

EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PICOSDR
2X2E PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA LTE, USANDO EL
SOFTWARE AMARISOFT

ANGELA TATIANA ROJAS RIOS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2017

EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PICOSDR
2X2E PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA LTE, USANDO EL
SOFTWARE AMARISOFT

ANGELA TATIANA ROJAS RIOS

Proyecto de Grado

Director
Juan Carlos Martínez Quintero, Msc.

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme la sabiduría necesaria para no fallar en este camino y guiar cada uno de mis pasos.

Agradecimiento a mi familia, en especial a mis abuelos Bertha y Daniel, mis padres Nubia y Cesar, por siempre darme su amor y apoyo incondicional para obtener mis logros y metas en lo personal y ahora profesional.

Agradezco también al Ing. Juan Carlos Martínez, por su dedicación profesional a la realización de este estudio, y su disposición personal para colaborar en este proyecto de grado, al darme las herramientas y el tiempo necesario para finalizar con satisfacción este proyecto. Al Ing. Luis Eduardo Quibano por estar presente en este proyecto, brindando su apoyo y conocimiento en el tema PicoSDR.

CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. ALCANCE DEL PROYECTO	15
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	16
5. MARCO TEÓRICO	17
5.1. Long Term Evolution (LTE)	17
5.1.1. Arquitectura del sistema LTE	18
5.1.2. Red de acceso evolucionada: E-UTRAN	19
5.1.2.1. Arquitectura de E-UTRAN.....	19
5.1.1.1 Entidades de Red e interfaces	21
5.1.1.2 MME (Mobility Management Entity).....	21
5.1.1.3 eNB (Evolved NodeB)	22
5.1.1.4 Interfaz Radio	22
5.1.1.5 Protocolos en la interfaz de radio	23
5.1.2 Red Troncal de Paquetes Evolucionada: EPC	25
5.1.2.1 Arquitectura de EPC.....	25
5.1.2.2 Arquitectura de Interfaces	27
5.1.3 UE (Equipo de Usuario)	29
5.2 Capa Física LTE	30
5.2.1 Canales físicos y modulación	32
5.2.1.1 Modulación de los canales físicos	33
5.3 Tecnologías a nivel físico: OFDMA, SC-FDMA y MIMO	35
5.3.1 OFDMA	36
5.3.2 SC-FDMA	36
5.3.3 MIMO	37
5.4 Radio Definido por Software (SDR)	37
5.5 PicoSDR 2X2 E	38
5.6 Amarisoft LTE 100	40
5.7 QualiPoc Android	42
5.8 Tarjeta de test Sim-Card	43

6. ESCENARIO DE PRUEBAS	44
6.1. Escenario propuesto	44
6.1.1. Configuración de la interfaz de radio	45
6.1.2. Configuración detallada de la red LTE	49
6.1.3. Modificación Ancho de Banda (BW) y configuración del EARFCN ..	51
6.1.4. Acceso al PicoLTE usando <i>ssh</i>	52
6.1.5. Procedimiento para puesta en marcha del nodo LTE.....	53
7. MEDIDAS CON QUALIPOC	55
7.1. Identificación de celda y tecnología	55
7.2. Monitor de medidas tecnología LTE	56
7.3. Métricas Equipo de Usuario (UE)	57
7.4. Test de velocidad	59
7.4.1. Prueba de conectividad	60
7.5. Escenario con dos equipos móviles conectados	61
7.5.1. Configuración del equipo móvil	62
8. MEDIDAS LTE ANALIZADOR DE ESPECTRO	64
9. CONCLUSIONES.....	67
10. BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXO A	70
ANEXO B	72
ANEXO C	84
ANEXO D	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE. [1]	18
FIGURA 2. RED DE ACCESO E-UTRAN. [1]	20
FIGURA 3. PROTOCOLOS DE LA INTERFAZ DE RADIO E-UTRAN	24
FIGURA 4. ARQUITECTURA BÁSICA DE LA RED TRONCAL EPC	26
FIGURA 5. ARQUITECTURA BÁSICA DE INTERFACES	28
FIGURA 6. EQUIPO DE USUARIO	30
FIGURA 7. ESQUEMAS DE ACCESO MÚLTIPLE LTE	31
FIGURA 8. RELACIÓN ENTRE LOS CANALES LÓGICOS, TRANSPORTE Y FÍSICOS DEL ENLACE DESCENDENTES. [1]	35
FIGURA 9. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA MIMO 2X2	37
FIGURA 10. NUNTAQ PICO SDR 2X2E	38
FIGURA 11. DIAGRAMA DE BLOQUES INTERNO PICO SDR 2X2 E. [18]	39
FIGURA 12. DIAGRAMA FUNCIONAL DE LA INTERFAZ DE RADIO 420M FMC	40
FIGURA 13. DIAGRAMA FUNCIONAL DEL SOFTWARE AMARISOFT LTE 100.....	41
FIGURA 14. EQUIPO DE USUARIO	42
FIGURA 15. TARJETAS DE PRUEBA ANRITSU (TEST CARD MT8820C)	43
FIGURA 16. ESCENARIO PROPUESTO RED LTE	45
FIGURA 17. ÁRBOL DE ARCHIVOS PARA CONFIGURACIÓN DE RED LTE	46
FIGURA 18. CONFIGURACIÓN ARCHIVOS MME Y ENB	48
FIGURA 19. CONFIGURACIÓN MME	50
FIGURA 20. CONFIGURACIÓN ENB	51
FIGURA 21. CONFIGURACIÓN EARFCN	52
FIGURA 22. ACCESO AL PICO LTE USANDO SSH	53
FIGURA 23. PUESTA EN MARCHA NODO LTE	54
FIGURA 24. IDENTIFICACIÓN DE CELDA Y TECNOLOGÍA LTE	55
FIGURA 25. MEDIDAS ESTACIÓN BASE ENB	56
FIGURA 26. MEDIDAS RFLTE	58
FIGURA 27. TEST DE VELOCIDAD QUALI POC	59
FIGURA 28. REPRODUCCIÓN VIDEO YOUTUBE	60
FIGURA 29. TASA DE DL	61
FIGURA 30. ESCENARIO CON VARIOS EQUIPOS MÓVILES	62
FIGURA 31. CONFIGURACIÓN EQUIPO MÓVIL	62
FIGURA 32. ANCHO DE BANDA 5 MHz – BANDA 5 CON QP	65
FIGURA 33. INGRESO LABORATORIO REMOTO WIRID-LAB	70
FIGURA 34. INGRESO AL EQUIPO PICO SDR REMOTAMENTE	71
FIGURA 35. NODO MME	72
FIGURA 36. OPCIONES DISPONIBLES INTERFAZ MME	73
FIGURA 37. INFORMACIÓN DEL NODO MME	73
FIGURA 38. INICIO ENB	75
FIGURA 39. OPCIONES DISPONIBLES EN LA INTERFAZ ENB	76
FIGURA 40. CONEXIÓN INTERFAZ S1	77
FIGURA 41. CARACTERÍSTICAS DEL CELULAR CONECTADO A LA RED	77

FIGURA 42. INFORMACIÓN DE LOS PAQUETES ENVIADOS Y RECIBIDOS.....	80
FIGURA 43. ARCHIVO CONFIGURACIÓN EARFCN	80
FIGURA 44. MODIFICACIÓN BANDAS DE FRECUENCIA DL_EARFCN	81
FIGURA 45. GUÍA DE USUARIO PARA CONFIGURAR GANANCIAS DE TX Y RX EN PICO LTE.	82
FIGURA 46. ARCHIVO DE CONFIGURACIÓN DE GANANCIA.....	82
FIGURA 47. TELEWAVE ANT1920Y9-WRU.....	86

LISTA DE TABLAS

TABLA I. ENTIDADES DE RED E INTERFACES DE E-UTRAN.....	21
TABLA II. ENTIDADES DE RED EPC	27
TABLA III. ENTIDADES DE RED E INTERFACES DE EPC PARA EL ACCESO DESDE E-UTRAN	28
TABLA IV. CANALIZACIÓN EN EL SISTEMA LTE.....	30
TABLA V. ANCHO DE BANDA LTE.....	32
TABLA VI. SEÑALES FÍSICAS LTE	32
TABLA VII. CANALES FÍSICOS LTE.....	33
TABLA VIII. ESQUEMA DE MODULACIÓN CANALES FÍSICOS.....	33
TABLA IX. CANALES DE TRANSPORTE LTE	34
TABLA X. CARACTERÍSTICAS PICO SDR Y LTE	38
TABLA XI. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PICO SDR 2X2E	39
TABLA XII. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES RADIO 420M	40
TABLA XIII. COMPONENTES DEL SOFTWARE AMARISOFT LTE 100	42
TABLA XIV. MÉTRICAS DE SEÑAL RF. [27]	58
TABLA XV. VELOCIDADES DE PICO EN FUNCIÓN DE LA CANALIZACIÓN DEL SISTEMA LTE. [29]	60
TABLA XVI. ANCHO DE BANDA OCUPADO	66
TABLA XVII. CÓDIGO DE COLOMBIA (MCC) Y CÓDIGOS DE RED MÓVIL (MNC) Y EL IMSI DE CADA OPERADOR	74
TABLA XVIII. INFORMACIÓN SIM TEST DE ANRITSU	76
TABLA XIX. BANDAS Y ANCHOS DE BANDA DEL CANAL LTE.	78
TABLA XX CONFIGURACIÓN DE GANANCIAS.....	82
TABLA XXI. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS [42].....	84
TABLA XXII. CATEGORÍA UE [43]	85
TABLA XXIII. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ANTENA TELEWAVE ANT1920Y9-WRU	86

LISTA DE ACRÓNIMOS

En el presente documento se aplicarán las abreviaturas siguientes:

3GPP	Third Generation Partnership Project.
4G	Fourth Generation (4 ^o Generation).
APN	Access Point Name.
BS	Estación Base.
DL	Enlace Descendente.
DL-SCH	DownLink Shared CHannel.
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer.
<i>E-UTRAN</i>	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network.
EARFCN	EUTRA (Absolute Radio Frequency Channel Number).
EIR	Equipment Identity Register.
<i>eNB</i>	Envolved Node B.
eNB-ID	evolved NodeB IDentifier.
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute.
FDD	Frequency Division Duplex.
FFT	Fast Fourier Transform.
GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network.
GSM	Global System for Mobile communications.
GUTI	Globally Unique Temporary Identity.
HSPA+	High-Speed Packet Access Evolution.
HSS	Home Subscriber Server.
ID	IDentity.
IMEI	International Mobile Equipment Identity.
IMEISVN	International Mobile Equipment Identity Software Version number.
IMSI	International Mobile Subscriber Identity.
IP	Internet Protocol.
IQ	In-phase - Quadrature phase.
ITU	International Telecommunications Union.
LTE	Long Term Evolution.
M-TMSI	M Temporary Mobile Subscriber Identity.
MAC	Medium Access Control.
MCC	Mobile Country Code.
MCS	Modulation and Coding Scheme.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
MME	Mobility Management Entity.
MNC	Mobile Network Code.
MSC	Mobile Switching Centre.
NAS	Negative ACKnowledgment.

OCS	Online Charging System.
OFCS	Offline Charging System.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
P-GW	Packet Data Network GateWay.
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio.
PBCH	Physical Broadcast CHannel.
PCH	Paging CHannel.
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function.
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel.
PDCP	Packet Data Convergence Protocol.
PDN	Packet Data Network.
PHY	Physical Layer.
PLMN	Public Land Mobile Network.
PSS	Primary Synchronization Signal.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
RB	Block Resource.
RE	Resource Element.
RLC	Radio Link Control.
RRC	Radio Resource Control.
RS	Reference Signal.
RSRP	Reference Signal Received Power.
RSRQ	Reference Signal Received Quality.
RSSI	Received Signal Strength Indicator.
S-GW	Serving GateWay.
S1	Interface S1.
S1- U	User Plane Interface.
S1-MME	Control Plane Interface S-GW Serving Gateway.
SAE	System Architecture Evolution.
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access.
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio.
SNR	Signal-to-Noise Ratio.
SSS	Secondary Synchronization Signal.
TA	Tracking Area.
TAC	Tracking Area Code.
TDD	Time Division Duplex.
TS	Technical Specification.
UE	Equipo de Usuario.
UL	UpLink.
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network.
Wi-Fi	Wireless Fidelity.
X2	The interface used to interconnect eNodeBs.

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el estudio e implementación de una estación base con el estándar de comunicaciones móviles LTE (*Long Term Evolution*), que proporciona mayor velocidad de transferencia de datos de acuerdo a la especificación del Reléase 8, por la 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) y compatible con posteriores reléase como Reléase 13.

La tecnología PicoSDR 2X2E de la empresa Nutaq, el software Amari LTE 100 de la empresa Amarisoft y el equipo de mediciones QualiPoc, se rigen bajo la estandarización de la 3GPP. La PicoSDR 2X2E es un equipo compacto que se basa en tecnología SDR (*Radio Definida por Software*) que permite el despliegue de una red LTE, mediante la configuración de parámetros establecidos y para diferentes servicios o especificaciones del software Amarisoft.

El software Amarisoft es integrado en el equipo PicoSDR, ya que este equipo cuenta con un pc embebido, lo que permite una implementación y cobertura para el despliegue de la red LTE. Este software realiza el procesamiento relacionado con el núcleo de la red o EPC (Evolved Packet Core) y del eNodeB (Evolved NodeB). El software Amarisoft puede ser instalado en otras plataformas de SDR pero no es intercambiable luego de estar instalado.

Para el proyecto se realizan levantamiento de la información con el fin de caracterizar el equipo PicoSDR 2X2E a nivel técnico, con información fundamental como frecuencias, anchos de banda y funcionalidades que aporten a nivel investigativo el desarrollo del proyecto. También se analizó el esquema de la red LTE y la descripción de elementos que lo conforman, así como arquitectura de las interfaces y protocolos de trabajo; para luego realizar mediciones y establecer niveles de señal de la red en el software QualiPoc, para análisis y desempeño de la tecnología sobre dispositivos móviles.

En este documento se implementa un escenario para mostrar el funcionamiento, entorno de trabajo, configuración y prácticas que se deseen realizar a nivel de investigación o académica en materias como comunicación digital y comunicación inalámbrica y móvil con el fin de analizar, investigar y estudiar mejoras en pro de futuros proyectos o prácticas de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

LTE (Long Term Evolution) o E-UTRAN (Red de Acceso Terrestre Universal Evolucionado), es un estándar desarrollado por la comunidad 3GPP en el reléase 8 (R8) de comunicaciones móviles, parte fundamental de acceso al sistema de paquetes evolucionados (EPS). Las principales características para la red de acceso se encuentran en los tiempos de ida, alta eficiencia espectral, flexibilidad en la frecuencia, presenta altas velocidades de datos pico y ancho de banda. LTE es una tecnología que ofrece estabilidad debido a que cuenta con una tasa de bits alta, con baja latencia, flexible, evitando la fragmentación por la duplexación que soporta.

El sistema de paquetes evolucionados (EPS) se basa específicamente en IP, estos servicios se realizan gracias al protocolo IP en tiempo real y comunicación de datos. La asignación de la dirección IP en un teléfono móvil se realiza solo cuando el móvil se encuentre encendido y se libera esta, cuando se apaga.

La solución de acceso LTE, está basada en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), que se combina con modulación de orden superior (hasta 64 QAM), cuenta con grandes anchos de banda estandarizados como 1.4, 3, 5, 15 y 20 MHz y multiplexado espacial en el enlace descendente (MIMO 2X2, 4X4 o 8X8) obteniendo velocidades de datos altas. La tasa de datos teórica máxima en el canal de transporte es de 75 Mbps en el enlace ascendente, y en el enlace descendente, manejando multiplexación espacial se puede obtener una tasa hasta de 300 Mbps.

LTE (Long Term Evolution) se diseñó con el fin de soportar servicios de conmutación de paquetes, con el único objetivo de proporcionar una conectividad perfecta del protocolo de internet (IP) entre equipo de usuario (UE) y la red de paquetes de datos (PDN), asegurando acceso a las aplicaciones de manera segura y sin interrupciones a los usuarios finales durante la movilidad.

La plataforma SDR (Software Defined Radio), es un sistema de radio programable que delega gran parte del procesamiento hecho en hardware en software, mediante un ordenador o equipos que cuenten con soluciones SDR de mesa como la PicoSDR 2X2E. Dentro de las ventajas se tiene un bajo costo y menor complejidad, debido a que se puede modificar la funcionalidad específica de la radio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad Militar Nueva Granada cuenta con equipos de comunicaciones para medición y desarrollo de nuevas tecnologías. Un ejemplo de esto es el radio reconfigurable Nutaq PicoSDR 2X2E, adquirido por la facultad de Ingeniería en el programa de Ingeniería en Telecomunicaciones para labores de investigación y academia.

Para sacar la máxima potencialidad de las aplicaciones del equipo Nutaq PicoSDR 2X2E a futuro, es necesario establecer los alcances del hardware de tal forma que se determinen parámetros de funcionamiento. Adicional a esto se cuenta con el software Amarisoft LTE que es usado junto con la plataforma SDR como una estación base LTE totalmente basada en software y ejecutada en un PC.

Los parámetros obtenidos de la estación base, permitirán su uso en proyectos de investigación o academia y dan una visión más real de las redes de telefonía móvil a los estudiantes de asignaturas como: Comunicación Digital, Comunicación Inalámbrica y Móvil e Instrumentación en Telecomunicaciones.

Teniendo en cuenta lo planteado se realiza una pequeña descripción de la tecnología LTE, teniendo en cuenta la norma 3GPP que regula y estandariza esta tecnología que es materia de estudio y se establece un escenario para pruebas y puesta en marcha de una estación base (eNB) en la universidad Militar Nueva Granada. Esto se da dentro de un marco de estudio e investigación con el fin de realizar la caracterización del equipo PicoSDR 2X2E con la tecnología LTE y sus especificaciones.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las características técnicas del equipo de radio definido por software “PicoSDR2x2E” de la empresa Nutaq e implementar herramientas de software que permitan establecer la potencialidad del equipo y su uso en comunicaciones digitales.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los aspectos técnicos del radio a partir de su construcción, para establecer sus rangos en cuanto a frecuencia, amplitud, potencia de salida y modos de transmisión – Recepción.
- Diseñar un escenario de comunicación LTE basado en el software de Amarisoft sobre la PicoSDR 2X2E y los dispositivos QualiPoc, en el cual se realicen mediciones de calidad de señal sobre la capa física del esquema.
- Realizar la medición de parámetros LTE entregados por el QualiPoc y comparar que se encuentren dentro de lo establecido con las normas 3GPP.

3. ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto tiene como fin la implementación de una estación base LTE compatible con Reléase 8 y Reléase posteriores (hasta reléase 12), mediante tecnología SDR con el equipo PicoSDR 2X2E de la empresa Nutaq y software Amarisoft (Amari LTE 100).

Para el desarrollo de esta propuesta, se evaluarán características técnicas del equipo mediante pruebas de software, que permitan establecer la potencialidad del equipo y su amplio uso.

Al determinar las características del equipo, se procede a establecer los rangos en cuanto a frecuencia, amplitud, potencia de salida y modos de transmisión – recepción, así como pruebas y su aplicabilidad, con el fin de realizar una documentación adecuada, para integrarla debidamente al manual de pruebas.

Se identifican características del hardware y software, así como los rangos de utilización del equipo; se procede a la toma de pruebas de funcionamiento del equipo PicoSDR 2X2E, donde se une a la red LTE equipos móviles y se verifica la conexión con aplicaciones que permitan recibir video y realizar descargas en línea al estar conectados a la estación base.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se describe la metodología utilizada para la realización y ejecución del proyecto.

En primer lugar se realizó una investigación teórica sobre la arquitectura LTE mediante lectura de libros, artículos, normas, documentos científicos y tesis. Una vez entendidas las funcionalidades de los elementos que conforman la tecnología LTE, se realiza una investigación exhaustiva de los parámetros clave para la configuración de la estación base, mediante la lectura de informes técnicos del 3GPP y artículos de investigación con implementaciones realizadas.

La segunda fase de este proyecto analiza los aspectos técnicos del equipo de PicoSDR 2X2 E de la empresa Nutaq, en esta fase se establecieron parámetros de esta herramienta para determinar la configuración del software Amarisoft LTE y su implementación.

En la tercera fase se implementa un escenario de comunicación LTE, basado en el software Amarisoft LTE, teniendo en cuenta que esta herramienta dispone de múltiples opciones y configuraciones. Se explora el software mediante el uso de comandos y modificación de archivos de configuración. A continuación se verifica el funcionamiento del escenario.

En la cuarta fase se realiza la medición de parámetros LTE con el equipo QualiPoc, se evalúa el uso de esta tecnología y su rendimiento frente a parámetros ya establecidos por las normas.

5. MARCO TEÓRICO

En el desarrollo del marco teórico se proporcionan conceptos, ideas y fundamentos más claros acerca de temas como LTE (Long Term Evolution), Radio Definido por Software (SDR) y equipos de mediciones como analizador de espectro y QualiPoc. Se encontraran conceptos básicos, complementarios y específicos.

Inicialmente se presenta la arquitectura general de una red móvil de comunicaciones basada en las descripciones del sistema LTE. Es de aclarar que el término LTE se toma de la 3GPP para nombrar una línea de trabajo con único fin de estudio la evolución de la red de acceso de UTRAN, llamada como UTRAN. Por lo que, se denomina a la nueva red de acceso E-UTRAN (Evolved UTRAN) aunque el término LTE es más común en las especificaciones paralelo a E-UTRAN.

5.1. Long Term Evolution (LTE)

LTE (Long Term Evolution) o E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network), introducida en 3GPP Reléase 8, hace parte del acceso del Evolved Packet System (EPS). El sistema LTE consiste en altas velocidades de datos de pico, flexibilidad en el ancho de banda y frecuencia, alta eficiencia espectral y cortos tiempos de ida y regreso.

Características del sistema LTE:

- Proporciona máximas velocidades de transmisión pico de 100 Mbps.
- Ancho de banda variable: 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz.
- Mejora en la eficiencia espectral con respecto a otros sistemas, especialmente en la técnica de acceso que utiliza el sistema LTE, OFDMA (DL) y SC-FDMA (UL).
- Uso de modulación en el estado del canal de radio que permiten diferentes velocidades y las modulaciones a trabajar son: QPSK, 16QAM y 64 QAM.
- Aumenta la capacidad del sistema con la tecnología MIMO.
- Compatibilidad con otros sistemas, sean 3GPP o no.

5.1.1. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura completa del sistema LTE se ilustra de forma simplificada en la Figura 1. Se denomina según en las especificaciones del 3GPP como EPS (Evolved Packet System).

Los componentes principales del sistema LTE son:

- E-UTRAN (Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network).
- EPC (Evolved Packet Core).
- UE (User Equipment).

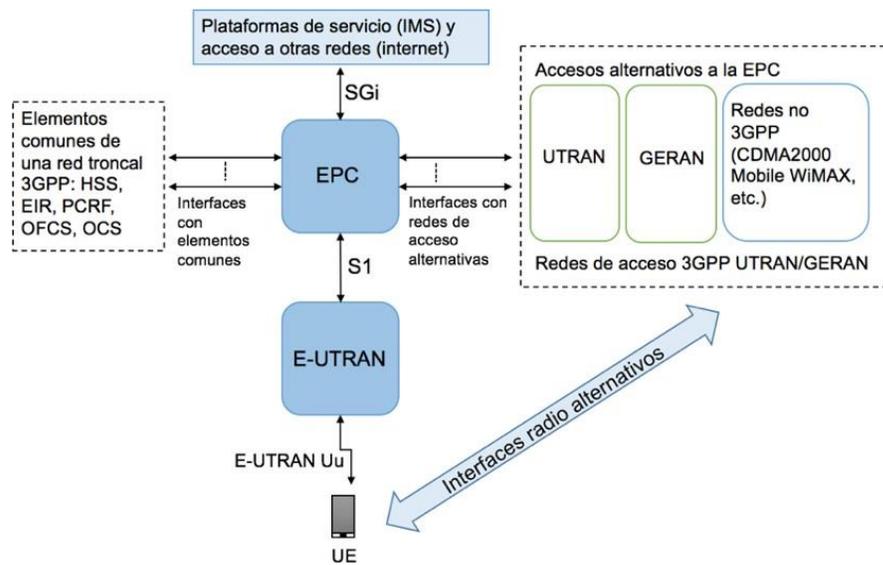


Figura 1. Arquitectura del sistema LTE. [1]

En la Figura 1, muestra la arquitectura básica del EPS cuando el equipo de usuario (UE) está conectado al EPC a través de E-UTRAN (red de acceso LTE); así como algunos elementos comunes entre los que se encuentra la base de datos que tiene como fin almacenar los elementos comunes del sistema como información de la suscripción de usuarios (HSS).

A continuación breve descripción de las interfaces principales de E-UTRAN y EPC.

- S1 es la interfaz conformada entre la E-UTRAN y EPC, que facilita a la EPC los mecanismos necesarios y dar gestión al acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN.

- E-UTRAN Uu, interfaz de radio entre equipo de usuario y E-UTRAN. [1]
- La interfaz Sgi de la EPC contiene la conexión de redes a paquetes externos y los servicios IMS. Sgi es una interfaz análoga definida en redes GPRS/UMTS. [1]

El sistema LTE cuenta con una característica importante ya que contempla el acceso de las redes UTRAN, GERAN y otras redes que no conforman la 3GPP a sus servicios. Las interfaces de la EPC soportan la interconexión de redes tanto 3GPP como otras redes. [1]

Finalmente y para este tipo de arquitectura se utiliza la tecnología de la red basada en IP para lograr la interconexión de diferentes equipos físicos, para funcionalidad en la red EPC y E-UTRAN.

5.1.2. Red de acceso evolucionada: E-UTRAN

5.1.2.1. Arquitectura de E-UTRAN

La arquitectura de red de acceso se conforma de la entidad de red llamada *evolved NodeB* (eNB), y esta compone la estación base de E-UTRAN. La descripción de la arquitectura de E-UTRAN se detalla en la especificación del 3GPP TS 36.300.

Los eNodeBs están normalmente interconectados entre sí por la interfaz "X2" y conectados al EPC (Evolved Packet Core) por medio de la interfaz S1, más concretamente al MME (Mobility Management Entity) por la interfaz S1- MME y al Serving Gateway (S-GW) por la interfaz S1- U. [1]

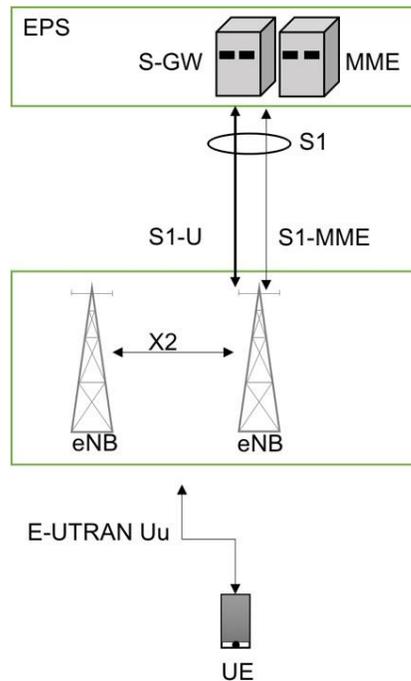


Figura 2. Red de acceso E-UTRAN. [1]

En la Figura 2, se ilustra la arquitectura E-UTRAN en el cual los eNB utilizan interfaces S1 y S2 para lograr comunicación con el resto de elementos del sistema, y así proporcionar la conexión entre equipo de usuario (UE) y red troncal.

La transferencia de información por el canal de radio entre el eNB y el equipo de usuario (UE) se logra a través de la interfaz de radio LTE bien conocida como interfaz E-UTRAN Uu.

La red LTE permite de forma independiente y a su vez separar tanto entidades de red propuestas a respaldar el plano de control como la red dedicada a respaldar el plano de usuario, con el fin de soportar la señalización y al mismo tiempo para el envío del tráfico a usuarios. Todo esto se logra por una propiedad del eNB que permite dividir en dos interfaces S1 diferentes, S1-MME para soportar el plano de control y S1-U para sustentar el plano de usuario con el fin de conectar a toda la red troncal EPC. [1]

Tabla I, se presenta en síntesis las entidades de red e interfaces E-UTRAN y las especificaciones del 3GPP que se relacionan entre ellas. [1]

Tabla I. Entidades de red e interfaces de E-UTRAN.

Entidades de red	Denominación	Descripción
		Evolved NodeB (eNB)
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas
	E-UTRAN Uu (Interfaz radio)	eNB UE
	X2	eNB - eNB
	S1-MME	eNB Red troncal EPC (MME)
	S1-U	eNB Red troncal EPC (S-GW)

5.1.1.1 Entidades de Red e interfaces

A continuación se describe en detalle funciones asociadas a la entidad MME, estación base eNB y las principales características de la interfaz de radio.

5.1.1.2 MME (Mobility Management Entity)

En el plano de control de la red E-UTRAN la entidad MME se posiciona como el elemento principal para gestionar el acceso de los terminales. La entidad MME es asignada a todo terminal que se encuentre registrado en la red LTE. [1]

La entidad MME que se asigna al usuario varía dependiendo a solicitud de la movilidad que presenta el usuario dentro de la zona de servicio. Dentro de las principales características de la entidad se tienen:

- Acceso de usuarios por medio de la E- UTRAN, para autenticación y autorización de la red.
- Gestión de servicios portadores.
- Modo *idle* para la gestión de movilidad a los usuarios.

5.1.1.3 eNB (Evolved NodeB)

Como se describió en la arquitectura general de E-UTRAN, en el eNB se terminan los protocolos de la interfaz de radio ya que integra todas las funciones de la red de acceso.

Dentro de las funcionalidades claves del eNB se encuentra la gestión de los recursos de radio, así como funciones de control de admisión de los servicios portadores de radio, control de movilidad, asignación dinámica de los recursos de radio tanto en los enlaces ascendentes como descendentes (scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de realización y envío de medidas desde los equipos de usuario con el fin de que puedan ser útiles en la gestión de los recursos, etc. [1]

Dentro de las funcionalidades base de un eNB se encuentran:

- La entidad MME realiza selección dinámica para registro en la red LTE.
- Un eNB en la red puede estar conectado a múltiples MMES.
- El “pool área”, conjunto de MMES que permiten acceso un NB.
- Permite la gestión de varias celdas el eNB.

5.1.1.4 Interfaz Radio

Esta interfaz soporta tres componentes de transferencia de información en el canal de radio y se detallan a continuación:

- Difusión (Broadcast) señalización de control en la zona de cobertura de la celda.
- A través del canal de radio los usuarios realizan la transmisión de paquetes IP.
- Transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un equipo de usuario. El RRC (protocolo de radio) realiza gestión de los servicios portadores de radio entre el equipo de usuario y el eNB.

5.1.1.5 Protocolos en la interfaz de radio

Este protocolo se estructura en planos de usuario y de control. Donde el plano de usuario es utilizado para el envío del tráfico (IP) y el plano de control sustenta las funciones y procedimientos de los protocolos principales en las diferentes interfaces. [1]

En la Figura 3, se presentan los protocolos y funciones utilizados en las diferentes interfaces.

La torre de protocolos a través de la radio permite el envío de paquetes IP entre el eNB y el UE. Esta se encuentra formada por una capa de enlace o capa de nivel 2 y una capa física, que se describen a continuación:

- *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*: proporciona el punto de acceso al servicio portador radio (Radio Bearer, RB), es decir, que proporciona entrega y recepción de los paquetes IP del tráfico que el usuario efectúe.
- *Radio Link Control (RLC)*: permite el envío confiable de los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. La capa RLC tiene como función la modificación de errores aplicando mecanismos de Automatic Repeat ReQuest (ARQ). [1]
- *Medium Access Control (MAC)*: realiza el control de acceso al canal radio, es decir, que la capa MAC tiene funciones de scheduling dinámico atendiendo a prioridades y entre equipos de usuario. [1]
- *Capa física*: realiza la transmisión a través del canal radio, es decir, que aloja funciones de codificación de canal, asociado a las técnicas MIMO. [1]

Plano de usuario Plano de control

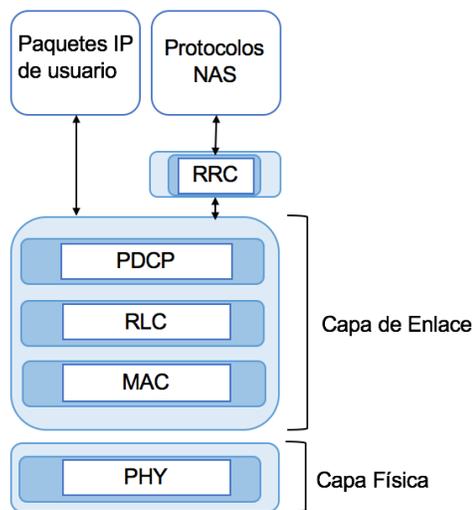


Figura 3. Protocolos de la interfaz de radio E-UTRAN.

Para el plano de control se soporta sobre la capa física entre el equipo de usuario y la red. Los protocolos utilizados en el plano usuario y capa de enlace son PDCP, RLC y MAC.

Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

- *Radio Resource Control (RRC)*: establece un control en la conexión del eNB y equipo de usuario, con la gestión operativa de la interfaz radio que permite llevar a cabo un sin número importante de funciones.
- Señalización de los protocolos NAS: comprenden la entidad de red MME en la red troncal y equipo de usuario. [1]

5.1.2 Red Troncal de Paquetes Evolucionada: EPC

5.1.2.1 Arquitectura de EPC

El EPC es la última evolución de la arquitectura de red básica 3GPP y fue introducido por primera vez por 3GPP en la versión 8 de la norma.

EPC es la red central responsable del control general del UE (Equipo Usuario) y del establecimiento de las portadoras. Una de sus principales características es el uso del protocolo IP para el transporte de todos los servicios, tanto los servicios de datos, voz y mensajes.

Una de las grandes diferencias respecto a tecnologías anteriores (GSM, GPRS), es que los datos de usuario (conocido también como plano de usuario) y señalización (conocido también como plano de control), funcionan de manera independiente, permitiendo una fácil adaptación y dimensionamiento de la red.

La Figura 4 establece las entidades de red que integran el núcleo de la red troncal EPC. Las funciones que soportan el control de conectividad se provisionan de la conectividad IP a través de la red de acceso E-UTRAN. [1]

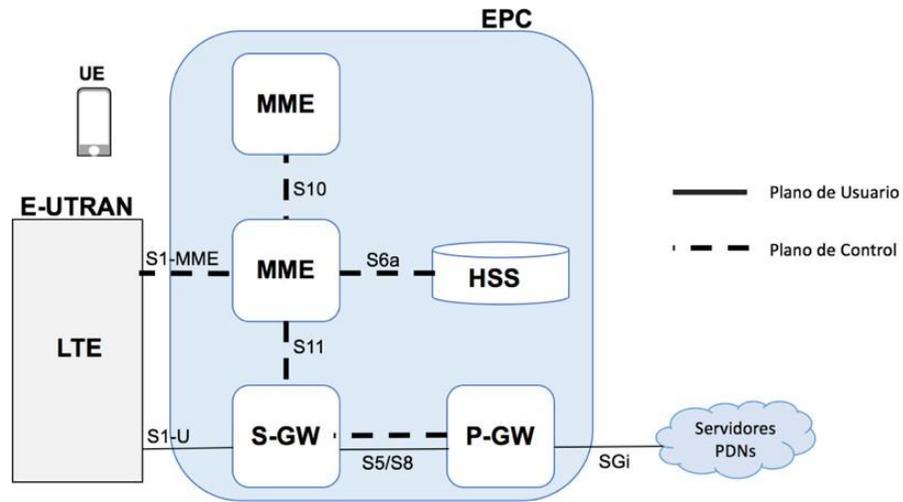


Figura 4. Arquitectura básica de la red troncal EPC.

En la Figura 4, se presenta el núcleo del sistema EPC conformado por tres entidades de red: MME (Mobility Mmanagement Entity), Serving Gateway (S-GW) y Packet Data Network Gateway (P-GW).

Estas tres entidades y la base de datos principal del sistema 3GPP denominadas HSS (Home Subscriber Server), conforman los elementos principales para el aprovisionamiento del servicio entre los equipos de usuario a través de E-UTRAN y, la red troncal EPC que se conecta a redes externas.

La arquitectura de la red troncal EPC, da soporte a diferentes funciones:

- En el plano de usuario se centralizan las funciones asociadas en las dos entidades (S-WG y P-GW).
- Con la interfaz S1 se realiza la interconexión de la red de acceso E-UTRAN a la EPC.
- En la entidad MME finaliza la interfaz S1-MME que sostiene el plano de control.
- En la entidad S-GW finaliza la interfaz S1-U que sustenta el plano de usuario.
- A través de la interfaz S11 se realiza la transferencia del plano de usuario de red LTE.

- La información relacionada a los usuarios de la red autorizados, se realiza a través de la conexión de la entidad HSS y la interfaz S6a.
- También se realiza comunicación entre entidades MME, mediante la interfaz S10.

La Tabla II, muestra los principales nodos lógicos que componen la interfaz EPC.

Tabla II. EPC - Entidades de red.

	Denominación	Descripción	Referencia 3GPP
Entidades de red EPC	MME	Nodo del plano de control de la red LTE	TS 23.401[2]
	S-GW	Punto del plano de usuario en la red troncal	TS 23.401[2]
	P-GW	Interconexión con redes externas	TS 23.401[2]
	HSS	Base de datos que contiene información con el usuario y suscriptores.	TS 23.008[3]

5.1.2.2 Arquitectura de Interfaces

En la Figura 5 se ilustra la arquitectura de interfaces y entidades de EPC. Las entidades funcionales de la red troncal permiten que estas entidades puedan resistir en un equipo físico con las mismas condiciones. [4]

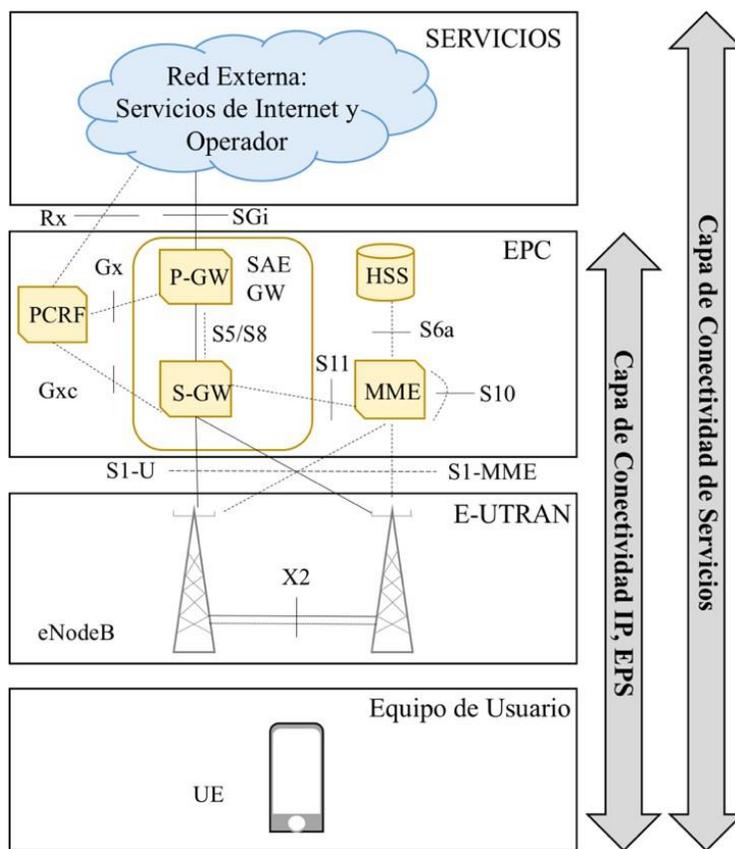


Figura 5. Arquitectura básica de interfaces.

En la Tabla III se presentan las entidades de red que conforman el EPC así como otras entidades que hacen parte de los sistemas 3GPP.

Tabla III. Entidades de red e interfaces de EPC para el acceso desde E-UTRAN

	Denominación	Descripción	Referencia 3GPP
Entidades de red EPC	MME	Plano de control de la red LTE	TS 23.401 [2]
	S-GW	Plano de usuario en la red troncal	TS 23.401 [2]
	P-GW	Interconexión con redes externas	TS 23.401 [2]
Entidades comunes a las	Denominación	Descripción	Referencia 3GPP
	HSS	Base de datos del sistema global.	TS 23.008 [3]

redes 3GPP	PCRF	Elemento central del sistema de control de uso de la red.	TS 123.203 [5]
Interfaces	Denominación	Descripción	Referencia 3GPP
	S1-MME	MME E-UTRAN (eNB)	TS 36.410 [6]
	S1-U	S-GW E-UTRAN (eNB)	TS 36.410 [6]
	SGi	P-GW Redes externas	TS 29.061 [7]
	S6a	MME HSS	TS 29.272 [8]
	S5/s8	P-GW S-GW	TS 29.274 [9]
	S11	MME S-GW	TS 29.274 [9]
	S10	MME MME	TS 29.274 [9]
	Señalización NAS	UE MME	TS 24.301 [10]
	Rx	PCRF Plataformas servicios	TS 123.203 [5]
	S9	PCRF PCRF	TS 123.203 [5]
	Gx/Gxc	P-GW/S-GW PCRF	TS 29.212 [11]

5.1.3 UE (Equipo de Usuario)

Se define como equipo de usuario al dispositivo que accede a los servicios de la red. El equipo de usuario incluye una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card, UICC) con información que permite conexión a la red y la sus servicios.

El equipo usuario (UE) contiene dos elementos básicos:

- Módulo de subscripción de usuario: La SIM/USIM es el identificador para la red.
- El equipo móvil (ME): integra las funciones de comunicación con la red celular.
 - Mobile Termination (MT): se ocupa de todas los componentes de comunicación.

- Terminal Equipment (TE): equipo que se requiere para intercambio de comunicación con el usuario.

A continuación se describe la arquitectura del equipo de usuario LTE. Figura 6. [1]

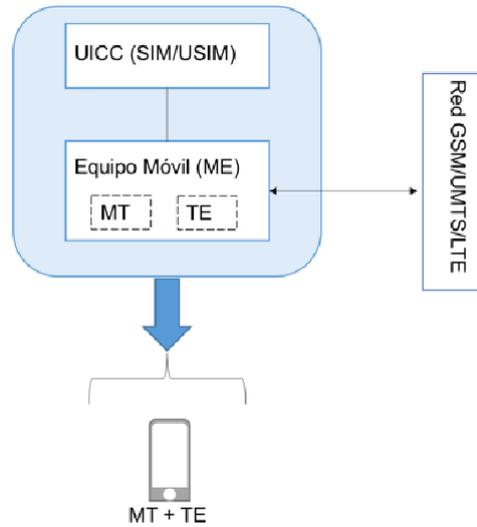


Figura 6. Equipo de Usuario.

5.2 Capa Física LTE

Los esquemas de acceso múltiple en LTE utilizan técnicas de múltiple acceso OFDMA para enlace descendente (eNB a Móvil) y SC-FDMA para enlace ascendente (Móvil a eNB). En ambos casos la separación entre subportadoras es fija y equivale a 15 KHz.

En la Tabla IV indica el número de subportadoras que se encuentran habilitadas y que varían en función de la canalización del sistema. [12]

Tabla IV. Canalización en el sistema LTE

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de Subportadoras Disponibles	73	181	301	601	901	1201

La asignación de recursos en el dominio de frecuencia tiene lugar con una resolución de recursos de bloque (RB) de 180kHz para el enlace ascendente como el enlace descendente. Esta asignación específica del usuario del enlace UL es continua, permitiendo la transmisión de una sola portadora, mientras que en enlace DL utiliza bloques de recursos que son independientes del espectro.

LTE permite flexibilidad del espectro donde el ancho de banda de transmisión es configurable entre 1.4MHz y 20 MHz, dependiendo del espectro disponible. En la Figura 7, muestra un ejemplo de asignación de frecuencia en enlace descendente LTE y transmisión del enlace ascendente. [12]

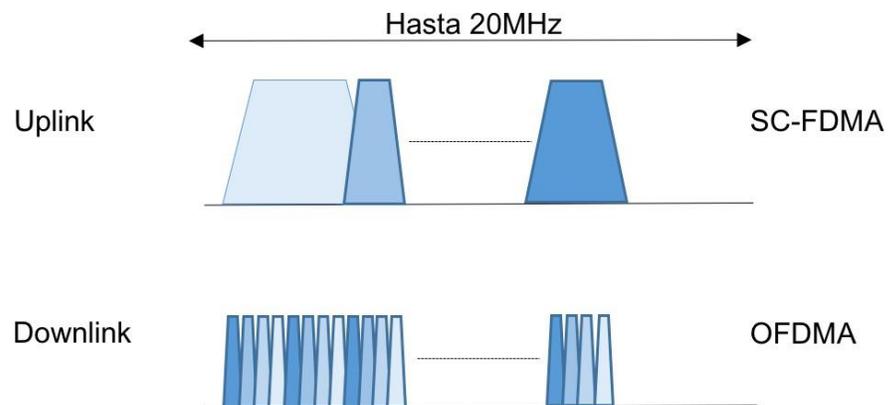


Figura 7. Esquemas de acceso múltiple LTE

En la Tabla V se definen los valores del ancho de banda del canal utilizado por la portadora. Físicamente el ancho de banda es el ancho de canal en frecuencia medida desde el borde de canal más bajo hasta el borde de canal más alto.

El número de RB (Resource Block) que puede estar dentro de un ancho de banda de canal determinado, varía proporcionalmente al ancho de banda. La configuración de ancho de banda para transmisión corresponde al número máximo de bloques de recursos que pueden estar dentro del ancho de banda del canal.

Dado un ancho de banda de canal en el ancho de banda de 20MHz para LTE Reléase 8, es decir que, 100RB pueden estar dentro de este ancho de banda. Estos valores a para cada ancho de banda se tienen a continuación. [13]

Tabla V. Ancho de banda LTE.

Ancho de Banda del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Ancho de Banda de transmisión [MHz]	1.08	2.7	4.5	9	13.5	18
Ancho de Banda de transmisión [RB]	6	15	25	50	75	100

5.2.1 Canales físicos y modulación

La interfaz aérea LTE consiste en señales físicas y canales físicos, que se definen en 3GPP TS 36.211. En capa 1 se generan las señales físicas y tienen como fin la sincronización del sistema. Los canales físicos transportan datos de capas superiores incluyendo programación, control y carga útil del usuario. [14]

En la Tabla VI, se resumen las señales físicas del enlace descendente, es decir, que codifican la célula realizando la sincronización primaria y secundaria para el UE. [15]

Para el enlace descendente como el enlace ascendente existen señales de referencia (RS), conocidos como señales piloto en otras normas, que son utilizadas por el receptor para estimar la fluctuación de amplitud y fase de la señal recibida.

Sin el uso de RS, los desplazamientos de fase y amplitud en la señal recibida harían que la demodulación fuera poco fiable, particularmente a grandes modulaciones como 64QAM o 16QAM.

Tabla VI. Señales físicas LTE

Señales Físicas DL	Propósito
Señal de sincronización primaria	Búsqueda e identificación de células por el UE. Lleva parte de la ID de la celda (una de tres secuencias ortogonales)
Señal de sincronización secundaria	Búsqueda e identificación de células por el UE. Lleva el resto de la ID de la celda (una de 168 secuencias binarias)
Señal de Referencia	Se utiliza para la estimación de canales de enlace descendente. La secuencia de resultados derivada de la ID de la célula (una de $3 \times 168 = 504$ secuencias pseudo aleatorias)

Junto a las señales físicas están los canales físicos que contienen información del sistema y del usuario. En la Tabla VII se tienen los canales físicos DL, así como el propósito de cada uno; teniendo en cuenta que existe una ausencia de canales condicionados que es una característica de los sistemas de solo paquetes. [15]

Tabla VII. Canales físicos LTE.

Canales DL	Nombre	Propósito
PBCH	Canal Físico de difusión	Información específica de la celda
PDCCH	Canal físico de control de enlace descendente	Programación, ACK / NACK
PDSCH	Canal físico compartido de enlace descendente	Carga útil
PMCH	Canal físico de Multidifusión	Lleva el canal de transporte MCH
PCFICH	Canal físico de indicador de formato de control	Número de símbolos PDCCH OFDMA por subtrama (1, 2, 3 ó 4)
PHICH	Canal físico indicador híbrido ARQ	Lleva HARQ ACK / NACK

5.2.1.1 Modulación de los canales físicos

Un canal físico con enlace descendente son elementos de recursos que transportan información de capas superiores y es la interfaz definida en el documento 3GPP TS 36.211. [14]

En la Tabla VIII, se definen los canales físicos para el enlace descendente así como el esquema de modulación que cada canal utiliza. [14]

Tabla VIII. Esquema de modulación canales físicos. [14]

Esquema de modulación para Downlink LTE	
Downlink	Esquema de modulación
PBCH	QPSK
PDCCH	QPSK
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PCFICH	QPSK
PHICH	BPSK

La capa física mediante canales de transporte y canales de información de control, suministra servicios de transporte de datos..

En la Tabla IX, se enumeran los tipos de canales de transporte para enlace descendente. [15]

Tabla IX. Canales de transporte LTE

Tipos de canales de transporte	Funciones	
Dowlink		
Downlink Shared Channel (Canal Compartido de Enlace Descente)	DL-SCH	Encargado de transportar datos como señalización de usuario.
Broadcast Channel (Canal de Difusión)	PBCH	Permite que los dispositivos accedan al sistema e identificar el operador.
Paging Channel (Canal de Paginación)	PCH	Informa a los terminales móviles de actualizaciones.
Multicast Channel (Canal Multicast)	MCH	Encargado de la transmisión de cobertura de la celda en toda el área.

Para la ilustración de la Figura 8, se tiene la relación de los canales Downlink LTE: lógicos, transporte y físicos.

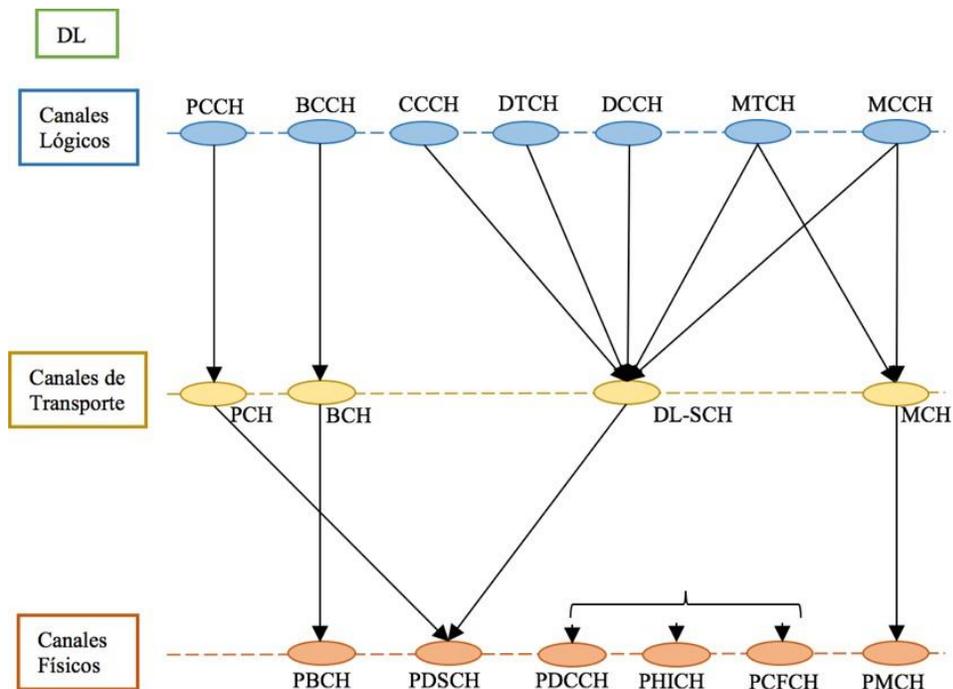


Figura 8. Relación entre los canales lógicos, transporte y físicos del enlace descendentes. [1]

5.3 Tecnologías a nivel físico: OFDMA, SC-FDMA y MIMO

Se definen los aspectos más relevantes del nivel físico para el sistema LTE, con el fin de tener mayor eficiencia en el uso de los recursos de radio y niveles de capacidad.

Se utiliza la técnica para enlace descendente OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y para enlace ascendente SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).

Otra de las funcionalidad de la tecnología LTE es la implementación de estos dos esquemas de múltiple acceso que soporta diversas modulaciones: QPSK, 16QAM y 64QAM.

5.3.1 OFDMA

Se usa en enlace descendente y permite que los usuarios transporten su información sobre los símbolos de las sub-portadoras. [1]

Las subportadoras se encuentran con una separación ya definida de $\Delta f=15$ kHz, así como la existencia de un espaciado reducido de 7.5 kHz. [1]

5.3.2 SC-FDMA

Se utiliza en el enlace ascendente del sistema LTE, dentro de las funciones importantes es el consumo de potencia que proporciona una eficiencia en términos de potencia. [1]

Esta tecnología al aumentar la potencia radiada para el dominio de la frecuencia produce una reducción en el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo y genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB para canales con desvanecimiento. [1]

5.3.3 MIMO

MIMO (Multiple Input Multiple Output), es un método de la tecnología LTE que se utiliza para mejorar el rendimiento del sistema, proporcionando a LTE una capacidad de mejoramiento en cuanto a rendimiento de datos y eficiencia espectral superando el obtenido por el uso de OFDM.

Teniendo en cuenta que MIMO añade complejidad al sistema en cuanto a procesamiento y número de antenas necesarias, ahora permite conseguir altas tasas de datos junto con gran eficiencia espectral mejorada.

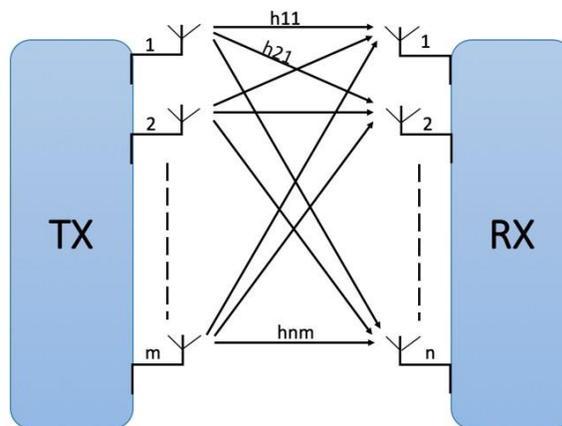


Figura 9. Esquema general del sistema MIMO 2X2.

En la Figura 9, se tiene el transmisor (TX) y el receptor (RX) de un sistema MIMO. [16]

Para la configuración de enlace tanto ascendente como descendente se utiliza dos antenas de transmisión en la estación base y dos antenas de recepción en el terminal móvil, como línea de base.

5.4 Radio Definido por Software (SDR)

Tecnología usada para mejorar la interoperabilidad entre diferentes servicios. Se compone de manera híbrida con software y hardware, permitiendo la reconfiguración dinámica para habilitar comunicaciones entre una amplia variedad de protocolo y normas de comunicaciones. [17]

5.5 PicoSDR 2X2 E

La PicoSDR 2X2E es una solución de Radio Definido por Software (SDR) de Nutaq, que incorpora soluciones embebidas y personalizadas con lógica FPGA de altas prestaciones, diversas interfaces de memoria y potentes módulos transceptores RF MIMO 2X2. [18]

En la Figura 10, se tiene la ilustración del equipo con el cual se realizaron las pruebas.



Figura 10. Nutaq PicoSDR 2X2E

Las características técnicas más importantes de este equipo se encuentran en Tabla X.

Tabla X. Características PicoSDR y LTE

	PicoSDR 2X2E	LTE
Configuración Antena	MIMO 2X2, SISO 1X1	MIMO 2X2, 4X4*, SISO 1X1
Anchos de banda (MHz)	1.5MHz a 28MHz	1.4MHz a 20MHz
Frecuencia	0.3 a 3.8 Ghz	Bandas 4 y 7
Multiplexación	FFD – TDD	FFD – TDD
BANDAS FDD	4, 7	1 - 21

*NOTA: NO SOPORTA MIMO 4X4.

NOTA: Ver ANEXO B. Tabla XIX. Bandas y anchos de banda del canal LTE, para ver las frecuencias de las bandas LTE FDD.

Para ver en detalle cada una de las especificaciones técnicas con las que cuenta el equipo de la empresa Nutaq PicoSDR 2X2E, ver Tabla XI.

Tabla XI. Especificaciones técnicas PicoSDR 2X2E

Modelo	Canal RF	MIMO	Cobertura RF	Ancho de Banda RF	Interfaz Host Remota	Rendimiento Host Remoto	FPGA	CPU Integrada	Rendimiento Integrado FPGA-CPU	Almacenamiento Interno
PicoSDR 2x2 E	2x TRX	2x2	0.3 – 3.8 GHz	1.5 – 28 MHz	1x GigE (opt. 4xPCle)	-900 Mbps 6.4 Gbps	1x V6**	Intel 4C i7 2.1 GHz	2x (PCIe 4x) -12 Gbps	64 GB SSD +2x SATA

** : Virtex-6 opciones disponibles: LX240T, LX550T, SX315T o SX475T.

En la Figura 11 se ilustra el diagrama de bloques interno del PicoSDR 2X2 E, donde se pueden observar las entradas, salidas y sub-sistemas que implementan las características técnicas mencionadas en detalle. De igual manera la ubicación de los software que forman parte fundamental en el despliegue de la red LTE.

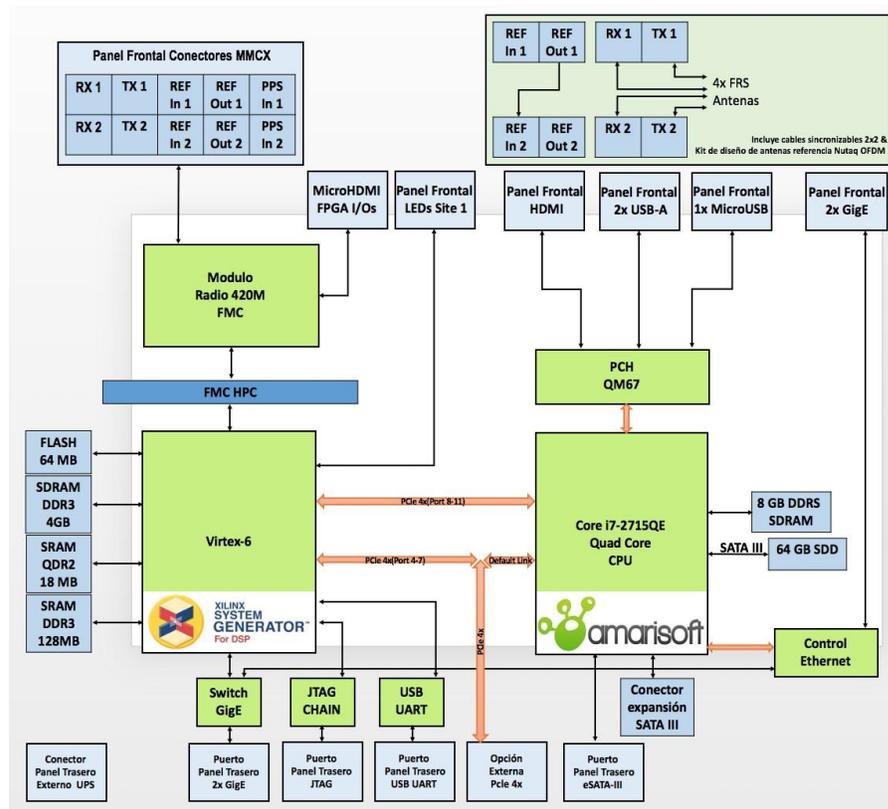


Figura 11. Diagrama de bloques interno PicoSDR2X2 E. [18]

En la Figura 11 es importante resaltar la tarjeta Radio 420M FMC, que es un módulo multimodo SDR RF diseñado para el transceptor RF Lime Microsystem LMS6002D. Soporta la cobertura de banda ancha, así como los modos de operación full dúplex TDD y FDD.

Las características más importantes a destacar del Radio 420M, se tienen en la Tabla XII. [19]

Tabla XII. Características principales Radio420M

• Ancho de banda modulación programable y en tiempo real de: 1.5MHz a 28MHz	• Rango de frecuencias 300MHz a 3GHz.	• Transceptores de RF SISO de banda dual y 2X2 MIMO	• Modos de operación dúplex TDD y FDD	• Calibración automática (pérdida LO, compensación DC, desequilibrio IQ).	• Estándar Vita 57.1
---	---------------------------------------	---	---------------------------------------	---	----------------------

En la Figura 12, se muestra un diagrama funcional de la interfaz de radio 420M FMC y su arquitectura, donde se evidencia el uso de moduladores de cuadratura para trabajar esquemas de comunicación IQ. Adicional a esto el uso de bancos de filtros seleccionables, que permiten una buena calidad de señal en diferentes bandas. [20]

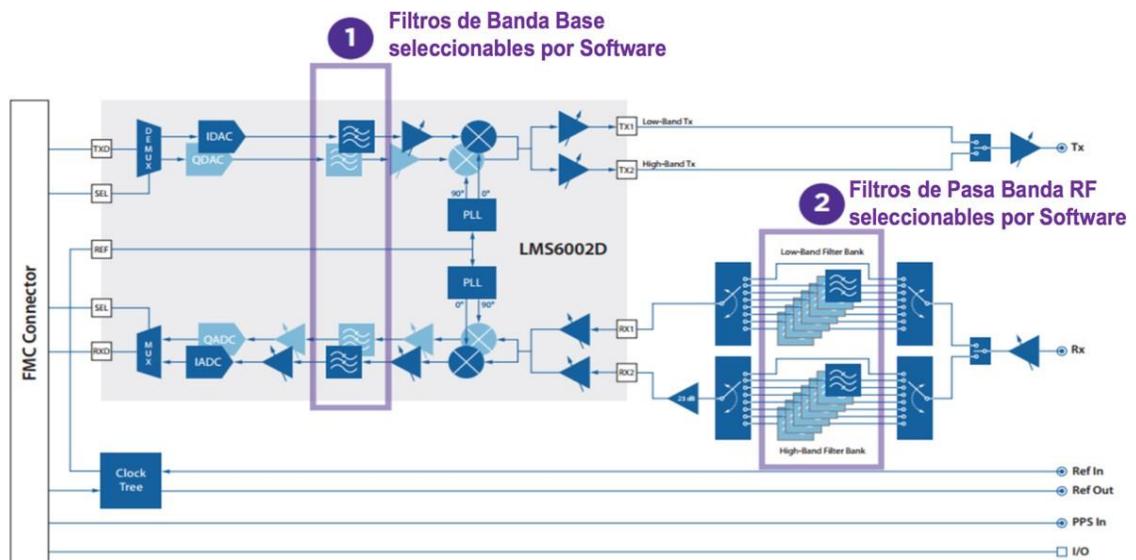


Figura 12. Diagrama funcional de la interfaz de radio 420M FMC.

5.6 Amarisoft LTE 100

AMARI LTE 100 es un componente software que incluye eNB, EPC, puerta de enlace eMBMS y servidor de pruebas IMS. Permite la comunicación de extremo a extremo de hasta 1000 UEs comerciales. Amarisoft LTE 100 es compatible con 3GPP hasta Reléase 13, incluye soporte de instalación y configuración de archivos a través de JSON. [21]

En la Figura 13 se tiene la arquitectura funcional del software Amarisoft LTE 100, así como la ejecución de capas MAC, RLC, PDCP y RRC, y protocolos NAS.

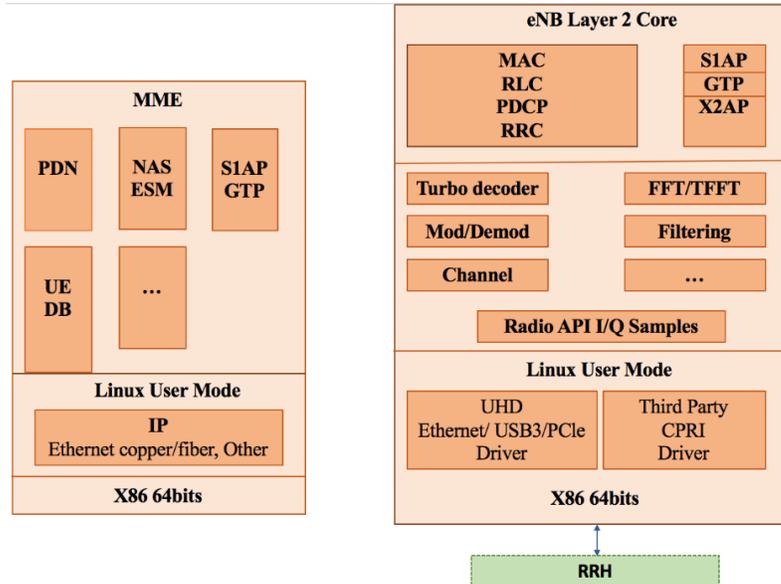


Figura 13. Diagrama funcional del software Amarisoft LTE 100.

En resumen, Amari LTE 100 es una estación base LTE totalmente integrada en software que se ejecuta en un PC configurable para una máxima flexibilidad. Se basa en un diseño de solución flexible con las siguientes consideraciones:

- Estación independiente con base LTE.
- Ajustes de parámetros y reconfiguración.
- Capacidad y compromiso de soportar futuras versiones de 3GPP.

Amari LTE 100, al ser una plataforma compacta que no necesita de grandes equipos en cuanto a hardware y red central, se caracteriza para el uso de pruebas y desarrollos de la red LTE a presupuestos asequibles para estudiantes y semilleros de investigación. A continuación se tienen los componentes principales del software Amarisoft LTE 100 en la Tabla XIII. [21]

Tabla XIII. Componentes del software Amarisoft LTE 100

eNB	EPC
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soporte MIMO, multicelular, CA hasta 5 celdas. ✓ Categoría NB1 y M1. ✓ 1000 UEs conectados simultáneamente por radio. ✓ Handovers, compatible con S1. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Red básica compacta que incluye MME/S-GW/P-GW/HSS. ✓ Pila de red de Linux integrado completamente. ✓ Optimizado para el modelo de punto de acceso.

5.7 QualiPoc Android

QualiPoc Android es una herramienta multifuncional basada en teléfonos inteligentes para la resolución de problemas de calidad de servicio de voz y datos y optimización de RF. Soporta todas las tecnologías de red móvil utilizadas en todo el mundo, y cubre múltiples capas de protocolo, así como la pila IP en tiempo real. [22]

QualiPoc Android ofrece extensas funciones de prueba para voz, datos, streaming de video y pruebas de mensajería para evaluar y reflejar la experiencia real de usuario final QoS / QoE dentro de una red móvil.

Este equipo se ilustra en la *Figura 14* con la interfaz del software QualiPoc Android.



Figura 14. Equipo de usuario

Terminal Móvil – Samsung Galaxy S5

El terminal móvil de test que se ha usado para la implementación de la red LTE es el Samsung Galaxy S5, fabricado por Samsung.

Las características principales del equipo móvil se encuentran a detalle en el ANEXO C.

5.8 Tarjeta de test Sim-Card

La tarjeta USIM de test, requiere ser compatible con las tecnologías WDCMA, TD-SCDMA y LTE. Para el desarrollo del proyecto se usó la tarjeta test de Anritsu MT8820C, tal como se tiene en la Figura 15.

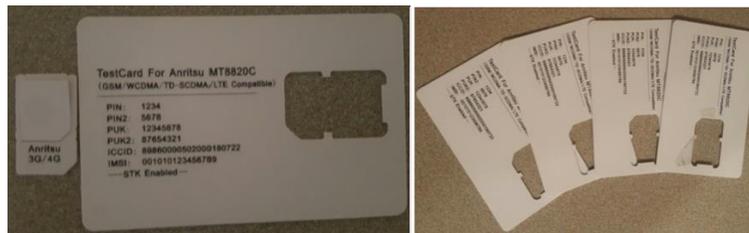


Figura 15. Tarjetas de prueba Anritsu (TestCard MT8820C)

6. ESCENARIO DE PRUEBAS

A continuación se establece el escenario implementado en el desarrollo del proyecto para la ejecución de pruebas de funcionamiento en diferentes bandas, así como toma de mediciones y resultados en esta red. Las pruebas de laboratorio realizadas se implementaron sobre plataforma del laboratorio remoto Wirid-Lab en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada.

Para acceder al laboratorio remoto, realizar reserva de equipos y otros procedimientos sobre la plataforma ver ANEXO A.

6.1. Escenario propuesto

Como se mencionó antes, el despliegue del escenario para realizar las configuraciones y pruebas se soportó en el laboratorio remoto Wirid-lab [23]. En este laboratorio es posible tener conexión remota de la PicoSDR 2X2 E, así como la conexión de equipos de instrumentación en comunicaciones como el analizador de espectro MS2722C, además del equipo de medición QualiPoc Android. De esta manera, se incorporan cada uno de estos equipos para el desarrollo del proyecto.

La finalidad es realizar pruebas funcionales a la estación base de la red LTE que se encuentra integrada en una sola plataforma como el equipo PicoSDR 2X2E, en el laboratorio remoto de la UMNG. Ver Figura 16.

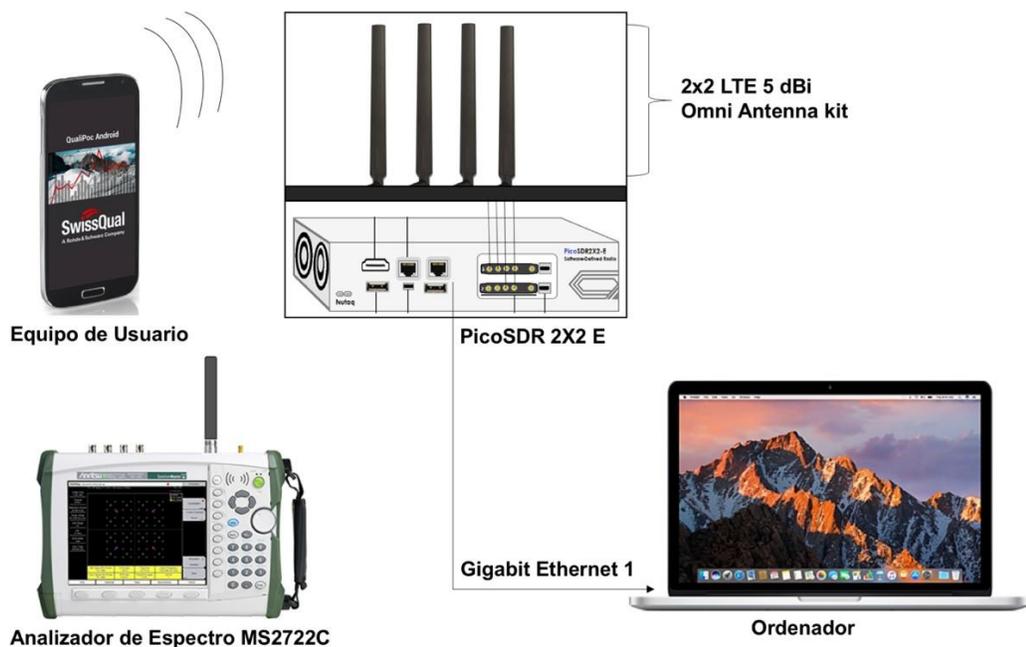


Figura 16. Escenario propuesto red LTE.

En este capítulo se evidencia el procedimiento de configuración del equipo para el funcionamiento de la estación base (eNB). En la documentación encontrada en los antecedentes se evidencia poca información en los procedimientos para la ejecución de la red LTE usando el software de Amarisoft, por tanto se puede incurrir en errores en el despliegue de la pico celda para el escenario planteado.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el escenario propuesto se realizan las siguientes configuraciones y programaciones de la pico celda:

- Configuración de la interfaz de radio.
- Configuración de parámetros de red y conexión con el UE.
- Procedimiento 2: Modificación Ancho de Banda (BW) y configuración del EARFCN
- Procedimiento 1: Acceso remoto del *ssh* al equipo PicoSDR y archivos de configuración.
- Procedimiento 3: Procedimiento para puesta en marcha del nodo LTE.

6.1.1. Configuración de la interfaz de radio

En esta sección se muestran los pasos para la configuración de los parámetros más importantes que se trabajan en la configuración de la red LTE. Dicha configuración corresponde con la metodología del software Amarisoft para cambiar

los parámetros de operación del radio, esta metodología consiste en la modificación de archivos de texto (extensión .cfg) antes de la activación de los elementos del sistema (MME y eNodeB).

El sistema operativo Linux versión 3.13.0-92-generic x86_64, con el software Amarisoft instalado tiene una distribución específica en su sistema de archivos. Para mostrar esta organización se ha plasmado esta estructura mediante un árbol de archivos para evidenciar la ruta que el usuario debe seguir para realizar diferentes modificaciones sobre el sistema. En el árbol se muestran las carpetas contenedoras y los archivos sobre los cuales se debe trabajar. (Ver Figura 17).

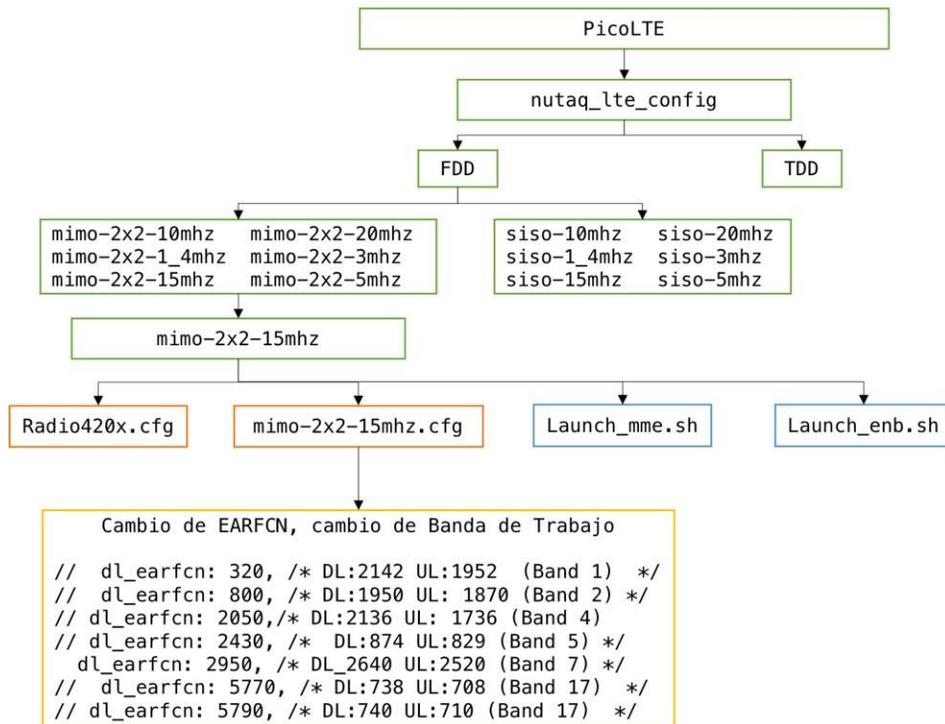


Figura 17. Árbol de archivos para configuración de red LTE

En la Figura 17 los cuadros verdes representan carpetas contenedoras, los cuadros naranja archivos de configuración, los cuadros azules archivos ejecutables y el cuadro amarillo es un ejemplo de posibles valores a cambiar dentro de un archivo.

La carpeta donde se realizan las configuraciones básicas se denomina “PicoLTE”. El equipo PicoSDR 2X2E, cuenta con el sistema operativo Linux preinstalado y sobre este se monta el software de Amarisoft, resultando el árbol mostrado de sistema de archivos.

El sistema de archivos permite seleccionar una ruta para selección y configuración del sistema con multiplexación de tiempo o frecuencia como FDD (Frequency Division Duplex) o TDD (Time Division Duplex); dentro de cada carpeta se tiene la posibilidad de seleccionar el sistema de antenas como MIMO 2x2 o SISO y cada sistema a su vez tiene seis opciones diferentes para trabajar los diferentes anchos de banda de LTE (1.4 a 20Mhz).

En el diagrama de la Figura 17 se busca una configuración FDD, MIMO 2x2 con ancho de banda de 15Mhz, por tanto se ubica la carpeta “mimo-2x2-15mhz”. Los archivos de esta carpeta permiten realizar configuraciones y la ejecución de la red LTE de la siguiente manera:

- El “Radio420x.cfg” permite cambiar, ajustar y ver las ganancias en transmisión y recepción,
- El “mimo-2x2-15mhz.cfg” permite realizar el cambio de banda de frecuencia y EARFCN.
- El archivo “launch_mme.sh” es un ejecutable que se usa para lanzar el componente MME
- El archivo “launch_enb.sh” es un ejecutable que calibra e inicializa la estación base eNodeB

6.1.1.1. Configuración archivos de nodo (MME) y estación base (eNB)

Esta sección contiene pautas para la configuración de los parámetros más importantes en la implementación de la red LTE que tienen como base el nodo (MME) y la estación base (eNB). Para realizar esta configuración se modifican los archivos que aparecen en la Figura 18. Para modificar estos archivos es necesario tener permisos de administrador dado que los directorios se encuentran en la raíz del sistema.

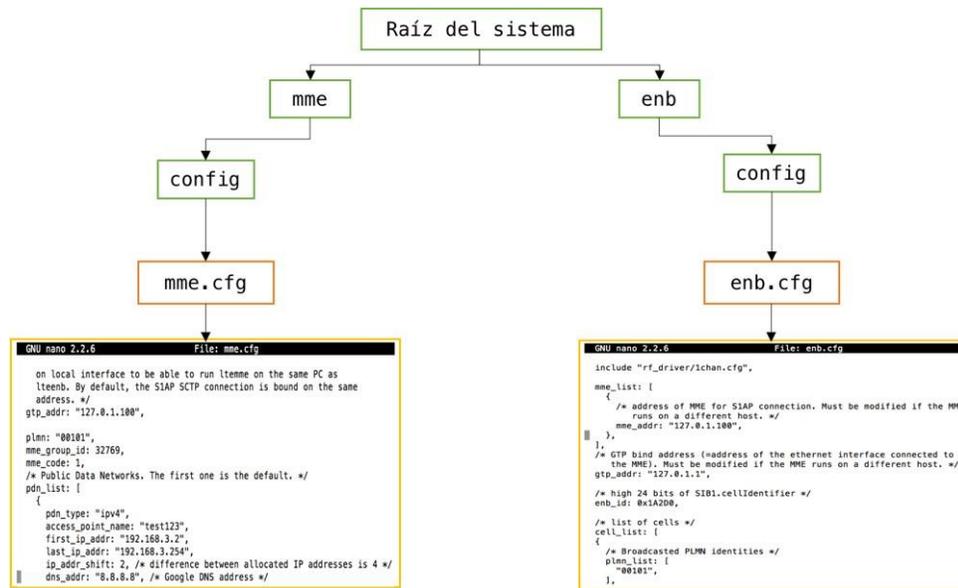


Figura 18. Configuración archivos MME y eNB

En la Figura 18 los cuadros verdes representan carpetas contenedoras, los cuadros naranja archivos de configuración y los cuadros amarillos, son un ejemplo de lo que contiene cada carpeta de configuración MME y eNB.

Para el ingreso a los archivos de configuración del MME y estación base eNB, se debe ejecutar el comando “sudo -i”, debido a que permite el acceso a la raíz del sistema con todos los permisos y privilegios.

El archivo “mme.cfg” permite la configuración de parámetros internos de la red como:

- PDN (Public Data Networks)
- APN (Access Point Name)
- Rango de direcciones IP de los UE
- Dirección de salida a internet
- entre otros.

El archivo “enb.cfg” permite la configuración de parámetros de la red como:

- PLMN (Public Land Mobile Network)
- EARFCN
- mme_list
- enb_id
- Cell_list

6.1.2. Configuración detallada de la red LTE

A continuación se tienen los pasos a seguir para ingresar a los archivos de configuración de los archivos del nodo MME y de la estación base (eNB). Para tener acceso a estos archivos de configuración, se debe ingresar a la raíz del sistema “/root” y luego a cada una de las carpetas del nodo y la estación base respectivamente como se indicó en la sección anterior.

En los archivos de configuración del MME y eNB, se resaltan los parámetros más importantes que se pueden modificar para el eNB y MME. A continuación se muestra en detalle las posibilidades para estas modificaciones.

6.1.2.1. Configuración MME

Dentro del diagrama que detalla el ingreso al archivo de configuración del nodo MME (Figura 18), se mostró que inicialmente se debe ingresar a la ubicación “/root”. Al acceder al archivo “mme.cfg” se visualizan parámetros como: “*gtp_addr*” que permite al usuario asignar una dirección IP al núcleo de red por la cual los paquetes se van a recibir configurando así la interfaz S1-MME, “*plmn*” que es un identificador de la red aparece por defecto en “00101” pero que es posible cambiar por otro valor de 5 o 6 dígitos, “*mme_group_id*” y “*mme_code*” que son parámetros que se utilizan para identificar un MME específico cuándo un grupo de MMEs está sirviendo en la misma área.

La configuración del PDN permite establecer un punto de acceso para los usuarios con un rango de direcciones IP a ser asignadas. Se pueden definir diferentes PDN's, cada uno con su propio nombre de punto de acceso y rango de direcciones IP. Usando *pdn_type*, los usuarios pueden utilizar el direccionamiento IPv4 o IPv6 o pueden ser usados los dos simultáneamente. El APN (Access point name) por defecto es “test123”, este parámetro es clave para la configuración del UE a la hora de ingresar a la red.

Por último, se tiene la lista de abonados a los que se les permite acceder a los servicios ofrecidos por la red. Ubicado en el mismo archivo de configuración. Para agregar información del suscriptor incluyendo IMSI, número IMEI, código “op” y los valores de código “K” como algoritmo de autenticación, es decir, xor o milenage. Con las tarjetas de sim de prueba de Anritsu, se usa principalmente el algoritmo xor, ya que permite usar varias tarjetas sim de prueba con IMSIs iguales y los usuarios son autenticados sobre la base de una combinación IMSI y los números IMEI de los dispositivos conectados. Ver Figura 19.

MHZ, modo FDD (Frequency Division Duplex) y ancho de banda 20 MHZ (archivo de configuración *mimo-2x2-10mhz.cfg*).

Estos valores se tienen en detalle de acuerdo al ANEXO B.

En la Figura 21 se muestra el procedimiento para configuración de los parámetros antes establecidos.

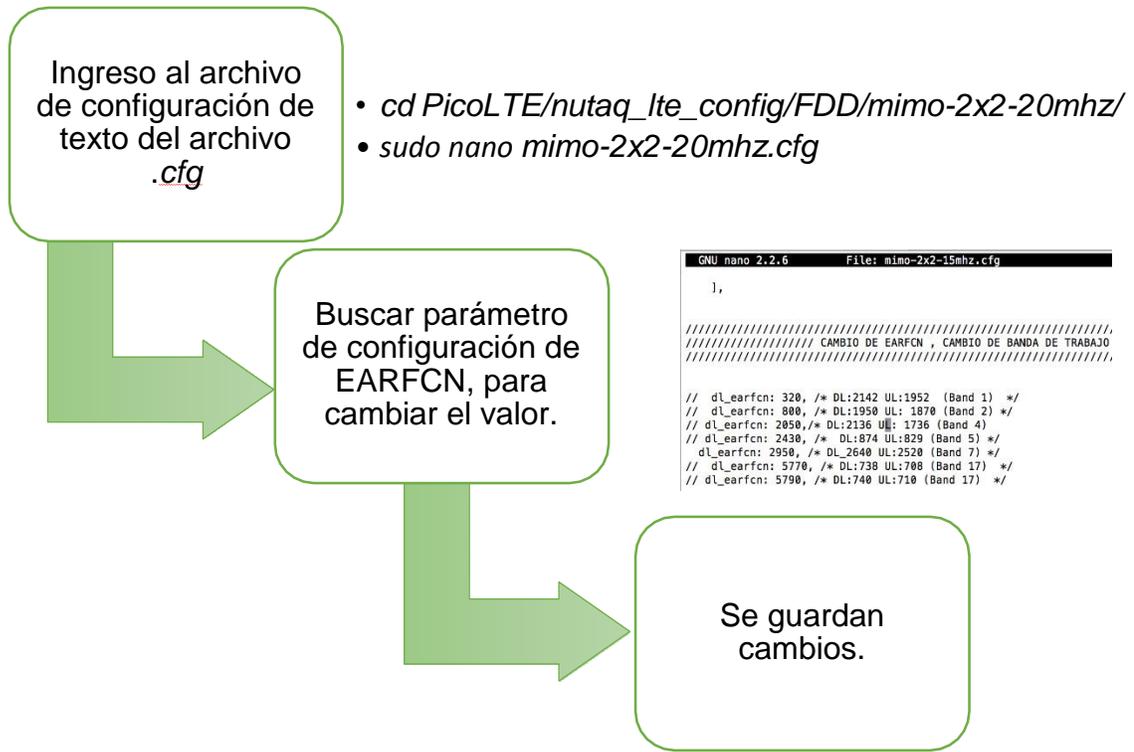


Figura 21. Configuración EARFCN.

6.1.4. Acceso al PicoLTE usando *ssh*

Para la configuración del equipo PicoSDR existen dos formas: la primera se realiza mediante la conexión del equipo a una red LAN por *ssh* (ver

ANEXO A). Y la segunda es conectando teclado, pantalla y mouse en puertos USB y HDMI para trabajarlo como un ordenador clásico, sin necesidad de conexión remota ni reservas.

En este caso se enfatiza en conexión *ssh* dada la naturaleza del laboratorio. Ver Figura 22.

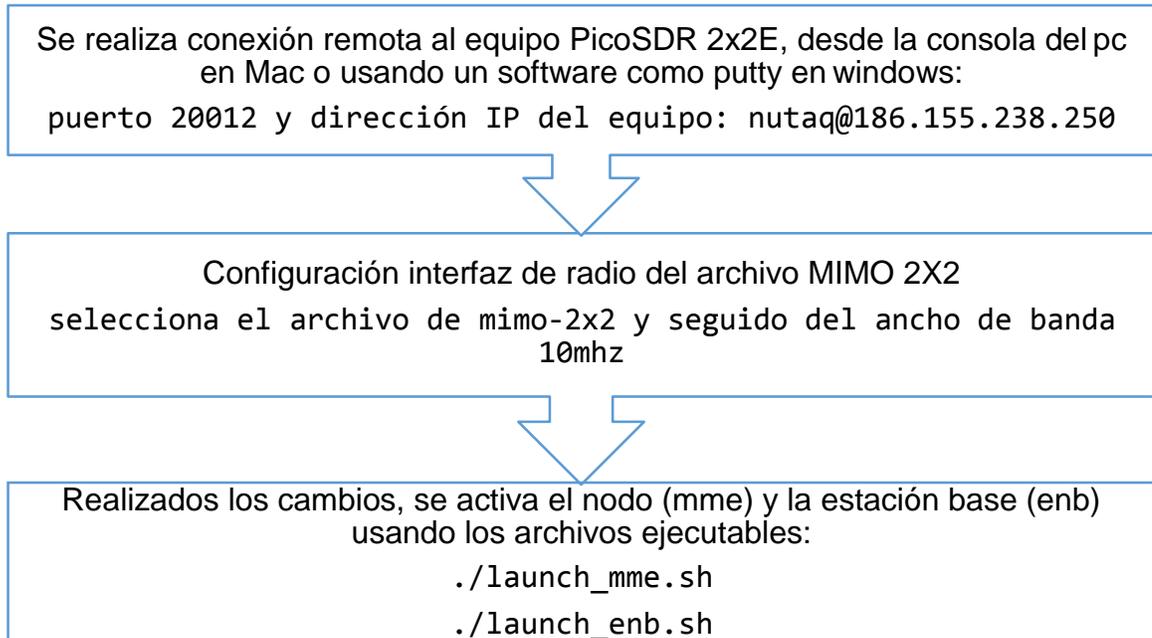


Figura 22. Acceso al PicoLTE usando *ssh*

6.1.5. Procedimiento para puesta en marcha del nodo LTE.

Para la puesta en marcha del nodo y la estación base LTE se debe iniciar el MME y el eNB en ese orden, ya que si no se inicia el nodo (MME) y a continuación la estación base (eNB); esta última no tendrá funcionamiento.

Para ver en detalle el inicio del nodo MME y estación base eNB, (ver ANEXO B)

Dentro de cada carpeta existen ejecutables para el nodo mme (launch_mme.sh) y para la estación base eNB (launch_enb.sh). Por ejemplo en la ubicación "PicoLTE/nutaq_lte_config/FDD/mimo-2x2-20mhz/" se encuentran los dos archivos.

En el diagrama de la Figura 23 se muestra el procedimiento completo para poner en marcha el pico LTE.

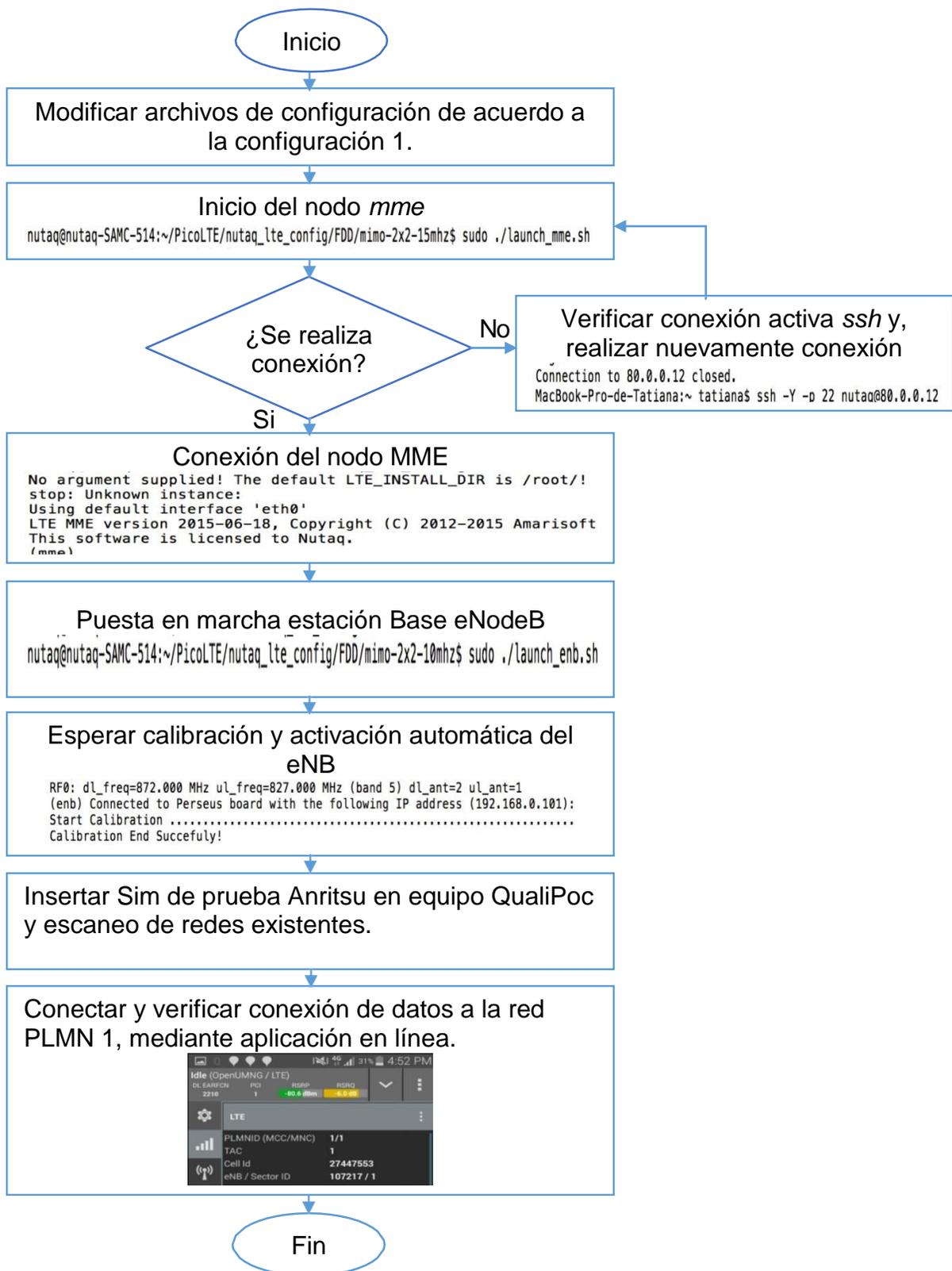


Figura 23. Puesta en marcha nodo LTE.

7. MEDIDAS CON QUALIPOC

QualiPoc proporciona funcionalidad de control y monitoreo de pruebas desde el Smartphone con sistema Android. El área de trabajo de QualiPoc contiene diversos monitores de tecnología y opciones de resultados. Las medidas se pueden personalizar y guardar dependiendo de las necesidades o resultados que se quieran obtener.

Las medidas están orientadas a verificar la conexión y verificar parámetros de calidad de la red LTE. El dispositivo utilizado está descrito en el ANEXO C.

Se inicia con la identificación de la red una vez se ha puesto en marcha la pico celda y se procede a realizar las mediciones pertinentes.

7.1. Identificación de celda y tecnología

En la Figura 24, se tiene la identificación de la celda en la cual el equipo QualiPoc se conecta, esta red es “OpenUMNG”, cabe resaltar que previamente se ha instalado en este equipo una sim Card de prueba de Anritsu, con una sim diferente no es posible la conexión dado que el eNB está configurado con los parámetros de este chip. El equipo detecta la tecnología LTE usada, tecnología en la cual se inician las pruebas y respectivas mediciones.

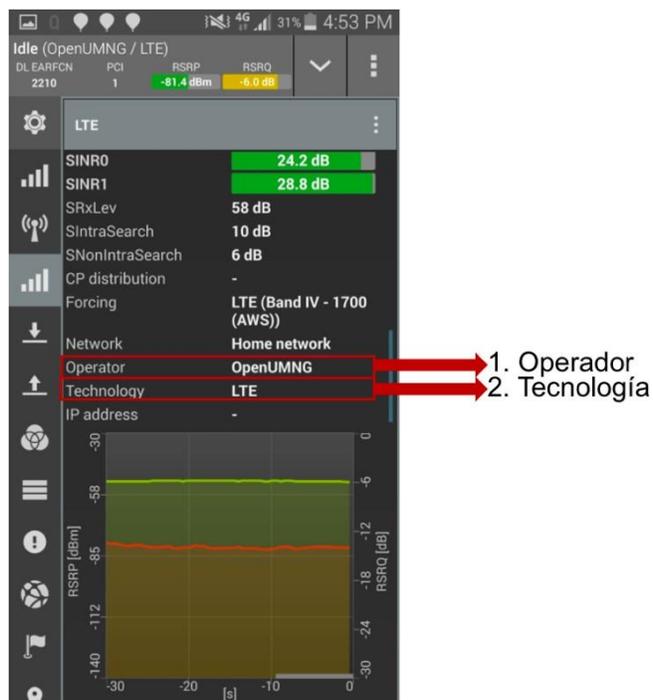


Figura 24. Identificación de celda y tecnología LTE.

A continuación se muestran los parámetros medidos, así como la identificación de parámetros claves que se encuentran dentro de la configuración de la PicoLTE.

7.2. Monitor de medidas tecnología LTE

Dentro de los parámetros a medir se destacan, la identificación de la estación base eNB y otros parámetros que con anterioridad se detallaron en el capítulo 6, en la configuración del MME y eNB, como ejemplo el Cell_ID, la banda configurada y EARFCN. En la Figura 25 se muestran los resultados y se describen cada uno de los parámetros.

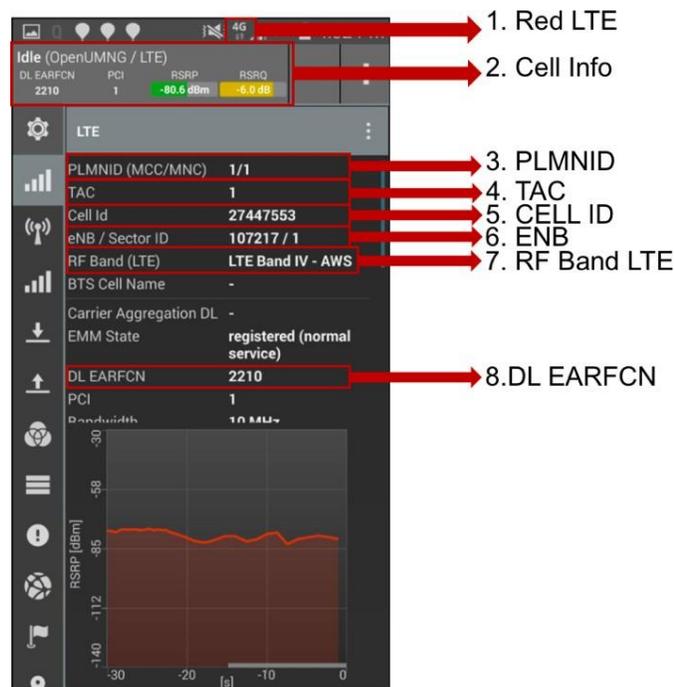


Figura 25. Medidas estación base eNB

Descripción de parámetros de la estación base eNB identificados en el QualiPoc:

1. Red LTE: indica la red en la que se encuentra el Smartphone QualiPoc Android actualmente. Se visualiza 4G como red de acceso (LTE).
2. Cell Info: indica la información de la red en la que se encuentra el teléfono, como operador (OpenUMNG), tecnología de la red (LTE), la frecuencia central (EARFCN) con la que se encuentra configurada la estación base (eNB), el PCI que es el identificador de celda física, es decir, la identidad de una célula LTE y se incluye en el procedimiento de configuración del eNB.

3. PLMNID: es el identificador de red móvil terrestre pública, identificación única del PLMN. (ver ANEXO B).
4. TAC (Type Approval Code): tipo de código de asignación, es un código de área de seguimiento para indicar eNB a que área de seguimiento pertenece (por celda), único dentro de un PLMN. [25]
5. CELL ID: es el identificador de celda y define el ID de celda de la capa física. Este identificador de celda de la capa PHY determina el grupo ID de celda y el sector ID de la celda.
6. ENB / Sector ID: utilizado para identificar estaciones base (eNBs) dentro de un PLMN, el identificador de eNB se encuentra dentro del identificador de celda E-UTRAN.
7. RF Band LTE: indica la banda LTE en la que se encuentra operando la estación base.
8. DL EARFCN: es la frecuencia central que maneja el sistema LTE y su cálculo está dado por el protocolo 3GPP TS 36.104. [26]

7.3. Métricas Equipo de Usuario (UE)

QualiPoc permite programar distintas pruebas de medida para comprobar cómo se comporta el UE en diferentes situaciones. La prueba que se realizó tiene como acción ver videos de plataformas musicales en línea mediante aplicaciones que necesiten datos; con el fin de que se realice una descarga de datos a través de la red LTE. Para este caso en específico, se detallan cada uno de los parámetros que se tienen en la Figura 26, con base en las métricas de señal RF de la Tabla XIV.

En la red LTE, los UE miden constantemente la intensidad de la señal de sus propias células y de las células vecinas, durante el modo inactivo o conectado, para mantener constante la calidad de la señal. El rendimiento del sistema inalámbrico tiene una relación directa con las condiciones de RF en el momento, para ayudar con el análisis de rendimiento se definen algunos rangos de mediciones de RF que corresponden a algunas condiciones típicas de RF.

Los siguientes parámetros de trabajo son para medir las distintas señales que mantiene al UE conectado a la red, estos son: RSRP, RSRP y SINR.

La Tabla XIV representa una clasificación de las condiciones de RF ideales para la toma de medidas en una red LTE.
(La fuente de esta tabla es un proveedor de E-UTRAN).

En la tabla se utilizan tres términos de medición:

- RSRP (Señal de referencia recibida)
- RSRQ (Calidad de la señal de referencia recibida)
- SINR (Señal a interferencia y razón de ruido.)

Tabla XIV. Métricas de señal RF. [27]

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Condiciones RF	Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
	Buena	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
	Celda Mediana	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
	Celda EDGE	≤ -100	< -20	≤ 0

En la Figura 26 se tienen los parámetros que se utilizaron para la medición y obtención de resultados, con el fin de evaluar la estación base y sus niveles de señal en un radio de menos de 5m.

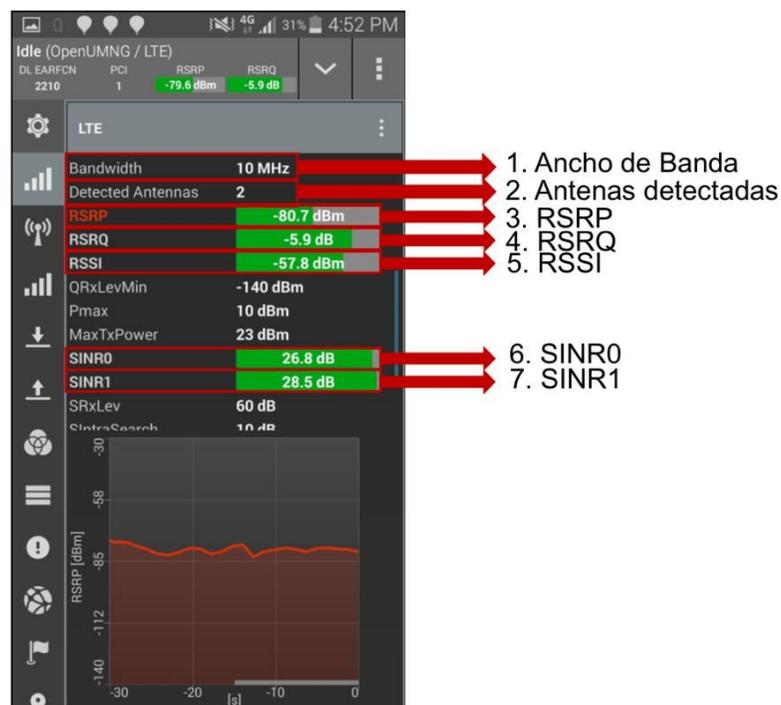


Figura 26. Medidas RF LTE.

Los parámetros vistos en la Figura 26 corresponden a:

1. Ancho de banda (BW): los anchos de banda que operan en la tecnología LTE.
2. Antenas detectadas: identifica el número de antenas que se encuentran configuradas en la estación base MIMO-2X2.
3. RSRP (señal de referencia potencia recibida): potencia de las señales de referencia LTE que se encuentran distribuidas por todo el ancho de banda y banda estrecha. Para esto, se requiere un mínimo de -20 dB SINR para detectar RSRP/RSRQ. [27]
4. RSRQ (calidad de la señal de referencia recibida): La medición RSRQ proporciona información adicional cuando el RSRP no es suficiente para realizar una transferencia confiable. [27]
5. RSSI (Indicador de la intensidad de la señal recibida): el indicador RSSI representa la potencia de banda ancha total recibida por UE. Ayuda a determinar la interferencia y la información del ruido. [28]
6. SINR (Señal relación de interferencia - ruido): medida de la calidad de la señal, pero no se define en las especificaciones 3GPP. [28]

7.4. Test de velocidad

El test de velocidad se realizó mediante el uso de la aplicación móvil *Speed Test*, descargada con anterioridad en el equipo de usuario QualiPoc Android. Tras la ejecución de la aplicación, se obtuvieron los resultados sobre la velocidad en UL – DL y latencia, como se ilustra en la Figura 27.

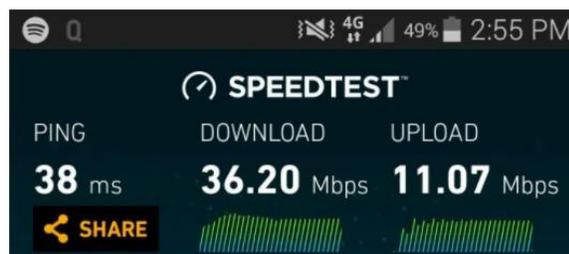


Figura 27. Test de velocidad QualiPoc

Los valores mostrados en la Figura 27 son valores máximos para una configuración de ancho de banda de 10MHz, con valor de descarga (DL) de 36.20 Mbps y valor de carga (UL) de 11.07 Mbps. Además de una latencia con valor de 38ms, que es el tiempo transcurrido entre el envío y recepción de un paquete IP del UE al servidor de la red, llamado también Ping.

Los valores obtenidos para esta canalización de 10MHz, se detallan en la Tabla XV, donde se tiene un resumen de las velocidades de pico en función de la canalización. Con base en esta tabla, se concluye que los valores son satisfactorios ya que el valor teórico máximo para la misma canalización de tasa de bit útil es de 42.5 Mbps.

Teniendo en cuenta que para un mejor desempeño de la eficiencia espectral se obtiene en mayores anchos de banda como 10MHz y 20MHz.

Tabla XV. Velocidades de pico en función de la canalización del sistema LTE. [29]

Canalización (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Velocidad de pico (Mbps)	≈ 6	≈15	≈ 25	≈ 50	≈ 75	≈ 100
Velocidad de pico bruta (15% de los recursos destinados a control y señalización)	≈ 5,1	≈ 12,8	≈ 21	≈ 42,5	≈ 63,7	≈ 85

7.4.1. Prueba de conectividad

Para el análisis del correcto funcionamiento de la red LTE y la conexión con el equipo de usuario, se determina como prueba de servicio el video streaming para la transmisión masiva de datos.

En la Figura 28, se tiene la reproducción del videoclip “*Speed of Sound*” del grupo Coldplay a través del portal web YouTube.



Coldplay - Speed Of Sound

Figura 28. Reproducción video YouTube.

Para el análisis de conectividad el software Amari LTE, cuenta con la visualización de tramas MAC entre el eNB y el UE. Se debe ejecutar la estación base (eNB), con la configuración deseada, ver apartado 6.1.3.

Si la configuración es correcta debe iniciarse sin problemas y, haciendo uso del comando “t” en el terminal se despliega el mensaje PRACH que se transmite entre el eNB y UE, seguido se da inicio a listar las tramas que se transmiten ambos elementos, tal como se ilustra en la Figura 29.

Nota: En el ANEXO B, se tiene en detalle cada uno de los parámetros vistos en la Figura 29.

Nota: PRACH (Physical Random Access Channel) canal requerido para el establecimiento de conexiones.

En la Figura 29 se tienen varias secciones importantes en las tramas MAC, para este análisis se destaca la sección “Brate”, que significa que la tasa de velocidad en DL es mayor que en UL, debido a que se trata de un proceso de descarga mediante una prueba de reproducción de video online.

Al realizar este proceso de descarga se obtuvieron tasas de velocidad de hasta 19Mbps. En este caso, los valores tienden a oscilar entre 3Mbps y los 19Mbps.

```
(enb) t
Press [return] to stop the MAC trace
PRACH: cell=01 seq=36 ta=2 snr=28.2 dB
-----DL-----UL-----
UE_ID CL RNTI cqi ri mcs retx txok brate snr puc1 mcs retx rxok brate turbo phr
9 01 0045 15 1 17.0 4 10 2.72k 15.9 10.7 11.9 2 10 7.07k 1/2.0/6 26
9 01 0045 12 2 22.1 17 30 35.0k 14.6 8.4 15.0 0 15 10.5k 1/1.0/1 23
9 01 0045 12 2 22.5 21 359 3.63M 14.4 7.8 15.8 0 52 99.9k 1/1.3/2 24
9 01 0045 11 2 20.9 63 839 7.38M 15.1 11.2 16.2 1 154 450k 1/1.6/6 11
9 01 0045 13 2 22.5 97 1339 13.38M 15.5 7.7 16.5 0 156 185k 1/1.4/5 28
9 01 0045 13 2 24.9 42 821 9.23M 15.7 9.0 16.6 0 71 74.1k 1/1.2/2 26
9 01 0045 13 2 25.0 23 34 32.1k 12.6 7.6 16.3 0 23 85.1k 1/2.2/4 29
9 01 0045 13 2 24.5 200 1398 19.4M 15.0 9.9 17.0 1 127 225k 1/1.5/6 23
PRACH: cell=01 seq=29 ta=2 snr=28.5 dB
-----DL-----UL-----
10 01 0046 3 1 - 0 0 0 0.0 - - 0 0 0 - -
9 01 0045 13 2 24.9 77 1058 16.7M 10.2 11.8 17.1 0 81 99.4k 1/1.4/5 25
-----DL-----UL-----
UE_ID CL RNTI cqi ri mcs retx txok brate snr puc1 mcs retx rxok brate turbo phr
10 01 0046 15 1 17.0 5 10 2.42k 16.7 10.8 8.5 3 9 1.85k 1/3.1/6 16
9 01 0045 13 2 - 0 0 0 1.4 - - 0 0 0 - 25
10 01 0046 10 2 - 0 0 0 16.9 - - 0 0 0 - 16
9 01 0045 11 2 27.0 18 20 8.72k 8.4 6.9 13.2 0 16 59.4k 1/1.3/2 24
10 01 0046 10 2 - 0 0 0 12.6 - - 0 0 0 - 16
9 01 0045 15 1 21.9 6 184 2.57M 16.0 20.5 16.1 1 12 10.9k 1/1.4/6 26
10 01 0046 12 2 25.0 5 6 1.96k 9.6 7.0 10.4 0 5 1.38k 1/1.6/4 14
9 01 0045 12 2 27.0 1 36 669k 2.9 8.6 16.5 0 11 17.9k 1/1.5/5 25
10 01 0046 13 2 21.0 6 8 1.64k 6.8 7.1 11.4 1 5 1.35k 1/2.2/6 14
9 01 0045 13 2 - 0 0 0 3.6 - - 0 0 0 - 25
```

Figura 29. Tasa de DL.

7.5. Escenario con dos equipos móviles conectados

La implementación de equipos móviles al escenario propuesto Figura 30, tiene como propósito integrar diferentes equipos a la red LTE con el fin de verificar conectividad y navegación a la red 4G.

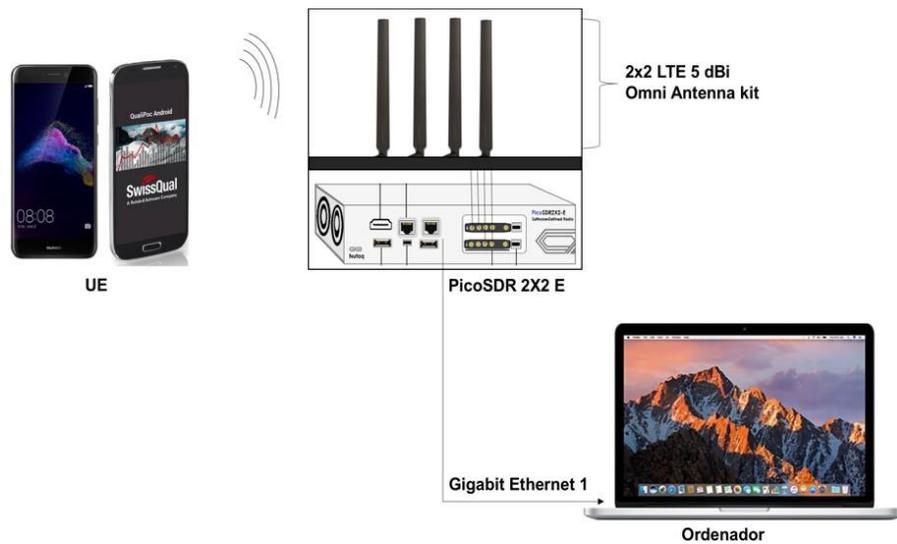


Figura 30. Escenario con varios equipos móviles

7.5.1. Configuración del equipo móvil

En esta prueba se agrega un equipo de usuario referencia Huawei G7, que soporta la tecnología LTE. Tras la verificación, se procede a realizar en detalle la descripción de la Figura 31, para que el equipo tenga conexión a la red LTE habilitada.



Figura 31. Configuración equipo móvil

En la Figura 31 se tiene el equipo móvil en el cual se procede a insertar la tarjeta de prueba Sim test Anritsu, descrita en el apartado 5.8, a través de la ranura superior del equipo móvil.

A continuación, se procede a configurar un nuevo APN (Access Point Name) para

que el dispositivo pueda acceder a la red LTE y permitir conectividad IP. Para esta configuración solo se debe modificar el apartado “Name” y “APN” con **test123** (como se configuró en el capítulo 6 en el MME), tal como se ilustra en la Figura 31.

Tras esta configuración se procede a la conexión final de la red LTE, seleccionando el APN creado, luego se ingresa a la opción “buscar” en el menú de Redes Móviles y se selecciona la opción Modo de red y forzar la red a *LTE/WCDMA/GSM (Conexión automática)*.

Nota: al realizar la configuración del APN puede suceder que el dispositivo no tome la red LTE de inmediato, por tanto se requiere reiniciar el dispositivo o activar y desactivar el modo avión.

Para finalizar, en el nodo MME se tiene la conexión de dos equipos móviles que se identifican por el IMEI cada uno, debido a que es el identificador único de cada equipo y el IMSI viene configurado por defecto dentro de los archivos del nodo MME para las SIM de prueba de Anritsu.

8. MEDIDAS LTE ANALIZADOR DE ESPECTRO

Para verificar uno de los comportamientos del pico SDR con el software de Amarisoft, se realiza un análisis con el equipo analizador de espectro MS2722C, luego de activar la estación base (eNB) para calcular el ancho de banda ocupado.

El ancho de banda ocupado, es la capacidad de ocupar una determinada banda especificada como un porcentaje de la potencia en el espectro adquirido. Se requiere configurar el analizador en la banda y EARFCN adecuado. El equipo utilizado, cuenta con el firmware necesario para la medición requerida con la tecnología LTE.

La Figura 32 muestra la pantalla de medición del ancho de banda ocupado (channel spectrum) y dentro de las configuraciones realizadas en el analizador de espectro y el eNB se tienen:

- Ancho de banda definido 5MHz.
- Banda FDD: 5 (869MHz – 894MHz)
- MIMO 2X2

Los siguientes parámetros se establecen de manera adicional en el analizador de espectro

- SPAN 5MHz
- Atenuación – Auto
- Nivel de referencia – Auto

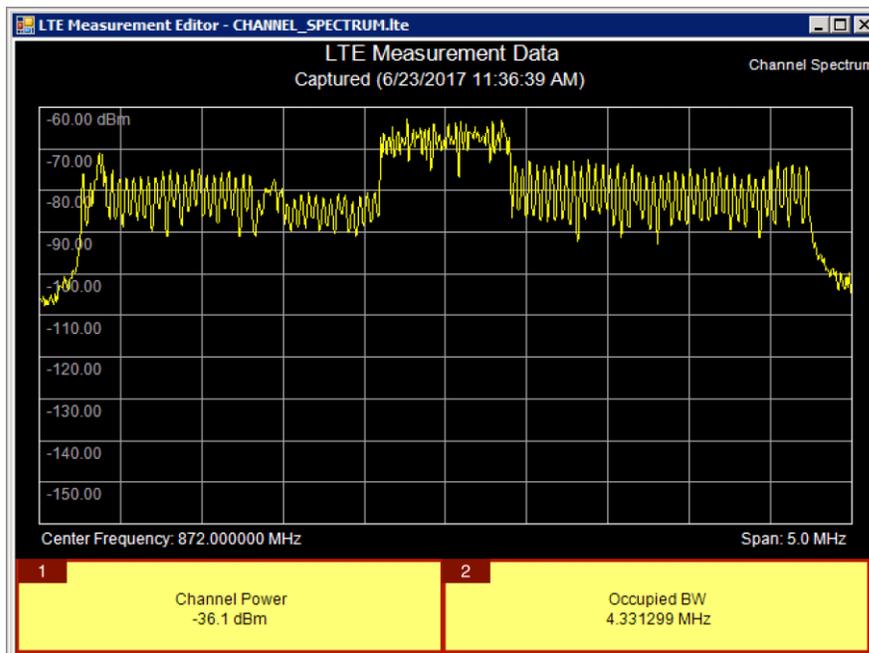


Figura 32. Ancho de Banda 5 MHz – Banda 5 con QP

La señal recibida debe estar centrada en la pantalla, lo que indica que se ha elegido el canal de RF adecuado. Esta medición también es útil cuando se buscan problemas de corrimiento de frecuencia de RF.

En el análisis de la Figura 32 se tienen dos medidas importantes definidas por 3GPP, potencia de canal (Channel Power) y ancho de banda ocupado (Occupied BW). Estas mediciones de canal se describen a continuación:

- Potencia de canal (Channel Power): la potencia de canal mide la potencia de transmisión de la estación base en el dominio de la frecuencia. El analizador de espectro mide la potencia de la señal sobre la frecuencia, mostrando el espectro de la señal. En la Figura 32 numeral 1, se tiene el resultado de medición de potencia de canal de una señal LTE FDD, donde la potencia del canal resultante está dentro de los parámetros establecidos por 3GPP. [12]
- El ancho de banda que ocupa corresponde a la medida del ancho de banda que contiene el 99% de la potencia media total integrada del espectro transmitido en el canal asignado. El ancho de banda del canal ocupado para todas las configuraciones de ancho de banda de transmisión (Bloques de recursos) debe ser menor que el ancho de banda del canal especificado en la Tabla XVI.

Consecuencias: el exceso de BW ocupado provoca interferencias con los

transportistas vecinos, llamadas caídas y baja capacidad. [30]

Tabla XVI. Ancho de banda ocupado.

Ancho de banda del canal [MHz]	Ancho de banda de canal ocupado / Ancho de banda del canal					
	1.4MHz	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
	1.4	3	5	10	15	20

Requerimiento mínimo

Para E-UTRA, el ancho de banda ocupado para cada portadora E-UTRA será menor que el ancho de banda del canal definido en la Tabla XVI.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha evaluado la tecnología LTE sobre el equipo PicoSDR 2X2E haciendo una configuración inicial de los parámetros requeridos y una posterior etapa de medición de señales con el equipo QualiPoc y con el analizador de espectro.

Para el caso de la prueba con el equipo de medidas QualiPoc Android, se encuentra por un lado la verificación de parámetros de identificación y configuración que se realizaron en el eNodeB y el MME y por otro lado se midieron niveles de calidad de señal para las redes LTE mediante señales de referencia como RSRP (señal de referencia recibida) y RSRQ (calidad de señal de referencia recibida), verificando que la medición de estos parámetros se encuentra dentro de los rangos establecidos.

Otros parámetros adicionales que visualiza el QualiPoc y que son claves a la hora de establecer las características de un enlace de RF con una celda eNodeB son:

- La identificación de antenas usadas por el eNodeB para transmisión, en caso de las mediciones realizadas y la configuración hecha se trata de MIMO 2X2 (2 antenas).
- La banda y el ancho de banda el cual está acorde con lo configurado dentro de los parámetros configurados en el software Amari LTE 100.
- Los niveles de señal de potencia y calidad se hallan dentro de los rangos instaurados por la 3GPP TS 36.211.

Las mediciones de ancho de banda ocupado con el analizador de espectro Anritsu MS2722C, confirman la capacidad de operación del eNodeB en las bandas especificadas y de acuerdo a los estándares establecidos por 3GPP a nivel de este parámetro de RF.

Con relación al equipo PicoSDR 2X2E, se evidenció que soporta todas las opciones disponibles en el software de Amarisoft para la implementación de una red LTE. Las características de hardware de este equipo son las suficientes y necesarias para cumplir con los criterios de ancho de banda, muestreo, rango de frecuencias de operación, y capacidad de procesamiento de señal.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Agusti, F. Álvarez, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, and O. Sallent, *LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES*, Vodafone. 2010.
- [2] “3GPP TS 23.401 V9.1.0,” 2009.
- [3] 3GPP TS 23.008, “Technical Specification Group Core Network and Terminals,” 2009.
- [4] F. Firmin, “The Evolved Packet Core.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>.
- [5] E. T. 123.203, “Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture,” 2014.
- [6] “3GPP TS 36.410,” 2011.
- [7] “3GPP TS 29.061,” 2008.
- [8] “3GPP TS 29.272,” 2016.
- [9] “3GPP TS 29.274,” 2015.
- [10] “3GPP TS 124.301,” 2011.
- [11] “3GPP TS 29.212,” 2008.
- [12] Viavi Solutions Inc., “LTE PHY Layer MEasurement Guide.”
- [13] Anritsu, “LTE Resources Guide.”
- [14] ETSI TS 136.211, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation,” 2011.
- [15] Agilent Technologies, *3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges*. 2009.
- [16] I. Poole, “LTE MIMO: Multiple Input Multiple Output.” [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-mimo.php>.
- [17] “RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE,” p. CAPITULO 1.
- [18] “Nutaq PicoSDR,” 2014.
- [19] Nutaq, “Nutaq Radio420X. Multimode SDR FMC RF transceiver.”
- [20] Nutaq, “Radio Front End.” [Online]. Available: <https://www.nutaq.com/products/titanmimo-4/radio-front-end>.
- [21] Amarisoft, “Amari LTE 100.” [Online]. Available: <https://www.amarisoft.com/products-lte-ue-ots-sdr-pcie/>.
- [22] Rohde&Schwarz, “QualiPoc Android.” [Online]. Available: <https://www.mobile-network-testing.com/en/products/optimization2/qualipoc-android/>.
- [23] J. Rugeles, J. C. Martinez, and L. Quibano, “Wirid Lab UMNG,” 2016. [Online]. Available: <http://wirid-lab.umng.edu.co>.
- [24] “Cyclic Prefix.” [Online]. Available: [http://www.lte-bullets.com/LTE in Bullets - Cyclic Prefix.pdf](http://www.lte-bullets.com/LTE%20in%20Bullets%20-%20Cyclic%20Prefix.pdf).
- [25] “LTE Identifiers,” 2012. [Online]. Available: <http://www.rfwireless->

- world.com/Terminology/LTE-Identifiers.html.
- [26] “3GPP TS 36.104.”
 - [27] M. La Rocca, “RSRP and RSRQ Measurement in LTE,” 2016. [Online]. Available: <https://www.laroccasolutions.com/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>.
 - [28] M. La Rocca, “LTE Metrics RSRQ and SINR,” 2016. [Online]. Available: <https://www.laroccasolutions.com/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>.
 - [29] I. Fernandez López, “Planificación y Dimensionado de una Red LTE,” Universidad Politécnica de Catalunya.
 - [30] NATIONAL INSTRUMENTS, “LTE Occupied Bandwidth (OBW),” 2015. [Online]. Available: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/375417A-01/rfmxlte/lte_occupied_bandwidth_obw/.
 - [31] “Protocolo SSH.” [Online]. Available: <http://web.mit.edu/rhel-doc/4/RH-DOCS/rhel-rg-es-4/ch-ssh.html>.
 - [32] R. W. Noticias, “MME,” 2014. [Online]. Available: <https://www.rcwireless.com/20140509/diameter-signaling-controller-dsc/lte-mme-epc>.
 - [33] CRC, “Códigos MNC.” [Online]. Available: <http://www.pnn.gov.co/mapa/codigosMNC.xhtml>.
 - [34] IBM, “PLMN.” [Online]. Available: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSSHRK_4.2.0/itnm/ip/wip/tpdb/reference/nmip_tpdb_plmn.html.
 - [35] “MCC List.” [Online]. Available: <http://mcclist.com/mobile-network-codes-country-codes.asp>.
 - [36] “IMSI Code list.” [Online]. Available: <https://www.geveystore.com/imsi-code-list/>.
 - [37] “Identificadores LTE.” [Online]. Available: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-Identifiers.html>.
 - [38] B. Barton, “IMSI, TMSI y GUTI,” 2012. [Online]. Available: <http://www.lteandbeyond.com/2012/02/imsi-tmsi-and-guti-how-they-are-created.html>.
 - [39] T. Suyash, K. Vinay, and K. Alok, “LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols,” 2011.
 - [40] “Resource Elements Groups (REG).” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/resource-element-groups-regs-1.html>.
 - [41] S. Sesia, I. Toufik, and Ma. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution a Pocket Dictionary of Acronyms*. 2009.
 - [42] “Samsung Galaxy S5 SM-900M,” 2014. [Online]. Available: <http://www.movilcelular.es/samsung-galaxy-s5-sm-g900m/caracteristicas/1415>.
 - [43] “3GPP TS 36.306.”
 - [44] “ANT1920Y9-WR YAGI ANTENNA,” San Jose, CA.

ANEXO A

Ingreso al laboratorio virtual

En este anexo se muestra una reseña de como tener acceso a los equipos del laboratorio remoto WIRID LAB de la Universidad Militar Nueva Granada, específicamente la PicoSDR 2X2E de Nutaq y el analizador de espectros Anritsu. Así como el manejo del software Amarisoft y el equipo de medida QualiPoc.

El procedimiento se realizó en un computador portátil de marca Apple, sin embargo, en el sitio web del laboratorio se encuentran los pasos para acceder desde otro terminal como Windows.

Para realizar la conexión remota al equipo Nutaq PicoSDR, se debe tener una reserva anticipada en la página *wirid-lab.umng.edu.co* (Figura 33) para los equipos a utilizar, para este caso la PicoSDR 1 y analizador de espectro marcando las horas que se desee trabajar. [23]

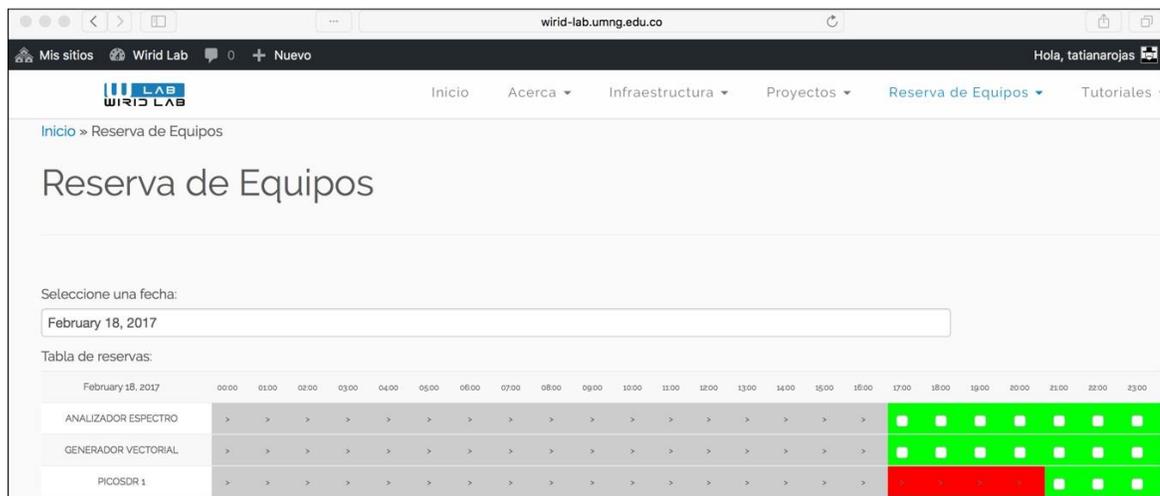


Figura 33. Ingreso laboratorio remoto Wirid-Lab

Después de realizar la reserva en el laboratorio remoto, se procede a abrir el terminal del equipo y se digita el siguiente comando, con el fin de acceder al equipo Nutaq.

```
MacBook-Pro-de-Tatiana:~ tatiana$ ssh -Y -p 20012 nutaq@wirid-lab.umng.edu.co
```

Dónde:

Ssh (Secure Shell): es el protocolo que facilita las comunicaciones seguras entre dos sistemas usando una arquitectura cliente/servidor y, permite a los usuarios conectarse a un host remotamente. [31]

20012: es el número de puerto del equipo

nutaq@wirid-lab.umng.edu.co: dirección para acceder remotamente al equipo.

Seguido de digitar la línea de comando vista, se observa el acceso al equipo PicoSDR de manera remota como se observa en la Figura 34.

```
-----  
WIRID LAB  
WIRELESS RESEARCH INNOVATION  
AND DEVELOPMENT LABORATORY  
  
Nueva Granada Military University, Bogotá ,Colombia  
Department of Telecommunication Engineering  
contact:  
jose.rugeles@unimilitar.edu.co  
juan.martinezq@unimilitar.edu.co  
support: maxwell@unimilitar.edu.co  
-----  
Last login: Fri Feb 17 12:14:09 2017 from macbook-pro-de-tatiana.local  
nutaq@nutaq-SAMC-514:~$ █
```

Figura 34. Ingreso al equipo PicoSDR remotamente.

ANEXO B

Manual de Configuración de la Estación Base

Una vez se tiene conexión con el equipo, se puede dar inicio a la manipulación remota desde la terminal, se ingresa el siguiente comando para entrar a la carpeta que contiene los archivos necesarios para transmitir la señal LTE con un ancho de banda de 15MHZ: “cd PicoLTE/nutaq_lte_config/FDD/mimo-2x2-15mhz/”.

En caso de querer transmitir a un ancho de banda diferente al de 15 MHZ se cambia el nombre por el ancho de banda a utilizar, ya sea: 1.4 MHz, 3 MHz, 10 MHz o 20 MHz que son los anchos de banda posibles en LTE. En cada carpeta se encuentran los archivos necesarios para iniciar el servicio de LTE y, estos pasos se realizan desde el terminal Xquartz o terminal de MAC.

Los archivos *.cfg* son aquellos archivos para configurar las características del nodo como lo es ganancia de antenas, bandas de frecuencia, características del radio, configuración de la tarjeta SIM, etc. Se ejecuta el nodo *MME* con el siguiente comando: “*sudo ./launch_mme.sh*” cuando se ejecuta el nodo MME muestra la interfaz que se ilustra en Figura 35.

```
nutaq@nutaq-SAMC-514:~/PicoLTE/nutaq_lte_config/FDD/mimo-2x2-15mhz$ sudo ./launch_mme.sh
No argument supplied! The default LTE_INSTALL_DIR is /root/!
stop: Unknown instance:
Using default interface 'eth0'
LTE MME version 2015-06-18, Copyright (C) 2012-2015 Amarisoft
This software is licensed to Nutaq.
[(mme)
```

Figura 35. Nodo MME

MME, es el principal nodo de señalización en el *EPC*, ya que Evolved Packet Core (EPC) es la red central del sistema de LTE y da una visión general de la red que describe algunos de sus elementos. Siendo de esta manera *MME*, responsable de gestionar la sesión de estados, autenticación y seguimiento de los usuarios a través de la red. [32]

Mientras se ejecuta el componente *MME* aparece en la terminal el prompt: (MME), al escribir el comando *help*, se pueden ver las diferentes opciones que permite esta interfaz dentro de las que se tiene en la lista, (ver Figura 36) y que son relevantes para este proyecto que son las conexiones *eNB* y *ue*.

```

(mme) help
help          show available commands
log           change the log options
enb           list connected eNodeBs
ue            list all MME UE contexts
uectx         list active eNB UE contexts
pws_write     send ETWS/CMAS message to all eNodeBs
pws_kill      kill ETWS/CMAS message
quit          stop the Core Network and exit
(mme)

```

Figura 36. Opciones disponibles interfaz MME.

En la Figura 37, se ilustran opciones dentro del nodo MME como:

- **eNB**: componente principal de la estación base de la red LTE y provee la cobertura para los usuarios de banda ancha móvil.
- **ue** (equipos de usuario): donde LTE utiliza categorías o clases de equipos de usuario para definir las especificaciones de rendimiento, y permitir que las estaciones base puedan comunicarse eficazmente con ellos conociendo sus niveles de rendimiento.

```

(mme) enb
PLMN      eNB_ID
00101     0x1a2d1
(mme)

(mme) ue
IP:Port #UEctx  TACs  IMSI  IMEISV  M_TMSI REG  TAC #ERAB IP_ADDR
127.0.1.1:52701  1  0x1  001010123456789 3525700625162801  0x1 Y 00101. 0x1 1 192.168.3.2
(mme)

```

Figura 37. Información del nodo MME

Para el comando digitado **eNB** dentro de la interfaz del nodo **MME**, se tienen las siguientes características:

PLMN (Public Land Mobile Network): una red pública móvil terrestre, es una red que proporciona servicios de telecomunicaciones móviles terrestres al público. Cada operador que proporciona servicios móviles tiene su propia PLMN. Esto se da a la recomendación E.212 de UIT-T que define los códigos móviles de cada país, así como los códigos de red móviles. El código de país móvil consta de 3 dígitos decimales y el código de red móvil consta de 2 o 3 dígitos decimales.

En la Figura 37, se tiene un PLMN de código MNC 001 que ha sido asignado a Colombia Telecomunicaciones S.A ESP (Movistar), este dato ha sido encontrado en la página de la CRC de Colombia, en el sistema de información y gestión de recursos de identificación – CRC. A continuación en el link [33] para tener datos de los códigos de todos los operadores que prestan sus servicios de telecomunicaciones en Colombia. [34]

Identidad de suscripción móvil internacional (IMSI): La IMSI es una cadena de dígitos decimales, con una longitud máxima de 15 dígitos, que identifica una suscripción única.

El IMSI consta de tres campos:

- Código de país móvil (MCC) para Colombia es el MCC 732.
- Código de red móvil (MNC) que depende del operador.
- Número de identificación de suscripción móvil (MSIN), que al igual depende del operador.

A continuación se tiene una tabla al detalle con cada uno de estos campos para Colombia, en los operadores con mayor demanda en el país. [35]

Teniendo en cuenta que el IMSI es un número único estandarizado internacionalmente para identificar el abonado, la IMSI se define en la Recomendación UIT-T E.212. [36]. Ver Tabla XVII

Tabla XVII. Código de Colombia (MCC) y códigos de red móvil (MNC) y el IMSI de cada operador.

MCC	MNC	RED	OPERADOR	ESTADO	IMSI
732	001	Colombia Telecomunicaciones S.A	Movistar	Operacional	7320014
732	101	COMCEL S.A	Claro	Operacional	7321014
732	103	Colombia Móvil	Tigo	Operacional	7321114

IMEISV (International Mobile Equipment Identity with software version/ Identidad internacional del equipo móvil con la versión del software). Identifica el número de serie del equipo móvil, el número de modelo del hardware y el número de versión del software de un equipo móvil de forma única. Tamaño: 16 dígitos, IMEISV = TAC +SNR +SVN. [36] [37]

TAC (Type Approval Code) tipo de código de asignación, es un código de área de seguimiento, para indicar eNB a que área de seguimiento pertenece el eNB (por celda) único dentro de un PLMN. [25]

M-TMSI (M-Temporary Mobile Subscriber Identity), es un valor temporal que identifica de forma única a un abonado en ese MME particular.

Es un número binario de 32 dígitos que es parte de la GUTI y se utiliza exclusivamente en el E-UTRAN. El procedimiento de asignación siempre debe ejecutarse en modo cifrado para evitar accesos no autorizados. [38]

E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer), Un portador EPS / E-RAB se establece cuando el UE se conecta a un PDN y permanece establecido durante toda la vida útil de la conexión PDN para proporcionar al UE una conectividad IP siempre activa en esa PDN. Ese portador se conoce como el portador predeterminado. [39]

REG (Resource Element Group), los grupos de elementos de recursos se utilizan para definir la asignación de canales de control a elementos de recursos (RE). Los REG`s son bloques de RE`s consecutivos dentro del mismo símbolo OFDM. [40]

IP_ADDR (Address IP), indica la dirección IP del equipo LTE conectado.

Seguidamente se procede a abrir otra ventana de terminal (diferente a la que está corriendo el nodo MME), y se ingresa a la ubicación de la misma carpeta donde se ejecutó anteriormente el nodo mme (cd PicoLTE/nutaq_lte_config/FDD/mimo-2x2-15mhz/).

A continuación se digita el siguiente comando para iniciar la estación base eNodeB: "sudo ./launch_enb.sh", e inmediatamente el programa detecta la tarjeta Perseus del equipo Nutaq; se asigna una IP interna y de acuerdo a las configuraciones mostrará la banda de frecuencias a la cual se encuentra trabajando el servicio PicoLTE. Indicando la frecuencia downlink (739MHz) asignada a la banda 17. Ver Figura 38.

```
mimo-2x2-10mhz
log/2016-12-09 Does Not Exist!
log/2016-12-09 Created!
DISTRIB_ID=Ubuntu
DISTRIB_DESCRIPTION="Ubuntu 14.04.5 LTS"
net.core.rmem_max = 50000000
net.core.rmem_max = 1048576
LTE Base Station version 2015-06-18, Copyright (C) 2012-2015 Amarisoft
This software is licensed to Nutaq.
sample_rate=11.520 MHz
RF0: dl_freq=739.000 MHz ul_freq=709.000 MHz (band 17) dl_ant=2 ul_ant=1
(enb) Connected to Perseus board with the following IP address (192.168.0.101):
Start Calibration .....
Calibration End Succesfully!
```

Figura 38. Inicio eNB.

En la Figura 38, se presenta el inicio de la calibración de la PicoSDR, este proceso puede tardar aproximadamente uno o dos minutos y es automático. Una vez se realiza esta calibración, el dispositivo inicia la transmisión. Al presionar Enter, de inmediato aparece habilitada la interfaz de manejo del eNB, y dentro de esta interfaz se digita el comando help para ver las opciones que permite explorar.

Al igual que la interfaz MME, el eNB permite ver las opciones que se encuentran en este nodo por el comando help; y de esta manera ver en detalle como en la Figura 39.

```

(enb) help          show available commands
help              activate status display
t                 change the log options
log               list available cells
cell              set the cell DL gain
cell_gain         disable uplink for a given cell
cell_ul_disable  display error stats
errors            show connected UEs
ue                start a handover
handover          start recording pcap data to a file
pcap              stop recording pcap data
pcap_stop        Get RF driver informations
rf_info          set the analog TX gain
tx_gain           set the analog RX gain
rx_gain          show the S1 connection status
s1                (re)connect to the MME
s1connect         disconnect from the MME
s1disconnect     list X2 connections
x2                start an X2 connection
x2connect        stop an X2 connection
x2disconnect     show host CPU capabilities
hwcaps           show the MBMS status
mbms              Stop eNB
quit              (enb)

```

Figura 39. Opciones disponibles en la interfaz eNB.

Para que el celular acceda al PicoSDR es necesario utilizar alguna de las SIM Card de prueba con las que se cuenta en el laboratorio virtual, esta SIM CARD contiene la información de la Tabla XVIII.

El celular que se tiene para el desarrollo de estas pruebas es de marca y modelo Samsung S5, y tiene integrado el software QualiPoc para la toma, análisis e interacción de medidas y simulación.

Tabla XVIII. Información Sim test de Anritsu

INFORMACIÓN SIMCARD (TESTCARD ANRITSU MT8820C)	
PIN	1234
PIN2	5678
PUK	12345678
PUK2	87654321
ICCID	89860000502000180722
IMSI	001010123456789

Dentro de las opciones que brinda el eNB para estudiar en detalle, se tienen la interfaz S1 que es el medio por donde se intercambia tráfico entre eNodeBs y EPC.

Los eNodeB se encuentran normalmente interconectados entre sí por medio de una interfaz denominada "X2" y al EPC (Evolved Packet Core) por medio de la interfaz "S1", más específicamente al MME por medio de la interfaz S1-MME y al S-GW por medio de la interfaz S1-U.

Para la conexión de la interfaz “S1” como se tiene en la Figura 40, se obtienen los detalles del servidor como la dirección IP que se encuentra asignada, el estado de la conexión que esta realizada y el valor de PLMN (red pública móvil terrestre), donde cada operador tiene asignada su propia PLMN y para este caso, el valor 00101, corresponde al código de identificación estándar de las redes móviles.

```
S1 connection state:
- server=127.0.1.100:36412 state=setup_done PLMN=00101
(enb) >
```

Figura 40. Conexión interfaz S1.

En la Figura 41, se tienen las características del móvil conectado a la red LTE.

Dentro de los parámetros que se encuentran se tiene nuevamente el PLMN asignado, el eNB_ID que es el identificador de un eNB dentro de una red móvil terrestre pública (PLMN).

```
((enb) cell
PLMN=00101 eNB_ID=0x1a2d1
Cell TAC dl_earfcn pci prach_seq dl_gain ul_dis plmn
0x01 0x0001 5780 1 204 0.0 N 00101
(enb) >
```

Figura 41. Características del celular conectado a la red.

La frecuencia portadora en el enlace descendente (dl_Earfcn) es designado por el EARFCN que oscila entre 0-65535. Teniendo en cuenta que el EARFCN identifica de forma exclusiva la banda LTE y la frecuencia de la portadora, además es independiente del ancho de banda del canal.

PCI (Physical Cell Identifier), el identificador de celda física, es la identidad de una celda LTE y se incluye en el procedimiento de configuración LTE 2X2. [41]

Cell_id: Corresponde al código identificador de la celda, que para una configuración básica se debe asignar se debe asignar **0x01** en hexadecimal de 8 bits, aunque el rango es de 0 a 255.

PRACH (Physical Random Access Channel), el canal de acceso físico aleatorio, es un canal físico utilizado para transportar el canal de acceso aleatorio (RACH). Consiste en una firma de preámbulo, que se selecciona al azar o se asigna previamente. Al dividir las firmas en dos grupos, el PRACH puede llevar un bit de

información de capa superior que indica la cantidad de recurso necesario, para el siguiente mensaje de enlace ascendente. [41]

Los valores de las bandas de frecuencia LTE, se toman de referencia de la Tabla XIX.

EARFCN: la frecuencia portadora en el enlace ascendente y descendente se designa por el número de canal de radiofrecuencia absoluta E-UTRA (EARFCN) con el intervalo 0 – 65535. [41]

Bandas LTE, anchos de banda de canal y asignaciones de frecuencia

En la Tabla XIX se ilustran las bandas operativas LTE, que indican la frecuencia de portadora a utilizar. No todas las frecuencias LTE soportan todos los anchos de banda.

La Tabla XIX incluye solo bandas FDD, que son las que se utilizaron para el desarrollo, pruebas y análisis en el proyecto.

Tabla XIX. Bandas y anchos de banda del canal LTE.

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode	Channel Bandwidths (MHz)
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD	5, 10, 15, 20
2	1850 MHz – 1920 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD	5, 10
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD	5, 10, 15, 20
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD	5, 10, 15, 20
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD	5, 10, 15, 20
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD	5, 10

12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD	5, 10
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD	5, 10
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD	5, 10
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD	5, 10, 15
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD	5, 10, 15
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD	5, 10, 15, 20
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD	5, 10, 15

DL_freq = 739.000 MHz

UL_freq = 709.000 MHz

Banda 17 UL (704MHz – 716MHz) DL (734MHz – 746MHz)

DL_ant = 2

UL_ant = 1

Sample_rate = 11.520 MHz

En la interfaz de eNB se ejecuta el comando `!status` que activa la pantalla de status, que muestra la conexión que hay actualmente entre los diferentes celulares y el nodo PicoLTE. Esto se logra con encender el celular y este automáticamente se conecta a la red 00101, que es la que corresponde a la red de prueba.

Donde se tienen los siguientes parámetros:

RNTI (Radio Network Temporary Identifier). Identificador Temporal de la Red de Radio. Los RNTI se utilizan para identificar los UE dentro de E-UTRAN, en particular en los mensajes de señalización entre el UE y E-UTRAN. Existen varios tipos de RNTI, incluyendo Cell-RNTI (C-RNTI), Paging-RNTI (P-RNTI), Random Access-RNTI (RA-RNTI) y Sistema de Información-RNTI (SI-RNTI). [41]

CQI (Channel Quality Indicator). Indicador de Calidad de Canal. Información señalado por un UE a la estación base para indicar una velocidad de datos adecuada (típicamente una modulación y codificación Scheme (MCS) de valor) para transmisiones de enlace descendente, por lo general basado en una medición de la señal de enlace descendente recibida a interferencia más ruido (SINR) y conocimiento de las características del receptor del UE. [41]

SNR (Signal-to-Noise Ratio). Relación señal a ruido. La relación de la potencia media recibida portadora modulada a la potencia de ruido (por lo general el ruido térmico modelado como Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN)). [41]

MCS (Modulation and Coding Scheme). Esquema de modulación y codificación, es el término que abarca la orden de modulación y la velocidad de código de una

transmisión. Por lo tanto, el MCS describe la velocidad de datos de información de una transmisión. [41]

RI (Rank Indicator). Un rango de indicador (RI) se notifica al eNodeB por los UE configurados para Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) 3 modos de transmisión (multiplexado espacial en bucle abierto) y 4 (multiplexación espacial de circuito cerrado). [41]

PHR (Power Headroom Report). Es el índice informado por el UE para indicar el margen de ganancia de potencia estimado. El rango de informe de cabeceras de potencia es de -23 a +40 dB. [41]

En la Figura 42 se tiene la información que corresponde a los datos de Downlink y de Uplink, mientras el celular Samsung S5 se encuentra reproduciendo en la plataforma de Youtube un video.

```

PRACH: cell=01 seq=51 ta=11 snr=28.0 dB
70 01 0093 13 1 20.0 5 24 11.3k 14.8 8.5 8.6 1 17 8.30k 1/1.7/6 17
70 01 0093 12 1 21.6 8 13 11.9k 10.0 9.3 15.2 1 12 7.00k 1/2.2/6 17
70 01 0093 8 1 - 0 0 0 9.3 - - 0 0 0 - 17
--DL-----
UE_ID CL RNTI cqi ri mcs retx txok brate snr puc1 mcs retx rxok brate turbo phr
70 01 0093 8 1 15.1 4 19 21.3k 12.8 11.6 11.6 4 18 9.76k 1/2.6/6 15
70 01 0093 11 1 - 0 0 0 10.7 - - 0 0 0 - 15
70 01 0093 12 1 25.0 1 2 840 10.6 8.6 12.0 0 1 292 2/2.0/2 18
70 01 0093 15 1 - 0 0 0 7.5 - - 0 0 0 - 18
70 01 0093 12 1 21.0 0 2 624 11.7 8.3 13.0 0 2 616 1/1.5/2 16
70 01 0093 11 1 22.7 3 18 41.2k 12.0 7.5 11.9 1 17 11.9k 1/1.9/6 15
70 01 0093 12 1 24.1 24 174 614k 11.6 12.1 13.2 4 192 381k 1/2.3/6 11
70 01 0093 15 1 26.7 4 15 22.7k 11.7 9.4 12.7 0 40 69.4k 1/2.0/3 17
70 01 0093 13 1 27.0 5 12 6.28k 8.9 9.9 12.2 4 12 4.64k 1/2.9/6 18
70 01 0093 11 1 - 0 0 0 10.3 - - 0 0 0 - 18
--DL-----
UE_ID CL RNTI cqi ri mcs retx txok brate snr puc1 mcs retx rxok brate turbo phr
70 01 0093 11 1 - 0 0 0 11.0 - - 0 0 0 - 18
70 01 0093 10 1 - 0 0 0 10.1 - - 0 0 0 - 18
70 01 0093 13 1 - 0 0 0 8.6 - - 0 0 0 - 18
PRACH: cell=01 seq=24 ta=7 snr=27.6 dB
88 01 0094 10 1 12.2 1 8 1.44k 10.0 6.6 12.7 2 7 1.83k 1/2.3/6 32
88 01 0094 10 1 - 0 0 0 6.2 - - 0 0 0 - 32
88 01 0094 10 1 - 0 0 0 12.7 - - 0 0 0 - 32
88 01 0094 13 1 - 0 0 0 6.7 - - 0 0 0 - 32
88 01 0094 13 1 - 0 0 0 8.7 - - 0 0 0 - 32
88 01 0094 11 1 21.0 1 1 204 12.7 9.9 0.0 0 1 268 1/1.0/1 12

```

Figura 42. Información de los paquetes enviados y recibidos.

Para cambiar las configuraciones de transmisión del PicoSDR como frecuencia de transmisión, es necesario detener el servicio del nodo b (eNB) utilizando el comando quit y editando el archivo mostrado en la Figura 43.

```
$ sudo nano mimo-2x2-15mhz.cfg
```

Figura 43. Archivo configuración EARFCN

En este archivo se busca la configuración del *dl_earfcn*, como el código es extenso se procede a colocar las teclas *ctrl+w* y se escribe la línea que se desea modificar para nuestro caso “*dl_earfcn*”. A continuación se comenta la banda que se encuentra en uso y se procede a digitar la banda deseada mediante *dl_earfcn: 5780*, es importante la coma ya que sin esta no se puede ejecutar la orden. Ver Figura 44.

Seguido se procede a guardar, usando “*ctrl+x*” y “*enter*”, de esta manera queda guardada la configuración.

EARFCN: 5770

```

GNU nano 2.2.6 File: mimo-2x2-15mhz.cfg Modified
plmn_list: [
  "00101",
],

/////////////////////////////////////$
//////////////////////////////////// CAMBIO DE EARFCN , CAMBIO DE BANDA DE TRABAJO ///////////////////////////////////$
/////////////////////////////////////$

// dl_earfcn: 320, /* DL:2142 UL:1952 (Band 1) */
// dl_earfcn: 800, /* DL:1950 UL: 1870 (Band 2) */
//dl_earfcn: 2210,/* DL:2136 UL: 1736 (Band 4)
// dl_earfcn: 2450, /* DL:874 UL:829 (Band 5) */
// dl_earfcn: 2950, /* DL_2640 UL:2520 (Band 7) */
|| dl_earfcn: 5770, /* DL:738 UL:708 (Band 17) */
//dl_earfcn: 5790, /* DL:740MHZ UL: 710 (Band 17) */

^G Get Help      ^O WriteOut     ^R Read File    ^V Prev Page    ^K Cut Text     ^C Cur Pos
^X Exit          ^J Justify      ^W Where Is     ^N Next Page    ^U UnCut Text   ^T To Spell

```

Figura 44. Modificación bandas de frecuencia DL_EARFCN

Una vez guardado el valor EARFCN a trabajar, se procede a iniciar nuevamente el servicio del nodo b (*enb*) utilizando el siguiente comando:

```
sudo ./launch_enb.sh
```

Para el cambio de valores de ganancia en transmisión PicoSDR, se tienen diferentes etapas de amplificación para la señal LTE, la manera de ajustar los diferentes valores en la antena transmisora y receptora se encuentran en el directorio donde se lanza el servicio de LTE. Para cada directorio de ancho de banda existe un archivo llamado “**radio420x.cfg**”. En este archivo se pueden modificar los valores de ganancia que se encuentran establecidos, así como un rango para tener en cuenta a la hora de modificarlas.

Para la Figura 45, se observa este archivo como guía para la modificación de ganancias de las antenas, para obtener mejores y óptimos resultados en el receptor o en el analizador de espectro.

```

GNU nano 2.2.6                               File: radio420x.cfg
#####
//          USER GUIDE
#####
//RAX : Radio Card A, x is 1 or 2
//PicoSDR2x2E : RA1 TX/RX
//          RA2 TX/RX
//=====
//          TX GAINS
//-----
//TXVGA1:   [-35, -4] dB
//TXVGA2:   [ 0, 25] dB
//TXVGA_EXT: [-13, 18] dB
//=====
//          RX GAINS
//-----
//RXVGA_EXT: [-13, 18] dB
//RXVGA_LNA: { 0, 3, 6} dB
//RXVGA1:   { 5, 19, 30} dB
//RXVGA2:   [ 0, 60] dB
//          (Above 30 dB is not recommended)

```

Figura 45. Guía de usuario para configurar ganancias de TX y RX en PicoLTE.

Como se ilustra en la Figura 46, dentro del mismo archivo se encuentra los parámetros de las antenas que se quieran modificar, teniendo en cuenta los rangos máximos y mínimos para aplicar.

```

GNU nano 2.2.6                               File: radio420x.cfg
#####
RA1_TXVGA1  -10
RA1_TXVGA2   10
RA1_TXVGA_EXT 10
=====
RA1_RXVGA_EXT 0
RA1_RXVGA_LNA 3
RA1_RXVGA1  19
RA1_RXVGA2   10
#####
RA2_TXVGA1  -17
RA2_TXVGA2   5
RA2_TXVGA_EXT -4
=====
RA2_RXVGA_EXT -8
RA2_RXVGA_LNA 3
RA2_RXVGA1  19
RA2_RXVGA2   0
#####

```

Figura 46. Archivo de configuración de ganancia.

En la Tabla XX, indica los rangos de ganancias a trabajar en el equipo PicoSDR.

Tabla XX Configuración de Ganancias.

	VALORES DE GANANCIA
TXVGA1	Valores desde -35 hasta -4
TXVGA2	Valores desde 0 hasta 25
TXVGA_EXT	Valores desde -13 hasta 18
RXVGA_EXT	Los valores pueden ir desde -13 hasta 18

RXVGA_LNA	Únicamente se puede configurar el valor de 0, 3 o de 6
RXVGA1	Únicamente el valor de 5, 19 o 30
RXVGA2	Valores desde 0 hasta 60

ANEXO C

QualiPoc Android Handheld – Samsung Galaxy S5

El terminal móvil de test que se ha usado para la implementación de la red LTE es el Samsung Galaxy S5, fabricado por Samsung, modelo SM-G900M categoría 4 de LTE.

Sus características se detallan en la Tabla XXI, así como las especificaciones relacionadas con esta categoría se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XXI. Especificaciones Técnicas [42]

	SoC	MSM8974ACv3 2.45 GHZ Snapdragon 801
	RAM / NAND	2GB lpddr3, 16/32 GB NAND + microSD
	Red	2G / 3G / 4G LTE (Qualcomm MDM9X25 UE categoría 4 LTE)
	OS	Android 4.4 con touchWiz
	Conectividad	802.11a / b / g / n / ca 2x2 + BT 4-0, USB 3.9, GPS /GNSS, MHL, DLNA, NFC.
	Tamaño de SIM	MicroSim
	Batería	2800 mAH (10,78 Whr)

Categoría terminales

La especificación del 3GPP 36.306 define para LTE un conjunto de categorías de terminal.

La Tabla XXII, detalla las velocidades máximas del enlace descendente para las distintas categorías como ejemplo que se dispone de un ancho de banda de 20 Mhz. Al igual que la categoría en la que se encuentra el equipo a trabajar en el desarrollo del proyecto.

El régimen binario máximo que puede recibir el teléfono es 150,7 Mbps. Además el dispositivo cuenta con 2 antenas.

Tabla XXII. Categoría UE [43]

Categoría UE	Release 3GPP	Antenas MIMO (DL)	Rb máximo en la capa L1 DL	Rb máximo en la capa L1 UL
1	Release 8	1	10,3 Mbps	5,2 Mbps
2	Release 8	2	51 Mbps	25,5 Mbps
3	Release 8	2	102 Mbps	51 Mbps
4	Release 8	2	150,7 Mbps	51 Mbps
5	Release 8	4	299,6 Mbps	75,4 Mbps
6	Release 10	2 o 4	301,5 Mbps	51 Mbps
7	Release 10	2 o 4	301,5 Mbps	102 Mbps
8	Release 10	8	2,998 Gbps	1.497 Mbps

ANEXO D

Antenas (30.800 Aaronia OnmiLog) [33]

ANT1920Y9-WR es una antena Yagi de banda ancha, de alta ganancia, robusta para bandas de telefonía móvil, diseñada para el uso con muchos tipos de analizadores portátiles.



Figura 47. Telewave ANT1920Y9-WRU

En la Figura 47 se tiene el diseño de la antena Telewave ANT 1920Y9-WRU, que cuenta con una característica importante y es la optimización de esta, para evitar la intermodulación de RF y asegurar el control de patrón preciso.

Ver Tabla XXIII, para especificaciones técnicas de la antena. [44]

Tabla XXIII. Especificaciones Técnicas antena Telewave ANT1920Y9-WRU

Especificaciones			
Frequency (Continuous)	1850–1990 MHz	Elements	6
Gain (typ)	9.3 dBd	Dimensions (L x H)	11.75 x 3.5 in.
Power rating (typ)	500 watts	Antena weight	1 lb.
Impedance / VSWR	50 ohms / 1.5:1 (max)	Shipping weight	4 lb.
Front to back ratio (min)	20 dB	Wind Rating / with 0.5" ice	200/165 MPH
beamwifth V / H	46° / 56°	Exposed área (flat plate equiv.)	0.14 ft.
Pattern / Polarization	Dirrectional/ Variable	Lateral thrust at 100 MPH	5.6 lb.
Termination	N Female or 7-16 DIN (opt.)	(40 psf – flat plate equiv.)	