmisión desde dos puntos TX. [8]

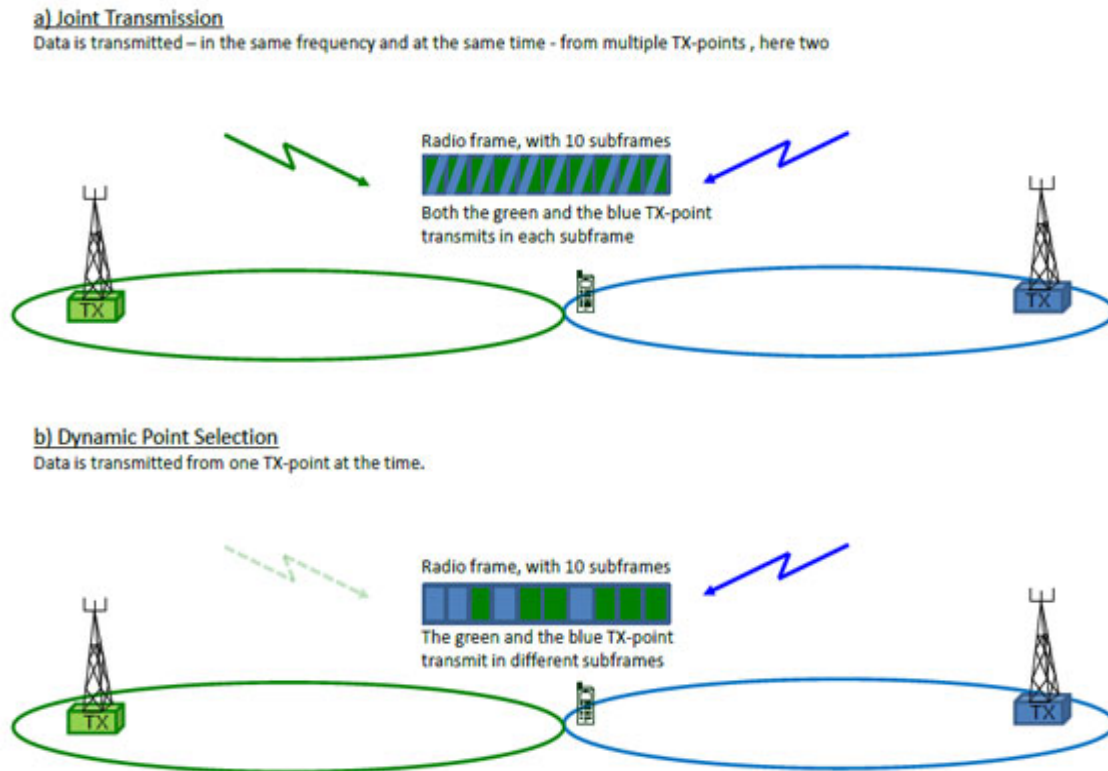


Figura 2.3: Formas de hacer CoMP [8]

Cuando dos o más puntos TX transmiten en la misma frecuencia en la misma subtrama, se denomina Transmisión conjunta (Joint Transmission). Cuando los datos están disponibles para la transmisión en dos o más puntos TX pero solo programados desde un punto TX en cada subtrama, se llama Selección de punto dinámico (Dynamic Point Selection). Para UL CoMP, por ejemplo, hay recepción conjunta, varios puntos RX reciben los datos de UL de un UE, y los datos recibidos se combinan para mejorar la calidad. [8]

Cuando los puntos TX / RX están controlados por diferentes eNB, puede agregarse un retraso adicional, ya que los eNB deben comunicarse para tomar decisiones de programación.

La evolución de LTE ha sido constante. Son innumerables las perfecciones y mejoras introducidas a sus componentes, así como la descripción de cada uno de ellos. Para una idea más abarcadora de LTE y sus diversos componentes y funcionamiento se sugiere continuar con la lectura del Capítulo 3: Estándar LTE.

2.3. Herramientas de software para la implementación de redes 4G/LTE

2.3.1. Amarisoft LTE

Fundada en 2012 Amarisoft es una compañía de software no convencional dedicada a la industria de las telecomunicaciones. Ofrece soluciones de alta calidad a la comunidad 4G / 5G para expandir las comunicaciones entre las personas. La tecnología de Amarisoft ejecuta la Radio Access Network (RAN) completa, incluida la capa física, en hardware genérico. Ésta característica abre una nueva área donde migrar de 4G a 5G viene como actualización de software. [9]

Amarisoft cuenta con los siguientes componentes [9]:

E-UTRAN Node B (eNB):

- Provee LTE-Advanced con Multiple Input Multiple Output (MIMO) 4 x 4 y hasta 5 celdas en DL y 3 en UL.
- Soporte de todas las bandas FDD y TDD.
- Multicelda con soporte de transferencia Intra eNB, S1 y X2.
- Anchos de banda compatibles: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Modos de transmisión: 1 (antena única) y 2 a 10 antenas (MIMO).
- Soporta 256QAM DL para Physical DL Shared Chanel (PDSCH) y Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS).

- Implementa las capas MAC, Radio Link Control (RLC), Packet Data Convergence Protocol (PDCP) y Radio Resource Control (RRC).
- El ancho de banda debe ser mayor o igual a 5 MHz.

Evolved Packet Core (EPC):

- Soporte de todos los LTE QoS Class Identifier (QCI), Traffic Flow Template (TFT) y portadores dedicados.
- Pila de red integrada totalmente Linux.
- Optimizado para el modelo de punto de acceso.
- Versión LTE 14 compatible.
- Implementa un Mobility Management Entity (MME) con Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network Gateway (P-GW), Policy Control and Charging Rules Function (PCRF), Home Subscriber Server (HSS) y Equipment Identity Register (EIR) incorporados.
- Admite varios eNBs con interfaz S1 estándar.
- Manejo de procedimientos de UE: conexión, autenticación, configuración de seguridad, desconexión, seguimiento, acceso a servicio, establecimiento de portador de radio, paginación.
- Soporte de IPv6.

Simulador de User Equipment (UE):

- Simula una gran cantidad de UEs que comparten el mismo espectro.
- Compatibilidad con LTE versión 8 con características hasta la versión 14.
- Soporte FDD / TDD.
- Simulador de canales multi-UE.

- Anchos de banda: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Soporte MIMO DL.
- Soporte de MBMS.
- Soporte de categoría M1.
- Soporte Narrowband-IoT (categoría Narrowband 1 / Narrowband 2) con soporte multi-tono y multi-Dedicated Radio Bearer (DRB).
- Soporte de todos los algoritmos de cifrado y protección de integridad.
- Incluye capas PHY, MAC, Radio Link Control (RLC), Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Resource Control (RRC) y Non-access Stratum (NAS).

2.3.2. srsLTE

Software Radio System LTE (srsLTE) se especializa en software de alto rendimiento para sistemas inalámbricos. Tiene un enfoque de radio definido por software que apunta a hardware de procesamiento de productos básicos y frontales RF flexibles para ofrecer soluciones inalámbricas de vanguardia. Fundada en 2012 por un equipo de expertos en tecnología inalámbrica del centro de investigación CONNECT en el Trinity College de Dublín, SRS se basa en más de 15 años de investigación y desarrollo de software de radio.

[10]

srsLTE cuenta con los siguientes componentes [10]:

srsUE:

- Configuración de FDD y TDD.
- Soporte de agregación de operadores.
- Procedimiento de búsqueda y sincronización celular para el UE.
- Soporte duro de Universal Subscriber Identity Module (USIM).

- Interfaz de red virtual creada al conectar la red.
- Soporte de QoS.
- DL de 150 Mbps en configuración MIMO de 20 MHz en CPU i7 Quad-Core.
- 75 Mbps DL en configuración Single-Input, Single-Output (SISO) de 20 MHz en CPU i7 Quad-Core.
- DL de 36 Mbps en configuración SISO de 10 MHz en CPU i5 Dual-Core.

srsEnb:

- Configuración FDD
- Soporte de retroalimentación periódica y de Channel Quality Indicator (CQI).
- Interfaces estándar S1AP y GPRS Tunneling Protocol (GTP-U) a la red principal.
- DL de 150 Mbps en MIMO de 20 MHz con UE comerciales.
- 75 Mbps de DL en configuración SISO con UE comerciales.
- 50 Mbps de UL en 20 MHz con UE comerciales.

srsEPC:

- Implementación de LTE EPC binaria simple y liviana. En un solo ejecutable trae MME, con interfaz estándar S1AP y GTP-U para eNB, S / P-GW con SGi estándar expuesto como interfaz de red virtual y HSS con base de datos de usuario configurable en formato CSV.
- Soporte para paginación

2.3.3. Mymo Wireless

Mymo Wireless es un proveedor de tecnología 4G y 5G LTE que ofrece una completa solución de la pila de protocolos para equipos de usuario LTE y mercados de dongle de alta velocidad.

Mymo Wireless ofrece LTE Release-9 basado en un módem UE de referencia y flexibilidad en la adaptación de la tecnología central para LTE eNB. Mymo posee componentes IP LTE y ha licenciado tecnología a proveedores globales en India, Estados Unidos, Reino Unido y Canadá para varios segmentos del mercado. La tecnología comprobada de Mymo ofrece a los clientes soluciones de chips de calidad y un tiempo de comercialización más rápido. [11]

Mymo Wireless ofrece los siguientes productos:

4G LTE eNB

La solución eNB PHY de Mymo Wireless es compatible con 3GPP LTE Release 9. Cubre todos los canales físicos del transmisor y receptor. Los algoritmos se prueban y optimizan en tiempo real, a través de una interfaz de RF con un UE. La oferta eNB PHY de Mymo Wireless incluye la interfaz Femto Application Platform Interface (FAPI), para permitir una fácil integración de PHY con cualquier MAC de terceros. Mymo Wireless facilita aún más la personalización y la integración al proporcionar servicios de diseño. [11]

4G LTE UE

La solución UE PHY de Mymo Wireless es compatible con 3GPP LTE Release 9. Ha sido licenciado a más de 14 clientes en todo el mundo para diferentes líneas de productos. La oferta UE PHY de Mymo Wireless incluye una interfaz MAC-PHY bien definida para permitir una fácil integración de PHY con cualquier MAC de terceros. Mymo Wireless facilita aún más la personalización y la integración al proporcionar servicios de diseño. La oferta está disponible en versiones C y Matlab. [11]

Sniffer 4G LTE

El rastreador LTE se utiliza para aplicaciones de escaneo, monitoreo y seguimiento de redes LTE. Ésta IP ha sido exitosamente licenciada y comercialmente implementada por clientes de los EE. UU. Tanto en las fuerzas militares como paramilitares para buscar y rastrear estaciones de bases ilegales en movimiento. Tiene la capacidad de rastrear el espectro de frecuencia completo de 50 MHz a 6 GHz en pocos minutos y rastrear varias estaciones base objetivo simultáneamente. [11]

Además, esta solución se pueden actualizar para interceptar datos en vivo y llamadas VoLTE en sistemas de interceptación activos y legales. Mymo ofrece éste componente en varias actualizaciones, incluidas las últimas versiones de LTE, que incluye capacidades de rastreo 5G New Radio (NR) y Narrowband(NB) IoT.

LTE NMM

El modo de monitoreo de red (NMM, por sus siglas en inglés Network Monitoring Mode) es una funcionalidad clave de Pico y Femto eNB. Reduce una gran cantidad de intervención humana en la auto-sincronización general con NodeBs vecinos al proporcionar funcionalidad de auto organización en los eNBs auto-sincronizando con las células eNB vecinas. [11]

La oferta de NMM de Mymo Wireless es la solución compatible con 3GPP LTE Release-9 con campo probado e integrado con éxito en los productos eNB del cliente. Se ha comercializado y desplegado. La tecnología NMM / SON es muy útil en comunicaciones tácticas para implementaciones de estaciones base no gestionadas y no planificadas en redes de comunicaciones inalámbricas patentadas o de defensa. [11]

2.3.4. Labview para LTE

El Framework de Aplicaciones LTE de LabVIEW Communications es un complemento de software que ofrece una implementación de la capa física LTE en tiempo real en forma de código fuente abierto y modificable. El framework es compatible con un determinado subconjunto del 3GPP LTE Release 10. [12]

Ésta compatibilidad permite a los investigadores de sistemas inalámbricos comenzar a trabajar rápidamente con su sistema de generación de prototipos en tiempo real basado en el estándar LTE, enfocarse en los aspectos del protocolo que desean mejorar, modificar los diseños y comparar sus cambios con el estándar existente. El Framework de Aplicaciones LTE de LabVIEW Communications requiere la Suite para Comunicaciones de LabVIEW. [12]

2.3.5. Open Air Interface

Open Air Interface (OAI) actualmente proporciona una implementación compatible con el estándar LTE para terminal (UE), estación base (eNodeB) y red central (MME, HSS, SGw y PGw) en un equipo informático estándar basado en Linux. Se puede usar junto con equipos de RF habituales, disponibles en muchos laboratorios (es decir, National Instruments / Ettus USRP y plataformas PXIe) además del hardware de RF personalizado proporcionado por EURECOM para implementar estas funciones en un grado suficiente para permitir en tiempo real la interoperación con dispositivos comerciales.

Los principales usuarios industriales actuales de Open Air Interface para proyectos de colaboración son Agilent, China Mobile, IBM, Alcatel-Lucent, Thales, National Instruments y Orange. El objetivo principal es proporcionar una implementación de referencia de código abierto que siga el proceso de estandarización 3GPP a partir de Release 13 y el camino evolutivo hacia 5G y que esté disponible gratuitamente para la experimentación en equipos de laboratorio de productos básicos. [6]

Los componentes de OAI presentan las siguientes características [6]:

OAI eNB:

- Compatible con LTE versión 8.6 y un subconjunto de características de la versión 10.
- Implementa las capas MAC, RLC, PDCP y RRC.
- Servicio de protocolo para todos los canales R8 y R10 eMBMS, Multicast Channel (MCH), Multicast Control Channel (MCCH), Multicast Traffic Channel (MTCH)).
- Pila de protocolos completamente reconfigurable.
- Soporte de medición RRC con brecha de medición.
- Interfaces estándar S1AP y GTP-U a la red principal.
- Soporte de IPv4 e IPv6.

OAI EPC:

- Implementación de MME, SGW, PGW y HSS. OAI reutiliza pilas de protocolos de aplicación GTPv1u y GTPv2c que cumplen con los estándares de la implementación de software de código abierto de EPC llamada nwEPC.
- Integridad y encriptación Non-access Stratum (NAS).
- Manejo de procedimientos de UE: conexión, autenticación, acceso al servicio, establecimiento de portador de radio.
- Acceso transparente a la red IP (no se necesita una puerta de enlace de servicio externa ni una puerta de enlace PDN). Nombre de punto de acceso configurable, rango de IP, DNS y QoS para el E-UTRAN Radio Access Bearer (E-RAB).
- Soporte de IPv4 e IPv6.

Son disímiles las primacías ofrecidas, de manera general, por las herramientas mencionadas anteriormente. Cada una tiene características que la hacen superior a la otra. Por ejemplo, Amarisoft LTE, una herramienta muy completa, que cuenta con la implementación de cada uno de los componentes y protocolos de LTE y que ofrece soporte de parte del equipo técnico ante cualquier dificultad que se pueda presentar durante su despliegue o estando ya productivo. Sin embargo, es necesaria la compra de licencia para hacer uso de éste software.

srsLTE, por su parte, es libre de costos de licencia, trae incorporado un simulador de UE para principiantes, así como el conjunto de componentes y protocolos descritos por la 3GPP para la implementación de un sistema 4G/LTE. Es una herramienta muy completa para proyectos investigativos. Una de las desventajas que se puede observar en srsLTE es el uso de un fichero para la gestión de sus datos en lugar de un sistema de base de datos.

Para un sistema inicial de pruebas utilizar un fichero no sería mayor inconveniente, pero para un sistema de entorno productivo no sería una solución adecuada ya que la cantidad de nodos que se conectarían a la red sería mucho mayor, así como la cantidad de componentes que se podrían integrar. La segunda desventaja es el hecho de tener todos los

componentes del EPC en un solo binario, impidiendo la separación física de estos durante un despliegue.

Por su parte, Mymo Wireless es un software que ya cuenta con una serie de clientes, hecho que aporta credibilidad a la estabilidad y calidad del producto. Sin embargo, esta herramienta requiere del pago de licencia para su uso. Además, no trae todos los componentes de una red LTE. Está más bien orientado a usos de seguridad, comunicación y ubicación, principalmente para el ámbito militar.

El Framework de Aplicaciones LTE de LabVIEW Communications, al igual que Amarisoft y Mymo Wireless, trae consigo la ventaja de la posibilidad de soporte de parte del proveedor ante cualquier inconveniente. Sin embargo, solo ofrece la implementación de capa física de LTE. Es una herramienta más enfocada a la investigación y a entornos controlados en laboratorios. Requiere del pago de licencia para su uso.

Finalmente, OAI, una herramienta de software que ofrece la implementación de la completa pila de protocolos de LTE. Es un software muy completo y bastante estable. También tiene sus desventajas, como el hecho de la estabilidad de sus componentes, debido a que es de código abierto y está en constante modificación por parte de la comunidad.

A pesar de ello, se decide hacer el despliegue de la red LTE utilizando éste sistema, ya que cuenta con características muy llamativas las cuales hacen interesarse en él, como el hecho de traer incorporados los principales componentes de una red LTE de forma independiente. Es libre de costos. Cuenta con una comunidad considerable de personas que aportan a su desarrollo y documentación. Es de código abierto y tiene continuas actualizaciones. La gestión de usuarios y componentes se hace mediante el uso de una base de datos en MySQL.

2.4. Trabajos relacionados

Debido al auge alcanzado por OSA con la herramienta Open Air Interface, han sido varios los trabajos basados en esta implementación.

Tal es el caso del trabajo “Open Air Interface-An Effective Emulation Platform for LTE

and LTE-Advanced” [13], presentado en 2014. En éste trabajo se prueba la efectividad de la herramienta para evaluar el rendimiento del sistema LTE y LTE-Advanced.

La abstracción PHY con la metodología central de mapeo Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) efectivo mejora la eficiencia de la plataforma y la capacidad de construir una emulación a gran escala con múltiples nodos. Se proporcionan la función clave de acceso aleatorio y la programación de la capa MAC y el procedimiento de llamada básica de la plataforma. [13]

Los resultados de validación que se muestran en éste documento ilustran que la plataforma de emulación está funcionando correctamente y que la abstracción PHY reduce significativamente el tiempo de emulación en función de la precisión. [13]

En éste documento, se proporciona la estructura de esta plataforma y la arquitectura del sistema de la emulación de múltiples máquinas. La plataforma implementa una secuencia de cuatro pasos para garantizar la diversidad de los escenarios de emulación.

Un diagrama de flujo muestra todo el procedimiento y brinda la información de cuándo y dónde se envía cada mensaje. Los resultados que se muestran en éste documento ilustran el funcionamiento correcto y la precisión de la abstracción de la capa física. De los resultados se desprende que la plataforma de emulación OAI LTE es realista y escalable para la nueva tecnología al agregar módulos clave.

Otro trabajo que cabe mencionar es el que lleva por título “Implementation of Open Air Interface Control Software for 4G Network” [14], publicado en 2017 por la IEEE.

En éste documento, se implementa un sistema para resolver las ineficiencias en la configuración de redes 4G mediante la combinación de tecnología Software Defined Networking (SDN) y OAI. Esto hace posible configurar y monitorear eNBs y UEs. Éste documento consta de dos partes. La parte de la estructura del sistema y una sección sobre el funcionamiento real del sistema implementado y cómo está configurado y monitoreado.

La estructura del sistema implementado en éste documento se divide en tres partes. La primera parte es un controlador que ordena la configuración de eNB y Core Network (EPC) implementada a través del software de OAI y monitorea la información al respecto.

La segunda parte es el Agente eNB que recibe el comando del controlador y actualiza la información de eNB al Core Network Storage. La parte final es un Agente de red central que recibe comandos del controlador, luego suscribe y libera al usuario a través de la tabla de usuarios de HSS. Core Network Agent también recibe información del eNB y actualiza la tabla eNB. [14]

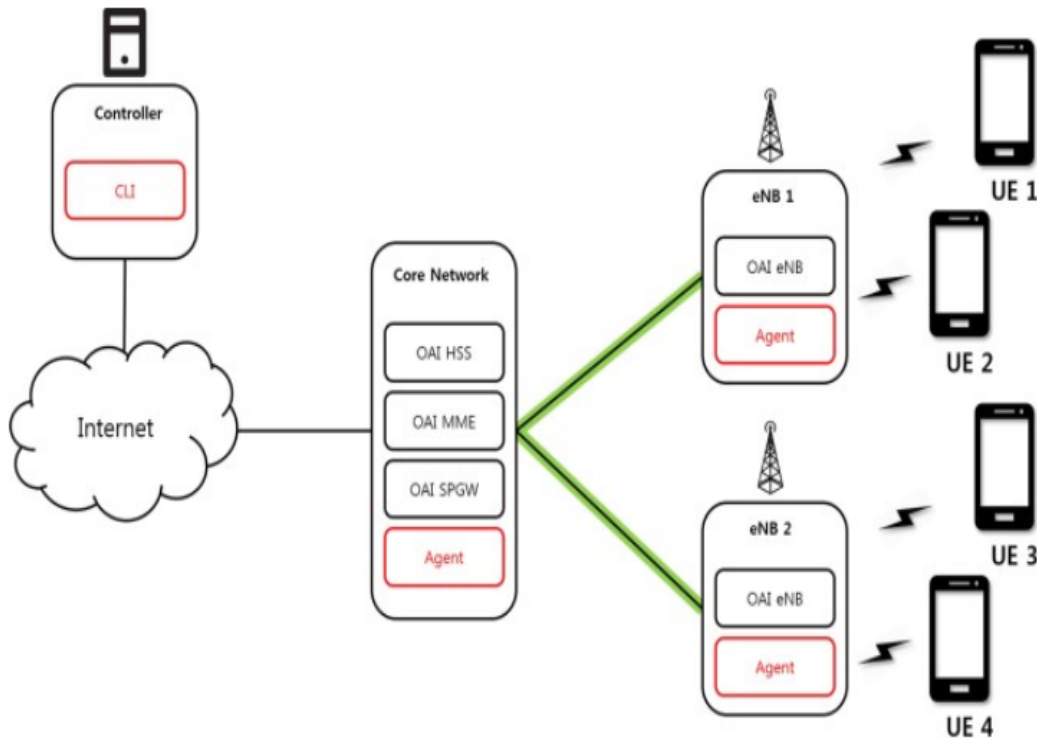


Figura 2.4: Arquitectura del sistema con OAI [14]

Como se muestra en la figura 2.4, varios UEs están conectados al eNB construido a través de OAI, y los eNB están conectados a la red central a través de túneles. A través del HSS y MME de la red principal, se realiza la gestión de perfil y la autenticación del UE. Además, la información de los eNBs se actualiza a través del agente de cada parte y la información se gestiona utilizando la tabla eNB en el HSS.

En éste documento, se implementa un sistema que configura y monitorea UE y eNB combinando la tecnología Software Defined Networking (SDN) con el sistema de red 4G construido con el software OAI. La información del eNB y del UE se actualiza y configura a

través de la comunicación entre el controlador centralizado implementado, el Core Network Agent y el agente eNB. Como resultado, se anticipa que éste sistema resolverá la ineficiencia de la configuración existente y resolverá el problema económico en consecuencia. [14]

El último trabajo a examinar, también publicado en la IEEE pero en 2016, se titula “Performance Study of LTE Experimental Testbed using Open Air Interface” [15].

En éste documento, se describe la implementación de OAI LTE enfatizando en el flujo de datos del plano de usuario. Se emula con éxito la transmisión por aire para un UE y una red eNB LTE que admite FDD Band 5 y TDD Band 38. También se realiza un perfil completo de OAI, en términos de tiempo de ejecución, en el flujo de datos del plano de usuario. [15]

El conjunto de pruebas experimentales LTE consta de una unidad de OAI UE, dos unidades de OAI eNB y una unidad de EPC / Home Subscriber Server (HSS). Todos ellos se ejecutan en máquinas separadas basadas en Linux.

Al principio, el OAI UE está conectado con dos unidades de OAI eNB utilizando el divisor / combinador de potencia de banda ancha para evitar interferencia de eNBs comerciales cercanas. El OAI EPC / HSS está conectado con dos unidades de OAI eNB mediante una interfaz Ethernet a través de un conmutador L2.

Ambos OAI eNB tienen una identidad de célula física (PCI, por sus siglas en inglés Physical Cell Identity) diferente, configurada usando Nid-cell en los archivos de configuración de eNB. La razón de tener una unidad adicional de eNB es que una está ejecutando FDD Banda 5 y otra unidad está ejecutando TDD Banda 38.

En éste trabajo se emula con éxito la LTE FDD Band 5 y TDD Band 38 usando OAI que comprende 1 UE y 2 eNBs. Para el escenario compatible con 3GPP, los eNBs están conectados al EPC que consiste en MME, HSS, SGW y PGW. [15]

También se propone un método de optimización simple para reducir el número de copias de datos en la pila de protocolos LTE y se logra ahorrar hasta 1.5ms para el tamaño máximo de PDCP Service Data Unit (SDU). [15]

Los trabajos expuestos anteriormente describen el correcto funcionamiento de la herra-

mienta Open Air Interface a partir de la usabilidad de esta. Se demuestra que los diversos componentes son capaces de conectarse entre sí correctamente y de hacer una correcta gestión de los recursos. A pesar de los diversos trabajos que existen hoy en día sobre éste software, ninguno ha contribuido al conocimiento del alcance de éste. El presente trabajo está enfocado no solo en probar la efectividad de una red LTE implementada con Open Air Interface y el equipo USRP B210, sino también su rendimiento en un entorno real haciendo un conjunto de pruebas a la señal y a los componentes de la herramienta para así realizar un análisis más íntegro de su comportamiento.

Capítulo 3

Estándar LTE

3.1. Introducción

Long Term Evolution (LTE) es uno de los últimos pasos en una serie avanzada de sistemas de telecomunicaciones móviles. Posiblemente, al menos para los sistemas basados en tierra, la serie comenzó en 1947 con el desarrollo del concepto de células por parte de Bell Labs, EE. UU. El uso de celdas permitió aumentar sustancialmente la capacidad de una red de comunicaciones móviles, al dividir el área de cobertura en celdas pequeñas, cada una con su propia estación base que opera en una frecuencia diferente. [16]

Al continuar la progresión tecnológica de las familias de tecnología Global System for Mobile Communications (GSM) y Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) dentro de 3rd Generation Partnership Project (3GPP), se puede ver que el sistema LTE completa la tendencia de expansión de la provisión de servicios más allá de las llamadas de voz hacia una interfaz aérea multiverso. [16]

Éste ya era un objetivo clave de UMTS y General Packet Radio Service (GPRS) / Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE) (tecnologías 2G y 3G, previas a LTE), pero LTE se diseñó desde el principio con el objetivo de evolucionar la tecnología de acceso por radio bajo el supuesto de que todos los servicios serían de conmutación de paquetes, en lugar de seguir el modelo de conmutación de circuitos de sistemas anteriores. [16]

LTE se acompaña de una evolución de los aspectos no radiales del sistema completo,

bajo el término Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, por sus siglas en inglés System Architecture Evolution) que incluye la red Evolved Packet Core (EPC). Juntos, LTE y SAE comprenden el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, por sus siglas en inglés Evolved Packet System), donde tanto la red central como el acceso de radio están totalmente conmutados por paquetes.

La tecnología UMTS también continuó desarrollándose sin embargo, LTE ha podido beneficiarse al evitar las limitaciones de la compatibilidad con versiones anteriores, lo que permite la inclusión de esquemas MIMO avanzados en el diseño del sistema desde el principio, y el uso de espectro altamente flexible construido alrededor de nuevos esquemas de acceso múltiple. [16]

3.2. Arquitectura LTE

La red LTE se basa en el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS). El EPS está compuesto por la red de acceso de radio conocida como E-UTRAN y una red central IP: el Evolved Packet Core (EPC). El EPS integra todas las aplicaciones en una arquitectura simplificada y común para proporcionar a los suscriptores servicios del operador como Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP) y navegación por Internet. [17]

El uso de un esquema de asignación de recursos de radio totalmente compartido maximiza el uso de estos. Evolved Packet System (EPS) admite la calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés Quality of Service) al configurar portadores de EPS para cada aplicación. Los portadores de EPS están asociados con un Identificador de clase de calidad (QCI, por sus siglas en inglés QoS Class Identifier) y una Prioridad de asignación y retención (ARP, por sus siglas en inglés Allocation and Retention Priority). [17]

El QoS Class Identifier (QCI) especifica la prioridad del servicio, el presupuesto de retraso de paquetes y la tasa aceptable de pérdida de paquetes. El ARP del portador se utiliza para decidir si el portador solicitado debe establecerse o no en caso de congestión de radio.

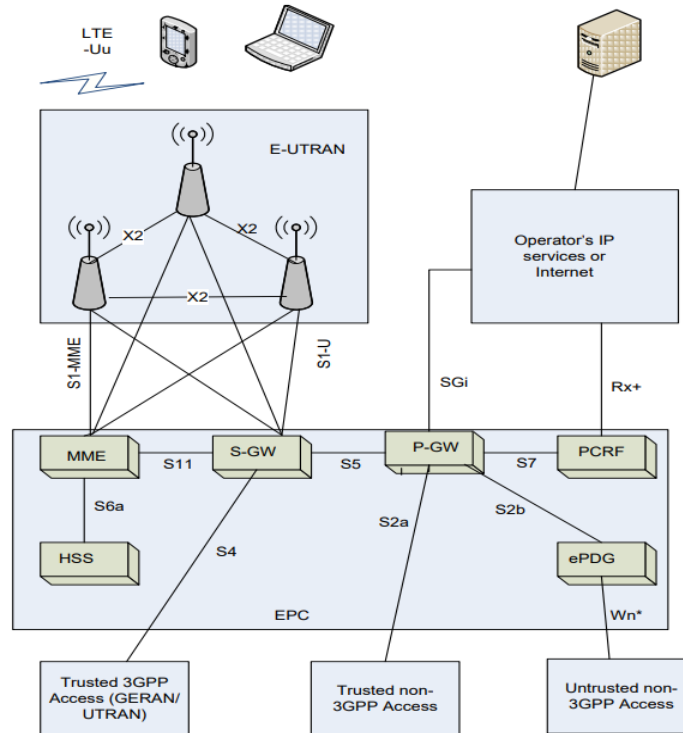


Figura 3.1: Arquitectura del EPS [17]

Como se ilustra en la figura 3.1, el EPS admite el interfuncionamiento con otras tecnologías inalámbricas 3GPP y no 3GPP.

La red también debe proporcionar suficiente seguridad y privacidad para el usuario y protección para la red contra el uso fraudulento. Esto se logra mediante varios elementos de red EPS que tienen diferentes roles.

La figura 3.1 muestra la arquitectura general de la red, incluidos los elementos de la red y las interfaces estandarizadas. En un nivel alto, la red está compuesta por el Core Network (CN) o EPC y la red de acceso E-UTRAN. [17]

Si bien el CN consta de muchos nodos lógicos, la red de acceso está compuesta esencialmente por un solo nodo, el Nodo B evolucionado (eNB, por sus siglas en inglés E-UTRAN Node B), que se conecta a los UE. [18]

El E-UTRAN maneja tareas relacionadas con la funcionalidad de radio del EPS, tales como codificación, técnicas de múltiples antenas, manejo de fuentes de radio, manejo de re-

transmisiones y programación. El EPC maneja tareas no relacionadas con la radio y admite redes de acceso heterogéneas como WiFi, WiMax e incluso tecnologías cableadas. [18]

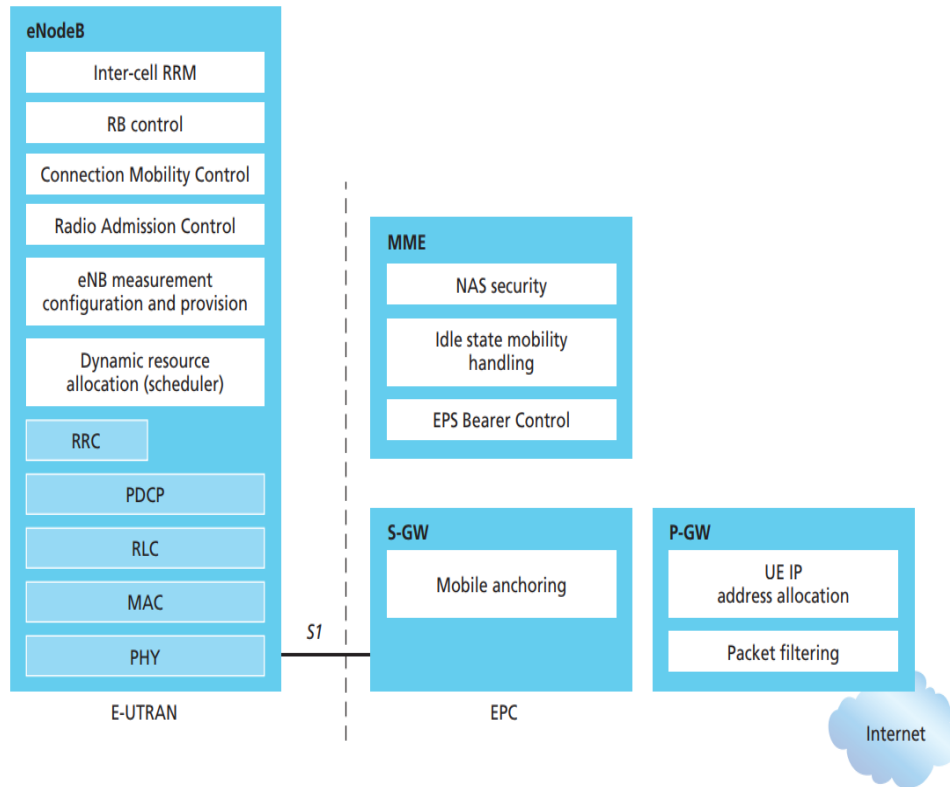


Figura 3.2: División funcional entre E-UTRAN y EPC [18]

Cada uno de estos componentes de la red está interconectado por medio de interfaces que están estandarizadas para permitir la interoperabilidad de múltiples proveedores. Esto brinda a los operadores de red la posibilidad de obtener diferentes elementos de red de diferentes proveedores. De hecho, los operadores de red pueden elegir en sus implementaciones físicas dividir o fusionar estos elementos lógicos de red dependiendo de consideraciones comerciales. La división funcional entre el EPC y E-UTRAN se muestra en la figura 3.2. [18]

3.3. Equipo de Usuario (UE)

El equipo de usuario (UE) es cualquier dispositivo utilizado directamente por un usuario final para comunicarse. Puede ser un teléfono de mano, un ordenador portátil equipado con un adaptador de banda ancha móvil, o cualquier otro dispositivo. Éste se conecta a una estación base o nodo eNB. Es un dispositivo que inicia todas las llamadas y es el dispositivo terminal en una red.

El UE también se comunica con el MME de la red EPC mediante señalización Non-access Stratum (NAS) para:

- Gestión de llamadas y movilidad
- Gestión de sesiones/identidad

3.3.1. Gestión de llamadas y movilidad

EPS Mobility Management (EMM) se refiere a los procedimientos relacionados con la movilidad a través de un acceso, autenticación y seguridad de E-UTRAN. Las especificaciones 3GPP hacen distinción entre los procedimientos comunes, específicos y de gestión de conexión de EMM[19]:

Los procedimientos comunes de EPS Mobility Management (EMM) se refieren a varios mecanismos iniciados por la red [19]:

- Reubicación del Global Unique Temporary Identifier (GUTI)
- Autenticación
- Control de modo de seguridad
- Identificación
- Información de EMM

Los procedimientos específicos de EMM son iniciados por UE. Estos procedimientos definen mecanismos de conexión / desconexión (a / desde el EPC). También presentan

el mecanismo de Tracking Area Update (TAU), que actualiza la ubicación del UE dentro de la red. Un UE inicia una actualización del área de seguimiento cuando detecta que ingresa en una nueva área de seguimiento. Los procedimientos específicos de EMM también definen la actualización periódica del área de seguimiento. [19]

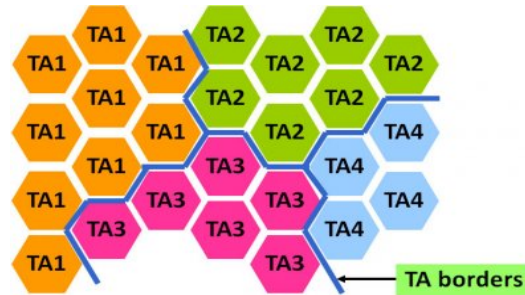


Figura 3.3: Tracking area list [19]

Evolved Packet System (EPS) también presenta el concepto de Tracking Area List (TAL), que permite la provisión de listas de Áreas de seguimiento en los UE (ver figura 3.3). Un UE no necesita iniciar una Tracking Area Update (TAU) si entra en un área de seguimiento que está incluida en su TAL. El aprovisionamiento de diferentes listas para los UE dentro de la red evita picos de señalización, por ejemplo, cuando todos los UE en un tren cruzan un límite de TA. [19]

Los procedimientos de administración de la conexión EMM proporcionan varias funciones para admitir la conexión del UE a la red [19]:

- Solicitud de servicio: iniciada por el UE para iniciar el establecimiento de la conexión de señalización NAS.
- Paginación: iniciada por la red en caso de señalización NAS de enlace descendente para indicar al UE que inicie una solicitud de servicio.
- Transporte de mensajes NAS: utilizado para SMS (respaldo CS).
- Transporte genérico de mensajes NAS: varias otras aplicaciones (por ejemplo, LCS).

3.3.2. Gestión de sesiones/identidad

Evolved Packet System (EPS) Session Management ofrece soporte para el establecimiento y manejo de datos de usuario en el NAS. En EPS, se introducen dos conceptos para definir la conectividad IP entre un UE y una red de paquetes de datos (PDN, por sus siglas en inglés Packet Data Networks): Conexión PDN y Portador de EPS [19].

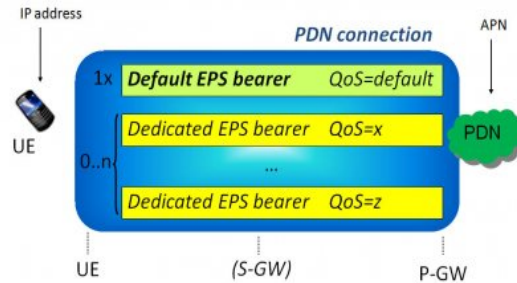


Figura 3.4: Conexión PDN y portador EPS [19]

Como se muestra en la figura 3.4, una conexión PDN está compuesta por un portador EPS predeterminado y posiblemente otros adicionales llamados portadores dedicados.

Se crea un portador predeterminado al establecer una conexión PDN. Si un servicio (por ejemplo, transmisión de video) requiere un manejo específico en términos de calidad de servicio (QoS), se pueden establecer portadores dedicados. [19]

Dentro de una conexión PDN, todos los portadores de EPS comparten una misma dirección IP de UE y un Access Point Name (APN). EPS admite múltiples conexiones PDN simultáneas. Por ejemplo, un UE puede tener una conexión PDN a Internet (con solo un portador EPS predeterminado) y una al IP Multimedia Subsystem (IMS) del operador (con portadores dedicados adicionales, si el servicio lo requiere). [19]

Los procedimientos de EPS Session Management (ESM) se agrupan en dos categorías [19]:

- Procedimientos de portador de EPS, que se inician en la red y proporcionan mecanismos para la activación, desactivación o modificación de portadores de EPS.
- Procedimientos relacionados con transacciones, que son iniciados por UE y proporcionan mecanismos para solicitudes de establecimiento y desconexión de conexión

PDN, solicitudes de asignación y modificación de recursos al portador y solicitudes de liberación.

3.3.3. Categorías de UE

En la práctica, es importante reconocer que el mercado para los UE es amplio y diverso, y por lo tanto, es necesario que LTE admita una gama de categorías de UE con diferentes capacidades para satisfacer diferentes segmentos del mercado. Cuanto más amplio sea el rango de categorías de UE admitidas, más cercana será la correspondencia que se puede hacer entre la funcionalidad admitida de un UE y los requisitos de un segmento de mercado particular. [16]

Sin embargo, el soporte para una gran cantidad de categorías de UE también tiene inconvenientes en términos de la sobrecarga de señalización requerida para cada UE para informar a la red sobre su funcionalidad admitida, así como el aumento de los costos debido a la pérdida de economías de escala y la mayor complejidad para probar el interoperabilidad de muchas configuraciones diferentes. [16]

Las cinco categorías de Release 8 UE se resumen en la tabla 3.1. Se puede ver que la categoría más alta de Release 8 LTE UE posee capacidades de velocidad de datos pico que superan con creces los objetivos de LTE Release 8. [16]

Categoría de UE	Velocidad Máxima de Datos de Enlace Descendente	Número de Flujo de Datos de Enlace Descendente	Velocidad Máxima de Datos de Enlace Ascendente	Soporte 64 QAM en Enlace Ascendente
1	10.3 Mbit/s	1	5.2 Mbit/s	No
2	51.0 Mbit/s	2	25.5 Mbit/s	No
3	102.0 Mbit/s	2	51.0 Mbit/s	No
4	150.8 Mbit/s	2	51.0 Mbit/s	No
5	302.8 Mbit/s	4	75.4 Mbit/s	Sí

Tabla 3.1: Categorías de UE [16]

3.3.4. Identidad del UE

Las redes LTE son redes IP donde los terminales de usuario (UE) comparten los recursos de red y radio. La red LTE asigna un identificador único a cada UE. Cada equipo LTE por lo tanto, tiene su propio identificador denominado User Equipment ID.

PLMN-ID

Están constituidas y gestionadas por operadores de red. El Public Land Mobile Network (PLMN) ID identifica a un operador de una red y tiene un uso global. Esto implica que identifica de forma única en todo el mundo al operador de red. Como se ve en la figura 3.5, el PLMN ID esta compuesto de un Mobile Country Code (MCC) y un Mobile Network Code (MNC) donde MCC identifica al país donde la red esta localizada y MNC identifica al operador de la red y es asignada para cada país. Están constituidas y gestionadas por operadores de red. [20]

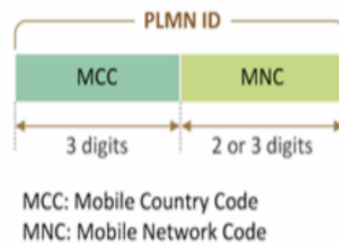


Figura 3.5: Formato del identificador PLMN ID [20]

IMSI

International Mobile Subscriber Identity (IMSI) es un número único que identifica de forma global a un suscriptor móvil. El IMSI esta compuesta del PLMN ID y del Mobile Subscriber Identification Number (MSIN) asignado por el operador. El tamaño máximo del MSIN es 15 dígitos (ver figura 3.6). [20]

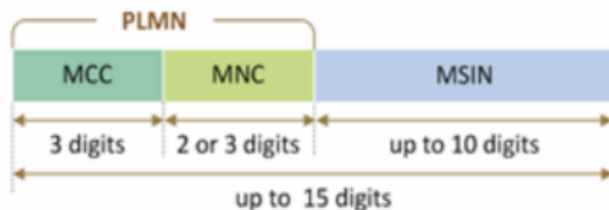


Figura 3.6: Formato del IMSI[20]

El IMSI identifica a un suscriptor móvil dentro del PLMN. En la figura 3.7 se observa que el IMSI es un valor permanente en el Universal Subscriber Identity Module (USIM), en el Home Subscriber Server (HSS) y en el Subscription Profile Repository (SPR), y tiene un valor temporal para MME, Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network Gateway (P-GW) y Policy Control and Charging Rules Function (PCRF).

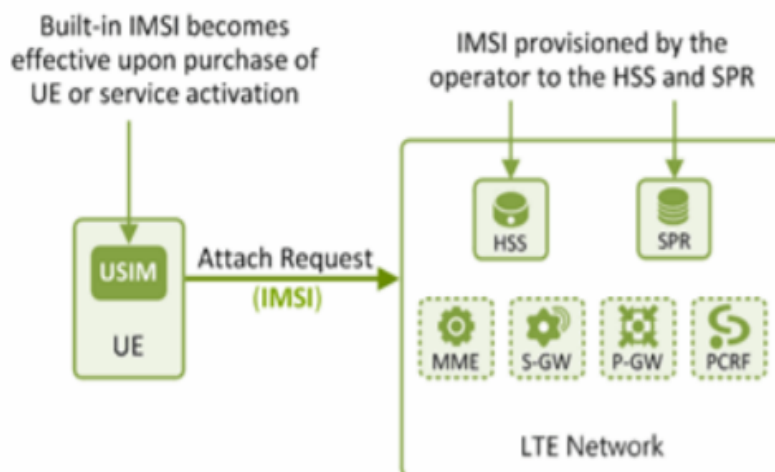


Figura 3.7: Asignación del IMSI[20]

El proceso de obtención del IMSI se describe con las siguientes etapas[20]:

1. Cuando un usuario compra un Universal Subscriber Identity Module (USIM) y se suscribe a una red, se le asigna el IMSI.
2. El IMSI es almacenado en el USIM dentro del móvil.

3. El IMSI es facilitado por el operador al HSS y al Subscription Profile Repository (SPR).
4. Una vez asignado, el UE envía su IMSI cuando se conecta a la red.
5. El MME, una vez recibido el IMSI, establece el bearer por defecto.

GUTI

Para mejorar la seguridad apareció el Global Unique Temporary Identifier (GUTI), valor que es asignado al UE por el MME y es utilizado en vez del IMSI. Para asignar el GUTI se realizan las siguientes acciones [20]:

1. La primera vez que se conecta el UE a la red usa su IMSI para solicitar acceso.
2. El operador asigna el identificador GUTI al UE.
3. El UE utiliza, a partir de éste momento, el GUTI en vez del IMSI para acceder a la red.
4. Que el UE utilice el IMSI o GUTI para acceder a la red, depende de que valor es seteado en el Temporary Identifier (TIN).
5. El valor definido en el TIN será el GUTI en el caso de que el proceso de conexión a la red o el TAU sea satisfactorio.

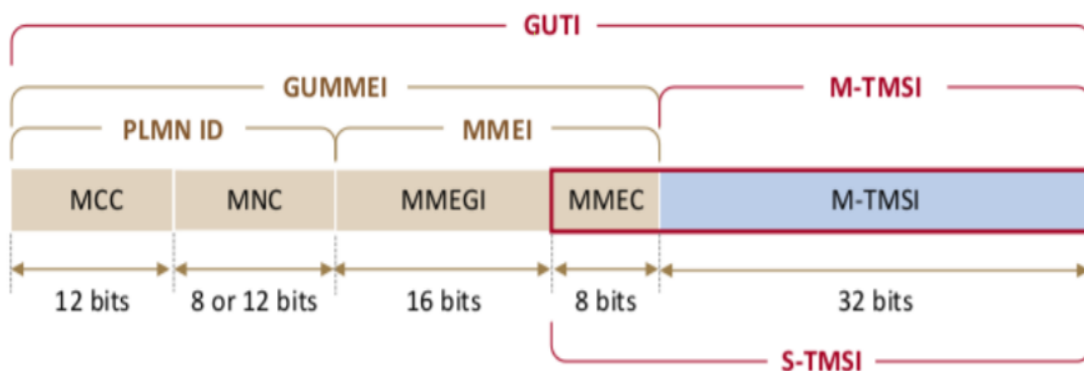


Figura 3.8: Formato del GUTI [20]

Como se muestra en la figura 3.8, el GUTI se compone de diferentes segmentos separados, cada uno de los cuales identifica un elemento de la red LTE [20]:

- Un operador de red puede tener uno o más de un grupo MME, compuesto de múltiples MMEs.
- Un MMEI es un identificador de MME. El MMEI está compuesto de un MME Group Identifier (MMEGI), que representa al grupo MME, y de un MME Code (MMEC) que representa al MME dentro del grupo.
- El Globally Unique MME Identifier (GUMMEI) está compuesto del PLMN ID y el MME ID.
- El MME Temporary Mobile Subscriber Identity (M-TMSI) es un valor único asignado al suscriptor por el MME. Con éste valor se pretende mantener la confidencialidad del suscriptor. Éste valor es único dentro del MME.
- El GUTI está compuesta de un GUMMEI y de un M-TMSI.
- El Serving Temporary Mobile Subscriber Identity (S-TMSI) está compuesto de MMEC y un M-TMSI, y es utilizado para identificar a un UE dentro de un grupo MME. Al ser más corto que el GUTI permite mejorar la eficiencia de transmisión en los enlaces radio.

C-RNTI

El Cell Radio Network Temporary Identifier (C-RNTI) es un identificador utilizado para distinguir equipos de usuario diferentes dentro de una celda. El C-RNTI es asignado al UE por el eNB. El C-RNTI permite identificar de forma única un UE dentro de una celda del eNB siendo éste valor solo válido dentro de esa celda. [20]

En el momento que el UE se mueve a una celda diferente, un nuevo C-RNTI es asignado al UE. El eNB es responsable de asignar los recursos radio a los UE asignados a él. El eNB notifica a cada UE que puede utilizar el canal radio en el próximo Transmission Time Interval (TTI) enviando un mensaje de broadcast con el C-RNTI mediante el Physical

Downlink Channel (PDCH). El UE cuyo C-RNTI corresponde al mensaje de broadcast, puede utilizar el canal radio en el próximo TTI. [20]

3.3.5. Interfaz Uu

La interfaz Uu proporciona el punto de referencia para la interfaz de radio entre el UE y el eNB. Abarca el plano de control y el plano de usuario. La conexión de señalización a través de la interfaz Uu es la conexión de señalización de Control de recursos de radio (RRC, por sus siglas en inglés Radio Resource Control), que se apila en las capas del Protocolo de Convergencia de Datos por Paquetes (PDCP, por sus siglas en inglés Packet Data Convergence Protocol), Control de enlace de radio (RLC, por sus siglas en inglés Radio Link Control) y Control de acceso a medios (MAC). Las capas PDCP, RLC y MAC constituyen los protocolos del plano de usuario para la interfaz aérea. [18]

3.4. Componentes del E-UTRAN

La red de acceso de LTE, E-UTRAN, consiste simplemente en una red de eNB, como se ilustra en la figura 3.9. Para el tráfico normal de usuarios (en oposición a la difusión), no hay un controlador centralizado en E-UTRAN; por lo tanto, se dice que la arquitectura E-UTRAN es plana. [18]

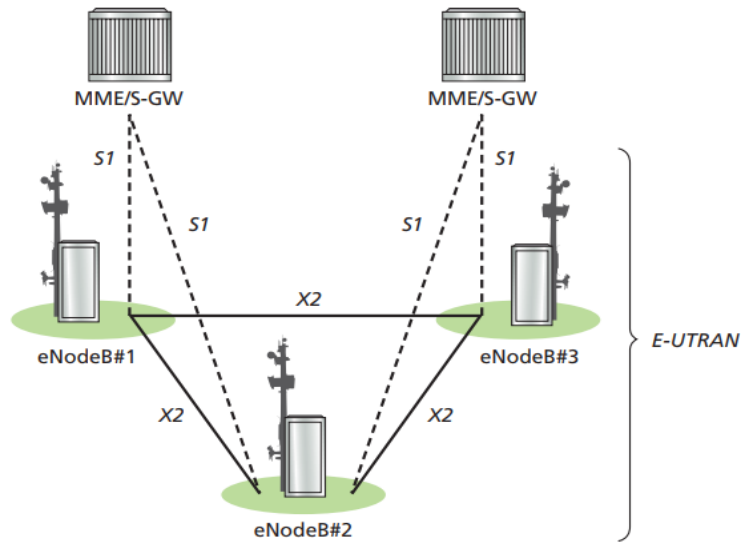


Figura 3.9: Arquitectura del E-UTRAN [18]

El E-UTRAN es responsable de todas las funciones relacionadas con la radio, que se pueden resumir brevemente como [18]:

- Gestión de recursos de radio (RRM): cubre todas las funciones relacionadas con los portadores de radio, como el control de portador de radio, el control de admisión de radio, el control de movilidad de radio, la programación y la asignación dinámica de recursos a los UE tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente.
- Compresión de encabezado: esto ayuda a garantizar un uso eficiente de la interfaz de radio al comprimir los encabezados de los paquetes IP que de otro modo podrían representar una sobrecarga significativa, especialmente para paquetes pequeños como VoIP.
- Seguridad: todos los datos enviados a través de la interfaz de radio están encriptados.
- Conectividad al EPC: consiste en la señalización hacia MME y la ruta del portador hacia el S-GW.

3.4.1. Interfaces

La interfaz **S1** conecta el E-UTRAN al EPC. El S1-MME conecta el eNB al segmento de control del EPC, el MME, mientras que el S1-U conecta el eNB al segmento del plano de usuario a través del S-GW. La interfaz S1-MME proporciona una entrega de datos confiable y garantizada mediante el uso de Stream Control Transmission Protocol (SCTP) sobre IP. [17]

Es responsable de procedimientos como la configuración / liberación del portador EPS, señalización de transferencia, procedimiento de paginación y procedimiento de transporte NAS. Por otro lado, el S1-U se encarga de entregar datos de usuario entre el eNB y S-GW. Consiste en GTP-U sobre UDP / IP y proporciona entrega de información no garantizada. [17]

La interfaz **X2** es la interfaz entre eNBs. Sus funcionalidades se dividen en plano de control y plano de usuario. La interfaz del plano de usuario X2 proporciona el reenvío de paquetes de datos almacenados cuando el UE se mueve de un eNB a otro. [17]

La interfaz del plano de control X2 es una interfaz de señalización confiable, que admite una serie de funciones y procedimientos entre eNB. Éstas características incluyen la gestión del equilibrio de carga y la información relacionada con el handover. [17]

3.5. Componentes del EPC

El EPC está compuesto por varias entidades funcionales que son responsables del control general del UE (Equipo de usuario) y el establecimiento de portadores.

El **MME(Movility Management Entity)** es el nodo de control principal para la red de acceso de radio. Maneja funciones relacionadas con la gestión de portadores, lo que implica procedimientos de señalización utilizados para configurar el contexto de paquetes de datos y negociar parámetros asociados como la QoS. MME también maneja procedimientos de seguridad, que implican la autenticación del usuario (seguridad de Access Stratum), así como la generación e integración de algoritmos de cifrado y protección de integridad (seguridad de Non-Access Stratum). [17]

Otra función importante del MME es la gestión de ubicación de UE: rastrea y mantiene la ubicación actual de UE. Otras funcionalidades y características de MME incluyen: facilitar las capacidades de red de optimización automática (SON, por sus siglas en inglés self-organizing Network) para E-UTRAN y EPC, alta disponibilidad para ayudar a garantizar la satisfacción del cliente, la gestión de la congestión, el intercambio de carga, la agrupación de MME, las transferencias intra-MME, etc. [17]

El Serving Gateway (S-GW) es el nodo del plano de usuario que conecta la E-UTRAN al EPC. Es compatible con la movilidad intra E-UTRAN sin problemas, así como con otras tecnologías 3GPP como 2G / GSM y 3G / UMTS. También retiene información sobre los portadores de EPS cuando el UE está en estado inactivo. Además, realiza algunas funciones administrativas que implican la interceptación legal y la contabilidad de los datos del usuario. [17]

El Packet Data Network Gateway (P-GW) conecta el UE a las redes externas de datos en paquetes (PDN, por sus siglas en inglés Packet Data Networks) y actúa como el enrutador predeterminado de la UE a Internet. El PGW es responsable de asignar direcciones IP a dispositivos móviles. Utiliza las plantillas de flujo de tráfico (TFT) para filtrar los paquetes de usuario de enlace descendente en diferentes portadores basados en QoS. P-GW actúa como agente de casa móvil (HA) para soportar la movilidad sin problemas del UE entre LTE y redes confiables que no son 3GPP como Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000) y WiMax. Otras funciones del P-GW incluyen: aplicación de políticas (se aplica a las reglas definidas por los operadores para la asignación y uso de recursos), soporte de carga e interceptación legal del tráfico de usuarios. [17]

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF) es un componente de software que accede de manera eficiente a la base de datos de suscriptores y otras funciones especializadas para la toma de decisiones de control de políticas. También controla la funcionalidad de carga basada en el flujo en la Función de Control de Política (PCEF), que reside en el P-GW. [17]

El Home Subscriber Server (HSS) funciona como la base de datos para almacenar datos de suscripción como el perfil de QoS e información sobre los Packet Data Networks

(PDN) externos a los que puede acceder el suscriptor y el MME al que está conectado actualmente el UE. Además, el HSS puede albergar el centro de autenticación (AUC), que genera los vectores para las claves de autenticación y seguridad. [17]

El **evolved Packet Data Gateway (ePDG)** es responsable del interfuncionamiento entre el EPC y las redes no confiables que no son 3GPP que requieren acceso seguro, como WiFi, metro LTE y redes de acceso de femtoceldas. Realiza importantes funciones de seguridad, autenticación y autorización de túnel, encapsulación IPsec y desencapsulación de paquetes. La interceptación legal en el ePDG es muy importante ya que están involucrados accesos no confiables. [17]

3.5.1. Interfaces

Las interfaces que interconectan los elementos funcionales de la red central incluyen:

- Interfaz S2b: proporciona al plano del usuario control relacionado y soporte de movilidad entre el ePDG y el P-GW. Se basa en el proxy IP móvil. [17]
- Interfaz S5: esta interfaz proporciona túneles de plano de usuario y gestión de túneles entre S-GW y P-GW. Se utiliza para la reubicación de SGW debido a la movilidad del UE y si el S-GW necesita conectarse a un P-GW no asignado para la conectividad PDN requerida. [17]
- Interfaz S6a: permite la transferencia de datos de suscripción y autenticación para autenticar / autorizar el acceso del usuario al sistema evolucionado (interfaz AAA) entre MME y HSS. [17]
- Interfaz S7: Proporciona la transferencia de la política (QoS) y las reglas de cobro de la PCRF a la Función de cumplimiento de políticas y carga (PCEF) en el P-GW. Ésta interfaz se basa en la interfaz Gx heredada. [17]
- Interfaz S8: punto de referencia que proporciona el usuario y el plano de control entre el Serving GW en la Red móvil de visitantes de tierra pública (VPLMN) y el P-GW en el Home PLMN (HPLMN). S8 es la variante de control de S5. [17]

- Interfaz S11: éste es el punto de referencia entre MME y S-GW. Gestiona sesiones, portadores predeterminados y dedicados. Agregue reglas para gestionar portadores dedicados. Realice la transferencia (handover) de UE. [17]
- Interfaz S10: es la encargada de conectar componentes MME entre sí. Se utiliza durante las actualizaciones del área de seguimiento entre MME (TAU) y las entregas. El nuevo MME puede contactar al antiguo MME que el usuario había registrado para recuperar datos sobre identidad (IMSI), información de seguridad (contexto de seguridad, vectores de autenticación) y portadores SAE activos (puertas de enlace PDN para contactar, QoS, etc.) [17]

3.6. Protocolos de la arquitectura

En la interfaz radio se utiliza una pila de protocolos específica que se puede dividir en 2, un plano de usuario y un plano de control. En esta interfaz se establecen canales para: el envío de paquetes IP de usuarios los cuales se denominan Dedicated Radio Bearers (DRBs) y para señalización, denominados Signalling Radio Bearers (SRBs).

3.6.1. Plano de usuario

Un paquete IP para un UE se encapsula en un protocolo específico de EPC y se canaliza entre el P-GW y el eNB para su transmisión al UE. Se utilizan diferentes protocolos de tunelización en diferentes interfaces. Se utiliza un protocolo de túnel específico de 3GPP llamado Protocolo de túnel GPRS (GTP, por sus siglas en inglés GPRS Tunneling Protocol) sobre las interfaces del CN: S1 y S5. [18]

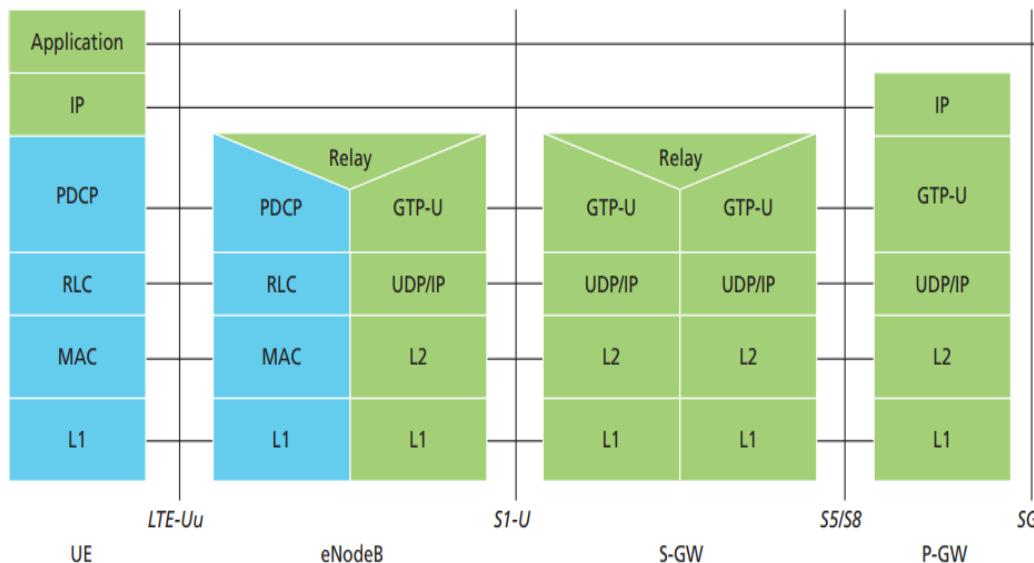


Figura 3.10: Pila de protocolos del plano de usuario del E-UTRAN [18]

La pila de protocolo de plano de usuario del E-UTRAN se muestra en azul en la figura 3.10, que consiste en las subcapas de Protocolo de Convergencia de Datos de Paquete (PDCP, por sus siglas en inglés Packet Data Convergence Protocol), Control de Enlace de Radio (RLC) y Control de Acceso Medio (MAC) que terminan en el eNB en el lado de la red. [18]

3.6.2. Plano de control

La pila de protocolos para el plano de control entre el UE y MME se muestra en la figura 3.11. La región azul de la pila indica los protocolos Access Stratum (AS). Las capas inferiores realizan las mismas funciones que para el plano de usuario con la excepción de que no existe una función de compresión de encabezado para el plano de control. [18]

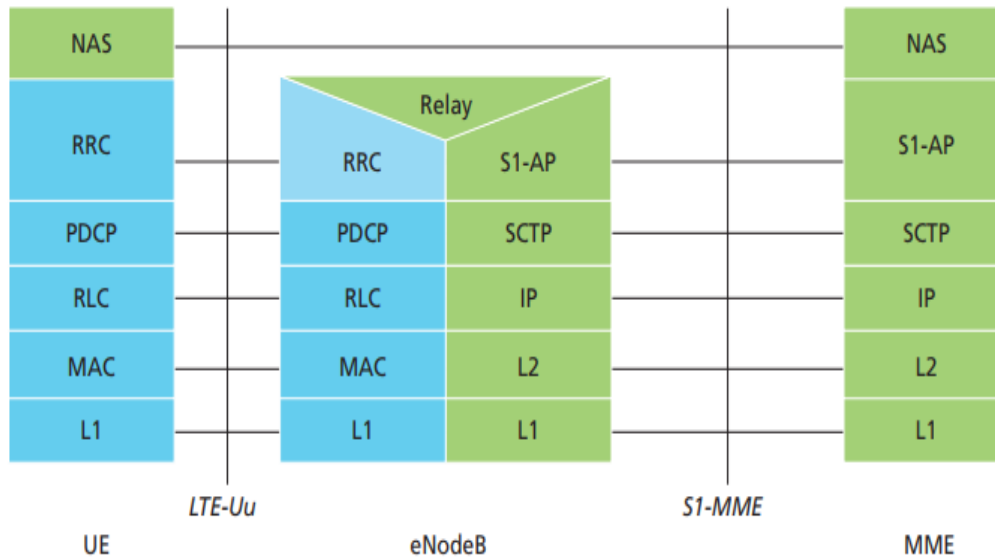


Figura 3.11: Pila de protocolos del plano control [18]

El protocolo RRC se conoce como capa 3 en la pila de protocolos Access Stratum (AS). Es la función principal de control en el AS, siendo responsable de establecer los portadores de radio y configurar todas las capas inferiores utilizando la señalización RRC entre el eNB y el UE. [18]

Las pilas de protocolo de control y plano de usuario sobre la interfaz X2 son las mismas que para la interfaz S1, con la excepción de que X2-AP se sustituye por S1-AP. Esto también reafirma que la elección de la versión IP y la capa de enlace de datos son completamente opcionales. El uso de la misma estructura de protocolo en ambas interfaces proporciona ventajas como la simplificación de la operación de reenvío de datos. [18]

Capítulo 4

Herramientas

4.1. Introducción

El presente capítulo está orientado al estudio de las herramientas que se utilizan para el desarrollo de éste trabajo. Comienza con el estudio de la herramienta de hardware. Se realiza una introducción a qué son los equipos SDR. Luego se habla sobre los equipos USRP B210 y sus características así como del software que se utiliza para controlar éste dispositivo.

La segunda herramienta a analizar es la de software: Open Air Interface. Se realiza una introducción al sistema, se plantean los objetivos y se definen las características de software y hardware.

4.2. USRP B210

4.2.1. Introducción a SDR

El siglo XX vio la explosión de la radio definida por hardware (HDR) como un medio para comunicar todas las formas de información (audible, visual y generada por máquinas) a grandes distancias. La mayoría de las radios son hardware definido con poco o ningún control de software; tienen funciones fijas para la mayoría de los artículos de consumo para la recepción de transmisiones. Tienen una vida corta y están diseñados para ser descartados

y reemplazados.

La radio definida por software utiliza dispositivos digitales programables para realizar el procesamiento de señal necesario para transmitir y recibir información de banda base en radiofrecuencia. Los dispositivos como los procesadores de señal digital (DSP) y los arreglos de compuerta programables en campo (FPGA, por sus siglas en inglés Field-Programmable Gate Array) usan software para proporcionarles la funcionalidad de procesamiento de señal requerida. Ésta tecnología ofrece una mayor flexibilidad y una vida útil del producto potencialmente más larga, ya que la radio se puede actualizar de manera muy rentable con el software. [21]

Un desafío importante para la radio definida por software es igualar las eficiencias de las soluciones puramente de hardware al tiempo que proporciona la flexibilidad y la inteligencia que el software puede ofrecer. Las eficiencias pueden medirse por el costo por bit de información, la potencia consumida por bit de información y el volumen físico consumido por bit de información. Además, el usuario no necesitará ni querrá conocer la tecnología subyacente de la radio, pero seguirá exigiendo una mayor eficiencia, más flexibilidad y una mayor inteligencia. [21]

Al mismo tiempo, el desarrollador de aplicaciones de radio de software querrá estar protegido de los detalles del hardware de procesamiento de señales y computación y completar todo el desarrollo en un entorno unificado utilizando un solo lenguaje de alto nivel.

Una arquitectura de radio ideal definida por software

La arquitectura de radio de software ideal, que se muestra en la figura 4.1, consiste en un subsistema digital y un subsistema analógico simple. Las funciones analógicas están restringidas a aquellas que no se pueden realizar digitalmente, es decir, antena, filtrado de RF, combinación de RF, preamplificación de recepción, amplificación de potencia de transmisión y generación de frecuencia de referencia.

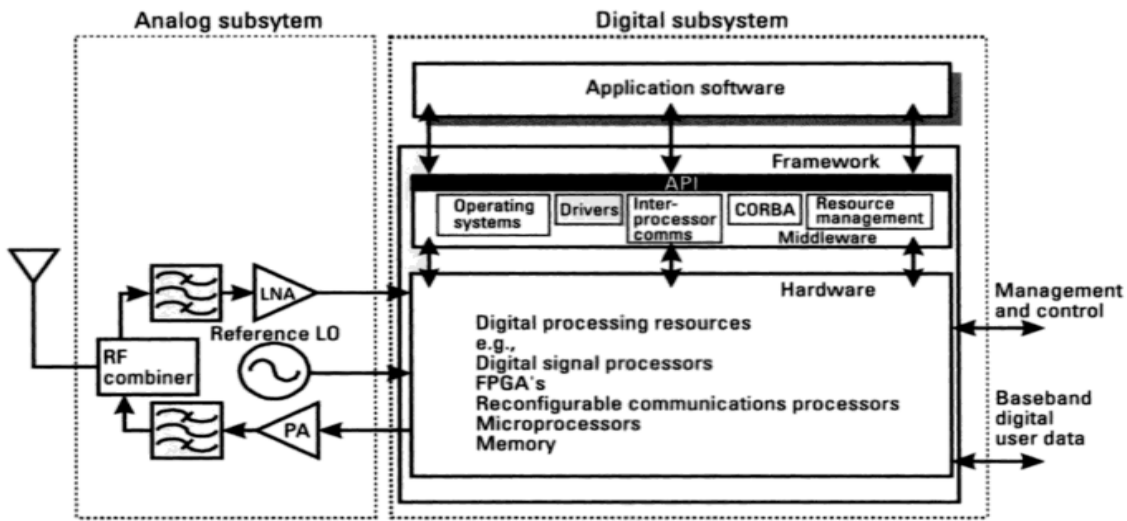


Figura 4.1: Arquitectura SDR ideal [21]

La arquitectura ubica la etapa de conversión analógica lo más cerca posible de la antena, en éste caso antes del amplificador de potencia (PA) en el transmisor y después del amplificador de bajo ruido (LNA) en el receptor. La separación de portadoras y la conversión de frecuencia ascendente / descendente a banda base se realiza mediante los recursos de procesamiento digital. De manera similar, las funciones de codificación y modulación de canal se realizan digitalmente en la banda base por los mismos recursos de procesamiento. [21]

El software para la arquitectura ideal está en capas, por lo que el hardware se abstrae completamente del software de la aplicación. Una capa de middleware logra esta funcionalidad envolviendo los elementos de hardware en objetos y brindando servicios que permiten que los objetos se comuniquen entre sí a través de una interfaz estándar, por ejemplo, Common Object Request Broker Architecture (CORBA). Middleware incluye el sistema operativo, controladores de hardware, gestión de recursos y otro software no específico de la aplicación. La combinación de hardware y middleware a menudo se denomina marco. [21]

4.2.2. Introducción a USRP

El Dispositivo de Radio Definido por Software USRP es un dispositivo de RF reconfigurable que incluye una combinación de procesadores basados en host, Field-Programmable Gate Array (FPGA) y terminales frontales de RF. El Dispositivo de Radio Definido por Software USRP incluye opciones que van desde opciones de menor costo con personalidades fijas de FPGA hasta radios de alta gama con un FPGA grande y abierto y un ancho de banda amplio e instantáneo. Estos dispositivos se pueden usar para aplicaciones como entradas múltiples, salidas múltiples (MIMO) y bancos de pruebas LTE/WiFi, SIGINT y sistemas de radar. [22]

La filosofía de diseño básica detrás del Universal Software Radio Peripheral (USRP) ha sido hacer todo el procesamiento específico de la forma de onda, como la modulación y la demodulación, en la CPU del host. Todas las operaciones de propósito general de alta velocidad, como la conversión digital ascendente y descendente, la destrucción y la interpolación, se realizan en el FPGA. [23]

El verdadero valor de la Universal Software Radio Peripheral (USRP) está en lo que permite a los ingenieros y diseñadores crear con un bajo presupuesto y con un mínimo de esfuerzo. Una gran comunidad de desarrolladores y usuarios ha contribuido a una base de código sustancial y ha proporcionado muchas aplicaciones prácticas para el hardware y el software. La poderosa combinación de hardware flexible, software de código abierto y una comunidad de usuarios experimentados lo convierten en la plataforma ideal para el desarrollo de su software de radio. [23]

La figura 4.2 muestra las distintas capas de software que intervienen en la comunicación desde un host hacia un dispositivo USRP. En la capa superior se listan un conjunto de ejemplos de aplicaciones capaces de trabajar con equipos USRP entre las que aparece, la ya mencionada, Open Air Interface. Éstas aplicaciones hacen uso de los elementos de la capa inmediata inferior UHD Driver/RFNoC.

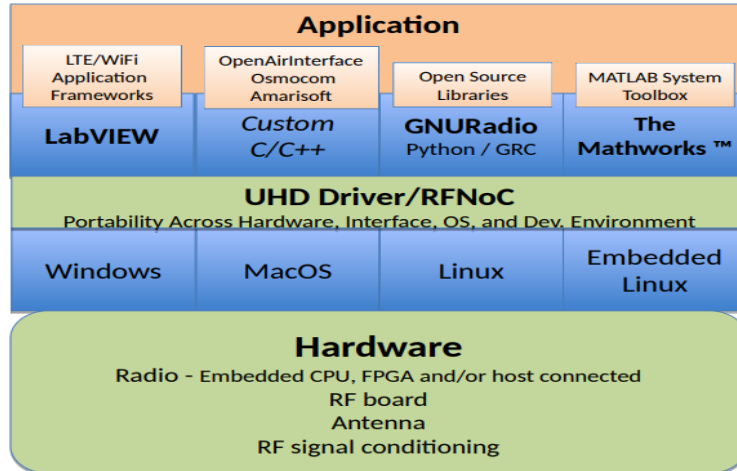


Figura 4.2: Ecosistema de software USRP [24]

RF Network on a Chip (RFNoC) es una herramienta de procesamiento heterogéneo distribuido en red con un enfoque en habilitar el procesamiento FPGA en dispositivos USRP, mientras que la API de software USRP Hardware Driver (UHD) admite el desarrollo de aplicaciones en todos los productos USRP SDR.

En éste trabajo, el software Open Air Interface hace uso del componente UHD por lo que más adelante, en el presente capítulo, se hablará de la misma.

4.2.3. USRP B210

El hardware USRP B210 (figura 4.3) cubre frecuencias que van de los 70 MHz a los 6 GHz. Tiene un FPGA Spartan6 y conectividad USB 3.0. Ésta plataforma permite experimentar con una amplia gama de señales, incluidas transmisiones de FM y TV, celulares, Wi-Fi y más. El USRP B210 ofrece un total de dos canales de recepción y dos de transmisión e incluye una fuente de alimentación externa.[25]

Usa un RFIC de Analog Devices para ofrecer una plataforma de experimentación de RF rentable, y pueden transmitir hasta 56 MHz de ancho de banda instantáneo a través de un bus USB 3.0 (ver figura 4.3) de alto ancho de banda en conjuntos de chips USB 3.0 seleccionados (compatible con USB 2.0). Debido a que están habilitados con el USRP Hardware Driver (UHD), los usuarios pueden desarrollar sus aplicaciones y portar sus

diseños sin problemas a USRP integrados o de alto rendimiento, como el USRP X310 o el USRP E310. [25]

La interfaz RF integrada en el USRP B210 está diseñada con el nuevo Analog Devices AD9361, un transceptor de conversión directa de un solo chip, capaz de transmitir hasta 56 MHz de ancho de banda de RF en tiempo real. El B210 usa ambas cadenas de señal del AD9361, proporcionando una capacidad MIMO coherente. [25]

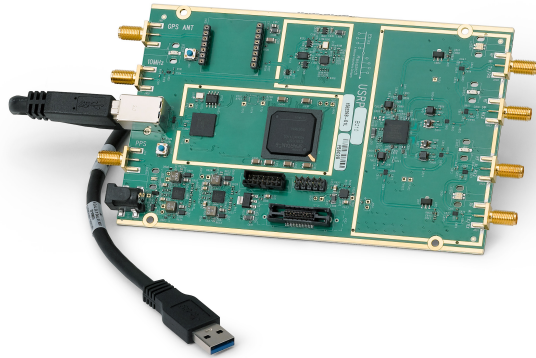


Figura 4.3: Tarjeta USRP B210 [25]

El procesamiento de señal a bordo y el control del AD9361 se realiza mediante un FPGA Spartan6 XC6SLX150 conectado a una PC host usando SuperSpeed USB 3.0. El rendimiento en tiempo real de USRP B210 se compara con 61.44MS / s en cuadratura, proporcionando los 56 MHz de ancho de banda de RF instantáneo a la PC host para procesamiento adicional usando aplicaciones que usan la API UHD. [25]

4.2.4. USRP Hardware Driver (UHD)

USRP Hardware Driver (UHD) es un controlador multiplataforma de código abierto que puede ejecutarse en Windows, Linux y MacOS. Proporciona una API común, que es utilizada por varios marcos de software, como GNU Radio. Con éste soporte de software,

los usuarios pueden colaborar con una comunidad de estudiantes y profesionales que han adoptado productos USRP para su desarrollo. [26]

Como miembro de esta comunidad, los usuarios pueden encontrar asistencia para el desarrollo de aplicaciones, compartir conocimientos para mejorar la tecnología SDR y contribuir con sus propias innovaciones. [26]

La API de software USRP Hardware Driver(UHD) admite el desarrollo de aplicaciones en todos los productos USRP SDR. El uso de una interfaz de software común es fundamental, ya que aumenta la portabilidad del código, lo que permite que las aplicaciones hagan una transición sin problemas a otras plataformas SDR de USRP cuando los requisitos de desarrollo se expanden o hay nuevas plataformas disponibles. Por lo tanto, permite una reducción significativa en el esfuerzo de desarrollo al preservar y reutilizar su código heredado para que pueda concentrarse en nuevos algoritmos. [26]

Como software de doble licencia, UHD está disponible bajo la Licencia Pública General GNU de código abierto versión 3 (GPLv3), así como una licencia alternativa menos restrictiva disponible solo de National Instruments para clientes OEM de volumen que implementan hardware Ettus. [26]

4.3. Open Air Interface

Open Air Interface Software Alliance proporciona un marco establecido para la propiedad intelectual y las contribuciones financieras para apoyar al desarrollo de software. La alianza promueve procesos meritocráticos en los cuales los miembros individuales pueden contribuir al desarrollo del software OSA. [6]

La alianza también es responsable de organizar eventos, capacitaciones y conferencias en torno al software Open Air Interface (OAI). OSA tiene la intención de proporcionar una colaboración abierta entre su comunidad miembro para fomentar la innovación y trabajar en el futuro diseño de redes inalámbricas 5G. [6]

La plataforma de tecnología inalámbrica Open Air Interface es flexible hacia un ecosistema LTE abierto. OAI ofrece una implementación basada en software de código abierto

del sistema LTE que abarca la pila de protocolos completa del estándar 3GPP tanto en E-UTRAN como en EPC. [6]

Con Open Air Interface se puede construir y personalizar una estación base LTE (OAI eNB), un equipo de usuario (OAI UE) y una red central (OAI EPC) todos localizados en una misma PC. El componente OAI eNB se puede conectar tanto a un UE comercial como a un OAI UE. Esto permite probar diferentes configuraciones de red y monitorear la red y el dispositivo móvil en tiempo real. Así mismo, OAI UE también se puede conectar a un equipo eNB de prueba o comercial. [6]

OAI se basa en una arquitectura de interfaz de radio de software alojado en una PC. Con OAI, la funcionalidad del transceptor se realiza a través de una interfaz de radio de software conectada a una computadora para su procesamiento.

OAI está escrito en el estándar C para varias distribuciones de Linux (Ubuntu, Debian, CentOS) en tiempo real optimizadas para procesadores Intelx86 y ARM y lanzado como software libre bajo el Modelo de Licencia OAI. OAI proporciona un rico entorno de desarrollo con una gama de herramientas integradas, como modos de emulación altamente realistas, herramientas de supervisión y depuración, analizador de protocolos, perfilador de rendimiento y sistema de registro configurable para todas las capas y canales. [6]

4.3.1. Objetivos

Hacia la construcción de un ecosistema celular abierto para la implementación y experimentación de redes 4G y 5G flexibles y de bajo costo, OAI apunta a los siguientes objetivos [6]:

- Ofrece un entorno de desarrollo abierto e integrado bajo el control de los experimentadores.
- Tiene funciones de red totalmente basadas en software que ofrecen flexibilidad para diseñar, crear instancias y reconfigurar los componentes de la red (en el borde, núcleo o nube, usando el mismo o diferente espacio de direccionamiento).

- Tiene funciones de UE completamente establecidas en software que pueden ser utilizadas por diseñadores de módems con la actualización y / o desarrollo de funciones avanzadas LTE y 5G.
- Creación rápida de prototipos de casos de uso con y sin cumplimiento de 3GPP, así como nuevos conceptos hacia sistemas 5G que van desde M2M, Internet de las Cosas y redes definidas por software hasta Radio Access Network (RAN) en la nube y MIMO masivo.

4.3.2. Plataforma de software

Actualmente, la plataforma OAI incluye una implementación completa de software de sistemas móviles celulares de cuarta generación que cumplen con los estándares 3GPP LTE. Desarrollado en C puede ser ejecutado bajo plataformas Linux en tiempo real, optimizado para arquitecturas x86. [6]

En la capa física, se proporcionan las siguientes características:[6]

- Cumple con la versión 8.6 de LTE y con un subconjunto de la versión 10.
- Ofrece configuraciones para FDD y TDD con anchos de banda de 5, 10 y 20 MHz.
- Adaptable a diversos modos de transmisión: 1 (SISO), y 2, 4, 5 y 6 (MIMO 2×2).
- Informes Channel Quality Indicator (CQI) / PMI.
- Es compatible con todos los canales DL: Primary Synchronisation Signal (PSS), Secondary Synchronisation Signal (SSS), Physical Broadcast Channel (PBCH), Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH), Physical Hybrid Indicator Channel (PHICH), Physical Downlink Control Channel (PDCCH), Physical DL Shared Channel (PDSCH), Physical Multicast Channel (PMCH).
- Es compatible con todos los canales UL : Physical Random Access Channel (PRACH), Physical Uplink Shared Channel (PUSCH), Physical Uplink Control Channel (PUCCH), Sounding Reference Signal (SRS), Discovery Reference Signal (DRS).

- Soporta Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) tanto en UL como en DL;
- Procesamiento de banda base altamente optimizado, incluyendo turbo decodificador.

Para la pila de protocolos E-UTRAN, OAI proporciona lo siguiente: [6]

- Compatibilidad con LTE versión 8.6 y con un subconjunto de características de la versión 10.
- Implementación de las capas MAC, RLC, PDCP y RRC.
- Servicio de protocolo para todos los canales de la versión 8 y en la versión 10 para eMBMS (MCH, MCCH, MTCH).
- Programación justa y proporcional consciente del canal.
- Pila de protocolos totalmente reconfigurable.
- Verificación de integridad y encriptación utilizando los algoritmos AES y Snow3G.
- Soporte de medición RRC con brecha de medición.
- Interfaces estándar S1AP y GTP-U a la red central.
- Compatibilidad con IPv4 e IPv6.

Características de la red del EPC: [6]

- Implementación de los componentes MME, SGW, PGW y HSS. OAI reutiliza las pilas compatibles con los estándares de los protocolos de aplicación GTPv1u y GTPv2c de la implementación de software de código abierto de EPC llamada nwEPC.
- Integridad y encriptación de NAS utilizando los algoritmos AES y Snow3G.
- Manejo de procedimientos del UE: conexión, autenticación, acceso al servicio, establecimiento de radio portadores.
- Acceso transparente a la red IP (no se necesitan una puerta de enlace de servicio externa ni una puerta de enlace PDN).

- Configuración del nombre de punto de acceso, rango de IP, DNS y E-RAB QoS.
- Compatibilidad con IPv4 e IPv6.

La figura 4.4 muestra un esquema de la pila de protocolos de LTE implementado en OAI.

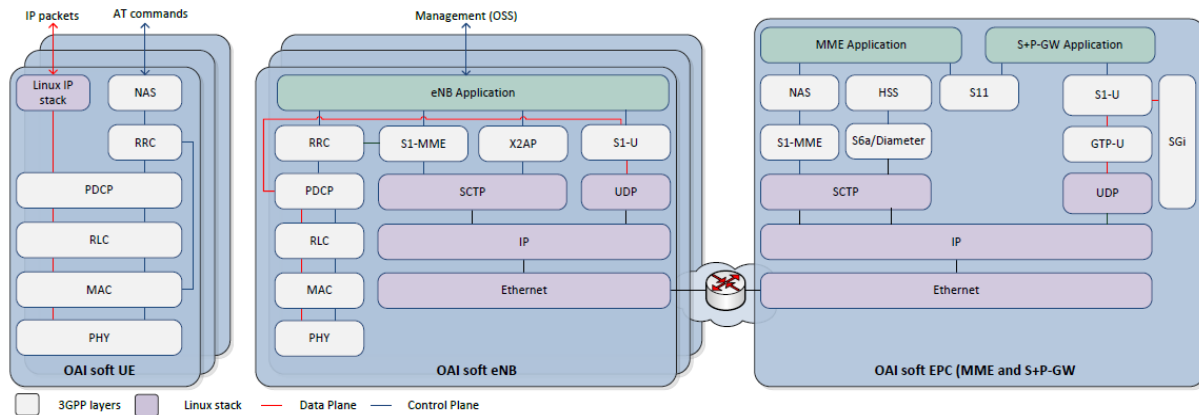


Figura 4.4: Pila de protocolos de OAI [6]

OAI se puede utilizar en el contexto de un rico entorno de desarrollo de software que incluye Aeroflex-Geisler LEON / GRLIB, RTOS RTAI o RT-PREEMPT, Linux, GNU, Wireshark, herramientas de control y monitoreo, analizador de mensajes y tiempo, sistema de registro de bajo nivel, Generador de tráfico, herramientas de perfilado y alcance suave.

También proporciona herramientas para la validación de protocolos, la evaluación del rendimiento y la prueba del sistema previa al despliegue. Se han realizado con éxito varias pruebas de interoperabilidad como son [6]:

- OAI eNB con los dispositivos móviles comerciales habilitados para LTE, a saber, Huawei E392, E398u-1, Bandrich 500, así como con prototipos comerciales de terceros de EPC.
- OAI-UE con equipo de prueba CMW500 y enodeB comercial (Ericsson en la red com4Innov) con EPC comercial.

Configuraciones a utilizar

La plataforma OAI se puede utilizar en varias configuraciones diferentes que involucran componentes comerciales en diversos grados[6]:

- Conexión de UE Comercial con eNB Comercial y OAI EPC.
- Conexión de UE Comercial con OAI eNB y EPC Comercial.
- Conexión de UE Comercial con OAI eNB y OAI EPC.
- Conexión de OAI UE con OAI eNB y OAI EPC.
- Conexión de OAI UE con OAI eNB y EPC Comercial.
- Conexión de OAI UE con eNB Comercial y EPC Comercial.

4.3.3. Plataforma de hardware

OAI está diseñado para ser independiente de las plataformas de hardware RF. Puede interconectarse con plataformas de SDR RF de terceros sin un esfuerzo significativo. En la actualidad, OAI es oficialmente compatible con las siguientes plataformas de hardware [6]:

- EURECOMTM EXMIMO2: la interfaz de radio de software predeterminada para OAI es la placa ExpressMIMO2 PCI Express (PCIe). Ésta placa cuenta con 4 conjuntos de chips RF de alta calidad de Lime Micro Systems (LMS6002), que son frontales de RF MIMO de grado LTE para eNB de células pequeñas. Admite la operación independiente a niveles de baja potencia (potencia de transmisión máxima de 0 dBm por canal) simplemente conectando una antena a la placa. El equipo de RF se puede configurar para operaciones TDD o FDD con anchos de banda de canal de hasta 20 MHz que cubren una gran parte del espectro de RF disponible (250 MHz - 3.8 GHz) y un subconjunto de modos de transmisión LTE MIMO.
- Serie USRP X / Serie B: OAI también es compatible con los productos de la serie B y serie X de Ettus USRP a través del controlador Ettus UHD. La más información para estos productos se puede encontrar aquí.

Capítulo 5

Desarrollo e implementación

5.1. Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo la instalación y configuración no solo de los componentes de Open Air Interface, sino también de un conjunto de requisitos de hardware y software establecidos por los proveedores de la herramienta. Se definen parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de la red.

Al final de esta etapa, se debe contar con una red LTE compuesta por un S-GW/P-GW, un MME, un HSS y una estación base a la cual un equipo de usuario (UE) debería poder adjuntarse y navegar por Internet a través de la misma.

5.2. Componentes de hardware utilizados

El software Open Air Interface requiere de máquinas basadas en arquitectura Intel para los objetivos eNB o UE. Éste requisito se debe a funciones DSP(Digital Signal Processor) optimizadas que hacen un uso intensivo de las instrucciones SIMD (SSE, SSE2, SSS3, SSE4 y AVX2).

El software se ha probado actualmente en las siguientes familias de procesadores:

- Generación 3/4/5/6 Intel Core i5, i7.
- Generación 2/3/4 Intel Xeon.

- Intel Atom Rangeley, E38xx, x5-z8300.

En el presente trabajo se utilizan dos equipos: uno para la implementación del EPC y otro para la estación base.

Características de Equipo Acer Aspire E5-575 para Estación Base:

- Core i3 7th Gen, 2.4 GHz .
- 4 GB DDR4 para memoria RAM.
- 1 TB para disco duro.
- Tarjeta Gráfica Intel HD 620.
- Batería de iones de litio de 6 celdas.

Características de Equipo Hewlett Packard Spectre para EPC:

- Core i7 8th Gen, 1.8 GHz hasta 4 GHz con tecnología Intel® Turbo Boost, 8 MB de caché, 4 núcleos.
- 8 GB para memoria RAM.
- 256 GB SSD.
- Tarjeta Gráfica Intel HD 620.
- Batería de Ion Litio.

Equipos de Usuario probados:

- Huawei P20 Lite.
- Samsung Galaxy S6.

Interfaz de radio para la estación base:

Para la implementación de la estación base se utilizó el equipo USRP B210, descrito anteriormente en la sección [4.2.3 USRP B210](#). A este equipo se integraron dos antenas VERT2450, una para la transmisión y otra para recepción. Estas antenas deben ser orientadas formando un ángulo de 90 grados entre ellas para disminuir la interferencia.

5.3. Requisitos de software previos a la instalación

La estación base se encuentra sobre la distribución Linux Ubuntu 14.04.3 de 64 bits debido a que, luego de febrero de 2016, la versión 14.04.04 de Ubuntu viene con el kernel 4.2 por defecto el cual no funciona con OAI. Luego de instalar el sistema operativo se configuran parámetros específicos como la dirección de red, el Fully Qualified Domain Name (FQDN¹) del equipo, los repositorios y se instala el kernel de baja latencia linux-image-3.19.0-61-lowlatency.

Para realizar una administración de energía en el procesador se eliminan todas las funciones de administración de energía en el BIOS (estados de suspensión, en particular C-states) y escalado de frecuencia de CPU (Intel SpeedStep). Además, se deshabilita el hyperthreading en BIOS y hay que asegurarse de que esté apagado en Linux. Si al terminar estas configuraciones la frecuencia del CPU está cambiando o la CPU está en estado C, entonces se debe solucionar el problema de la CPU antes de continuar o de lo contrario existirán problemas en tiempo real con eNB / UE.

En el caso del EPC se debe instalar Ubuntu 16.04 con el kernel version 4.7. Se necesita instalar el módulo de kernel GTP de Osmocom que se carga como módulo dentro del kernel.

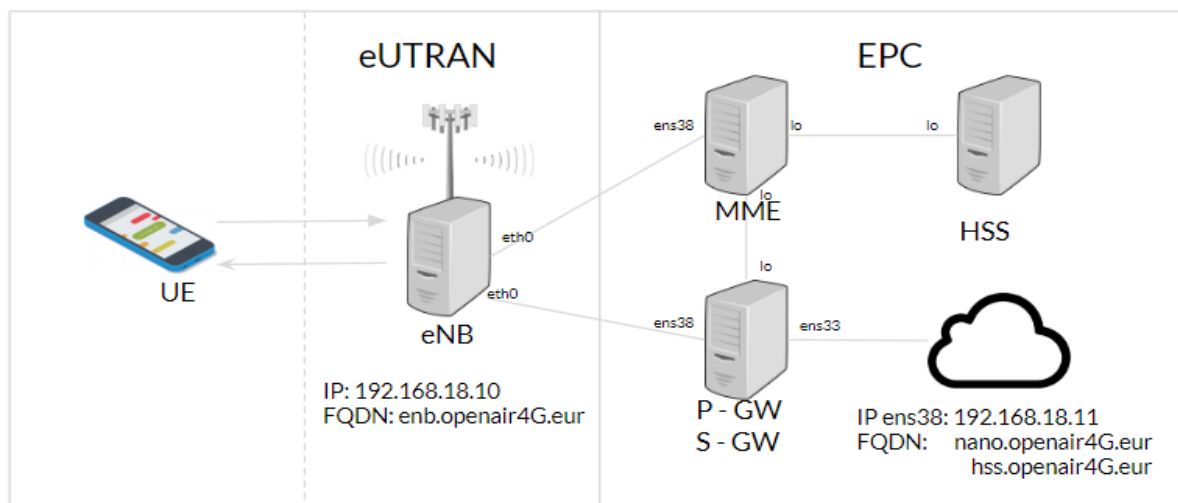


Figura 5.1: Arquitectura de red LTE diseñada con OAI

¹FQDN es el nombre de dominio completo para una computadora o host específico en Internet. El FQDN consta de dos partes: el nombre de host y el nombre de dominio.

Al finalizar esta etapa se tendrán dos equipos. El primero es el equipo Aspire E5-575 para estación base con el sistema operativo Ubuntu 14.04, la dirección IP 192.168.18.10 y el nombre enb.openair4G.eur. El segundo equipo sería Hewlett Packard Spectre para EPC, con Ubuntu 16.04, la dirección IP 192.168.18.11 y los FQDN nano.openair4G.eur y hss.openair4G.eur. La distribución física del EPC y eUTRAN mencionada anteriormente se pueden observar en la figura 5.1. Notar que para el equipo que contiene el EPC son necesarias dos interfaces de red: una para conectarse al eUTRAN y otra para la conexión a Internet.

5.4. Instalación de dependencias

Luego de descargar los directorios openair-cn (contiene todo lo referente al EPC) y Open Air Interface (contiene todo lo necesario para desplegar una estación base) del repositorio oficial de Open Air Interface, se procede a instalar las dependencias necesarias para la correcta ejecución de los distintos componentes.

En el equipo que va a alojar la estación base se deben ejecutar los siguientes comandos para instalar todas las bibliotecas necesarias para la correcta ejecución del componente:

```
$ cd Open Air Interface
$ source oaienv
$ cd cmake_targets
$ ./build_oai -I --eNB -x --install-system-files -w USRP
```

En caso de no instalarse alguna de las dependencias el script lo notificará en la salida mostrada durante ejecución. Las dependencias no obtenidas mediante el script deberán ser instaladas manualmente. Durante el proceso de instalación, se le solicita establecer la contraseña para el usuario root de MySQL. En éste caso se utiliza Linux.

Luego, en el equipo que va a alojar al EPC, se deben ejecutar los siguientes comandos:

```
$ cd openair-cn
$ git checkout develop
```

```
$ git pull
$ cd scripts
$ ./build_mme -i
$ ./build_hss -i
$ ./build_spgw -i
```

Éstas instrucciones se deben ejecutar una vez ya que únicamente instalan dependencias necesarias. Al igual que las instrucciones para el eNB, en caso de no instalarse alguna dependencia, esta se debe instalar manualmente. Durante el desarrollo de éste trabajo fue necesario instalar de forma manual dos dependencias: mysql-server y el módulo GTP.

5.5. Configuración de componentes

Las primeras configuraciones a realizar son en el equipo que ejecuta al eNB. Para esto se va a crear el fichero que va a contener los parámetros necesarios para que el eNB se comunique con el EPC y con los UE. Éste fichero se guarda en la ruta:

```
$ pwd
Open Air Interface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/
```

Algunos de los parámetros de configuración fundamentales para la estación base son los siguientes:

```
tracking_area_code = "1";
mobile_country_code = "208";
mobile_network_code = "93";
// MME parameters:
    mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.168.18.11";
                        ipv6 = "192:168:18::11";
                        active = "yes";
                        preference = "ipv4";
                        }
    )
```

```

);
NETWORK_INTERFACES :
{
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME    = "eth0";
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME      = "192.168.18.10/24";
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U       = "eth0";
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U         = "192.168.18.10/24";
    ENB_PORT_FOR_S1U                  = 2152; # Spec 2152
};

```

En esta configuración se le define al eNB la dirección IP del componente MME al cual se va a conectar, así como las interfaces del equipo que serán utilizadas como interfaz S1-U y S1-MME.

Luego se realizan las configuraciones en el equipo que aloja al EPC. Se hace necesario la generación de tres ficheros de configuración: mme.conf, hss.conf y spgw.conf. Un fichero por cada componente del EPC. Estos ficheros se alojan en la ruta:

```

$ pwd
/usr/local/etc/oai/

```

Algunas de las configuraciones en el fichero mme.conf son las siguientes:

```

REALM = "openair4G.eur";
S6A :
{
    S6A_CONF = "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/mme_fd.conf";
    HSS_HOSTNAME          = "hss";
};
GUMMEI_LIST = (
    {MCC="208" ; MNC="93"; MME_GID="4" ; MME_CODE="1"; }
);
TAI_LIST = (
    {MCC="208" ; MNC="93"; TAC = "1"; }
);

```

```

);
NETWORK_INTERFACES :
{
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "ens38";}
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.168.18.11/24";
    MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME = "lo";
    MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME = "127.0.11.1/8";
    MME_PORT_FOR_S11_MME = 2123;
};
S-GW :
{
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11 = "127.0.11.2/8";
};

```

Dentro de los parámetros configurados se encuentran los datos necesarios para la interfaz S6a. Como ya se mencionó en el Capítulo 3: Estándar LTE, esta interfaz es la que conecta al MME con el HSS. Para la interfaz S6a se definen dos entradas. La primera es la llamada a un fichero de configuración que contiene información necesaria para conexión al HSS. La segunda es el hostname definido para el HSS.

Luego aparecen datos necesarios para los identificadores GUMMEI y TAI. Seguidamente aparece la interfaz S1-MME que será utilizada para conectar al MME con el eNB. El último parámetro definido es la interfaz S11 para conectar al MME con el S-GW. Como en esta ocasión los componentes MME, HSS, S-GW y P-GW se encuentran en el mismo equipo, siempre se van a comunicar por la interfaz local.

A continuación se muestran las configuraciones para el SP-GW. Éste componente es una unión del S-GW y el P-GW y se encuentra en la misma ruta del fichero mme.conf pero con el nombre spgw.conf:

```

S-GW :
{
    NETWORK_INTERFACES :
    {

```

```

    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11 = "lo";
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11 = "127.0.11.2/8";
    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "ens38";
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP = "192.168.18.11/24";
    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";
};
}
P-GW =
{
    NETWORK_INTERFACES :
    {
        PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8 = "none";
        PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8 = "0.0.0.0/24";
        PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI = "ens33";
        PGW_MASQUERADE_SGI = "yes";
        UE_TCP_MSS_CLAMPING = "no";
    };
    ...
    DEFAULT_DNS_IPV4_ADDRESS = "8.8.8.8";
    DEFAULT_DNS_SEC_IPV4_ADDRESS = "8.8.4.4";
}

```

En el resumen anterior del fichero de configuración `spgw.conf` se muestran las configuraciones para las interfaces de los componentes S-GW y P-GW. Como ya se mencionó en el Capítulo 3: Estándar LTE, la interfaz S11 comunica al S-GW con el MME, la interfaz S1-U comunica al S-GW con el eNB, la interfaz S5/S8 comunica al S-GW con el P-GW y la interfaz SGi es la que comunica al P-GW con el Packet Data Networks (PDN).

El último fichero es el `hss.conf`. Los principales parámetros almacenados son los necesarios para acceder a la base de datos MySQL que contiene información pertinente a los usuarios de la red:

```

MYSQL_user   = "root";
MYSQL_pass   = "linux";

```

Luego de configurar los componentes, estos son compilados y ejecutados en el siguiente orden: HSS, MME, SP-GW y finalmente el eNB. Aunque la red ya se encuentra en funcionamiento y sus elementos se comunican entre sí, todavía no es posible conectar ningún Equipo de Usuario ya que aún no se registra ninguno en la base de datos del HSS, además de que no se cuenta con una tarjeta USIM con los mismos datos que se encuentran en el HSS.

5.6. Configuración de UE y registro de usuario en la red LTE

Antes de configurar la tarjeta USIM que va a usar el UE y antes de guardar en la base de datos del HSS la información del usuario, se deben definir los parámetros mostrados en la tabla 5.1.

Parámetro	Valor
IMSI	208930000000001
MSISDN	33638030001
MME ID	3
Key	0x8BAF473F2F8FD09487CCBD7097C6862
SPN	oai
OPc	e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c

Tabla 5.1: Parámetros de la red para usuario

OPc se calcula a partir de OP y Key. Se puede dejar NULL cuando se inserte en el HSS ya que éste es capaz de calcularlo. SPN es el nombre que se va a mostrar en el UE cuando éste se conecte a la red LTE.

5.6.1. Insertar datos en USIM

Para insertar los datos en la USIM son necesarios dos componentes: la tarjeta USIM y un quemador de tarjetas USIM mostrados en la figura 5.2.



Figura 5.2: Elementos para grabar datos de red

El componente Smart Chip Card Reader Writer trae incluido un sistema para insertar los datos a grabar. Éste sistema se muestra en la figura 5.3, donde se pueden apreciar los parámetros establecidos en la tabla 5.1.

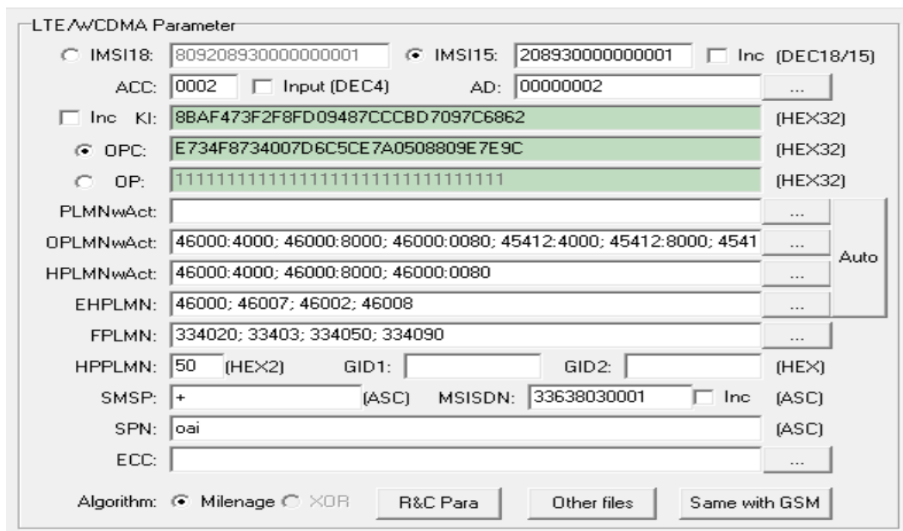


Figura 5.3: SIM personalize tool

Luego de grabar los datos en la USIM, esta debe ser colocada en el UE y en el dispositivo se debe agregar una nueva Access Point Name (APN) con el nombre que se haya asignado

a esta. En éste caso a la APN se le asigna el nombre oai.ipv4. También se debe habilitar en el campo Bearer la opción LTE.

5.6.2. Registro de datos de usuario en el HSS

Registrar los datos del usuario ya definidos se puede hacer mediante la consola o mediante algún software de interfaz gráfica como phpmyadmin. En el ejemplo que se muestra a continuación, el registro se hizo mediante la consola.

```
shell > mysql -u root -p
mysql > use oai_db;
mysql > INSERT INTO users ('imsi', 'msisdn', +'imei', 'imei_sv',
'ms_ps_status', 'rau_tau_timer', 'ue_ambr_ul', 'ue_ambr_dl',
'access_restriction', 'mme_cap', 'mmeidentity_idmmeidentity',
'key', 'RFSP-Index', 'urp_mme', 'sqn', 'rand', 'OPc')
VALUES ('208930000000001', '33638030001', NULL, NULL,
'PURGED', '120', '50000000', '100000000', '47', '0000000000',
'3', 0x8BAF473F2F8FD09487CCCB7097C6862, '1', '0', '',
0x00000000000000000000000000000000,
e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c );
```

En el ejemplo anterior solamente se inserta el usuario pero previamente se deben gestionar otros componentes como el MME y el APN. Una vez hecho esto se ejecutan los componentes de la red y se le indica al UE buscarla.

Capítulo 6

Pruebas y análisis

6.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una recolección de los valores recuperados durante las pruebas realizadas a la red. En primer lugar se va a realizar una selección de la mejor opción de ganancia a utilizar en la radio base. Para esto se mide por cada variación de ganancia, la potencia de salida del equipo USRP.

Al haber seleccionado la ganancia, se decide ejecutar los componentes de la red LTE, para conectar un UE al sistema y verificar la conexión a internet mediante el uso de datos. Esto se evidencia en la segunda parte de las pruebas.

Las tres principales medidas en las que se basa un UE para decidir a qué celda de la red conectarse son Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Strength Indicator (RSSI) y Reference Signal Received Quality (RSRQ).

En la tercera parte de éste trabajo se realiza una descripción del indicador Reference Signal Strength Indicator (RSSI) para luego recolectar sus valores e interpretarlos. En la cuarta parte se recopilan los valores de Reference Signals Received Power (Reference Signals Received Power) mientras se varía la distancia. Finalmente se recuperan los valores de RSRQ para verificar la calidad de la señal recibida. Estos valores prácticos pueden ser comparados con los valores teóricos esperados, utilizando la ecuación definida por la 3GPP para el cálculo de RSRQ y de esta forma validar la calidad de las señales generadas por el

equipo SDR USRP B210.

Los valores de estas medidas fueron obtenidos a través de los equipos de usuario, los cuales permiten acceso a esta información en su panel de configuración. Para realizar las pruebas se tienen los parámetros mostrados en la tabla 6.1.

Parámetro	Valor	
Banda	7	
Ancho de Banda	5 MHz	10 MHz
No. de PRB	25	50
No. Antenas Rx	1	
No. Antenas Tx	1	
Codificación DL	16 QAM	

Tabla 6.1: Parámetros de la red OAI LTE

6.2. Selección de ganancia

En una antena transmisora, la ganancia describe qué tan bien la antena convierte la potencia de entrada en potencia de salida. Open Air Interface define un rango de ganancia con valores que van desde 1 hasta 120. Al seleccionar un valor del rango, OAI le envía a UHD el verdadero valor en dBs que se le va a asignar a la ganancia en el radio.

Para obtener los valores de la potencia de salida al variar la ganancia se utiliza el dispositivo que se muestra en la figura 6.1. Para la utilización de éste componente se necesita descargar los drivers correspondientes así como el software que va a mostrar la salida generada.



Figura 6.1: Rohde & Schwarz NRP-Z91 average power sensor

La tabla 6.2 muestra un resumen de algunos de los valores recuperados durante las mediciones. Para determinar estos valores se tomó un promedio de 200 muestras de la

potencia de salida (Pout) por cada uno de los valores de ganancia.

Ganancias	POut (dBm)
$G_x = 60$	9.18
$G_x = 70$	12.11
$G_x = 80$	13.04
$G_x = 85$	11.08
$G_x = 100$	7.81
$G_x = 120$	6.19

Tabla 6.2: Valores de potencia de salida

Al observar la tabla 6.2, se identifica como el mejor indicador de potencia de salida el valor arrojado para una ganancia $G_x = 80$. Cuando la ganancia es aumentada después de $G_x = 80$, la potencia de salida comienza a disminuir debido a que éste aumento está generando un incremento de ruido en la señal. Que la ganancia sea máxima no implica que la potencia de salida sea mejor al compararla con la arrojada por ganancias menores.

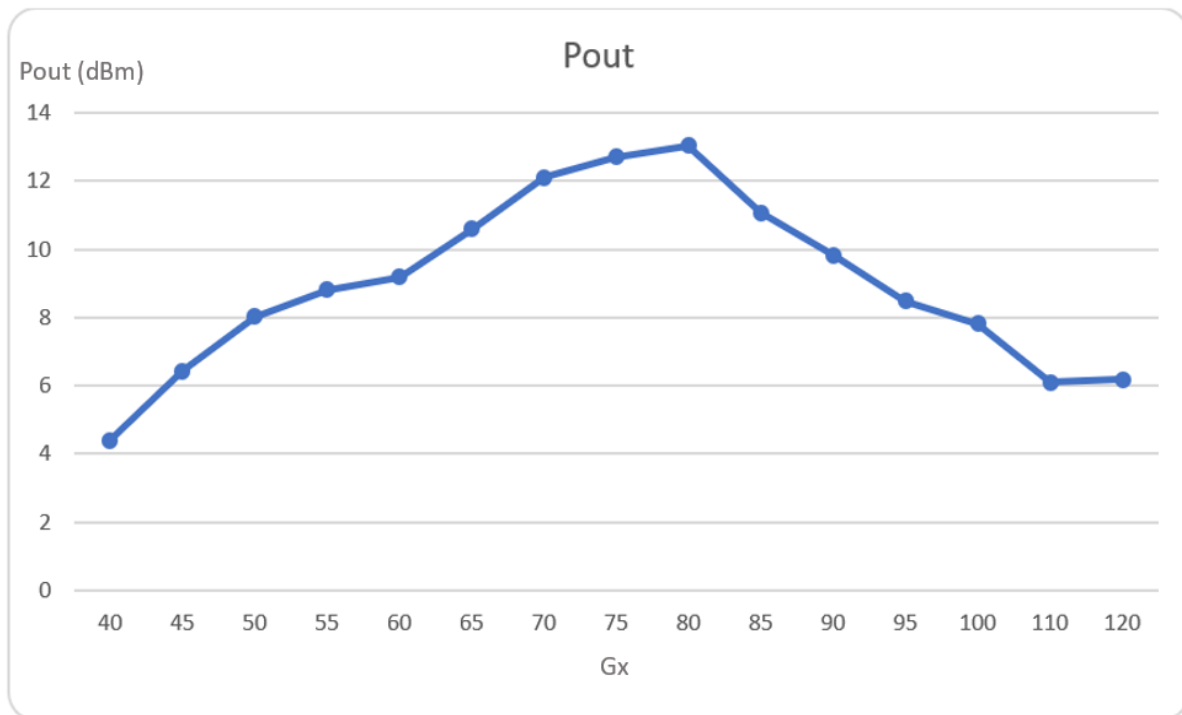


Figura 6.2: Valores de potencia de salida

La figura 6.2 muestra en gráfico el conjunto de valores de potencia de salida generados

por cada una de las ganancias probadas. Basados en los resultados mostrados en esta figura y los mostrados en la tabla 6.2, se decide utilizar como valor de ganancia $G_x = 80$.

6.3. Conexión del UE a la red LTE. Navegación por Internet

Ya se tienen todos los componentes de una red LTE funcional. El eNB es capaz de conectarse al MME y éste lo reconoce a su vez. El HSS ya tiene los datos de un usuario en su base de datos. Ahora se necesita verificar no solo que el UE se conecta a la red, sino que también puede hacer uso de datos para navegar por internet.

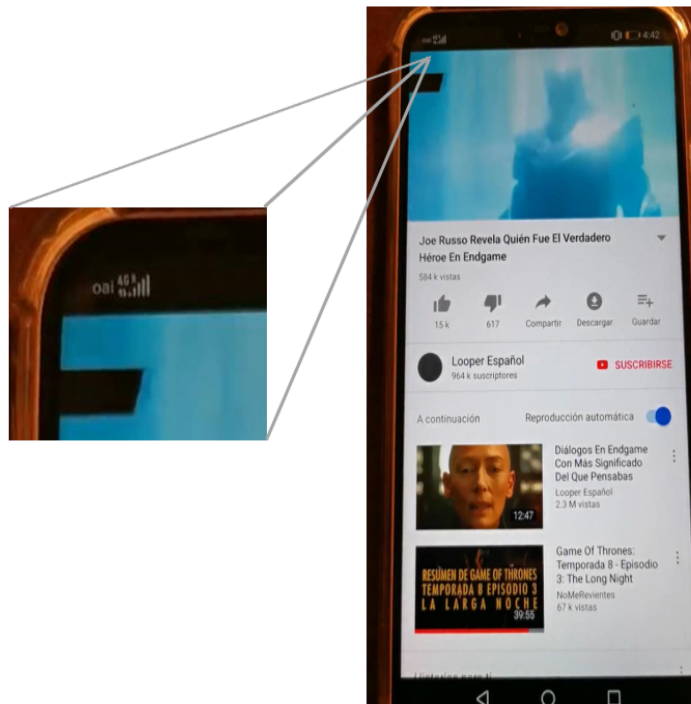


Figura 6.3: UE navegando por Internet mediante la red OAI LTE

La figura 6.3 muestra una captura de pantalla de un video realizado durante la conexión del UE a la red LTE. Después de establecer el attachment con la red, se decide abrir la aplicación Youtube. Ésta carga el contenido que tiene para mostrar y se decide visualizar

uno de los videos propuestos. También se realizaron pruebas de mensajería con la aplicación Messenger.

Al conectar el UE a la red, se puede verificar su conexión en el componente eNB, a través de la interfaz que se muestra en la figura 6.4. Ésta interfaz ofrece una descripción completa de las características de la capa PHY.

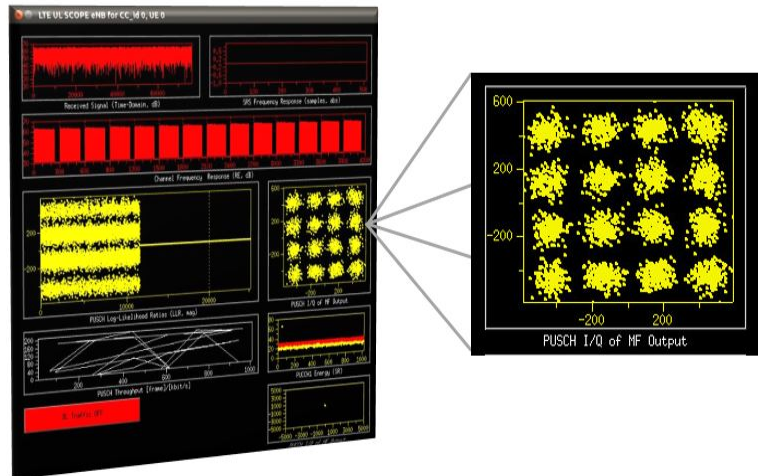


Figura 6.4: Herramienta OAI Soft Scope

OAI Soft Scope proporciona gráficos para la potencia de la señal recibida, la respuesta al impulso del canal, la respuesta a la frecuencia del canal, el rendimiento y los componentes I/Q (en éste caso se muestra una codificación de 16 QAM pero esto sucede porque esta fue la mayor codificación establecida en la configuración de la red)

6.4. Reference Signal Strength Indicator (RSSI)

Reference Signal Strength Indicator (RSSI) se calcula como un promedio lineal de la potencia total medida a través de símbolos OFDM que contienen símbolos de referencia transmitidos desde el primer puerto de antena (si no se utiliza MIMO). RSSI proporciona la potencia total recibida en cierto ancho de banda, incluida la potencia del canal de tráfico, la potencia del canal de control, el ruido térmico, entre otros. RSSI es una métrica tradicional que se ha utilizado en otras tecnologías como GSM y CDMA1.

Teóricamente, para calcular el valor de RSSI se utiliza la siguiente fórmula:

$$RSSI = I_t + N_t + S_t$$

donde :

$$I_t = \text{Interferencia Total} \quad (6.1)$$

$$N_t = \text{Ruido en la señal}$$

$$S_t = \text{Potencia total de subportadoras}$$

Para tener un mejor entendimiento sobre a qué se refiere el término *Potencia total de subportadoras*, se observa la figura 6.5. El marco LTE se divide en función de intervalos (slots) de tiempo o símbolos OFDM en el eje X y en subportadoras de frecuencia en el eje Y. El Resource Block (PRB) es la unidad más pequeña de asignación de recursos en el sistema LTE. Tiene una duración de aproximadamente 0.5 ms y está compuesto por 12 subportadoras en cada símbolo OFDM.

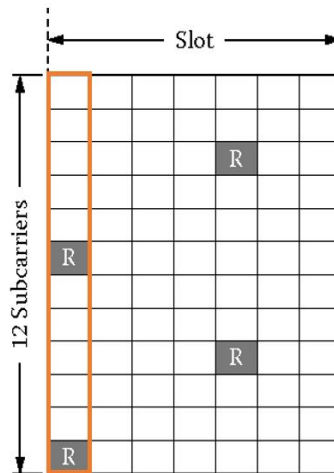


Figura 6.5: RSSI en un PRB

Un intervalo de tiempo equivale a 7 símbolos OFDM en el prefijo cíclico (CP, por sus siglas en inglés cyclic prefix) normal y 6 símbolos OFDM en el prefijo cíclico extendido. Un bloque de recursos completo es igual a 12 subportadoras por 7 símbolos en CP normal. Por

lo tanto, consta de un total de 84 elementos de tiempo-frecuencia referidos como elementos de recursos (RE, por sus siglas en inglés Resource Element) en la red LTE.

Cada RE posee un valor de potencia, por lo que, en resumen, RSSI es el valor de la suma de potencias de los elementos que se encuentran dentro del rectángulo color naranja de la figura 6.5, multiplicado por el número total de PRB (ya que RSSI se mide en todo el ancho de banda), incrementado por los valores de ruido e interferencia en la señal. Para obtener el número de PRBs por cada ancho de banda LTE, consultar el Anexo 1: Relación ancho de banda-PRB.

Distancia (m)	RSSI (dBm) / Calidad de la Señal	
	BW = 5 MHz	BW = 10 MHz
1	-55.72 / Muy Buena	-52.1 / Muy Buena
2	-59.3 / Muy Buena	-55.61 / Muy Buena
4	-63.22 / Buena	-62.91 / Buena
8	-73.54 / Regular	-70.54 / Regular
16	-87.01 / Pobre	-85.41 / Pobre

Tabla 6.3: Valores de RSSI

En la tabla 6.3, se observan los valores RSSI recuperados durante las mediciones con anchos de banda (BW) de 5 y 10 MHz. Por ejemplo, para una distancia de 1 m y con un BW de 5 MHz, se obtuvo un valor de RSSI de -55.72 dBm, lo cual se traduce como una muy buena señal. Estos valores van disminuyendo a medida que aumenta la distancia debido a que el ruido y la interferencia se hacen mayores cuando el UE se aleja de la radio base. Las mediciones de RSSI se hicieron para distancias de 1 hasta 16 m, aumentando en 1 m cada vez que se tomaba la medida. Para verificar todos los valores de RSSI en cada una de las distancias se puede consultar el Anexo 2: Valores de RSSI.

RSSI varía con el ancho de banda del enlace descendente LTE. Incluso, si todos los demás factores fueran iguales, el ancho de banda 10 MHz mediría, aproximadamente, 3 dB más que el ancho de banda de 5 MHz. Esto en realidad no se traduce en una señal más fuerte para el usuario final.

6.5. Reference Signals Received Power (RSRP)

Según la 3GPP, Reference Signal Received Power (RSRP) se define como el promedio lineal sobre las contribuciones de potencia (en [W]) de los elementos de recursos que transportan señales de referencia específicas de la celda dentro del ancho de banda de frecuencia de medición considerado.

Para la determinación de RSRP se utilizarán las señales de referencia específicas de célula R0. Si el UE puede detectar de manera confiable que R1 está disponible, puede usar R1 además de R0 para determinar RSRP. El punto de referencia para el RSRP será el conector de antena del UE.

Las mediciones de RSRP se utilizan para:

- Selección de celda
- Reselección celular
- Handover
- Mediciones de movilidad

En otras palabras, RSRP es la potencia promedio recibida de un único RE de señal de referencia (RS, por sus siglas en inglés Reference Signal). El UE mide la potencia de múltiples elementos de recursos utilizados para transferir la señal de referencia, para luego promediarlos. El Rango de informe que provee 3GPP va de -44 dBm a -140 dBm. Los niveles de RSRP para la señal utilizable generalmente varían de, aproximadamente, -75 dBm cerca de un sitio de celda LTE a -120 dBm en el borde de la cobertura LTE.

Para un mejor entendimiento de cómo se obtiene teóricamente el valor de RSRP, se puede observar la figura 6.6.

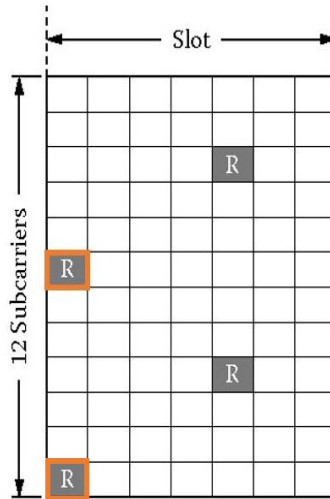


Figura 6.6: RSRP en un PRB

Los RE de señal de referencia en un PRB, son colocados en los símbolos OFDM 0 y 4. La ubicación en la subportadora va a depender del identificador de celda. En la figura 6.6, los RE de señal de referencia son representados por los cuadros grises. Para medir RSRP, se va a tomar de cada PRB dos de estos elementos y se va a promediar su potencia. En este caso se tomaron los elementos que se encuentran en los cuadros color naranja. Los RE a seleccionar para medir el RSRP deben pertenecer al mismo símbolo OFDM.

El UE generalmente mide RSRP en función de la dirección (mensaje RRC) de la red e informa el valor. Cuando informa éste valor, no utiliza el valor RSRP real. Envía un valor no negativo que varía de 0 a 97 y cada uno de estos valores se asigna a un rango específico de valor RSRP real como se muestra en la tabla 6.4. Por ejemplo, si al realizar medidas de RSRP, el UE reporta un valor igual a 95, esto significa que el valor de medida se va a encontrar en un rango entre -46 dBm y -45 dBm.

Valor Reportado	Valor de Medida (dBm)
RSRP_00	$RSRP \leq -140$
RSRP_01	$-140 \leq RSRP < -139$
RSRP_02	$-139 \leq RSRP < -138$
...	...
RSRP_95	$-46 \leq RSRP < -45$
RSRP_96	$-45 \leq RSRP < -44$
RSRP_97	$-44 \leq RSRP$

Tabla 6.4: Mapeo del informe de medición RSRP

Algunos de los valores RSRP obtenidos durante las mediciones son mostrados en la tabla 6.5 y en la tabla 6.6. Estos necesitan ser mapeados según los observado en la tabla 6.4. Por ejemplo, para una distancia de 1 m y un valor de BW de 5 MHz, el UE reportó un valor de 65. Al mapear este valor según la tabla 6.4 se obtiene que el valor de medida está entre -76 dBm y -75 dBm lo que implica una muy buena calidad de la señal.

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dBm)	Calidad de la Señal
1	65	$-76 \leq RSRP < -75$	Muy Buena
2	61	$-80 \leq RSRP < -79$	Muy Buena
4	55	$-86 \leq RSRP < -85$	Buena
8	43	$-98 \leq RSRP < -97$	Regular
16	18	$-123 < RSRP < -122$	Pobre

Tabla 6.5: Valores de RSRP para BW = 5 MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dBm)	Calidad de la Señal
1	61	$-80 \leq RSRP < -79$	Muy Buena
2	58	$-83 \leq RSRP < -82$	Muy Buena
4	52	$-89 \leq RSRP < -88$	Buena
8	41	$-100 \leq RSRP < -99$	Regular
16	17	$-124 \leq RSRP < -123$	Pobre

Tabla 6.6: Valores de RSRP para BW = 10 MHz

Al aumentar el ancho de banda de la red el valor RSRP se ve afectado debido a que ahora se tiene un mayor número de PRB y que el valor de potencia de los RE de RS no varía. El total de medidas RSRP realizadas se pueden consultar en los Anexos 3 y 4.

La figura 6.7 muestra las afectaciones que sufren las medidas de RSSI y RSRP al aumentar la distancia entre el UE y eNB.

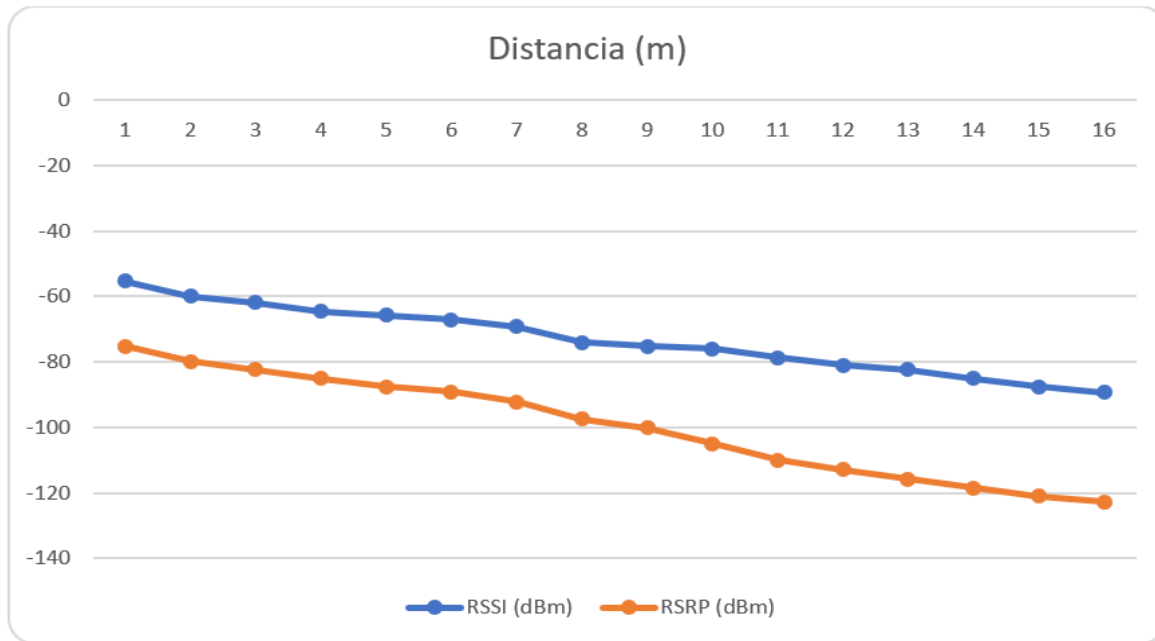


Figura 6.7: Valores RSSI y RSRP para $BW = 5$ MHz

En la figura 6.7 se observa un offset entre 25 y 38 dB aproximadamente, debido a que para el cálculo de RSSI se ocupan todos los RE de un símbolo OFDM, mientras que para el cálculo de RSRP se ocupa un RE de RS de un símbolo OFDM.

6.6. Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Para obtener más detalles sobre la calidad del canal y el ancho de banda completo se utiliza Reference Signal Received Quality (RSRQ). RSRQ es un tipo de medida que indica la calidad de la señal de referencia recibida. La medición RSRQ proporciona información adicional cuando RSRP no es suficiente para tomar una decisión confiable de transferencia o reelección celular.

Las mediciones RSRQ también se utilizan para:

- Selección de celda

- Reselección celular
- Entregar
- Mediciones de movilidad

3GPP define Reference Signal Received Quality (RSRQ) como la relación:

$$RSRQ = N \times \frac{RSRP}{(E - UTRA \text{ carrier } RSSI)} \quad (6.2)$$

Donde N es el número de PRB del ancho de banda de medición de RSSI del operador E-UTRA. Las mediciones en el numerador y el denominador se realizarán sobre el mismo conjunto de bloques de recursos.

El indicador de intensidad de señal recibida por portadora E-UTRA (RSSI), comprende el promedio lineal de la potencia total recibida (en [W]) observada solo en símbolos OFDM que contienen símbolos de referencia para el puerto de antena 0, en el ancho de banda de medición, sobre N número de recursos bloques por el UE de todas las fuentes, incluidas las células co-canal de servicio y las células no de servicio, interferencia de canal adyacente, ruido térmico, etc. El punto de referencia para el RSRQ será el conector de antena del UE.

Al igual que los informes de medición RSRP, las mediciones de RSRQ no se transmiten directamente, sino que se aplica un mapeo a las mediciones. La medición de RSRQ se define de -3 dB a -19.5 dB, mientras que el rango de informes para mediciones RSRQ tiene un valor entero entre 0 y 34. Éste rango de valores se muestra en la tabla 6.7.

Valor Reportado	Valor de Medida (dB)
RSRQ_00	$RSRQ < -19.5$
RSRQ_01	$-19.5 \leq RSRQ < -19$
RSRQ_02	$-19 \leq RSRQ < -18.5$
...	...
RSRP_32	$-4 \leq RSRQ < -3.5$
RSRQ_33	$-3.5 \leq RSRQ < -3$
RSRQ_34	$-3 \leq RSRQ$

Tabla 6.7: Mapeo del informe de medición RSRQ

Al recolectar los valores RSRQ generados por el UE se obtienen los datos mostrados, en resumen, en la tabla 6.8 y la tabla 6.9. Consultar Anexos 5 y 6 para ver todas las medidas recuperadas y sus respectivos valores teóricos.

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dB)	Valor Teórico (dB)	Calidad de la Señal
1	28	$-6.0 \leq RSRQ < -5.5$	-5.8	Muy Buena
2	26	$-7.0 \leq RSRQ < -6.5$	-6.59	Muy Buena
4	24	$-8.0 \leq RSRQ < -7.5$	-7.88	Buena
8	19	$-10.5 \leq RSRQ < -10.0$	-10.03	Regular
16	0	$RSRQ < -19.5$	-21.87	Pobre

Tabla 6.8: Valores de RSRQ para BW = 5 MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dB)	Valor Teórico (dB)	Calidad de la Señal
1	18	$-11.0 \leq RSRQ < -10.5$	-10.7	Buena
2	20	$-10.0 \leq RSRQ < -9.5$	-9.59	Muy Buena
4	23	$-8.5 \leq RSRQ < -8.0$	-8.42	Muy Buena
8	16	$-12.0 \leq RSRQ < -11.5$	-11.99	Buena
16	0	$RSRQ < -19.5$	-21.4	Pobre

Tabla 6.9: Valores de RSRQ para BW = 10 MHz

En las tablas también aparecen los valores teóricos RSRQ calculados aplicando la ecuación 6.1. Para hacer un ejemplo de éste cálculo se van a tomar los valores RSSI y RSRP obtenidos para una distancia $D = 1$ m.

Para calcular RSRQ correctamente, los valores de RSSI y RSRP deben ser convertidos a Watts, según indicaciones de la 3GPP. En el caso de RSRP se toma un valor aleatorio del rango $-76 \leq RSRP < -75$, por lo que se tienen los siguientes datos:

$$\begin{aligned}
 RSSI &= -55.72 \text{ dBm} = 2.67917 \times 10^{-6} \text{ mW} \\
 RSRP &= -75.50 \text{ dBm} = 2.81838 \times 10^{-8} \text{ mW} \\
 N &= 25, \text{ ya que } BW = 5 \text{ MHz}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Al sustituir los valores representados en la ecuación 6.3 en la ecuación 6.2, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 RSRQ &= N \times \frac{RSRP}{(E - UTRA \text{ carrier } RSSI)} \\
 RSRQ &= 25 \times \frac{2.81838 \times 10^{-8}}{2.67917 \times 10^{-6}} \\
 RSRQ &= 0.26299047mW \\
 RSRQ &= -5.800599dB
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

El valor obtenido para RSRQ, de forma teórica, es -5.8 dB, el cual entra en el rango arrojado por el UE durante las pruebas realizadas: $-6.0dB \leq RSRQ < -5.5dB$.

Como sucede con las medidas RSSI y RSRP, la calidad de la señal recibida disminuye al aumentar la distancia entre el UE y el eNB.

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo realiza un estudio de varios elementos que en conjunto llevan a la implementación de una red 4G/LTE. Se hizo necesario en primer lugar realizar un estudio del marco teórico donde se determinan aspectos esenciales para la investigación y ver que tan factible sería realizarla, determinando como Objetivo General: Analizar el comportamiento de una red 4G/LTE implementada con Open Air Interface utilizando un equipo USRP B210

Para dar cumplimiento a éste objetivo se llevaron a cabo varias tareas, fundamentalmente realizar un estudio del estado del arte, determinar cuáles son los aspectos esenciales en la caracterización de una red 4G, realizar un estudio de la herramienta Open Air Interface y sus componentes, implementar la red OAI LTE y finalmente realizar pruebas a la red para determinar su correcto funcionamiento.

Al sistema se le hicieron cuatro pruebas esenciales. Primero se determinó la ganancia que generaba mayor potencia de salida en el equipo USRP B210, seleccionando como mejor opción de ganancia a $G_x = 80$.

Luego se decide medir la potencia total recibida promedio (RSSI) observada solo en los símbolos OFDM que contienen símbolos de referencia para el puerto de antena 0 en el ancho de banda de 5 MHz. Al tomar estas medidas se observa que estando el UE cerca de la radio base tiene una muy buena recepción de la señal pero también se observa un límite de cobertura muy pequeño debido a que ya después de 16 m no se tiene señal LTE alguna.

Para un equipo decidir a qué celda conectarse en una red LTE, utiliza un parámetro fundamental: Reference Signal Received Power (RSRP). Si un eNB tiene más de una antena éste valor será el promedio de lo que se recibe de ambas antenas. Al tomar medidas de éste parámetro se determina, al igual que con RSSI, que la potencia ofrecida por el radio no ofrece una señal más allá de los 16 m.

En algunas ocasiones a un UE no le es suficiente utilizar el parámetro RSRP para determinar a dónde conectarse. Es por ello que utiliza en esos casos el parámetro Reference Signal Received Quality (RSRQ). Éste ofrece un valor en dB que representa la calidad de la señal recibida. Al alejarse de la estación base, éste valor disminuye. Aunque los valores RSRP y RSSI eran medibles hasta los 16 m de distancia, RSRQ muestra una muy mala calidad de la señal a partir de los 9 m de distancia. En esta sección también se hace una comparación de los valores prácticos obtenidos en las mediciones con los teóricos calculados según la fórmula definida por la 3GPP para el parámetro RSRQ.

Al concluir las pruebas se determina que la red 4G implementada con OAI y equipos USRP B210 no es factible para entornos reales. El comportamiento de la red fue correcto mientras el equipo de usuario se encontraba cerca de la estación base, sin embargo la señal ofrecida por el eNB no abarcaba más allá de los 16 m. Es importante resaltar el hecho de que los equipos de National Instrument son equipos de laboratorio para el estudio de señales. No están equipados para funcionar en ambientes productivos y al aire libre.

En caso de realizarse la implementación de una red 4G/LTE con OAI sería recomendable utilizar equipos reales para la función de E-UTRAN. Open Air Interface es capaz de trabajar con equipos comerciales eNB y es una ventaja que permite aumentar su funcionalidad en ambientes reales.

7.1. Trabajos futuros y recomendaciones

Se recomienda, en caso de implementar una red OAI LTE en ambientes productivos, el uso de equipos comerciales para la función de eNB. Los equipos USRP son dispositivos destinados a pruebas de laboratorios, no a despliegues en entornos reales.

Open Air Interface ofrece la implementación de MIMO la cual sería de mucha ayuda en una red real. Se recomienda, en trabajos posteriores, hacer uso de esta ventaja del sistema, así como de la implementación de handover también ofrecida por el sistema.

Bibliografía

- [1] 3GPP, *3GPP: Release 8*, 3GPP, 2008.
Available: <https://www.3gpp.org>.
- [2] A. L. G. Reis, A. F. Barros, K. G. Lenzi, L. G. P. Meloni y S. E. Barbin, *Introduction to the Software-defined Radio Approach*, IEEE, vol. 10, pp. 1156-1161, 2012
- [3] National Instruments, *National Instruments*,
Available: <https://www.ni.com/es-mx>.
- [4] Ettus y N. Instrument, *Ettus Research: a National Instrument brand*,
Available: <https://www.ettus.com>.
- [5] S. K. a. S. Lee, *Implementation of Open Air Interface control software for 4G network*,
The Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN),
Milan, 2017.
- [6] OSA, *Open Air Interface: 5G software alliance for democratising wireless innovation*,
Available: <http://www.Open Air Interface.org>.
- [7] 3GPP, *3GPP: Release 9*, 3GPP
Available: <https://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9>.
- [8] W. Jeanette y 3GPP, *3GPP: LTE-Advance*, June 2013.
Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>.
- [9] Amarisoft, *Amarisoft Technology*, Amarisoft,
Available: <https://www.amarisoft.com/technology/>

- [10] srsLTE, *SRS: Software Radio System*, srsLTE,
Available: <https://www.softwareradiosystems.com/>
- [11] mymowireless, *Mymo Wirelessm: Next Generation Wireless Solutions*, mymowireless.
Available: <http://mymowireless.com/products-and-solutions/>
- [12] National Instruments, *National Instruments: Arquitectura para Aplicaciones LTE de LabVIEW Communications*, National Instruments,
Available: <http://www.ni.com/es-mx/>
- [13] Renyuan Wang, *Open Air Interface-An Effective Emulation Platform for LTE and LTE-Advanced*, IEEE, pp. 127 - 132, 2014.
- [14] S. L. Seawon Koh, *Implementation of Open Air Interface Control Software for 4G Network*, IEEE, pp. 747 - 749, 2017.
- [15] Chun Yeow Yeoh, *Performance Study of LTE Experimental Testbed using Open Air Interface*, IEEE, pp. 617 - 622, 2016 .
- [16] I. T. M. Stefania Sesia, *LTE The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice*, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2011.
- [17] Aderemi A. Atayero, *3GPP Long Term Evolution: Architecture, Protocols and Interfaces*, International Journal of Information and Communication Technology Research, vol. 1, n° 7, pp. 306-310, 2011.
- [18] A. Lucent, *The LTE Network Architecture: A comprehensive tutorial*.
- [19] 3GPP, *3GPP: NAS*, 3GPP,
Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas>.
- [20] J. G. Muñoz, *Estudio de la arquitectura de protocolos de LTE*, ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA, BARCELONA, 2016.
- [21] P. Burns, *Software Defined Radio for 3G*, Londres: Artech House, 2002.

- [22] National Instruments, *National Instruments: Dispositivo de Radio Definido por Software USRPs*, National Instruments,
Available: <https://www.ni.com/es-mx/>
- [23] National Instruments, *National Instruments: USRP Software Defined Radios*, National Instruments,
Available: <http://www.ni.com/pdf/product-flyers/usrp-software-defined-radio.pdf>
- [24] T. Tsou, *Ettus Research USRP*, 3rd Open Air Interface Workshop, 2017
- [25] E. Research, *Ettus Research: a National Instrument Brand*,
Available: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.
- [26] E. Research, *Ettus Research: UHD (USRP Hardware Driver)*,
Available: <https://www.ettus.com/sdr-software/uhd-usrp-hardware-driver/>.
- [27] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström y S. Parkvall, *LTE: The Evolution of Mobile Broadband*, IEEE, pp. 44 - 51, 2009.
- [28] T. S. Rappaport et al., *Wireless communications: principles and practice*, vol. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [29] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G:LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
- [30] D. Valerio, *Open source software-defined radio: A survey on gnuradio and its applications*, Forschungszentrum Telekommunikation Wien, Vienna, Technical Report FTW-TR-2008-002, 2008.
- [31] T. Schmid, O. Sekkat, and M. B. Srivastava, *An experimental study of network performance impact of increased latency in software defined radios*, in *Proceedings of the second ACM international workshop on Wireless network testbeds*, ACM, 2007.
- [32] B. Riyanto, A. Z. Langi, A. Kurniawan, E. Marpanaji, A. Mahendra, and T. Liung, *Software architecture of software-defined radio (sdr)*,

- [33] S. Sun, M. Kadoch, L. Gong, and B. Rong, Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4g/5g networks, *IEEE Network*, vol. 29, May 2015.
- [34] M. N. Sadiku and C. M. Akujuobi, Software-defined radio: a brief overview, *IEEE Potentials*, vol. 23, no. 4, pp. 14–15, 2004.
- [35] A. Larmo, M. Lindström, M. Meyer, G. Pelletier, J. Torsner, and H. Wiemann, *The lte link-layer design*, *IEEE Communications magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 52–59, 2009.
- [36] R. Stewart, Q. Xie, K. Morneault, et al., Ietf rfc 4960, stream control transmission protocol, <https://tools.ietf.org/html/rfc4960>, vol. 1, p. 2018, 2007.

Anexos

Anexo 1: Relación Ancho de Banda - PRB

BW (MHz)	# PRB
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Anexo 2: Valores de RSSI

Distancia (m)	RSSI (dBm)	
	BW = 5 MHz	BW = 10 MHz
1	-55.72	-52.1
2	-59.3	-55.61
3	-61.27	-59.92
4	-63.22	-62.91
5	-65.42	-63.83
6	-66.21	-64.52
7	-69.11	-67.11
8	-73.54	-70.54
9	-74.74	-72.71
10	-75.83	-74.66
11	-78.63	-77.09
12	-80.91	-78.23
13	-82.86	-80.95
14	-83.8	-81.79
15	-85.77	-83.9
16	-87.01	-85.41

Anexo 3: Valores de RSRP para $BW = 5$ MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dBm)
1	61	$-80 \leq RSRP < -79$
2	58	$-83 \leq RSRP < -82$
3	56	$-85 \leq RSRP < -84$
4	52	$-89 \leq RSRP < -88$
5	52	$-89 \leq RSRP < -88$
6	48	$-93 \leq RSRP < -92$
7	45	$-96 \leq RSRP < -95$
8	41	$-100 \leq RSRP < -99$
9	38	$-103 \leq RSRP < -102$
10	37	$-104 \leq RSRP < -103$
11	30	$-111 \leq RSRP < -110$
12	25	$-116 \leq RSRP < -115$
13	24	$-117 \leq RSRP < -116$
14	20	$-121 \leq RSRP < -120$
15	19	$-122 \leq RSRP < -121$
16	17	$-124 \leq RSRP < -123$

Anexo 4: Valores de RSRP para $BW = 10$ MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dBm)
1	61	$-80 \leq RSRP < -79$
2	58	$-83 \leq RSRP < -82$
3	56	$-85 \leq RSRP < -84$
4	52	$-89 \leq RSRP < -88$
5	52	$-89 \leq RSRP < -88$
6	48	$-93 \leq RSRP < -92$
7	45	$-96 \leq RSRP < -95$
8	41	$-100 \leq RSRP < -99$
9	38	$-103 \leq RSRP < -102$
10	37	$-104 \leq RSRP < -103$
11	30	$-111 \leq RSRP < -110$
12	25	$-116 \leq RSRP < -115$
13	24	$-117 \leq RSRP < -116$
14	20	$-121 \leq RSRP < -120$
15	19	$-122 \leq RSRP < -121$
16	17	$-124 \leq RSRP < -123$

Anexo 5: Valores de RSRQ para $BW = 5$ MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dB)	Valor Teórico (dB)
1	28	$-6.0 \leq RSRQ < -5.5$	-5.8
2	26	$-7.0 \leq RSRQ < -6.5$	-6.59
3	25	$-7.5 \leq RSRQ < -7.0$	-7.07
4	24	$-8.0 \leq RSRQ < -7.5$	-7.88
5	23	$-8.5 \leq RSRQ < -8.0$	-8.26
6	22	$-9.0 \leq RSRQ < -8.5$	-8.91
7	21	$-9.5 \leq RSRQ < -9.0$	-9.22
8	19	$-10.5 \leq RSRQ < -10.0$	-10.03
9	17	$-11.5 \leq RSRQ < -11.0$	-11.48
10	9	$-15.5 \leq RSRQ < -15.0$	-15.12
11	5	$-17.5 \leq RSRQ < -17.0$	-17.51
12	4	$-18.0 \leq RSRQ < -15.0$	-18.11
13	1	$-19.5 \leq RSRQ < -19.0$	-19.05
14	0	$RSRQ < -19.5$	-20.76
15	0	$RSRQ < -19.5$	-21.31
16	0	$RSRQ < -19.5$	-21.87

Anexo 6: Valores de RSRQ para $BW = 10$ MHz

Distancia (m)	Valor Reportado	Valor de Medida (dB)	Valor Teórico (dB)
1	18	$-11.0 \leq RSRQ < -10.5$	-10.79
2	20	$-10.0 \leq RSRQ < -9.5$	-9.59
3	24	$-8.0 \leq RSRQ < -7.5$	-7.99
4	23	$-8.5 \leq RSRQ < -8.0$	-8.42
5	24	$-8.0 \leq RSRQ < -7.5$	-8.09
6	18	$-11.0 \leq RSRQ < -10.5$	-10.73
7	16	$-12.0 \leq RSRQ < -11.5$	-11.8
8	16	$-12.0 \leq RSRQ < -11.5$	-11.99
9	16	$-12.0 \leq RSRQ < -11.5$	-11.92
10	15	$-12.5 \leq RSRQ < -12.0$	-12.25
11	6	$-17.0 \leq RSRQ < -16.5$	-16.82
12	0	$RSRQ < -19.5$	-20.48
13	0	$RSRQ < -19.5$	-18.94
14	0	$RSRQ < -19.5$	-21.29
15	0	$RSRQ < -19.5$	-21.05
16	0	$RSRQ < -19.5$	-21.4