

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UNA ESTACIÓN BASE  
CELULAR 4G BASADO EN SDR (RADIO DEFINIDA POR  
SOFTWARE) PARA ZONAS RURALES**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de las  
Telecomunicaciones**

**AUTOR:**

Luis Felipe Ramos Torres

**ASESOR:**

Darwin Auccapuri Quispetupa

Lima, Setiembre, 2025

## Informe de Similitud

Yo, Darwin Auccapuri Quispetupa,

docente de la Facultad de **CIENCIAS E INGENIERÍA** de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UNA ESTACIÓN BASE CELULAR 4G BASADO EN SDR (RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE) PARA ZONAS RURALES,**


del autor

**Luis Felipe Ramos Torres,**

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 07/09/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: **San Miguel, 07 de setiembre del 2025.**

Apellidos y nombres del asesor: <u>Auccapuri Quispetupa, Darwin</u>	
DNI: 43254948	Firma 
ORCID: 0000-0002-4760-9185	

## DEDICATORIA

A mi familia con mucho cariño.

A mi abuelo paterno que en paz descanse.



## **AGRADECIMIENTOS**

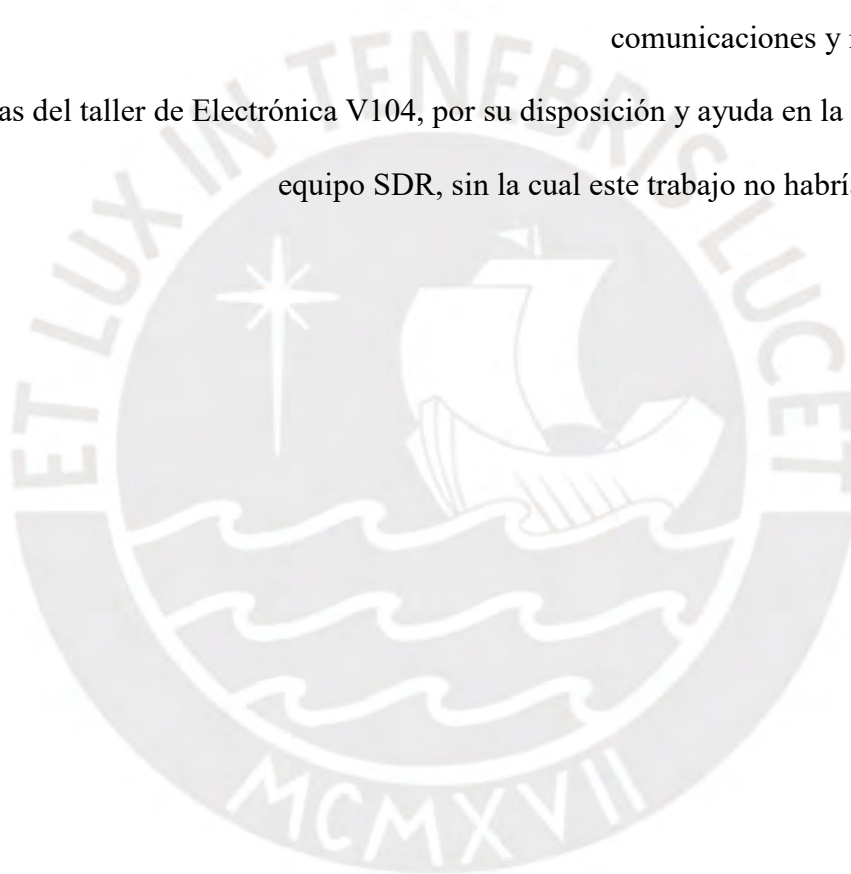
A mi madre y abuela, por contar siempre con su apoyo a lo largo de este proceso universitario.

A mis compañeros y amigos, con quienes he tenido el privilegio de compartir esta hermosa carrera, en especial a quienes me motivaron en los momentos más difíciles.

A mi asesor y a los integrantes del GTR, por su colaboración durante el desarrollo de la tesis.

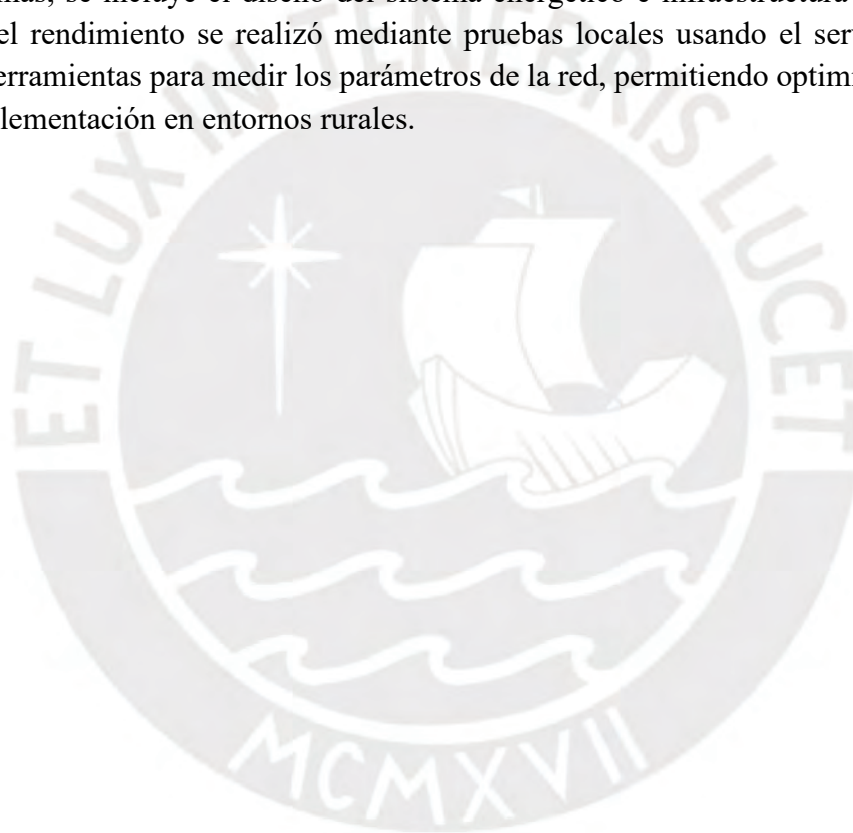
A los profesores José Rodríguez y Edgar Velarde, por sus enseñanzas en el área de las comunicaciones y redes móviles.

A las personas del taller de Electrónica V104, por su disposición y ayuda en la reparación del equipo SDR, sin la cual este trabajo no habría sido posible.



## RESUMEN

Las zonas rurales del Perú aún enfrentan una notable ausencia de cobertura móvil, debido a que los operadores consideran poco rentable invertir en estas regiones por sus desafíos geográficos, requerimientos de infraestructura y limitaciones económicas de sus habitantes. Esta investigación propone el desarrollo de un prototipo de estación base 4G-LTE para localidades rurales con baja densidad poblacional, implementando tecnología SDR. El proyecto evalúa opciones de software Open Source y equipamiento SDR disponibles comercialmente, utilizando la plataforma srsRAN y el dispositivo LimeSDR como componente físico para simular la estación base. Para las comunicaciones de voz se plantean dos alternativas: VOIP mediante servidor Asterisk y la integración de VoLTE en contenedores Docker. Además, se incluye el diseño del sistema energético e infraestructura necesario. La evaluación del rendimiento se realizó mediante pruebas locales usando el servicio VoLTE, empleando herramientas para medir los parámetros de la red, permitiendo optimizaciones para su futura implementación en entornos rurales.

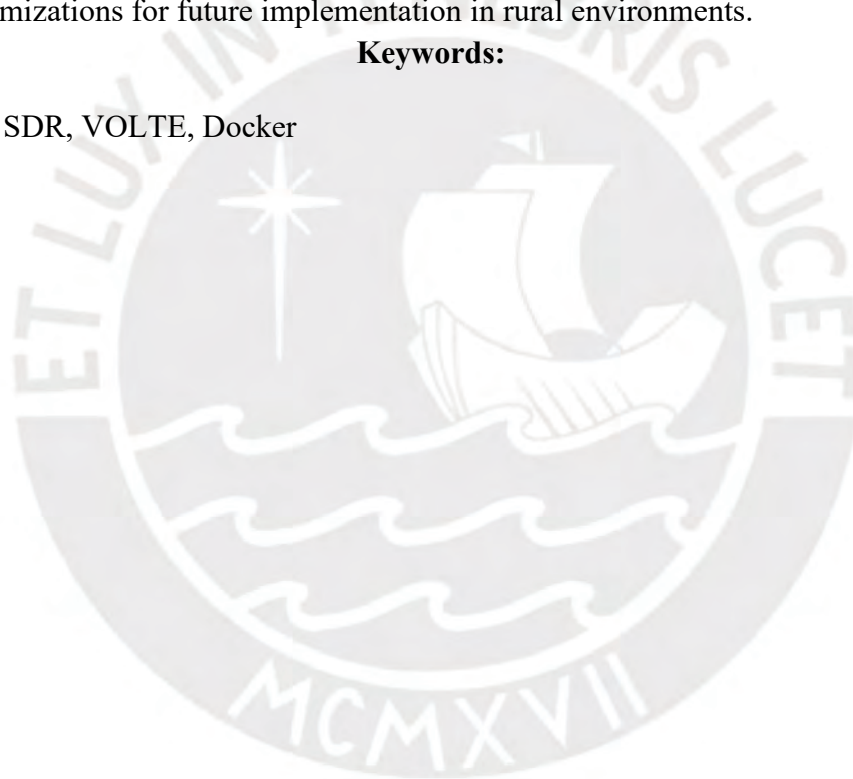


## ABSTRACT

Rural areas in Peru still suffer from a significant lack of mobile coverage as operators find it unprofitable to invest in these regions due to the geographical challenges, infrastructure requirements and economic limitations of the inhabitants. This research proposes the development of a 4G prototype base station for low population density rural areas using SDR technology. The project evaluates open source software options and commercially available SDR devices, using the srsRAN platform and the LimeSDR device as the physical component to simulate the base station. Two alternatives are proposed for voice communication: VOIP via Asterisk server and VoLTE integration in Docker containers. The design of the necessary power system and infrastructure is also included. The performance evaluation was carried out through local tests with the VOLTE service, using tools to measure network parameters, allowing optimizations for future implementation in rural environments.

### Keywords:

4G, srsRAN, SDR, VOLTE, Docker



# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
GLOSARIO.....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1. Problemática de la falta de acceso a la telefonía móvil en zonas rurales .....	4
1.1 Motivación por el problema propuesto.....	4
1.2 Área de especialización en las Telecomunicaciones .....	5
1.3 Descripción del desafío de ingeniería.....	5
1.3.1 Identificación del problema.....	5
1.3.2 Contexto y relevancia.....	6
1.3.3 Especificaciones y criterios.....	13
1.4 Justificación e importancia del desafío de Ingeniería.....	14
1.4.1 Importancia social .....	14
1.4.2 Importancia técnica .....	14
1.4.3 Importancia económica .....	16
1.5 Objetivos generales y específicos.....	16
1.6 Identificación de los beneficiarios .....	17
1.7 Evaluación del impacto de la solución .....	17
1.8 Alcances y limitaciones .....	18

Capítulo 2. Avances tecnológicos en redes móviles 4G. Soluciones para la conectividad rural	19
2.1 Marco teórico.....	19
2.1.1 LTE.....	19
2.1.2 Componentes de una estación base celular .....	32
2.1.3 SDR.....	38
2.2 Antecedentes de solución similares al desafío de ingeniería.....	40
2.3 Características de las soluciones similares .....	41
2.4 Conjunto de tecnologías, herramientas y métodos de las soluciones semejantes .....	41
2.5 Conjunto de características y especificaciones para la solución de ingeniería.....	43
Capítulo 3. Diseño y desarrollo del prototipo de una estación base 4G basada en SDR para zonas rurales.....	45
3.1 Descripción y características de un prototipo de una estación base 4G basado en SDR para zonas rurales.....	45
3.2 Evaluación de la implementación de una estación base LTE con la aplicación de SDR	47
3.3 Análisis de la elección óptima de software para la solución de ingeniería .....	48
3.4 Desarrollo del prototipo de una estación base LTE basado en SDR para zonas rurales	49
3.4.1 Especificaciones y restricciones del diseño .....	49
3.4.2 Desarrollo de la solución propuesta .....	50
3.4.3 Subsistema de energía .....	72
3.4.4 Subsistema de infraestructura y protección eléctrica .....	74

Capítulo 4. Evaluación integral: Viabilidad técnica, económica, legal y ambiental de la propuesta desarrollada.....	75
4.1    Resumen de las características de la solución .....	75
4.2    Análisis económico y financiero .....	76
4.2.1    Análisis económico .....	76
4.2.2    Análisis financiero.....	79
4.3    Análisis de idoneidad ambiental y sostenibilidad.....	80
4.4    Análisis de idoneidad social y cultural .....	81
4.4.1    Beneficiarios directos e indirectos .....	81
4.5    Análisis de idoneidad frente a la salud y el bien público .....	81
4.5.1    Salud.....	81
4.5.2    Seguridad.....	81
Capítulo 5. Resultados y pruebas del prototipo.....	83
CONCLUSIONES .....	92
RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES .....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
ANEXOS.....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Resumen del total de población urbana y rural en 2007 y 2017. Fuente: [19]	6
Tabla 1.2 - Definición de grupos poblacionales. Fuente: Elaboración propia	7
Tabla 1.3 - Distribución de comunidades nativas y campesinas (Tumbes - Ica). Fuente: [3]	7
Tabla 1.4 - Distribución de comunidades nativas y campesinas (Arequipa - Amazonas). Fuente: [3]	8
Tabla 1.5 - Pueblos originarios de comunidades campesinas que cuentan con telefonía celular. Fuente: [20]	10
Tabla 1.6 - ARPU según área geográfica. Fuente: [11]	16
Tabla 1.7 - Beneficiarios directos. Fuente: Elaboración propia	17
Tabla 1.8 - Beneficiarios indirectos. Fuente: Elaboración propia	17
Tabla 2.1- Bandas LTE según 3GPP (Banda 1 – Banda 12). Fuente: [25]	21
Tabla 2.2- Bandas LTE según 3GPP (Banda 13 – Banda 40). Fuente: [25]	22
Tabla 2.3 - Bandas para servicios LTE en Perú. Fuente: [43]	22
Tabla 2.4 - Anchos de banda nominales en LTE. Fuente: [39]	29
Tabla 2.5 - Canales lógicos en LTE. Fuente: [49]	30
Tabla 2.6 - Canales de transporte en LTE. Fuente: [49]	30
Tabla 2.7 - Canales de datos físicos en LTE. Fuente: [49]	31
Tabla 2.8 - Canales de control físicos en LTE. Fuente: [49]	31
Tabla 2.9 - Características de los tipos de nodo de una estación base. Fuente: [11]	33
Tabla 2.10 - Resumen de códigos aplicados para redes LTE. Fuente: [17], [27], [28], [64], [65], [74]	39
Tabla 2.11 - Resumen de antecedentes similares al tema de tesis. Fuente: [15], [16], [17], [29], [31], [32], [74]	40
Tabla 3.1 - Selección de las alternativas de software SDR disponibles. Fuente: [29], [74]	48

Tabla 3.2- Características de la máquina para la solución VOIP. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 3.3 - Características de la máquina para la solución VOLTE. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 3.4 - Características del equipo SDR. Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 3.5 - Características del equipo móvil Huawei Mate Lite 20. Fuente: [70]	53
Tabla 3.6 - Características del equipo móvil Huawei P30 Lite. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 3.7 - Campos para creación del ICCID. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 3.8 - Campos para creación del IMSI. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 3.9 - Cálculo de la cantidad de paneles y baterías. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 4.1 - Características de la solución. Fuente: [60]	75
Tabla 4. 2 - Costos de equipos de telecomunicaciones. Fuente: Elaboración propia	76
Tabla 4. 3 - Costos de equipos de energía. Fuente: Elaboración propia	77
Tabla 4. 4 - Costos de equipos de infraestructura. Fuente: Elaboración propia	77
Tabla 4. 5- Costos de equipos de protección eléctrica. Fuente: Elaboración propia	78
Tabla 4. 6 - Costos totales. Fuente: Elaboración propia	78
Tabla 4. 7 - Resultados del cálculo del VAN, TIR, IR. Fuente: Elaboración propia	79
Tabla 5.1 - Modelos de celulares Huawei usados para pruebas. Fuente: [74]	84
Tabla 5.2 - Resultados de parámetros usando antenas omnidireccionales (Huawei P30 LP). Fuente: Elaboración propia	85
Tabla 5.3 - Resultados de parámetros usando antenas omnidireccionales (Huawei P Smart). Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 5.4 - Resultados de parámetros en exteriores (Huawei P30 Lite LP). Fuente: [74]	87
Tabla 5.5 - Resultados de parámetros en exteriores (Huawei P Smart). Fuente: Elaboración propia	88
Tabla 5.6 - Medición de parámetros de calidad de voz. Fuente: [74]	90

Tabla 5.7 - Comparación entre solución VOIP y VOLTE. Fuente: Elaboración propia	90
Tabla A1. Bandas LTE. Fuente: [48]	101
Tabla E1. Porcentaje de uso del CPU usando herramienta “htop” con 5 equipos. Fuente: Elaboración propia	116
Tabla F1 - Especificaciones LimeSDR USB TYPE A. Fuente: [55]	117
Tabla I1. Fórmulas para el cálculo de los valores mínimos de velocidad y asimetría. Fuente: [68]	120



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comunidades nativas con el servicio móvil. Fuente: [18]	9
Figura 1.2 - Cantidad de comunidades nativas con telefonía pública. Fuente: [18]	9
Figura 1.3 - Comunidades campesinas con pertenencia a un pueblo que cuentan con telefonía celular. Fuente: [20].	10
Figura 1.4 – Número de líneas móviles agrupadas por operadora. Fuente: [11]	11
Figura 1.5 - Número de líneas móviles conectadas a Internet por tecnología. Fuente: [11]	11
Figura 1.6 - Porcentajes de tráfico de voz (izquierda) y datos (derecha) en el ámbito urbano y rural. Fuente: [11]	13
Figura 1.7 - Componentes de una estación base celular. Fuente: [22]	14
Figura 1.8 - Distribución de estaciones por tecnología y tipo de instalación. Fuente: [11]	15
Figura 2.1 - Arquitectura de una red LTE. Fuente: [45]	20
Figura 2.2 - Ancho de banda de canal y de transmisión. Fuente: [29]	23
Figura 2.3 - Asignación de bloques de recursos en OFDMA. Fuente: [39]	28
Figura 2.4 - Ejemplo de configuración en modo MIMO. Fuente: [11]	32
Figura 2.5 - Diagrama de un sistema fotovoltaico. Fuente: [11]	33
Figura 2.6 - Torre con cerco perimétrico (izquierda) y con caseta (derecha). Fuente: [11]	34
Figura 2.7 - Torre con antena de microondas. Fuente: [11]	37
Figura 2.8 - Tarjetas SIM LTE programables y lectora. Fuente: [47]	43
Figura 3.1 - Diagrama físico del prototipo LTE - SDR para ambas soluciones. Fuente: [74]	51
Figura 3.2 - Equipo LimeSDR USB Type A. Fuente: Elaboración propia	52
Figura 3.3 - Antenas omnidireccionales de 10 dBi. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 3.4 - Cable USB 3.0 (Con conectores macho y hembra). Fuente: Elaboración propia	53
Figura 3.5 - Primer paquete de la marca XCRFID. Fuente: Elaboración propia	54

Figura 3.6 - Segundo paquete de la marca OYEITIMES. Fuente: [51]	54
Figura 3.7 - Arquitectura de la primera solución propuesta. Fuente: Elaboración propia	55
Figura 3.8 - Flujograma de los pasos previos a seguir para la instalación. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 3.9 - Flujograma de instalación de SoapySDR. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 3.10 - Flujograma de instalación de LimeSuite. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 3.11 - Flujograma de instalación del software srsRAN. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 3.12 - Configuración del EPC. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 3.13 - Configuración del eNB (sección [enb]). Fuente: Elaboración propia	58
Figura 3.14 - Configuración del eNB (sección [rf]). Fuente: Elaboración propia	59
Figura 3.15 - Configuración de radio (rr.conf). Fuente: Elaboración propia	59
Figura 3.16 - Programa GRSIMWrite con la configuración del primer SIM. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 3.17 - Configuración de usuarios en el software. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 3.18 - Configuración en “Redes móviles” para el terminal móvil . Fuente: Elaboración propia	62
Figura 3.19 - Creación del APN en el terminal móvil . Fuente: Elaboración propia	63
Figura 3.20 - Nombre del APN en el terminal móvil . Fuente: Elaboración propia	63
Figura 3.21 - Ejecución de los comandos usando la herramienta tmux. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 3.22 - Escaneo de la red en el terminal móvil (izquierda), y estado de la conexión (derecha). Fuente: Elaboración propia	65
Figura 3.23 - Estado del servicio de Asterisk ejecutándose correctamente. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 3.24 - Llamada establecida VOIP. Fuente: Elaboración propia	67

Figura 3.25 - Arquitectura de la solución VOLTE. Fuente: [74]	67
Figura 3.26 - Pasos previos para la solución VoLTE. Fuente: [74]	68
Figura 3.27 - Construcción de las imágenes para la solución VoLTE. Fuente: [61], [74]	69
Figura 3.28 - Despliegue de la solución VoLTE. Fuente: [61], [74]	69
Figura 3.29 - Ejecución de los componentes de IMS, Core 4G y srsRAN. Fuente: [61], [74]	70
Figura 3.30 - Configuración del primer SIM en Open5GS. Fuente: Elaboración propia	70
Figura 3.31 - Esquema de direccionamiento de la red del software instalado. Fuente: [74]	71
Figura 3.32 - Configuración de ambos SIM en Open5GS. Fuente: Elaboración propia	71
Figura 3.33 - Creación de APNs (Internet y ims) para terminal móvil. Fuente: Elaboración propia	72
Figura 3.34 - Diseño del subsistema de energía, infraestructura y protección eléctrica para la estación base. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 5.1 - Antenas omnidireccionales de 10 dBi de ganancia. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 5.2 - Entorno de pruebas (CPU + LIMESDR + Antenas + Teléfono móvil). Fuente: Elaboración propia	85
Figura 5.3 - Distancia vs RSRP en interiores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart). Fuente: Elaboración propia	86
Figura 5.4 - Distancia vs DL y UL en interiores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart). Fuente: Elaboración propia	86
Figura 5.5 - Entorno de pruebas en exteriores. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 5.6 - Distancia vs RSRP en exteriores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart). Fuente: [74]	88
Figura 5.7 - Distancia vs DL en exteriores (Huawei P30 LP, P Smart, MATE 20 y P30 CP). Fuente: [74]	89

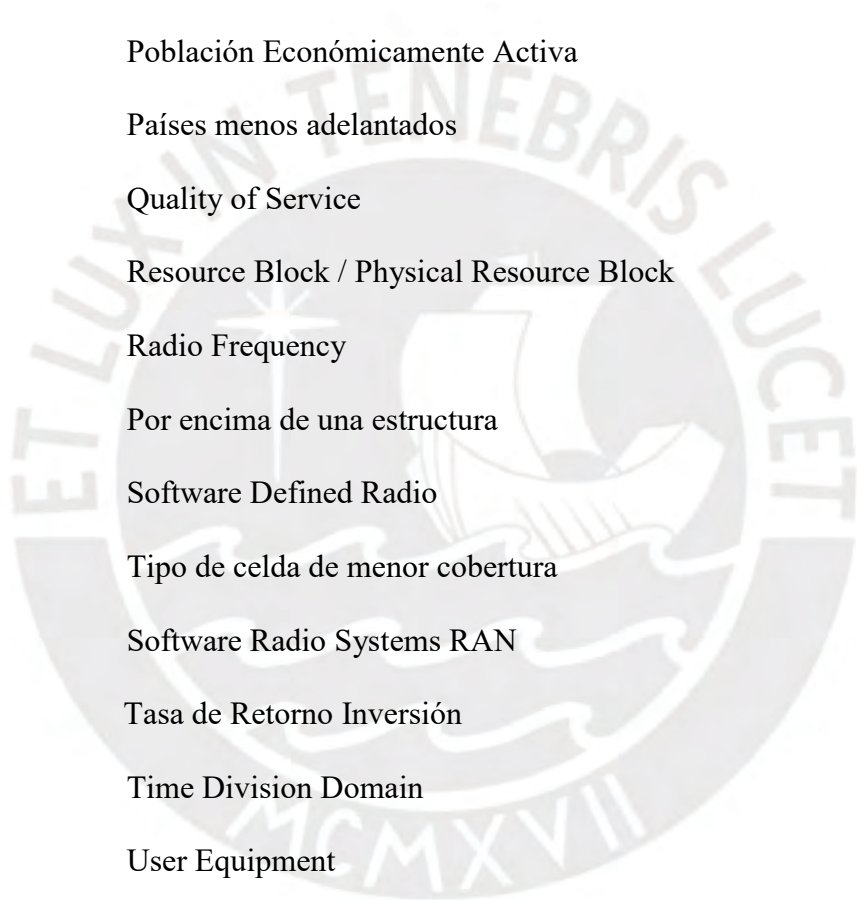
Figura 5.8 - Distancia vs UL en exteriores (Huawei P30 LP, P Smart, MATE 20 y P30 CP).	
Fuente: Elaboración propia	89
Figura D1 - Entorno de pruebas con antenas directivas. Fuente: Elaboración propia	109
Figura D2 - Valores de tasa de bajada (Downlink) y subida (Uplink), con antenas directivas.	
Fuente: Elaboración propia	110
Figura D3 - Valores de recepción en el terminal móvil (RSRP). Fuente: Elaboración propia	
	110
Figura D4 - Primer modelo de antenas omnidireccionales. Fuente: Elaboración propia	111
Figura D5 - Valores de Downlink y Uplink con primer tipo de antenas omnidireccionales.	
Fuente: Elaboración propia	111
Figura D6 - Valores de Recepción (RSRP) con primer tipo de antenas omnidireccionales.	
Fuente: Elaboración propia	112
Figura D7 - Distancia vs RSRP con antenas omnidireccionales (Huawei Mate 20 Lite). Fuente:	
Elaboración propia	113
Figura D8 - Distancia vs DL y UL con antenas omnidireccionales (Huawei Mate 20 Lite).	
Fuente: Elaboración propia	113
Figura E1 - Consumo del inversor + CPU + equipo SDR. Fuente: Elaboración propia	114
Figura E2 - Mediciones de consumo sin equipos conectados. Fuente: Elaboración propia	114
Figura E3 - Escenario de pruebas con equipos de telecomunicaciones y energía conectados.	
Fuente: Elaboración propia	115
Figura E4 - Escenario de pruebas con equipos de telecomunicaciones (equipo SDR con antenas)	
y celulares de prueba. Fuente: Elaboración propia	115
Figura E5 - Consumo de corriente con equipos conectados. Fuente: Elaboración propia	116
Figura G1 - Mapa de cobertura del prototipo 4G-SDR (Tecnología 4G). Fuente: Elaboración	
propia	118

Figura G2 - Mapa de cobertura del prototipo 4G-SDR (Valores de RSRP). Fuente: Elaboración propia	118
Figura H1 – Uso de FDD en el enlace de subida y bajada	119
Figura H2 - Ejemplos de medición de valores del tipo y ancho de banda	119
Figura J1 - Prueba de llamada VOIP entre 2 anexos. Fuente: Elaboración propia	121
Figura J2 - Parámetros de la llamada VOIP. Fuente: Elaboración propia	121



## GLOSARIO

3GPP	3rd Generation Partnership Project
APN	Access Point Name
APT	Advancing Package Tool
ARPU	Average Revenue Per User
CAPEX	Capital Expenditure
CNE	Código Nacional de Electricidad
Densidad poblacional	Promedio de habitantes por superficie de una geografía determinada
EARFCN	E-UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number
EBC	Estación Base Celular
eNB	evolved Node B
EPC	evolved Packet Core
FDD	Frequency Division Duplex
Greenfield	Tipo de torre instalada sobre el suelo
GTR	Grupo de Telecomunicaciones Rurales
ICCID	International Circuit Card ID
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunications Unit
Kamailio	Software Open Source que simula un Core IMS
LTE	Long Term Evolution
Macrocela	Tipo de celda de mayor cobertura
MIMO	Multiple Input Multiple Output



MOS	Mean Opinion Score
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
OAI	OpenAirInterface
OFDMA	Orthogonal Frequency Domain Multiple Access
OIMR	Operador de Infraestructura Móvil Rural
OPEX	Operational Expensure
Outdoor	Exteriores
PEA	Población Económicamente Activa
PMA	Países menos adelantados
QoS	Quality of Service
RB/PRB	Resource Block / Physical Resource Block
RF	Radio Frequency
Rooftop	Por encima de una estructura
SDR	Software Defined Radio
Small Cell	Tipo de celda de menor cobertura
srsRAN	Software Radio Systems RAN
TIR	Tasa de Retorno Inversión
TDD	Time Division Domain
UE	User Equipment
UHD	USRP Hardware Driver
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VOIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
VSAT	Very Small Aperture Terminals
VAN	Valor Actual Neto

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo de tesis aborda el desarrollo de un prototipo de estación base 4G-LTE utilizando radio definida por software (SDR) para su implementación en zonas rurales. Este trabajo se engloba en las Telecomunicaciones Rurales, con un enfoque específico en Redes y Sistemas Móviles. La necesidad de ofrecer soluciones tecnológicas para áreas de baja densidad poblacional es crucial, dado que los operadores de telecomunicaciones tradicionales enfrentan desafíos significativos para justificar inversiones en estas regiones. Factores como la geografía compleja, los altos costos de infraestructura y logística, y la baja rentabilidad a largo plazo son barreras que contribuyen a la exclusión digital.

La presente investigación adquiere relevancia debido a que el acceso a servicios de comunicación, tanto de voz como de datos, incluyendo la conectividad a Internet, constituye un factor esencial para el avance social y económico, y un medio clave para reducir la brecha digital en el país. Desde la ingeniería de telecomunicaciones, este proyecto busca presentar una solución viable, eficiente y adaptable para el despliegue de redes en entornos desatendidos.

En estos últimos años, se han empezado investigaciones en base a los entornos Open Source y el uso de la tecnología SDR como una forma de desarrollar redes móviles, y con un hardware de bajo costo. Por ejemplo, una de las primeras fue una investigación sobre el desarrollo de redes 2G/3G usando OpenBTS y como equipo físico el USRP B210. Luego los investigadores y comunidad en general han continuado con estos trabajos, donde aparece el desarrollo de redes 3G/4G usando los códigos OpenUMTS, OpenLTE y OpenAirInterface, donde utilizaron un equipo USRP NI 2901 como hardware SDR, y también con el uso de diferentes equipos de hardware como el USRP B210 en una investigación del año 2018 por Francisco García, de la UPG, y David Martínez, con un proyecto similar, por parte de la UPM, ambos en España.

Por parte de empresas del sector privado, se presentaron iniciativas como OpenEPC, desarrollado por Core Network Dynamics de Alemania que simula un Core LTE en una

Raspberry PI, uno de los equipos de bajo costo, pero con capacidad computacional y portátil, para su uso en zonas de emergencia. Además, la compañía YateBTS lanzó un producto llamado YateUCN, que es un Core unificado para LTE que ofrece también el servicio de voz, y puede ser integrado a otras plataformas de software.

Recientemente en Latinoamérica, un proyecto de tesis desarrollado por Mariela Codon, donde aplica una plataforma de software reciente llamada srsRAN, además hace una comparación con un operador móvil de red comercial local (Argentina); y hace un año aproximadamente, en la Universidad Nacional de Loja, Ecuador, Sergio García realizó el desarrollo de una estación base LTE usando OpenAirInterface, pero a diferencia de los demás, usó un equipo BladeRF como hardware.

La metodología desarrollada en esta tesis incluye, en primera instancia, una investigación sobre soluciones de software abierto para redes móviles LTE, además de la exploración de hardware SDR para la implementación de una estación base no convencional. Tras una evaluación de las distintas opciones, se selecciona la solución óptima en términos de facilidad de instalación, integración con el hardware SDR disponible en la universidad, y compatibilidad con otras plataformas de código abierto. Posteriormente, se procede con la instalación y configuración de la solución en una máquina física, habilitando el acceso a datos (Internet) en dispositivos móviles. Para el servicio de voz, se evaluaron dos alternativas: el uso de un servidor Asterisk para VoIP, y una solución basada en contenedores Docker para VoLTE.

Los objetivos específicos de esta tesis son: diseñar una red de acceso 4G-LTE basada en tecnología SDR, diseñar una arquitectura integral que incluya un sistema de energía, protección eléctrica e infraestructura para la solución, y evaluar el prototipo en un entorno controlado dentro del campus universitario.

La estructura del documento se organiza en los siguientes capítulos: el primero presenta la problemática del acceso a la telefonía móvil en entornos rurales y su impacto socioeconómico.

El segundo capítulo se centra en una introducción al estándar LTE, desde las características hasta las interfaces, una explicación detallada de los componentes de una estación base y una revisión de soluciones Open Source para redes móviles 4G con la aplicación de SDR. El capítulo tres describe el diseño y desarrollo de la red de acceso, incluyendo las soluciones para el servicio de voz (VoIP y VoLTE). En el capítulo cuatro, se analiza el proyecto desde diversos enfoques: económico y financiero, ambiental, social y cultural, y de salud pública. Por último, el capítulo cinco recoge y evalúa los resultados de las pruebas realizadas en un entorno controlado, brindando conclusiones y recomendaciones sobre la viabilidad y desempeño de la red propuesta.



## **Capítulo 1. Problemática de la falta de acceso a la telefonía móvil en zonas rurales**

En este capítulo se presenta la motivación detrás del problema planteado y se identifica el área de especialización de la tesis dentro de las Telecomunicaciones. Luego, se ofrece una descripción detallada de la problemática y se proporciona un contexto reciente sobre las características de las zonas rurales. Asimismo, se resalta la importancia del problema desde tres perspectivas: técnica, económica y social. Se establecen los objetivos generales y específicos, se identifican los beneficiarios y se evalúa el impacto de la solución de ingeniería propuesta. Finalmente, se mencionan los alcances y las limitaciones del estudio.

### **1.1 Motivación por el problema propuesto**

Uno de los motivos principales del planteamiento de esta tesis es la necesidad de llevar una solución tecnológica para las áreas rurales, que se encuentran en situación de abandono por parte de las instituciones públicas desde hace varios años atrás. Esta realidad ha sido observada por el autor en la experiencia de viajes realizados hacia los departamentos de las regiones de

Sierra y Selva principalmente, donde se observó con notoriedad las dificultades de la población, desde trasladarse cada vez a lugares más lejanos de las ciudades, hasta la carencia de acceso a servicios básicos, incluyendo a la telefonía móvil y la conexión a Internet, que ahora se han convertido en servicios esenciales en las ciudades.

Por último, es de interés aplicar los conceptos del curso de Comunicaciones Móviles para los entornos futuros de laboratorio con los estudiantes; y a la vez cómo mediante la aplicación del software Open Source es posible diseñar una red LTE para simularlo en un entorno real con el equipamiento SDR.

## **1.2 Área de especialización en las Telecomunicaciones**

El área de especialización en la cual se enfoca la tesis es el de las Telecomunicaciones Rurales y Desarrollo Sostenible. Los conocimientos implantados de dicha área se aprendieron en el curso de Telecomunicaciones Rurales, desde las tecnologías utilizadas y parámetros a considerar, hasta los requerimientos necesarios para un proyecto en zonas rurales. También se incluyen el área de Redes y Sistemas Móviles, para la introducción de una red 4G como parte de la solución, y contenido perteneciente al área de Redes Avanzadas y Tecnologías Inalámbricas, comprendida en las tecnologías de Radio Definida por Software (SDR).

## **1.3 Descripción del desafío de ingeniería**

### **1.3.1 Identificación del problema**

La problemática que se afronta es la falta de acceso al servicio móvil en zonas rurales, sobre todo en comunidades con una baja densidad poblacional (menos de 100 personas), donde no existen estaciones base celular, o apenas cuentan con la tecnología 2G, que solo permite realizar llamadas de voz, y como un limitante la capacidad de conectarse a internet. Una de las causas es la baja rentabilidad a largo plazo obtenida por las operadoras móviles en zonas con poca población, que genera una menor inversión.

### 1.3.2 Contexto y relevancia

En esta sección, se empieza a describir las características de las zonas rurales y la clasificación por cantidad de población y por departamento.

Primero, se consideran áreas rurales a las localidades que cumplan los siguientes criterios: no contar con una población mayor a 3 000 habitantes, ni con cobertura de alguno de los servicios de telecomunicaciones (telefonía móvil, Internet, radio FM, televisión); o con carreteras [7].

De acuerdo con la definición establecida por INEI [2], estas áreas constituyen espacios distritales integrados por asentamientos poblacionales rurales, los cuales se ubican desde las fronteras de los núcleos urbanos hasta alcanzar los confines distritales. En esta clasificación, se considera centro poblado a aquella localidad que cuenta con menos de 100 viviendas continuas que no conforman una estructura de manzanas y vías urbanas, ni ostenta la condición de capital distrital. Asimismo, se incluyen en esta categoría las localidades que, aun superando las 100 viviendas, presentan una distribución predominantemente dispersa o completamente aislada.

En cuanto a la representación de la población en el país, según el Censo 2017, se observa en la Tabla 1.1, la población rural se redujo en 19,4 %, comparado al censo del año 2007, a causa de la migración poblacional ocurrida entre los censos de los últimos diez años [6]. De la población total censada, la zona rural es representada por un 20,7% al 2017, equivalente a 6 609 991 habitantes. De esa cantidad, la PEA es de aproximadamente 3 442 005 ocupados [19].

*Tabla 1.1 - Resumen del total de población urbana y rural en 2007 y 2017.*

*Fuente: [19]*

Año	Total	Población		Participación (%)		Variación (%)	
		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
2007	27 412 157	19 877 353	7 534 804	72,5	27,5		
2017	29 381 884	23 311 893	6 069 991	79,3	20,7	17,3	-19,4

En las zonas rurales, encontramos una diversidad de grupos poblacionales según el entorno y estilo de vida. En la Tabla 1.2, se describen algunos de estos grupos:

*Tabla 1.2 - Definición de grupos poblacionales*  
*Fuente: Elaboración propia*

Grupo poblacional	Definición
Caseríos	Son pequeñas agrupaciones de viviendas dispersas, mayormente compuestos por un puñado de familias que comparten una ubicación geográfica cercana.
Comunidades campesinas	Son organizaciones sociales y territoriales reconocidas legalmente en Perú, y formadas por familias que comparten una historia, cultura y tradiciones comunes.
Anexos	Son extensiones de un centro poblado o distrito, que se encuentran en áreas rurales y pueden estar más alejados del centro principal.
Comunidades nativas	Su origen proviene de tribus en la Amazonía, “constituidas por familias vinculadas por lengua; características culturales y sociales; tenencia y usufructo común de un mismo territorio con asentamiento disperso” [20].

En las Tablas 1.3 y 1.4, se presenta una distribución de la cantidad de comunidades campesinas y nativas por departamento, donde el mayor número se ubican en Puno (1 265) y en Loreto (627), respectivamente [3].

*Tabla 1.3 - Distribución de comunidades nativas y campesinas (Tumbes - Ica)*  
*Fuente: [3]*

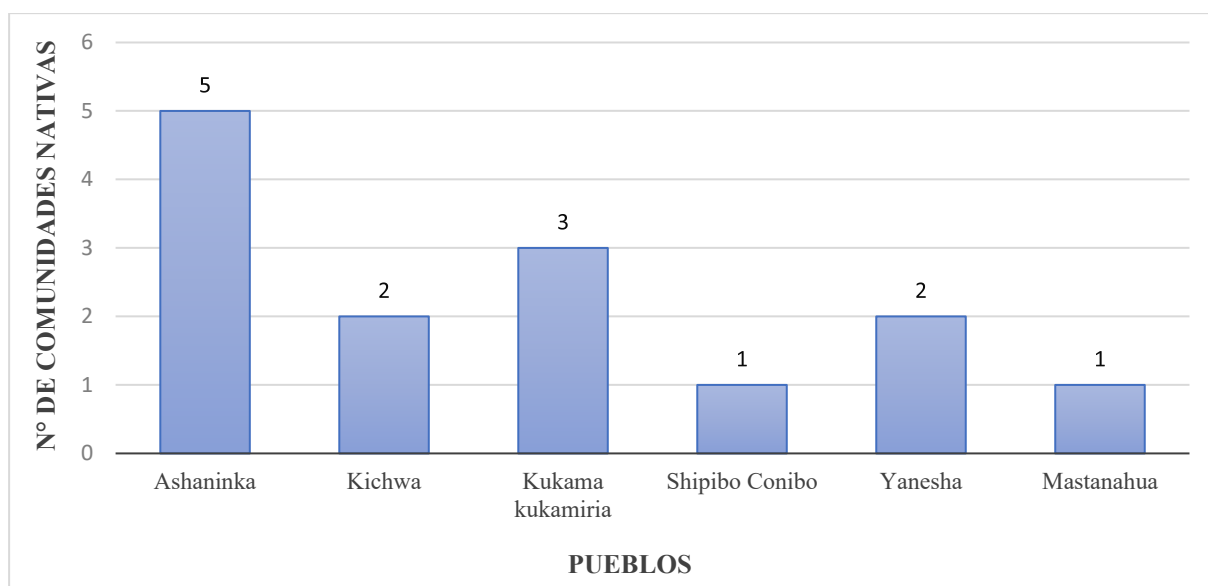
Departamento	Comunidades campesinas	Comunidades nativas
<b>TUMBES</b>	0	0
<b>PIURA</b>	136	0
<b>LAMBAYEQUE</b>	28	0
<b>CAJAMARCA</b>	104	2
<b>LA LIBERTAD</b>	120	0
<b>ANCASH</b>	350	0
<b>LIMA</b>	289	0
<b>HUÁNUCO</b>	285	13
<b>PASCO</b>	73	119
<b>JUNÍN</b>	391	171
<b>HUANCAVELICA</b>	592	0
<b>ICA</b>	11	0

*Tabla 1.4 - Distribución de comunidades nativas y campesinas (Arequipa - Amazonas).  
Fuente: [3]*

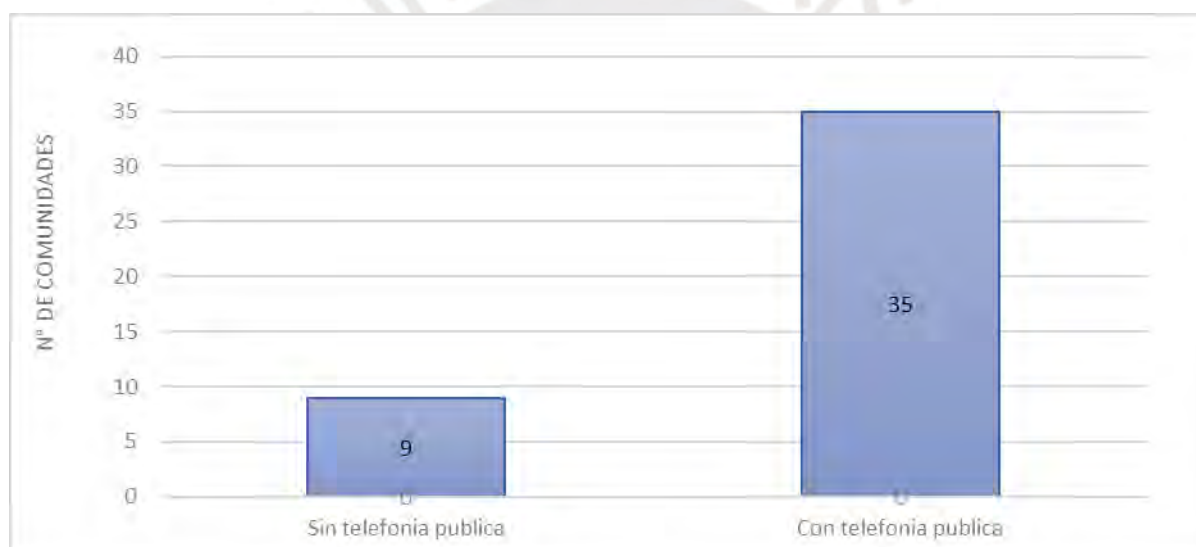
Departamento	Comunidades campesinas	Comunidades nativas
AREQUIPA	104	0
MOQUEGUA	75	0
TACNA	46	0
PUNO	1 265	0
CUSCO	928	63
APURIMAC	470	0
AYACUCHO	654	2
LORETO	95	127
UCAYALI	0	243
MADRE DE DIOS	0	27
SAN MARTIN	1	30
AMAZONAS	52	172

Nota: No se ha encontrado información de la cantidad de anexos y caseríos por departamento.

Según las estadísticas del INEI sobre las comunidades nativas y su acceso a los servicios de telecomunicaciones [18], de las 2 703 comunidades censadas, el 21,6% cuenta con radio FM y el 19,9% con telefonía pública; mientras que, en menor relevancia, se encuentra el servicio de TV por cable o satelital con 4,9%, Internet con 2,9% y telefonía móvil con 0,5%. A continuación, se presenta la distribución gráfica de comunidades que cuentan con estos servicios (Figuras 1.1 y 1.2):



*Figura 1.1 - Comunidades nativas con el servicio móvil. Fuente: [18]*



*Figura 1.2 - Cantidad de comunidades nativas con telefonía pública. Fuente: [18]*

En las comunidades campesinas, de las 6 682 censadas, el 11,8% cuenta con telefonía pública; el 10,7% con TV (cable o satelital); el 7,5% dispone de internet y el 6,1% de radiofonía entre lo más resaltante; en tanto que 4 837 comunidades no tienen algún servicio de comunicación (72,4%). De las que declararon pertenecer al pueblo Quechuas, el 10,4% cuenta con telefonía pública, el 7,7% con televisión; 6,4% dispone de internet y el 6,3% de radio FM; mientras que 2 724 comunidades no tienen servicios de comunicación. Asimismo, de las comunidades que declararon pertenecer al pueblo Aimara, el 5,2% cuenta con servicio de televisión, el 4,9% con telefonía pública; mientras que 504 no tienen servicios de comunicación (87,5%), mientras que

las comunidades de los pueblos Nomatsigenga, Sharanahua, Tikuna, Uro y Yine no cuentan con algún servicio de comunicación [20].

*Tabla 1.5 - Pueblos originarios de comunidades campesinas que cuentan con telefonía celular.  
Fuente: [20]*

Pueblos originarios	Cantidad de comunidades con telefonía celular
Aimaras	2
Quechuas	48

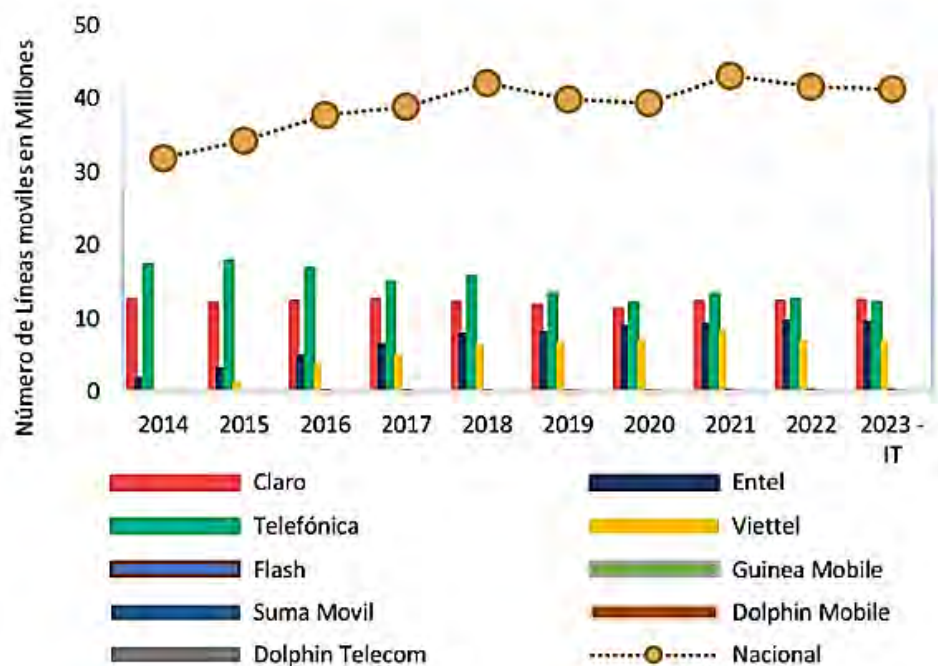
De los pueblos que pertenecen a comunidades campesinas, 48 de ellos cuentan con el servicio de telefonía móvil, mientras que 21 de los que no pertenecen a ningún pueblo originario, cuentan también con este servicio.



*Figura 1.3 - Comunidades campesinas con pertenencia a un pueblo que cuentan con telefonía celular. Fuente: [20].*

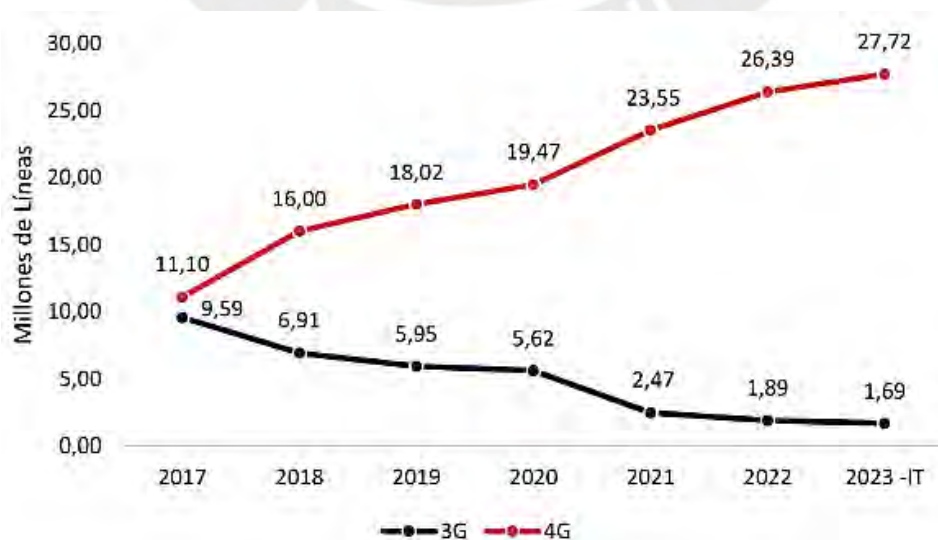
Ahora, al analizar el contexto reciente de la telefonía móvil en Perú, las líneas celulares han mostrado una tendencia al alza a lo largo del tiempo, con un crecimiento constante hasta el año 2018. Sin embargo, a partir de entonces, se observa una disminución notable hasta el 2020, seguida de un repunte posterior, posiblemente asociado al aumento en el uso de este servicio durante la pandemia. Además, se destaca un marcado aumento hasta el primer trimestre del

2023, con América Móvil Perú (Claro) liderando el mercado con alrededor del 30%, seguido por Telefónica del Perú con un 29% de participación, como se aprecia en la Figura 1.4 [11].



*Figura 1.4 – Número de líneas móviles agrupadas por operadora. Fuente: [11]*

Aunque para el primer trimestre de 2023 se registran aproximadamente 41,3 millones de líneas móviles, sólo un 71,18% (29,41 millones de usuarios) tienen acceso a Internet mediante sus dispositivos móviles. De estos, casi 26,4 millones de líneas utilizan la tecnología 4G, lo que representa aproximadamente el 67,09 % del total [11].

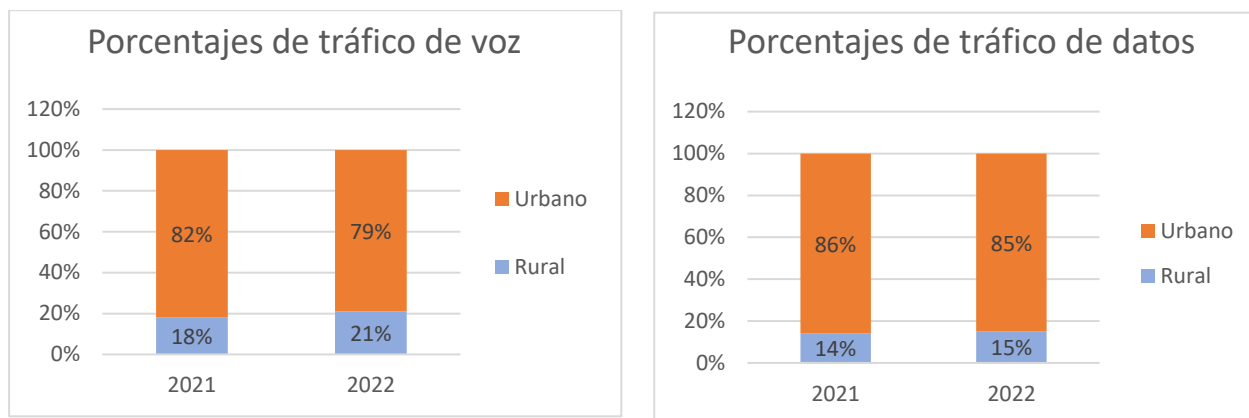


*Figura 1.5 - Número de líneas móviles conectadas a Internet por tecnología. Fuente: [11]*

Respecto a las zonas rurales, los datos proporcionados por las empresas concesionarias de telecomunicaciones al MTC revelan que, al finalizar el cuarto trimestre de 2022, aproximadamente en el 72,8% de los centros poblados no existe cobertura de servicios móviles, tanto para comunicaciones de voz o transmisión de datos. Esta situación afecta al 52,7% de los habitantes del territorio nacional, lo que equivale a cerca de 17,6 millones de ciudadanos. Analizando la distribución demográfica por localidad, se observa que el 56,2% de las comunidades ubicadas en territorios rurales albergan menos de 50 residentes. Esta característica evidencia la existencia de numerosos núcleos poblacionales rurales con distribución geográfica dispersa y baja densidad poblacional, los cuales requieren urgentemente del acceso a servicios de comunicación móvil y conectividad a internet [11].

Siguiendo por esa misma línea, según ITU en PMA, las zonas rurales continúan presentando dificultades de acceso a Internet, donde el 17% de la población vive en zonas sin cobertura móvil y el 19% solo tiene cobertura 2G [21].

Un factor que influye mucho en la evaluación de un operador móvil para desplegar el servicio móvil es el tráfico cursado medido, que indica la cantidad de información (voz y datos) intercambiada por las redes móviles existentes. Según la Figura 1.6, se revela que la mayor parte del tráfico de voz y datos ocurre en áreas urbanas. Esto se debe a, que la mayor parte de la población reside en dichos entornos, y existe una cobertura más limitada en zonas rurales. Como resultado, el tráfico cursado en estas áreas muestra una participación significativamente menor en comparación con el sector urbano. Otra consideración es que en áreas rurales son más usadas las comunicaciones de voz [11].



*Figura 1.6 - Porcentajes de tráfico de voz (izquierda) y datos (derecha) en el ámbito urbano y rural.  
Fuente: [11]*

### 1.3.3 Especificaciones y criterios

- ❖ Para el uso de la banda de frecuencias en la etapa de pruebas, se debe escoger una apropiada, y simular la fase en un entorno controlado.
- ❖ Para la potencia de transmisión de la estación base, se debería cumplir con transmitir por debajo del valor máximo, según el uso que se brindará, y apoyado según la norma del MTC.
- ❖ Para la energía de alimentación del prototipo, se diseñará un sistema basado en paneles solares, para una mejor optimización del recurso solar en las zonas rurales, y su facilidad de instalación.
- ❖ En el tema económico, se evaluarán los costos asociados a la solución, a través de una búsqueda de los fabricantes de equipos, por ejemplo, de antenas y radios, de preferencia proveniente de proyectos del GTR, y de bajo costo.
- ❖ Se analizará un estudio previo del número máximo de usuarios conectados al prototipo, y así proponer recomendaciones sobre el alcance de esta solución.

## 1.4 Justificación e importancia del desafío de Ingeniería

Para analizar la situación de la problemática, se desarrolla la importancia en 3 niveles: social, técnico y económico; y así definir la necesidad de una solución 4G basada en SDR.

### 1.4.1 Importancia social

Esta solución ayudaría a que las personas a través de la telefonía móvil puedan tener una comunicación masiva entre ellos, y con el acceso a Internet, de forma indirecta mejoran su calidad de vida.

También contribuye a reducir la brecha digital que actualmente todavía se mantiene en nuestro país, y de formación de habilidades tecnológicas a futuro para la población y a nivel comunitario, en especial con las que tienen una menor densidad poblacional.

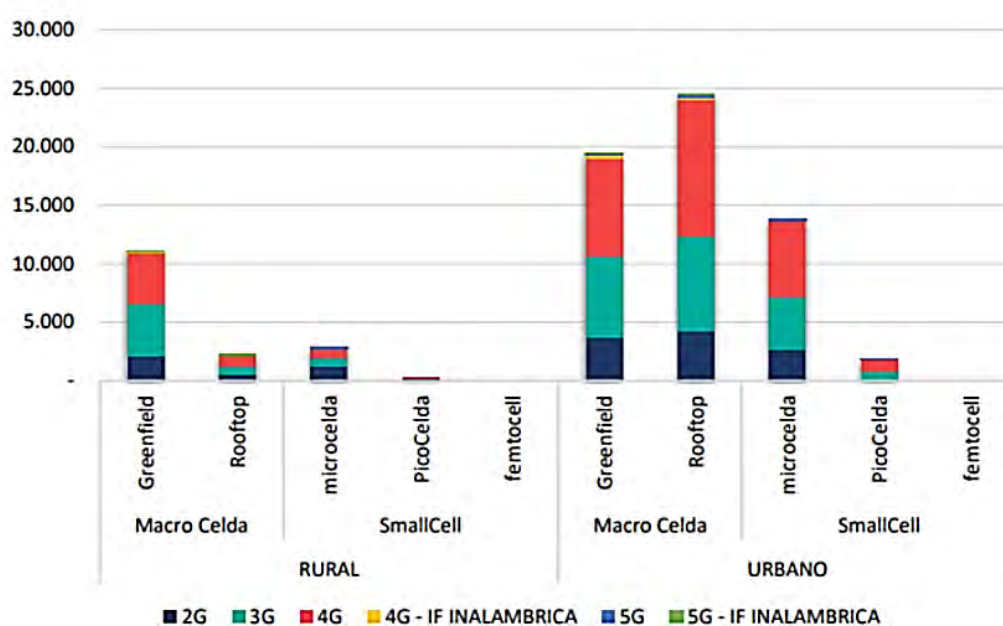
### 1.4.2 Importancia técnica

Un componente muy importante en la infraestructura de las redes móviles es la estación base celular, y los equipos que necesitan ser instalados para operar como una torre, antenas y radios; otro es el terreno apropiado para su instalación, y que debe de contar con el servicio eléctrico disponible, y el backhaul (transmisión) para la conexión con el operador móvil, tal como se observa en la Figura 1.7.



*Figura 1.7 - Componentes de una estación base celular. Fuente: [22]*

Un punto a considerar es el número de estaciones base, donde según INEI al año 2021 [1], existen 44 807 estaciones base instaladas en todo el país, donde la mayoría se concentran en Lima (17 185), donde se clasifican entre Greenfield y Rooftop, siendo en su mayoría de tipo Rooftop. Además, realizando la comparativa con la información del MTC [11], las antenas instaladas en dichas estaciones base varían según la tecnología (2G, 3G, 4G, 5G) y la cobertura de las celdas (macrocelda o small cell), siendo en el entorno rural, aproximadamente 10 000 estaciones base con antenas de tipo macroceldas y en su mayoría, con 2G hasta 4G.



*Figura 1.8 - Distribución de estaciones por tecnología y tipo de instalación. Fuente: [11]*

Finalmente, por lo explicado anteriormente, es necesario una solución de una estación base basada en SDR, debido a que comparando con las estadísticas respecto al número de estaciones base, observamos una menor cantidad de la infraestructura de redes de acceso en la zona rural, debido principalmente a los costos de CAPEX y OPEX para una operadora móvil que brinda el servicio, y no siendo rentable a largo plazo por la baja cantidad poblacional de las comunidades rurales.

### 1.4.3 Importancia económica

El prototipo será rentable para el operador móvil por la reducción de costos asociados a la infraestructura y equipamiento necesario para el procesamiento de la red. Para analizar la importancia, es clave el concepto del ARPU, indicador que calcula el ingreso promedio obtenido de los operadores por el número de usuarios. Según la Tabla 1.6, se obtiene un ingreso de 10,81 soles, registrado por los operadores móviles al año 2022, siendo en valor casi la mitad del área urbana, debido a la densidad poblacional, que limita la cantidad de usuarios y, por ende, menores ingresos que afectan la rentabilidad de inversión en estas áreas a largo plazo [11].

*Tabla 1.6 - ARPU según área geográfica. Fuente: [11]*

ARPU del servicio móvil				
	2019	2020	2021	2022
Nacional	S/ 15.81	S/ 15.93	S/ 16.81	S/ 17.58
Urbano	S/ 19.75	S/ 18.21	S/ 20.55	S/ 20.49
Rural	S/ 10.73	S/ 11.29	S/ 13.17	S/ 10.81

Por lo tanto, considerando este parámetro, sería un beneficio para el operador porque con una solución como la planteada se lograría un incremento del ARPU a nivel rural, y así obtener ganancias en estas zonas desatendidas.

## 1.5 Objetivos generales y específicos

La presente tesis tiene como objetivo principal el diseño de una estación base 4G para comunidades rurales. Los objetivos específicos para esta propuesta son los siguientes:

- ❖ Diseñar una red de acceso 4G basado en tecnología SDR.
- ❖ Diseñar una arquitectura de conexión integral de la estación base LTE aplicable a una zona rural.
- ❖ Realizar la evaluación del desempeño de la red de acceso en un entorno controlado.

## 1.6 Identificación de los beneficiarios

Se ha realizado la identificación de los beneficiarios y luego se clasifica en directos e indirectos, presentado en las Tablas 1.7 y 1.8:

*Tabla 1.7 - Beneficiarios directos. Fuente: Elaboración propia*

Beneficiarios directos	Motivos
Población rural	Acceso a las comunicaciones de voz y datos, sin depender de una operadora móvil, y un crecimiento en el desarrollo de las habilidades digitales de cada persona residente.

*Tabla 1.8 - Beneficiarios indirectos. Fuente: Elaboración propia*

Beneficiarios indirectos	Motivos
Operadora móvil	Reducción de gastos de inversión y mantenimiento para el despliegue de tecnología 4G en comunidades rurales con una baja densidad poblacional.
Instituciones públicas locales	Establecimiento de comunicaciones entre instituciones públicas para la interconexión con otros centros estatales.

## 1.7 Evaluación del impacto de la solución

- ❖ Los beneficiarios directos, empezando por la población, podrán acceder a la red móvil para conectarse a Internet y contar con el servicio de voz.
- ❖ Para el OIMR, el impacto principal sería la reducción de costos en el CAPEX y OPEX, para la instalación del equipamiento necesario para una estación base en las zonas de interés social, y el mantenimiento que conlleva una estación común de acceso.
- ❖ Para el operador móvil, similar al caso del OIMR, pero además de ello, tendría la capacidad de ampliar o mejorar la cobertura del servicio móvil, con tecnología 4G en las áreas con una baja densidad poblacional.
- ❖ En las instituciones públicas, el impacto sería beneficioso porque podrían aprovechar la conectividad para su uso en las comunicaciones con otros centros, por ejemplo, las postas o centros de salud estarían aptas para establecer coordinaciones con otros centros lejanos de la zona, y así mejorar la atención de las personas.

## 1.8 Alcances y limitaciones

- ❖ El equipamiento para el hardware SDR disponible en el campus universitario.
- ❖ Una limitación es el uso de la banda en el espectro de frecuencias, en el caso de tecnología 4G, el espectro asignado es propiedad de los operadores móviles, pero se trabajaría en un entorno controlado para las pruebas.



## **Capítulo 2. Avances tecnológicos en redes móviles 4G. Soluciones para la conectividad rural**

En este segundo capítulo, se inicia con un marco teórico sobre el estándar LTE, un detalle de los componentes de una estación base celular para telefonía móvil, los tipos de tecnologías de transmisión, y el concepto de SDR a nivel de hardware y software. Finalmente, se empieza a describir las soluciones similares encontradas a partir de la investigación propia, que servirán como referencia para el desarrollo de la presente tesis.

### **2.1 Marco teórico**

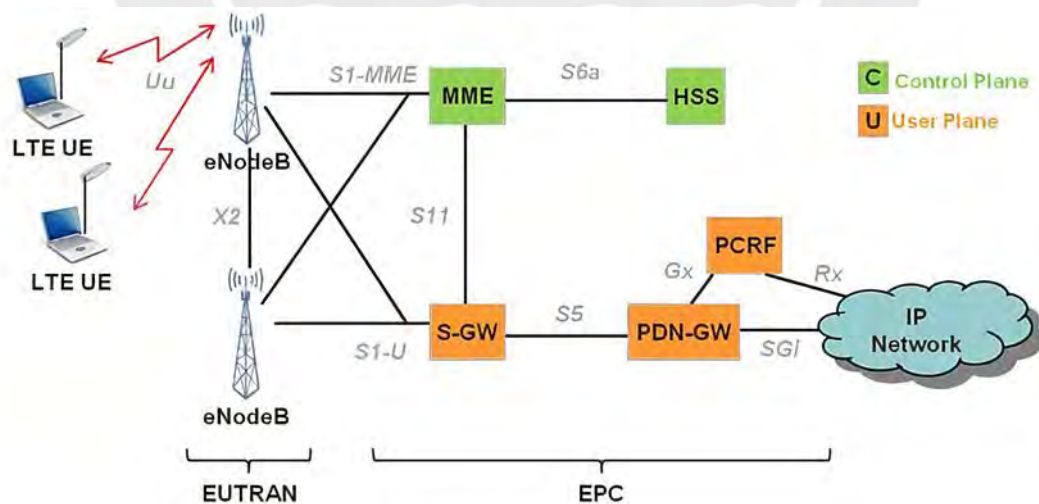
#### **2.1.1 LTE**

La tecnología LTE es un estándar en las redes móviles, con una transmisión de datos de alta velocidad desarrollado por 3GPP, definida también como una evolución de UMTS (3G). Según la ITU, se define como el primer estándar en 4G comercialmente. La edición 8 (*Release 8*) fue la primera que en el año 2008 definió a este estándar [25], y describe las siguientes características:

- ❖ Tasa máxima de velocidad: 100 Mbps de enlace de bajada y 50 Mbps de subida, para 20 MHz
- ❖ Mejora en la eficiencia espectral: 5 bps para enlace de bajada y 2.5 bps en subida.
- ❖ Latencia de 10 ms.
- ❖ Separación en dos planos: de control y de usuario.
- ❖ Tipo de acceso: Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) para el enlace de bajada y acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) para el enlace de subida.
- ❖ Antenas MIMO diseñado para aumentar la velocidad
- ❖ Ancho de banda adaptativo

### 2.1.1.1 Arquitectura

También se le conoce como EPS (Evolved Packet System), caracterizado por tener una arquitectura basada en el protocolo IP, para los servicios de voz y datos. En la Figura 2.1, se muestra la arquitectura compuesta por dos redes: E-UTRAN (red de acceso) y EPC (red de Core); además del UE (equipo de usuario):



*Figura 2.1 - Arquitectura de una red LTE. Fuente: [45]*

**1. E-UTRAN:** Encargada de conectar a los usuarios con la red Core. El componente principal es la estación base (eNB), que se comunica a través de la interfaz S1 al Core (EPC). Cuando hay más de una estación base, se interconectan a través de la interfaz X2, cuyo objetivo es minimizar la pérdida de paquetes por la movilidad del usuario [29]. La interfaz S1 se separa en S1-MME para el plano de control y S1-U en plano de usuario. La interfaz Uu permite el intercambio de información entre el eNB y los equipos de usuario (UE) [44]. El eNB se encarga de la modulación y demodulación, codificación y decodificación del canal. Para la operación en el espectro de frecuencias, se han establecido las bandas en las Tablas 2.1 y 2.2, definidas en el *Release 8* según 3GPP [25]:

*Tabla 2.1- Bandas LTE según 3GPP (Banda 1 – Banda 12). Fuente: [25]*

Número de Banda	Frecuencia de Uplink (UL)	Frecuencia de Downlink (DL)
1	1920 - 1980 MHz	2110 - 2170 MHz
2	1850 - 1910 MHz	1930 - 1990 MHz
3	1710 - 1785 MHz	1805 - 1880 MHz
4	1710 - 1755 MHz	2110 - 2155 MHz
5	824 - 849 MHz	869 - 894 MHz
6	830-840 MHz	875-885 MHz
7	2500 - 2570 MHz	2620 - 2690 MHz
8	880 - 915 MHz	925 - 960 MHz
9	1750-1785 MHz	1845-1880 MHz
10	1710-1770 MHz	2110-2170 MHz
11	1427.9 - 1452.9 MHz	1475.9 - 1500.9 MHz
12	698-716 MHz	728-746 MHz

*Tabla 2.2- Bandas LTE según 3GPP (Banda 13 – Banda 40). Fuente: [25]*

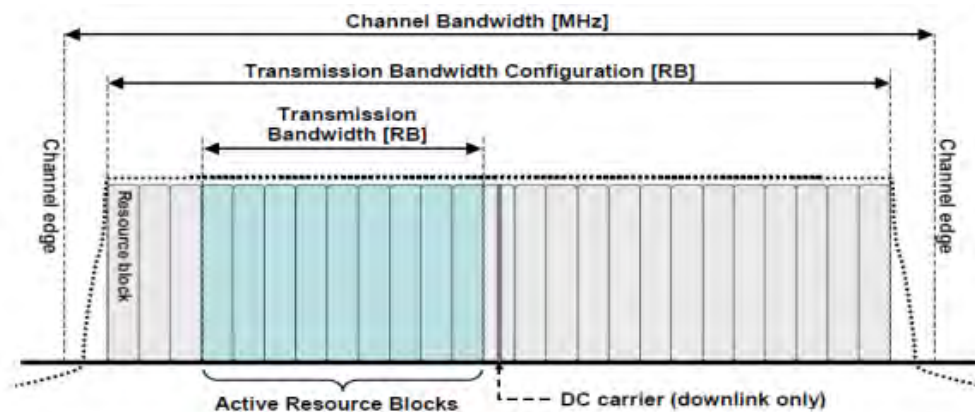
Número de Banda	Frecuencia de Uplink (UL)	Frecuencia de Downlink (DL)
13	777-787 MHz	746-750 MHz
14	788-798 MHz	758-768 MHz
...		
33	1900-1920 MHz	1900-1920 MHz
34	2010-2025 MHz	2010-2025 MHz
35	1850-1910 MHz	1850-1910 MHz
36	1930-1990 MHz	1930-1990 MHz
37	1910-1930 MHz	1910-1930 MHz
38	2570-2620 MHz	2570-2620 MHz
39	1880-1920 MHz	1880-1920 MHz
40	2300-2400 MHz	2300-2400 MHz

A continuación, se detallan las bandas de frecuencia asignadas por el MTC a los operadores de telecomunicaciones para el servicio móvil 4G en el Perú (Tabla 2.3):

*Tabla 2.3 - Bandas para servicios LTE en Perú. Fuente: [43]*

Operador	Bandas	Frecuencia central (MHz)
<b>BITEL</b>	7	2600
	8	900
<b>CLARO</b>	2	1900
	7	2600
	28	700
<b>MOVISTAR</b>	4	1700/2100
	28	700
<b>ENTEL</b>	4	1700/2100
	28	700

La cantidad de bloques de recursos (RB) transmitida depende directamente del ancho de banda disponible. En la Figura 2.2 se representa la correspondencia entre el ancho de banda del canal y la asignación de RB.



*Figura 2.2 - Ancho de banda de canal y de transmisión. Fuente: [29]*

## 2. UE (User Equipment)

Es el dispositivo por el cual el usuario accede a una red móvil. Su único componente es la SIM, que almacena información relacionada al operador móvil, y a través del cual se identifica al usuario. Los parámetros más importantes de las tarjetas SIM son los siguientes:

- ❖ ICCID: Es un parámetro que está dividido en dos partes: IIN (Número de Identificación del Emisor) y el AIN (Número de Identificación de la cuenta). La estructura es la siguiente: los dos primeros dígitos corresponden al Identificador de la Industria Principal (MII), siendo 89 el asignado al sector de telecomunicaciones. A continuación, se incluye un código de país de dos dígitos y uno de tres dígitos que identifica al emisor. Por su parte, el AIN contiene cuatro dígitos que indican el mes/año de fabricación, dos cifras que representan el código de configuración, seis dígitos asignados al número único de SIM y una cifra verificadora para la detección de errores [29].
- ❖ IMSI: Es el identificador de suscripción móvil a nivel internacional, de quince dígitos que se usa para el control y los mensajes en LTE. Compuesto por tres dígitos para el código de país (MCC), dos o tres cifras del código de red móvil (MNC), y lo restante para el número de Identidad del suscriptor Móvil (MSIN) [29].

- ❖ **MSISDN:** Es el número de Suscripción de Red digital de servicios Integrados Internacional, conformado por un máximo de quince dígitos y asignado al suscriptor para la recepción de llamadas. Su estructura incluye el MCC junto con el número de abonado [29].

**3. EPC:** La red de Core está compuesta por los siguientes elementos:

#### **MME (Mobility Management Entity)**

Es responsable de todas las funciones relacionadas con el plano de control, como los procedimientos de seguridad y la gestión de sesiones de los dispositivos conectados. En cuanto a la seguridad, incluye el registro del usuario final y el intercambio de los algoritmos de integridad y cifrado. En lo que respecta a la sesión, gestiona los procesos de señalización necesarios para mantener la calidad del servicio (QoS). También administra la actualización del área de seguimiento, utilizada por la red para localizar y registrar los terminales [26].

#### **HSS (Home Subscriber Server)**

Su función principal es mantener la información de suscripción del usuario, incluyendo su identidad, perfil de servicios, estado de suscripción, tipo de tráfico permitido y límites de velocidad. Además, genera las claves de seguridad a partir de los datos del usuario, y con esto se garantiza la confidencialidad de la información intercambiada entre el terminal y la red [26].

#### **SGW (Serving Gateway)**

Actúa como punto de conexión final para la transmisión de paquetes de datos desde y hacia la red de acceso. Cuando un dispositivo se desplaza entre distintas estaciones base (eNodeB) dentro del E-UTRAN, esta pasarela actúa como anclaje de movilidad local, facilitando el enrutamiento de los datos tanto dentro del E-UTRAN como hacia redes de tecnologías previas como 2G/GSM y 3G/UMTS [26].

### **PGW (Packet Data Network Gateway)**

Similar al SGW, esta pasarela proporciona la interfaz entre la red del operador y redes de datos externas, como Internet. Se encarga de enrutar los paquetes de usuario hacia dichas redes y también permite la conectividad con redes no 3GPP para el intercambio de tráfico [26].

### **PCRF (Policy and Charging Rules Function)**

Este servidor administra las políticas de servicios y proporciona la configuración de QoS personalizada para cada usuario. Cumple dos funciones principales: asignar recursos según las políticas del operador y determinar las reglas de cobro basadas en el tipo de contenido transmitido (como audio o vídeo) o la tasa de datos de la aplicación [26].

## **4. Core IMS**

Es una arquitectura diseñada inicialmente por la 3GPP, que permite soportar los servicios de telefonía y multimedia a través de la red IP. IMS funciona junto con la red móvil en 4G LTE para permitir llamadas de voz de alta calidad y otros servicios de comunicación enriquecidos, incluidos mensajes de texto y multimedia. IMS permite la integración necesaria con redes de voz externas como las de telefonía fija (PSTN - *Public Switched Telephone Network*) e ISDN (*Integrated Services Digital Network*). IMS utiliza SIP (Protocolo de Iniciación de Sesión) para permitir VoLTE para llamadas de voz y otros servicios sobre la parte IP de la red celular [71].

### **2.1.1.2 Interfaces**

A continuación, se explican las interfaces de comunicación entre los componentes de una red LTE:

- ❖ SGi: Interfaz que provee la conexión entre el PGW y las redes externas.
- ❖ S5: Es la interfaz que transmite los paquetes entre el SGW y el PGW mediante el protocolo GTP, a través de túneles que encapsulan los datos del usuario. Existe una interfaz similar (S8), que se utiliza en casos de *roaming* donde el SGW se encuentra en una red visitada, mientras que el PGW está en la principal.

- ❖ S11: Interfaz empleada para establecer, modificar o eliminar los portadores de servicio que los dispositivos terminales mantienen a través de la red troncal bajo el MME.
- ❖ S10: Permite la comunicación entre diferentes entidades MME. Por ejemplo, cuando un usuario en movimiento pasa de una celda gestionada por un MME a otra gestionada por un MME distinto, pero dentro de la misma red.
- ❖ S6a: Interfaz que permite la transferencia entre el HSS y el MME, que facilita el intercambio de la suscripción y autenticación de usuarios.
- ❖ S1-U: Encargado del transporte de datos del usuario entre el eNB y el SGW a través del protocolo UDP.
- ❖ S1-MME: Establece la comunicación entre el eNB y el MME, y se encarga de la señalización para la gestión de la movilidad, y asignación de recursos, y permite la administración de localización de los terminales móviles.

### 2.1.1.3 Protocolos

Se separan en dos partes: en el plano de usuario, que transporta los paquetes de datos de los clientes y plano de control que lleva las señales de control y señalización.

En el plano de usuario, entre el UE y el eNB actúan los siguientes protocolos [37]:

- ❖ Protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP): Es el que soporta el transporte eficiente de los paquetes IP a través del enlace de radio.
- ❖ Radio Link Control (RLC): Gestiona la segmentación, reensamblaje y corrección de errores de la información transmitida en la interfaz de radio.
- ❖ Control de acceso al medio (MAC): Administra el canal de radio y gestiona la transmisión de datos.
- ❖ PHY (Capa física): Su función es transmitir la señal en el canal de radio [29].

En la interfaz S1-U, se aplica el protocolo GTP (GPRS Tunnelling Protocol) para el encapsulamiento del tráfico de los paquetes en la capa de red, y UDP para el transporte.

En el plano de control, los protocolos son los siguientes [29]:

- ❖ Control de recurso de radio (RRC): Permite al eNB y UE establecer un enlace de control, donde se realiza la operación de la interfaz de radio.
- ❖ Estrato de no acceso (NAS): Maneja la señalización y la mensajería entre el UE y la red Core para el manejo de la movilidad y la administración de sesiones [38].

La información del eNB con la red Core se envía en la interfaz S1-MME, donde se aplican los protocolos S1AP, SCTP e IP.

#### 2.1.1.4 Duplexaje LTE

El duplexaje permite transmitir a la vez en ambas direcciones y se definen los siguientes términos a partir de ello:

- ❖ UE a eNB es *Uplink* (UL)
- ❖ eNB a UE es *Downlink* (DL)

El tipo de duplexaje por división de frecuencia (FDD) es empleado en redes 4G, que transmite y recibe en dos canales separados en frecuencia, usando una banda de guarda. Por otro lado, el TDD emplea el tiempo para diferenciar la transmisión y recepción dentro del mismo canal [29].

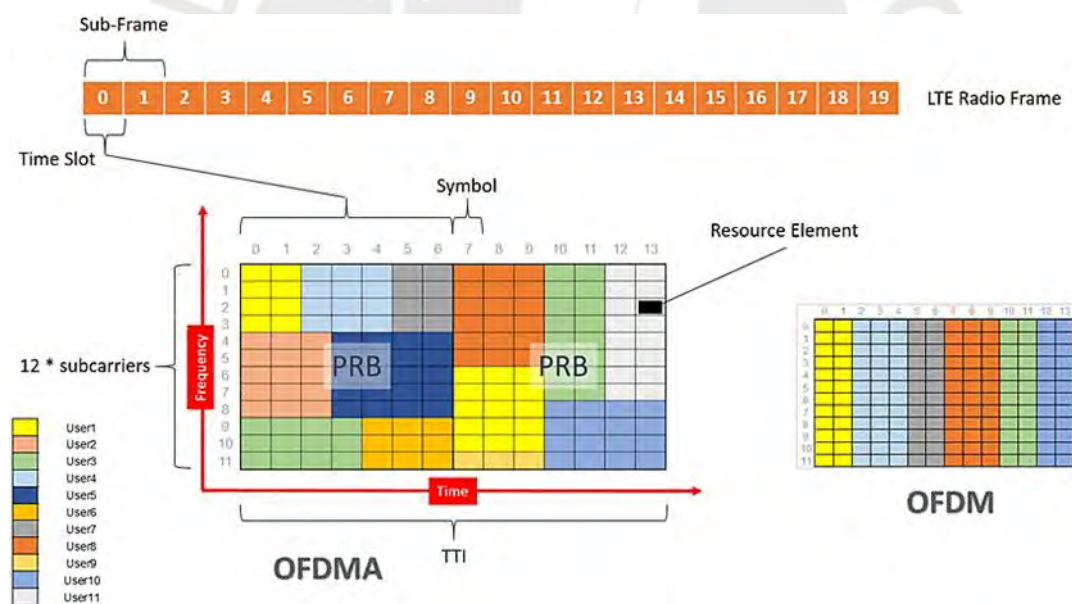
### 2.1.1.5 Técnicas de acceso en la interfaz de radio

#### OFDMA

Es una técnica que divide una señal en varias subportadoras ortogonales, permitiendo a los usuarios transmitir simultáneamente por cada símbolo OFDM en un tiempo determinado. Se usa en el enlace de bajada de la interfaz de radio [39].

Características:

- ❖ Tiempo de trama: 10 ms
- ❖ Tiempo de la subtrama: 1 ms
- ❖ Duración del símbolo: 0,5ms / 7; 0,5ms / 6
- ❖ Recuento de símbolos: 7 en prefijo cíclico normal, 6 en prefijo cíclico ampliado.
- ❖ Ancho de banda de la subportadora: 15 kHz
- ❖ Cantidad de subportadoras en un RB: 12



*Figura 2.3 - Asignación de bloques de recursos en OFDMA. Fuente: [39]*

Un RB consta de 12 subportadoras, 7 símbolos en CP normal, elementos de recursos y dura un intervalo de 0,5 ms. El RB puede imaginarse como una caja en la que se asignan datos de usuario y de control. En la Tabla 2.4, el número de RB y de subportadoras dependen del ancho de banda de frecuencia [39]:

*Tabla 2.4 - Anchos de banda nominales en LTE. Fuente: [39]*

Ancho de banda del canal (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Cantidad de RB	6	15	25	50	75	100
Cantidad de subportadoras	72	180	300	600	900	1200
Ancho de banda de transmisión (MHz)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18

El intervalo de tiempo de transmisión (TTI) equivale a 1 ms y es la unidad mínima de programación en LTE. Por lo tanto, se programan dos RB a la vez para el usuario. El elemento de recurso (RE) representa la unidad mínima del sistema OFDMA, donde se transporta la información del usuario, señales y datos de control.

### SC-FDMA

Se emplea en el enlace ascendente, donde los símbolos en el tiempo se modulan y luego son convertidos al dominio de la frecuencia a través de un módulo en el transmisor. Este proceso distribuye los símbolos entre las subportadoras asignadas al usuario dentro del ancho de banda disponible [29].

Gracias a su estructura de portadora única, permite reducir el PAPR (Relación Pico a Promedio de Potencia), parámetro que mide la potencia pico y promedio de la señal transmitida. Cuando el PAPR es más bajo, esto implica un menor requerimiento de linealidad en el amplificador de alta potencia (HPA), que reduce su costo y, además, disminuye el consumo de energía en dispositivos móviles.

#### 2.1.1.6 Canales

En LTE, existen 3 tipos de canales diferentes y se clasifican en:

- ❖ **Canales lógicos:** Determinan el tipo de datos que se transfieren y los servicios proporcionados en la capa MAC. Se dividen en dos: control y tráfico. Los canales de control pueden ser comunes, compartidos por todos los usuarios en una celda, o dedicados, por un solo usuario. Los canales de tráfico llevan la información del plano

de usuario, y los canales de control transportan los mensajes en el plano de señalización [49]. La Tabla 2.5 muestra los canales utilizados:

*Tabla 2.5 - Canales lógicos en LTE. Fuente: [49]*

Canal	Siglas	Control	Datos
Canal de control de transmisión	BCCH	X	
Canal de control de localización	PCCH	X	
Canal de control común	CCCH	X	
Canal de control dedicado	DCCH	X	
Canal de control de multidifusión	MCCH	X	
Canal de tráfico dedicado	DTCH		X
Canal de tráfico de multidifusión	MTCH		X

- ❖ **Canales de transporte:** Estos especifican cómo los datos son enviados a través de la capa física. La señalización se transmite mediante estos canales entre las capas MAC y física, diferenciados según la manera en que el procesador en el canal de transporte los gestiona [49]. La Tabla 2.6 muestra los canales utilizados:

*Tabla 2.6 - Canales de transporte en LTE. Fuente: [49]*

Canal	Siglas	DL	UL
Canal de transmisión	BCH	X	
Canal compartido de enlace descendente	DL-SCH	X	
Canal de búsqueda	PCH	X	
Canal de multidifusión	MCH	X	
Canal compartido de enlace ascendente	UL-SCH		X
Canal de acceso aleatorio	RACH		X

- ❖ **Canales físicos:** Se utilizan para la comunicación en la interfaz de aire e indica dónde se encuentra la información (ubicación de los bits en una señal). Al igual que en el concepto de los canales de transporte, se clasifican en control y datos. Los primeros manejan la información que el procesador del canal de transporte envía al canal. En cambio, los de datos se caracterizan por cómo el procesador de canales físicos los gestiona y la manera asignada a los símbolos y subportadoras en OFDMA [49].

*Tabla 2.7 - Canales de datos físicos en LTE. Fuente: [49]*

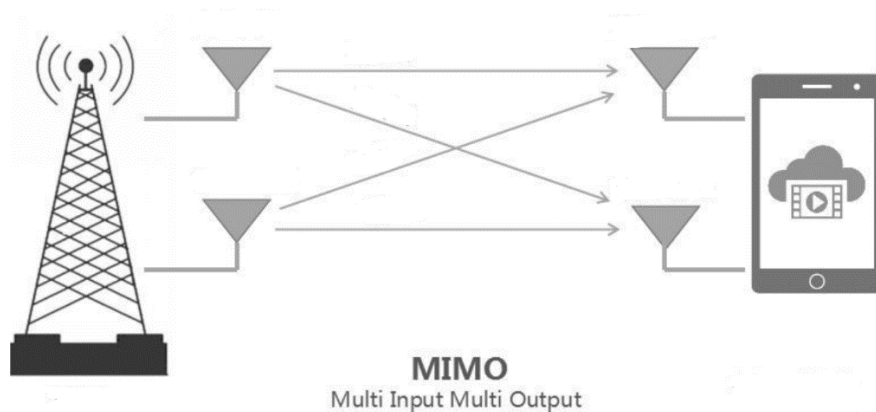
Canal	Siglas	DL	UL
Canal compartido de enlace descendente físico	PDSCH	X	
Canal de transmisión físico	PBCH	X	
Canal de multidifusión físico	PMCH	X	
Canal compartido de enlace ascendente físico	PUSCH		X
Canal de acceso aleatorio físico	PRACH		X

*Tabla 2.8 - Canales de control físicos en LTE. Fuente: [49]*

Canal	Siglas	DL	UL
Canal indicador de formato de control físico	PCFICH	X	
Canal indicador físico híbrido ARQ	PHICH	X	
Canal de control de enlace descendente físico	PDCCH	X	
Relé del canal de control de enlace descendente físico	R-PDCCH	X	
Canal de control de enlace ascendente físico	PUCCH		X

### 2.1.1.7 MIMO

Esta tecnología inalámbrica hace referencia al uso de varias señales que viajan entre sí en la misma frecuencia, a través de la diversidad de antenas en los extremos del enlace, para el envío y recepción de múltiples flujos de datos a la vez. Se logra a través de la propagación multicamino o Multiplexación Espacial, donde se transmite la señal completa en distintas direcciones a través de antenas separadas espacialmente, mientras que, en lado del receptor, las antenas reciben estos flujos y se combinan en uno solo. El número de antenas receptoras (2 o más) debe ser como mínimo igual al de los transmisores. En el *Release 8*, se introduce la configuración 4x4 (4 antenas transmitiendo y 4 en recepción) en el enlace de bajada, y 2x2 en subida para redes LTE. El objetivo es aumentar la tasa de transmisión efectiva y mejorar el alcance de la cobertura.



*Figura 2.4 - Ejemplo de configuración en modo MIMO. Fuente: [11]*

### 2.1.1.8 Valores teóricos de velocidades en 4G

En el Anexo H, se incluye información de los valores teóricos de la tasa de enlace de bajada para un solo usuario cerca de la estación base, con respecto al ancho de banda del canal configurado (5, 10, 15 MHz). Mientras, en el Anexo I se muestran las fórmulas de la velocidad mínima requerida por un ISP para garantizar el servicio 4G.

### 2.1.2 Componentes de una estación base celular

Para esta sección, se empieza a describir los tipos de estaciones base según el área de cobertura. Luego se divide todos sus componentes en diferentes subsistemas: energía, infraestructura, protección eléctrica y de telecomunicaciones.

#### 2.1.2.1 Tipos de EBC

Según el área de cobertura que se requiera conectar, existen dos tipos de celdas para las estaciones base:

- ❖ Macro Celdas: Son las estaciones que cubren áreas grandes, que se instalan sobre el suelo (*Greenfield*) o, sobre techos o azoteas (*Rooftop*) [11].
- ❖ Small Cells: Usadas para cubrir espacios reducidos en cobertura, o en interiores donde la señal externa es atenuada debido a barreras físicas. Por su capacidad y tamaño se dividen en: micro celda, pico celda y femtocelda [11].

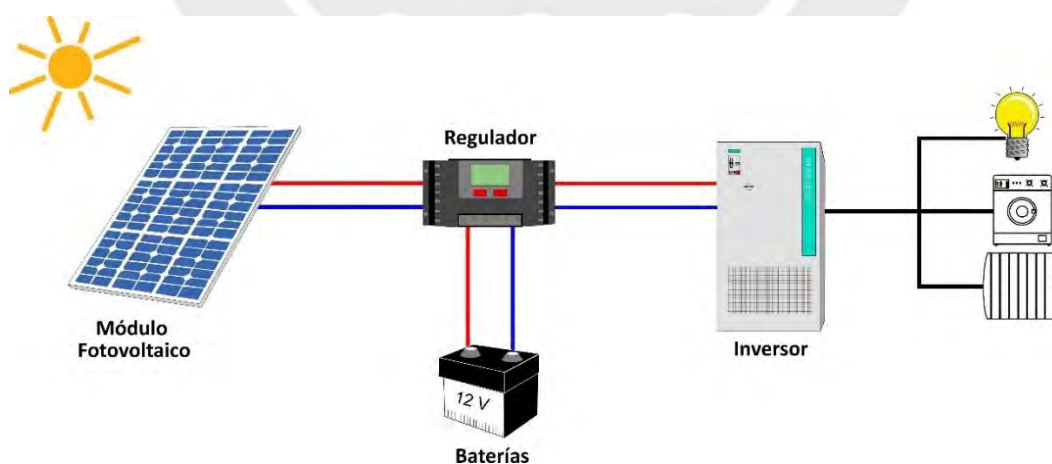
En la Tabla 2.9 se detalla la clasificación de los nodos físicos de una estación, así como la cantidad máxima de usuarios conectados en simultáneo, y el radio de cobertura aproximado de cada nodo y por subtipo [11].

*Tabla 2.9 - Características de los tipos de nodo de una estación base. Fuente: [11]*

Tipo de Nodo	Subtipo	Descripción usos	Cobertura referencial (a mayor frecuencia de portadora, menor cobertura)	Usuarios Simultáneos	Backhaul referencial	Potencia Transmisor
Macro celda	Rooftop	Normalmente urbano	más de 914 m	más de 2000	FO, MW	10-50W
	Greenfield	Normalmente rural				
Small Cell	Micro	outdoor, zonas de sombra que requieren señal puntual	182m a 914 m	32 - 200 usuarios	FO, MW, mesh. DSL	1-6W
	Pico	indoor, aeropuerto, estadio, hoteles, hospitales	100 a 300m	32 - 64 usuarios	ADSL, DSL, Fiber	0.1 - 0.25W
	Femto	indoor, small office, pueden pasar paredes	40 m	10 usuarios	ADSL, DSL	0.1W

### 2.1.2.2 Subsistema de energía

Un sistema fotovoltaico es el que usa principalmente paneles solares recogidos a partir de la luz solar, además de otros componentes como las baterías, inversores, reguladores.



*Figura 2.5 - Diagrama de un sistema fotovoltaico. Fuente: [11]*

### 2.1.2.3 Subsistema de infraestructura

La torre es la estructura donde se encuentra el elemento radiante del sistema y las antenas de transmisión. A continuación, se detalla su clasificación [11]:

- ❖ Torre ventada o arriostrada: Este tipo de torre está nivelada al suelo y emplea cables metálicos de tensión fijados al suelo para garantizar su estabilidad estructural. Resulta apropiada en zonas expuestas a corrientes de aire intensas y topografías accidentadas.
- ❖ Torre autoportada: Tipo de torre que sostiene por sí misma sin necesidad de soportes externos, generalmente usado con antenas y equipos de telecomunicaciones de gran tamaño.
- ❖ Torre de mástil o poste: Configuración vertical conformada por un elemento único o múltiples segmentos unidos entre sí. Es idónea para el soporte de antenas de dimensiones reducidas (ubicadas en el extremo superior) y equipamiento de telecomunicaciones (situado en la base).

También se incluye a la obra civil, que se define como el espacio cerrado, donde se ubica la torre que puede tener un muro de contención o cerco. Otra opción en algunos casos es colocar un cerco perimétrico, que es común en Small Cells [11].



*Figura 2.6 - Torre con cerco perimétrico (izquierda) y con caseta (derecha). Fuente: [11]*

#### 2.1.2.4 Subsistema de telecomunicaciones

Entre los componentes principales se encuentra el nodo, que realiza el procesamiento de la señal, e incluye a los siguientes módulos [11]:

- ❖ Unidad de radio remota (RRU): Es el equipo encargado de la modulación y amplificación de las señales para ser transmitidas por la antena. Puede operar con distintas tecnologías como GSM, CDMA o LTE.
- ❖ Unidad de banda base (BBU): Realiza el procesamiento de las señales recibidas desde la antena, decodificación y envío a la tarjeta de control; y viceversa.
- ❖ Módulo de control: Componente que controla y coordina las funciones operativas de la estación base, incluyendo la conexión con el canal de transporte, monitoreo del tráfico, distribución de frecuencias y canales a los UE, así como tareas de operación y mantenimiento del sitio.

Otro de los elementos son las antenas, encargadas de la transmisión y recepción de las señales entre la estación base y los equipos móviles. Su diseño puede ser omnidireccional (radiación en todas las direcciones); o direccional (radiación focalizada). Generalmente son multibandas, para soportar varias tecnologías en simultáneo. Una antena genera un sector de acuerdo a los requerimientos de cobertura, que puede abarcar  $360^\circ$  (omnidireccional),  $120^\circ$  (tres sectores) o  $90^\circ$  (cuatro sectores). Asimismo, mediante el uso de antenas MIMO es posible aplicar técnicas de *beamforming* para dirigir la señal de manera precisa hacia áreas geográficas determinadas.

### 2.1.2.5 Subsistema de protección eléctrica

Un sistema de protección eléctrica es fundamental para garantizar la seguridad e integridad tanto de las estructuras como de las personas frente a las descargas eléctricas. Incluye componentes esenciales como:

- ❖ Pararrayos: Es un instrumento que sirve para canalizar la descarga eléctrica producida por un rayo hacia tierra, para evitar daños a las estructuras y a los humanos.
- ❖ Pozo a tierra (PAT): Elemento principal de todo sistema de protección eléctrica, caracterizado por su baja resistencia, cuanto menor sea el valor es mejor su calidad. La elección adecuada depende del tipo de suelo; de las cargas que serán conectadas a este y de la resistencia máxima establecida en el diseño. Pueden ser verticales u horizontales, dependiendo del análisis que se realice. Existen en el mercado materiales para reducir la resistividad del terreno como el gel higroscópico, la bentonita y el cemento conductivo [41].
- ❖ Protectores de línea, usados para proteger los equipos de comunicación ante la inducción de corrientes en el cable UTP, producida por descargas atmosféricas, que se instalan cerca de los dispositivos externos y equipos de red [41].

### 2.1.2.6 Red de transmisión o backhaul

Es el tipo de sistema de comunicación entre una estación base y la red Core. Los más usados en zonas rurales son:

#### VSAT

Es un sistema de comunicación a través de satélites geoestacionarios que permiten la conectividad en zonas inaccesibles donde la implementación de las redes comunes no es posible. El elemento principal es el *hub* o estación central terrestre, y permite realizar la comunicación entre dos estaciones remotas. Las antenas tienen un diámetro de 1,3 m y los sistemas consumen baja energía. [11].

#### Microondas

Para este tipo de conexión se utiliza una Unidad de Interfaz Digital (IDU), que proporciona una interfaz entre el nodo y el amplificador microondas ubicado en la estación base, que realiza el procesamiento de las señales. Se puede ubicar dentro de un gabinete contenido en el nodo y está conectado a una antena que opera con señales desde 1 hasta 100 GHz. En los entornos rurales se pueden instalar en menor tiempo y abarcar distancias hasta 50 km con línea de vista [11].



*Figura 2.7 - Torre con antena de microondas. Fuente: [11]*

### 2.1.3 SDR

Es una tecnología que ha sido impulsada significativamente por el enfoque Open Source, que permite la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica mediante software, lo que brinda flexibilidad y la capacidad de reconfigurar rápidamente la funcionalidad del hardware de radio mediante cambios en el software.

#### Equipos de hardware SDR

- ❖ USRP: Es un equipo de radiofrecuencia adaptable que opera en un amplio rango del espectro, alcanzando hasta los 6 GHz e incorporando tecnología MIMO. Se emplea en aplicaciones como sistemas de múltiples entradas y salidas, pruebas en LTE, WiFi y en usos para radar. [29].
- ❖ LimeSDR: Dispositivo de código abierto y compatible con diversas aplicaciones, desarrollado por Lime Microsystems, y capaz de soportar prácticamente cualquier estándar de comunicación inalámbrica. [29].
- ❖ BladeRF: Es una plataforma de SDR diseñada por Nuand, y permite la experimentación con las comunicaciones inalámbricas. Actualmente posee dos generaciones: 1.0, la cual permite trabajar en frecuencias desde 300 MHz hasta los 3,8 GHz; y el 2.0, de 47 MHz a 6 GHz [29].

## Software para SDR

En la Tabla 2.10, se describen los códigos de software usados para la simulación de redes LTE en trabajos de investigación:

*Tabla 2.10 - Resumen de códigos aplicados para redes LTE.  
Fuente: [17], [27], [28], [64], [65], [74]*

Software	Características
OpenLTE	Implementa la parte de acceso, y un simulador para el EPC con las funcionalidades del MME y del HSS. Su configuración se realiza a través de un archivo que establece los parámetros de la simulación, y permite establecer el ancho de banda, la distancia entre el eNB y el UE, velocidad, entre otros [28].
Open Air Interface	Su plataforma se divide en dos partes: OpenairCN, que implementa los diferentes equipos que forman la red troncal de LTE, como el MME, HSS, SGW y PGW; y Openair5G para la red de acceso. Además, es capaz de implementar distintos UEs [17].
srsRAN	Código que se compone de un eNodeB, un EPC y una solución UE, que actúa como un terminal móvil desde una computadora. Por su modularidad, permite implementar una red híbrida, con soluciones de otros códigos de eNB o EPC externa, ya que cumple los estándares LTE Release 15 de 3GPP [27].
Open5GS	Es un proyecto de código abierto que permite la ejecución y el manejo de una red LTE/NR, donde brinda todos los componentes de un EPC y Core 5G [65]. Permite la integración con otras soluciones de código, como srsRAN, para el acceso en redes 4G o 5G. Además, se ha integrado a soluciones usando contenedores como Docker y Kubernetes, y OpenStack.
Kamailio	Es un servidor SIP de código abierto, que puede ser usado para construir plataformas de VoIP y comunicaciones en tiempo real, mensajería, entre otros. Entre funciones más importantes destacan: comunicación segura mediante TLS para VoIP (voz, vídeo, texto); mensajería instantánea; extensiones IMS para VoLTE. [65]

## 2.2 Antecedentes de solución similares al desafío de ingeniería

Se enumeran en la Tabla 2.11, las soluciones que se han desarrollado en base a proyectos de investigación en universidades e institutos de países en Latinoamérica y Europa:

*Tabla 2.11 - Resumen de antecedentes similares al tema de tesis.  
Fuente: [15], [16], [17], [29], [31], [32], [74]*

UNIVERSIDAD / EMPRESA	PAIS	TITULO DE PROYECTO	CARACTERISTICAS
Universidad Nacional de San Martín	Argentina	“Implementación de una red LTE con SDR”	Uso del software srsLTE y como hardware el equipo USRP B210 del fabricante Ettus Research. Además, se instaló un servidor Issabel para la funcionalidad del servicio de voz en una máquina virtual. Por último, hace una comparación con la red convencional de un operador móvil [15].
Universidad Nacional de Loja	Ecuador	“Implementación de un prototipo de estación base LTE, como herramienta experimental utilizando el SDR BladeRF” [29]	Sergio García realizó un proyecto similar, enfocado a una estación base LTE con SDR, pero utilizando en el hardware una tarjeta BladeRF Micro 2.0 xA9 y en aplicación del software OpenAirInterface [29].
Universidad Politécnica de Madrid	España	“Despliegue de un prototipo de red 4G-LTE con OpenAirInterface para entorno didáctico” [16]	David Martínez García redactó un trabajo de fin de grado sobre un prototipo de red 4G-LTE, con OpenAirInterface y el USRP NI 2901, del fabricante National Instruments [16].
		“Despliegue de un prototipo de red 3G/4G con OpenUMTS/OpenLTE y OpenAirInterface para entorno didáctico” [32]	Marcos Gómez propuso en este trabajo el despliegue de un prototipo de red 3G / 4G con algunos de los softwares mencionados como OpenLTE y OpenAirInterface, incluyendo a OpenUMTS, para redes 3G [32].
Universidad de Granada		“Prototipo de una estación base 4G usando Open Air Interface” [17]	Francisco García Espigares realizó un trabajo similar, pero aquí se usó para el hardware el USRP B210, y a diferencia de los demás, cada componente (eNB y EPC) se instalaron en una máquina virtual respectivamente [17].
Core Network Dynamics	Alemania	OpenEPC	Simulación de un Core LTE de bajo consumo, instalado en un dispositivo Raspberry PI, con capacidad de voz y datos, para desplegar una pequeña red en una zona lejana o para áreas que han sido perjudicadas por desastres naturales [30].
YateBTS	Rumania	YateUCN	Es una solución de un componente Core para redes LTE, donde implementa todas las funciones y protocolos del núcleo, además es capaz de comunicarse con las estaciones base a través de los protocolos GTP y S1AP, y usa una API para su configuración y administración [31].

### 2.3 Características de las soluciones similares

- ❖ Se utilizó el software Open Source para la implementación de prototipos de estaciones base o de red completa LTE.
- ❖ Se aplicó la tecnología SDR, tanto en software aplicando las soluciones disponibles para redes LTE y en hardware con equipos USRP de fabricantes como Ettus Research, National Instruments y BladeRF.
- ❖ El uso de tarjetas SIM inteligentes para el registro de los terminales móviles a la red LTE, con una lectora y un programa especial, que debe ser realizado en otra máquina (con sistema operativo Windows).
- ❖ Los trabajos que se han realizado son parte de tesis de pregrado o maestría para la carrera de Ingeniería Electrónica o Telecomunicaciones en las universidades mencionadas.

### 2.4 Conjunto de tecnologías, herramientas y métodos de las soluciones semejantes

En esta sección, se verán las tecnologías aplicadas, los códigos de software, los dispositivos utilizados para la función de una estación base, y otros componentes comunes que se han hecho mención en los trabajos de investigación nombrados anteriormente.

#### **Tecnología SDR**

En todos los trabajos de investigación y proyectos de prueba se ha utilizado esta tecnología, tanto en hardware a través de los equipos mencionados en el marco teórico, y el software para la parte operativa y funcional de una red móvil 2G, 3G, o 4G.

#### **Softwares Open Source aplicados**

- ❖ OpenBTS
- ❖ OpenLTE
- ❖ OpenAirInterface (OAI)
- ❖ srsLTE

## Equipos de hardware usados

- ❖ USRP B210: El espectro de frecuencia en la cual trabaja es el mismo que el modelo anterior (NI 2901), que permite la experimentación con señales FM, celular, TV, WiFi; y una conexión a través de USB 3.0. Además, este modelo ofrece 2 canales de transmisión y recepción, y es compatible con el UHD del propio fabricante (Ettus Research) [33].
- ❖ USRP NI 2901: el rango de frecuencias a la cual opera este equipo es entre los 70 MHz y 6 GHz, con una potencia de transmisión máxima de 20 dBm y -15 dBm como potencia máxima en recepción. La figura de ruido se encuentra entre 5 y 7 dB, su ancho de banda es de 20 MHz y se usa para diversas aplicaciones en las comunicaciones. El fabricante es National Instruments (NI) [34].
- ❖ Blade RF 2.0 micro xA9: Trabaja en el rango de frecuencias entre 47 y 6 GHz, con una frecuencia de muestreo de 61,44 MHz. Cuenta con una tarjeta FPGA programable (Altera Cyclone V) y un transceiver de banda ancha, para las tecnologías inalámbricas avanzadas, incluyendo a 5G [35].

## Antenas

- ❖ Antena Andven SK-030: Tipo de antena 4G omnidireccional que adiciona un conector macho SMA y un cable de 2 metros. La ganancia que ofrece es de 35 dBi y opera en el rango desde 701 hasta 2690 MHz.
- ❖ Antenas Yunjin 4G-SBK: Tipo de antena 4G LTE, proporciona una ganancia de 10 dBi con conector SMA, y el rango de frecuencias en la que opera es entre 700 - 960 y 1710 - 2700 MHz.

La primera antena ha sido usada en el trabajo de investigación de David Martínez para aumentar la ganancia en el dispositivo USRP NI 2901, mientras que la segunda es mencionada en el desarrollo del trabajo, pero no fue utilizada.

### **Tarjetas SIM LTE y lectora**

En los trabajos de investigación, se utilizaron tarjetas USIM (micro SIM) en blanco, para introducirlos en los terminales móviles y establecer la conexión a la red LTE basada en software. Además, se usó una lectora para dichas tarjetas, para grabar una SIM y obtener los parámetros solicitados para el software que se usó, y finalmente que el equipo móvil pueda autenticarse en la red y acceder al servicio. Se usaron lectoras de diferentes marcas en el mercado como OYEITIMES, Microsystems, Gemalto, entre otros.



*Figura 2.8 - Tarjetas SIM LTE programables y lectora. Fuente: [47]*

## **2.5 Conjunto de características y especificaciones para la solución de ingeniería**

La solución de ingeniería tendrá las siguientes características y especificaciones:

- ❖ Uso de equipos SDR, que simularán una estación base celular como componente principal de comunicación con el terminal móvil del usuario (UE).
- ❖ Tarjetas SIM LTE y lectora de tarjetas, para la lectura de dichas tarjetas, obtener los parámetros necesarios para la base de datos en la red (HSS) y los equipos móviles puedan conectarse a la red.

- ❖ Uso de plataformas de código abierto para el despliegue de una red móvil, como parte de la solución al desafío de ingeniería.
- ❖ Uso de antenas para una mejor obtención de la ganancia en la banda LTE configurada.
- ❖ Uso de computadoras con sistema operativo Ubuntu y procesador Core i5 en adelante, para la instalación y configuración del software.
- ❖ Uso de terminales móviles de cualquier fabricante que soportan LTE, para las pruebas requeridas más adelante.



### **Capítulo 3. Diseño y desarrollo del prototipo de una estación base 4G basada en SDR para zonas rurales**

En este capítulo se abordan los siguientes aspectos: la descripción y características de una estación base LTE basada en tecnología SDR, el análisis de las alternativas de código disponibles y la selección de la más óptima para el propósito del proyecto. Asimismo, se detalla el diseño y desarrollo del prototipo, incluyendo dos soluciones para el servicio de voz, junto con los subsistemas de energía e infraestructura.

#### **3.1 Descripción y características de un prototipo de una estación base 4G basado en SDR para zonas rurales**

La descripción de este sistema se basa principalmente en: el uso de ejecución de software que simula el despliegue de una red 4G, y un componente SDR, que actuará como una estación base celular física, con la capacidad de transmitir y recibir señales en la interfaz de aire para que un dispositivo móvil pueda conectarse y acceder al servicio de internet y voz a través de los datos móviles. A continuación, se listan los requerimientos para una solución 4G basada en SDR:

- ❖ Dispositivos SDR: Se necesitan de dispositivos capaces de transmitir señales RF, que trabajen de la mano con el código en ejecución para la simulación de la red móvil.
- ❖ Software Open Source para redes 4G: Existen códigos en varios repositorios capaces de simular una red móvil, incluyendo el estándar LTE, que pueden ser ejecutados y descargados sin la necesidad de pago por ello.
- ❖ Equipamiento para la instalación del código: Es indispensable para la instalación de los códigos contar con los equipos necesarios que cumplan con los requisitos mínimos como la memoria, el procesador, entre otras características. Esto dependerá de la disponibilidad de dicho equipamiento en los entornos de prueba.
- ❖ Tarjetas SIM LTE y lectora: Para las pruebas y resultados de la simulación de la red LTE, es necesario adquirir las tarjetas SIM para 4G, y luego de hacer el registro de los parámetros de la configuración en la base de datos con la lectora.
- ❖ Dispositivos móviles: En conjunto con lo mencionado anteriormente, aquí estarán insertados los SIM registrados para luego conectarse a la red y acceder a los servicios de datos y voz. Además, servirán para medir los resultados de la tasa de datos en la subida y bajada, valores de recepción, ancho de banda, etc.
- ❖ Antenas multibanda: Para mejorar la recepción en los dispositivos móviles, se necesita de antenas que trabajan en el rango de frecuencia de la banda seleccionada para el entorno de trabajo, y así incrementar la ganancia. Por ejemplo, existen antenas de tipo omnidireccional que se pueden adaptar a las necesidades requeridas.
- ❖ Accesorios adicionales: Para la conexión de los equipos SDR con las máquinas donde se ejecute el código, se debe tener en cuenta el uso de cables Ethernet o extensiones de tipo USB 3.0, esto dependiendo del tipo de equipo SDR que se disponga en nuestro entorno de pruebas.

### **3.2 Evaluación de la implementación de una estación base LTE con la aplicación de SDR**

En el espectro radioeléctrico, para ofrecer el servicio de 4G, en el Perú se tiene uso de diferentes bandas asignadas por el MTC para cada operador móvil, tal como se vio en la Tabla 2.3. Para el caso del prototipo, lo ideal es que se tenga asignado una banda para evitar la interferencia con otros operadores y servicios que se ofrezcan.

También se debe tener en cuenta la capacidad máxima de datos, tanto en bajada (Downlink) como en subida (Uplink) que podría recibir un terminal móvil con este prototipo, debido a la limitación de diversos factores como la capacidad soportada por el hardware SDR o características internas del equipo móvil, entre otros.

Otro es el tema de la cantidad máxima de usuarios que soporte el prototipo, que también dependerá de la cantidad de tarjetas SIM programables que se tengan disponibles para realizar dichas pruebas, y de los recursos del hardware físico que se utiliza para la ejecución del software.

Por último, el radio de cobertura en la práctica se verá afectado por la limitación del equipo SDR, ya que estos componentes de hardware solo han sido usados en proyectos de prueba, pero no han sido desplegados actualmente en producción para ofrecer el servicio de 4G, ni tampoco como un reemplazo de una estación base celular como las que se instalan en la actualidad por los operadores móviles.

### 3.3 Análisis de la elección óptima de software para la solución de ingeniería

Con lo mencionado en el Capítulo 2, donde se describió las soluciones de código para las redes de acceso 4G, se realiza una comparativa enfocada en las ventajas y desventajas de cada uno en la Tabla 3.1:

*Tabla 3.1 - Selección de las alternativas de software SDR disponibles.  
Fuente: [29], [74]*

Software	Compatibilidad con equipos SDR	Requisitos previos	Actualizaciones al software	Documentación disponible
OpenLTE	USRP B200/B210	Interfaz USB 3.0	Última vez: Hace 3 años	Baja
	HackRF	CPU multinúcleo con procesador Intel Core i5, i7		
	RTL-SDR	Instalación del controlador UHD y GNU Radio		
OpenAir Interface	USRP B210/X300	Interfaz USB 3.0	Última vez: Hace 1 mes	Alta
	BladeRF	CPU multinúcleo con procesador Intel Core i5, i7		
	LimeSDR			
srsRAN	USRP B210/X300	Interfaz USB 3.0	Última vez: Hace 7 meses	Media
	BladeRF	CPU multinúcleo con procesador Intel Core i5, i7		
	LimeSDR			

Con esta información, se optó por trabajar con el software srsRAN por varias razones. En primer lugar, se dispone de una versión reciente del código y acceso a proyectos similares en otros países. Además, su documentación facilita el proceso de instalación y configuración en comparación con OpenAirInterface. Otro aspecto favorable es su herramienta de monitoreo, que permite medir diversos parámetros. Finalmente, srsRAN es compatible con uno de los equipos disponibles en la universidad, el LimeSDR, obtenido a través de un préstamo del Instituto de Radioastronomía (INRAS-PUCP).

### **3.4 Desarrollo del prototipo de una estación base LTE basado en SDR para zonas rurales**

En este apartado, primero se indica las especificaciones y restricciones del prototipo, luego se explica la arquitectura de la solución, y el desarrollo del prototipo, incluyendo la descripción de cada equipo utilizado, y el proceso de instalación y configuración de los códigos, con servicios de voz distintos: VOIP y VOLTE.

#### **3.4.1 Especificaciones y restricciones del diseño**

A continuación, se indican las especificaciones y restricciones de la propuesta del prototipo:

##### **Especificaciones:**

- ❖ Se utilizará la plataforma de código srsRAN para la solución de la estación base LTE (eNB) con VOIP.
- ❖ Para la solución con VoLTE, se utiliza el software Open5GS, que simula un Core 4G/5G, y es más robusto que el srsepc, parte de srsRAN.
- ❖ Además, para la solución con VoLTE, se utiliza el software Kamailio, que simula un Core IMS, y se integra con Open5GS y srsRAN.
- ❖ Junto a la parte de acceso (eNB), se requiere un equipo SDR, es por ello que se trabaja con uno de la compañía Lime Microsystems, modelo LimeSDR USB, y antenas que soporten las bandas de LTE, además de una extensión de cable tipo USB 3.0.
- ❖ Para el proceso de instalación, se usará Docker, por lo tanto, se debe tener instalado dicho programa en base a la versión de Ubuntu.
- ❖ Se cuenta con 2 PCs, con procesador Intel Core i7 e i5, para la ejecución de la red; con el sistema operativo Linux, a partir de la distribución de Ubuntu versión 20.04 y 22.04, ambos de 64 bits.
- ❖ La conexión a Internet de la PC será a través de la red local, mediante la interfaz de red física, en caso se requiera para la instalación de las librerías adicionales.

- ❖ El uso de tarjetas SIM programables LTE para que luego se inserten en los dispositivos móviles y realizar las pruebas con la red en ejecución, donde la configuración se hará con una lectora a través de una aplicación, que se encuentra en un USB como un archivo ejecutable.

#### **Restricciones:**

- ❖ No permite el Handover por la interfaz S1
- ❖ Por defecto, según la página de srsRAN, se pueden admitir hasta 128 UE, pero en las pruebas en el laboratorio se llegará hasta 10 usuarios para las mediciones, debido a la cantidad de tarjetas SIM que se adquirieron para las pruebas iniciales.
- ❖ Se han realizado pruebas con los siguientes valores de anchos de banda: 5 y 10 MHz.

### **3.4.2 Desarrollo de la solución propuesta**

Para el desarrollo de la solución, se proponen 2 soluciones similares, pero con diferentes implementaciones para el servicio de voz: la primera aplicando VoIP, a través de la instalación de Asterisk como servidor para las llamadas de voz; y, por otro lado, usando contenedores de Docker con la implementación de VoLTE, a través de la integración del software Kamailio, que actúa como un Core IMS.

#### **3.4.2.1 Equipos y materiales**

Para ambas soluciones, se muestra el prototipo físico y los componentes, que se describen luego de la Figura 3.1:



*Figura 3.1 - Diagrama físico del prototipo LTE - SDR para ambas soluciones. Fuente: [74]*

Para los propósitos de la ejecución del software, y cumplir con los requerimientos, se utilizan las siguiente PCs con los siguientes recursos:

*Tabla 3.2- Características de la máquina para la solución VOIP. Fuente: Elaboración propia*

Marca	Procesador	RAM	Generación	Almacenamiento	Cantidad de interfaces USB 3.0
Lenovo	Intel Core i7	16 GB	6th	240 GB	4

*Tabla 3.3 - Características de la máquina para la solución VOLTE. Fuente: Elaboración propia*

Marca	Procesador	RAM	Generación	Almacenamiento	Cantidad de interfaces USB 3.0
Lenovo	Intel Core i5	16 GB	6th	240 GB	4

Para el hardware SDR, se usó el equipo LimeSDR USB para la simulación de un eNB, capaz de transmitir y recibir las señales hacia los terminales móviles. En este caso, los encargados del

instituto decidieron comprar un case especial de color negro para su debida protección y uso, como se observa en la Figura 3.2, y en la Tabla 3.4 se describen las características de dicho componente:



*Figura 3.2 - Equipo LimeSDR USB Type A. Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 3.4 - Características del equipo SDR. Fuente: Elaboración propia*

Hardware	Rango de operación	Ancho de banda	Potencia de salida	Energía	Conectores	Dimensiones
LimeSDR USB Tipo A	100 kHz – 3,8 GHz	61,44 MHz	0 - 10 dBm	Conector Micro USB 3.0, o fuente de energía opcional	6 en transmisión, 4 en recepción	100mm x 60 mm

Como componentes adicionales, se usaron antenas omnidireccionales para la conexión a los puertos de salida de transmisión (TX) y recepción (RX) del LimeSDR, y para ello poseen un conector macho. Funciona desde 700 a 2 700 MHz, por lo que es compatible con el software srsRAN y se encuentra dentro del rango de frecuencias de los servicios móviles. Posee una ganancia de 10 dBi, valor extraído por referencia de una antena similar. Otro componente es una extensión para USB de tipo 3.0, que se utiliza para la conexión del LimeSDR, que cuenta con esta entrada, con uno de los puertos del mismo tipo en la máquina donde se está ejecutando el software, y así se pueda reconocer a dicho hardware SDR a través de sus librerías descargadas, y que pueda ser ejecutado sin problemas.



*Figura 3.3 - Antenas omnidireccionales de 10 dBi. Fuente: Elaboración propia*



*Figura 3.4 - Cable USB 3.0 (Con conectores macho y hembra). Fuente: Elaboración propia*

Con respecto a los equipos móviles usados para las pruebas son los siguientes, ambos de la marca Huawei: los modelos Mate Lite y P30 Lite. En las Tablas 3.5 y 3.6 se describen sus características:

*Tabla 3.5 - Características del equipo móvil Huawei Mate Lite 20. Fuente: [70]*

RAM	Almacenamiento interno	Conectividad 4G	SIM
4 GB	64 GB	Bandas 7,8	Nano SIM - dual

*Tabla 3.6 - Características del equipo móvil Huawei P30 Lite. Fuente: Elaboración propia*

RAM	Almacenamiento interno	Conectividad 4G	SIM
4 GB	64 GB	Bandas 7, 8, 28	Nano SIM / Nano dual híbrido

Para la configuración en los equipos móviles a través de las SIM, se utilizaron los siguientes componentes que se incluyen en un solo paquete: 5 tarjetas SIM programables, lectora de las tarjetas y un USB, donde se encuentra la aplicación GRSIMWrite para la programación y manejo de los parámetros de las tarjetas SIM. Cabe decir que, para esta ocasión, se decidió adquirir dos paquetes de diferentes marcas: XCRFID y OYEITIMES, que se muestran en las Figuras 3.5 y 3.6:



*Figura 3.5 - Primer paquete de la marca XCRFID. Fuente: Elaboración propia*

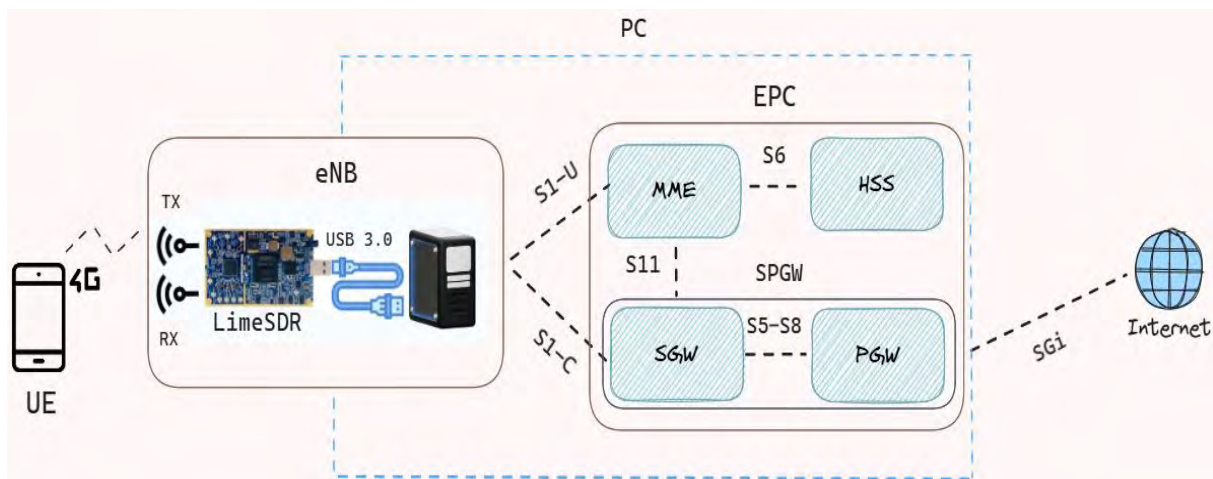


*Figura 3.6 - Segundo paquete de la marca OYEITIMES. Fuente: [51]*

Ambos paquetes usan el mismo programa para las SIM. Cuentan con un manual en un archivo de texto en el USB. El primero soporta solo el sistema operativo Windows, mientras que el segundo soporta también MAC y Linux. Para su uso, las páginas recomiendan tener un conocimiento en los conceptos de las redes móviles, específicamente en los parámetros relacionados del contenido de una tarjeta SIM.

### 3.4.2.2 Instalación y configuración con VOIP

En la Figura 3.7 se presenta la arquitectura de la primera solución del prototipo, que se divide en dos componentes: acceso (eNB) y Core (EPC). El software del eNB y EPC se instala y ejecuta en una única PC, que se conecta en la parte de acceso de un equipo transmisor y receptor (LimeSDR) conectado a través de un cable USB 3.0, y es donde inicialmente se conectan los terminales móviles 4G (UE), en la parte izquierda.

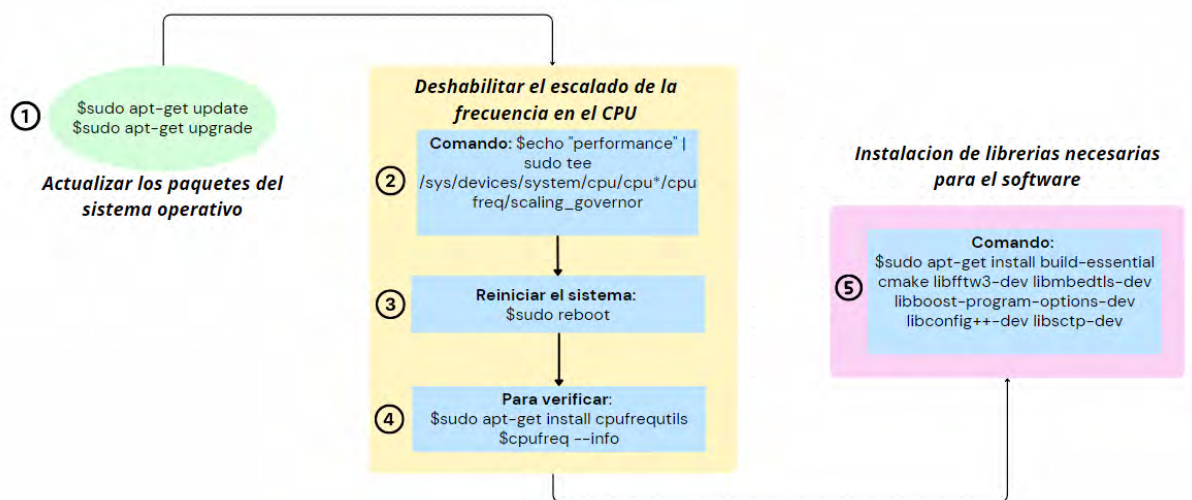


*Figura 3.7 - Arquitectura de la primera solución propuesta. Fuente: Elaboración propia*

Como el EPC se comunica con el eNB mediante la interfaz S1, y en este caso se utiliza un solo equipo para la ejecución del código, no es necesario un cable de red Ethernet adicional.

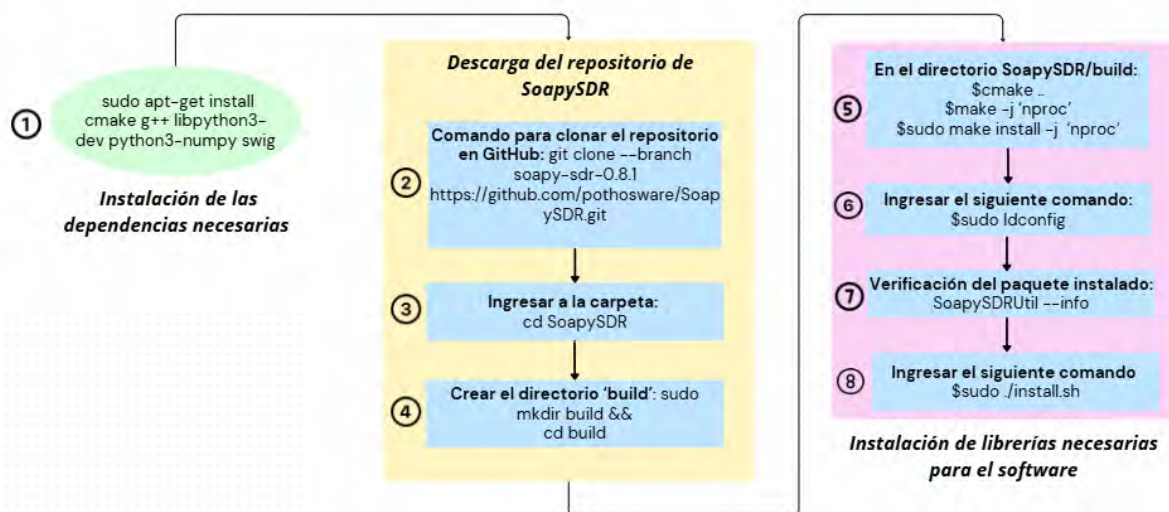
#### Fase 1: Instalación en un solo equipo

Se utiliza un sistema operativo Linux, con distribución Ubuntu, en su versión 22.04, por lo que se debe preparar el entorno para la instalación del software, así que se inicia con la actualización del Ubuntu a través del gestor APT, para la descarga y actualización de los paquetes en sus últimas versiones. Después, se recomienda que, para obtener un mejor desempeño, se debe deshabilitar el escalado en frecuencia del CPU. Los comandos utilizados para estos pasos previos se encuentran en la Figura 3.8, y además en el Anexo B1.



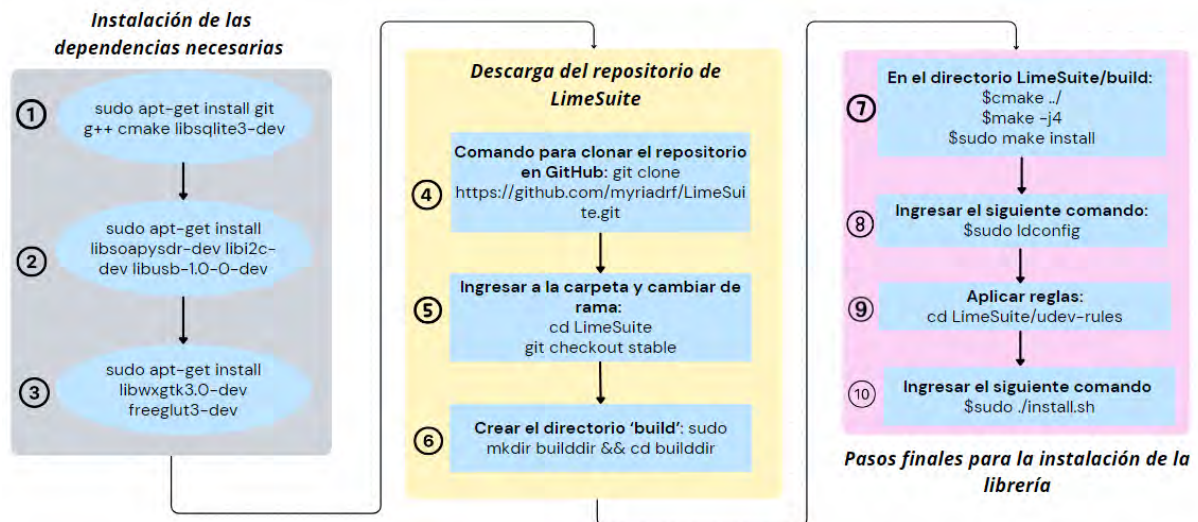
**Figura 3.8 - Flujograma de los pasos previos a seguir para la instalación. Fuente: Elaboración propia**

Ahora, para el hardware SDR, se necesita de dos librerías en particular: SoapySDR y LimeSuite, para el software seleccionado y para las dependencias que requerirá el equipo, respectivamente. Para la instalación del paquete SoapySDR, se realiza el siguiente procedimiento de la Figura 3.9 [53]. Los comandos se pueden encontrar en el Anexo B2.



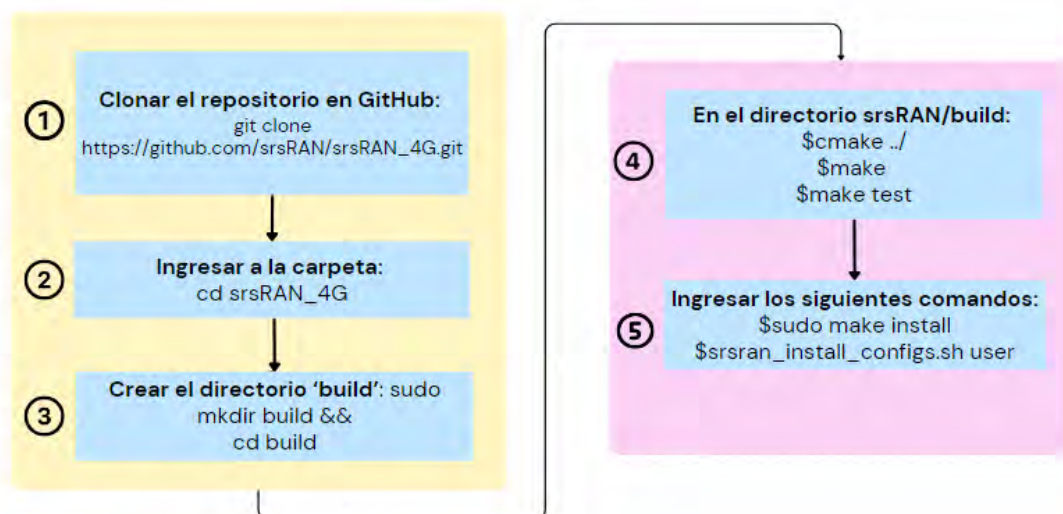
**Figura 3.9 - Flujograma de instalación de SoapySDR. Fuente: Elaboración propia**

De forma similar, para la instalación del paquete LimeSuite, indispensable para el reconocimiento del hardware LimeSDR con la máquina a usar, se requiere aplicar los comandos mostrados [54], siguiendo el orden del flujograma en la Figura 3.10, y en el Anexo B3:



*Figura 3.10 - Flujograma de instalación de LimeSuite. Fuente: Elaboración propia*

Para la instalación del software srsRAN, se recomienda descargar el código base del repositorio oficial en GitHub [50]. Luego, se finaliza la instalación con los comandos del paso 5, en la Figura 3.11, que realizan una copia de los archivos de configuración en `~/config/srsran`. Los comandos también se pueden encontrar en el Anexo B4:



*Figura 3.11 - Flujograma de instalación del software srsRAN. Fuente: Elaboración propia*

## Fase 2: Configuración del EPC:

En la ruta `~/config/srsran` se edita el archivo `epc.conf` en la sección `[mme]` con lo siguiente:

MCC: 716 (código móvil del país)

MNC: 12 (código móvil de la red)

```

GNU nano 6.2          epc.conf
# mcc:                Mobile Country Code
# mnc:                Mobile Network Code
# full_net_name       Display Name of the Network
# short_net_name      Short Display Name of the Network
# apn:                Set Access Point Name (APN)
# mme_bind_addr:      IP bind addr to listen for eNB S1-MME connections
# dns_addr:           DNS server address for the UEs
# encryption_algo:    Preferred encryption algorithm for NAS layer
#                    (supported: EEA0 (default), EEA1, EEA2, EEA3)
# integrity_algo:     Preferred integrity protection algorithm for NAS
#                    (supported: EIA0 (rejected by most UEs), EIA1 (default), EIA2, EIA3)
# paging_timer:       Value of paging timer in seconds (T3413)
# request_imeisv:     Request UE's IMEI-SV in security mode command
# lac:                16-bit Location Area Code.
#
#####
[mme]
mme_code = 0x1a
mme_group = 0x0001
tac = 0x0007
mcc = 716
mnc = 12
mme_bind_addr = 127.0.1.100
apn = srsapn
dns_addr = 8.8.8.8
encryption_algo = EEA0
integrity_algo = EIA1
paging_timer = 2
request_imeisv = false
lac = 0x0006

```

*Figura 3.12 - Configuración del EPC. Fuente: Elaboración propia*

### Fase 3: Configuración del eNB:

En la ruta `~/config/srsran`, se edita el archivo `enb.conf` con lo siguiente:

MCC: 716

MNC: 12

$N_{prb} = 50$

Los valores de MCC y MNC deben ser los mismos que en el archivo de configuración del EPC.

```

GNU nano 6.2          enb.conf
#####
# srsENB configuration file
#####
# eNB configuration
#
# enb_id:              20-bit eNB identifier.
# mcc:                Mobile Country Code
# mnc:                Mobile Network Code
# mme_addr:           IP address of MME for S1 connection
# gtp_bind_addr:      Local IP address to bind for GTP connection
# gtp_advertise_addr: IP address of eNB to advertise for DL GTP-U Traffic
# s1c_bind_addr:      Local IP address to bind for S1AP connection
# s1c_bind_port:      Source port for S1AP connection (0 means any)
# n_prb:              Number of Physical Resource Blocks (6,15,25,50,75,100)
# tm:                 Transmission mode 1-4 (TM1 default)
# nof_ports:          Number of Tx ports (1 port default, set to 2 for TM2/3/4)
#
#####
[enb]
enb_id = 0x198
mcc = 716
mnc = 12
mme_addr = 127.0.1.100
gtp_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_port = 0
n_prb = 50
tm = 4
nof_ports = 2

```

*Figura 3.13 - Configuración del eNB (sección [enb]). Fuente: Elaboración propia*

Luego para reconocer al equipo SDR, en la sección [rf] se necesita configurar lo siguiente [52]:

`device_name = soapy`

`device_args = driver = lime, rxant = LNAH, txant=BAND1`

`tx_gain = 66`

`rx_gain = 47`

`time_adv_nsamples = 60`

```

GNU nano 6.2                               enb.conf
# device_name: Device driver family
# Supported options: "auto" (uses first driver found), "UHD", "bladeRF", "soapy", "zmq" or "Sidekiq"
# device_args: Arguments for the device driver. Options are "auto" or any string.
# Default for UHD: "recv_frame_size=9232,send_frame_size=9232"
# Default for bladeRF: ""
# time_adv_nsamples: Transmission time advance (in number of samples) to compensate for RF delay
# from antenna to timestamp insertion.
# Default "auto". B210 USRP: 100 samples, bladeRF: 27
#####
[rf]
#dl_earfcn = 3350
tx_gain = 66
rx_gain = 47

device_name = soapy
device_args = driver=lime,rxant=LNAH,txant=BAND1
time_adv_nsamples = 60
#device_name = auto

# For best performance in 2x2 MIMO and >= 15 MHz use the following device_args settings:
# USRP B210: num_recv_frames=64,num_send_frames=64
# And for 75 PRBs, also append "master_clock_rate=15.36e6" to the device args

# For best performance when BW<5 MHz (25 PRB), use the following device_args settings:
# USRP B210: send_frame_size=512,recv_frame_size=512

#device_args = auto
#time_adv_nsamples = auto

```

**Figura 3.14 - Configuración del eNB (sección [rf]). Fuente: Elaboración propia**

Sobre la frecuencia seleccionada para trabajar en el entorno de prueba, se ha seleccionado la banda 7, que es usada para comunicaciones móviles en LTE en el país, y en esta ocasión, por el desarrollo en trabajos anteriores y su facilidad de adaptarse a la mayoría de equipos móviles. En el archivo rr.conf, se configura la frecuencia de subida y bajada a la que transmitirá el equipo SDR. En este caso, en el software se debe configurar el valor del EARFCN en bajada, y luego este mismo hace el cálculo de la frecuencia, ya que dicho software solo soporta el modo FDD [52]. En la sección “cell\_list”, se actualiza el parámetro dl\_earfcn con un valor que se encuentre en el rango de la banda 7, en este caso es 3 350, el valor por defecto en dicha banda, como se puede ver en la Figura 3.15.

```

GNU nano 6.2                               rr.conf *
{
mode = "periodic";
simultaneousAckCQI = true;
period = 40; // in ms
//subframe = [0, 10, 20, 30]; // Optional vector of subframe indices every period where CQI resources will be allo
m_rI = 8; // RI period in CQI period
//subband_k = 1; // If enabled and > 0, configures sub-band CQI reporting and defines K (see 36.213 7.2.2). If disa
};
};
cell_list =
(
{
// rf_port = 0;
cell_id = 0x01;
tac = 0x0007;
pci = 1;
// root_seq_idx = 204;
dl_earfcn = 3350;
//ul_earfcn = 21400;
ho_active = false;

```

**Figura 3.15 - Configuración de radio (rr.conf). Fuente: Elaboración propia**

#### Fase 4: Grabación de tarjetas SIM

A continuación, se empieza esta parte configurando las tarjetas SIM con los parámetros de nuestra red. El software necesita los valores de IMSI, KI y el código OP/OPC. Primero, se selecciona un MCC y MNC para la identificación de la red móvil. Con ambos valores que se configuraron previamente (MCC:716, MNC:12), se empieza creando el valor del ICCID, valor de 19 dígitos, que le da un registro único al SIM y es realizado por el fabricante [52]. Para esto, se seguirá el formato establecido de la Tabla 3.7:

*Tabla 3.7 - Campos para creación del ICCID. Fuente: Elaboración propia*

Campo	Descripción	Valor
Identificador de la industria del sector	Por defecto 89 para propósitos de telecomunicaciones	89
Código de país	Valor de 2 o 3 dígitos, definido por la ITU-T E.164	51
Identificador del emisor	Usualmente es el MNC	12
Identificador único individual	Número de identificación variable	000000000001

Luego, se genera el IMSI, valor de 15 dígitos que es usado para identificar únicamente a cada usuario en la red móvil [52]. Similar al ICCID, se sigue el formato de la Tabla 3.8:

*Tabla 3.8 - Campos para creación del IMSI. Fuente: Elaboración propia*

Campo	Descripción	Valor
MCC	Código móvil del país	716
MNC	Código de la red móvil	12
Identificador único individual	Mismo que en el ICCID, pero se quitan 3 ceros	0000000001

Ahora, se genera un KI, la clave del abonado, que solo es conocido por el usuario y la red, usado para la autenticación del equipo. También se necesita un OP (código de operador) u OPC (código de operador derivado). El OP es el mismo para todas las tarjetas SIM de un proveedor determinado. Si se recupera, es posible que cualquier persona lo utilice para suplantar cualquier SIM de la red del operador. Por eso se suele utilizar la clave OPC, que se forma mediante una combinación de la clave del operador y la clave del abonado a través de una función criptográfica unidireccional. Si el código OPC se recuperara de una tarjeta SIM, sólo esa tarjeta SIM podría ser falsificada [52]. Para propósitos del entorno de prueba, se puede generar códigos

aleatorios de 128 bits para ambos parámetros, usando el comando que se encuentra en el Anexo B. Todos estos parámetros se pueden observar en la Figura 3.16 para el caso del primer SIM, con el uso del programa GRSIMWrite en el sistema operativo Windows 10. El SPN es el nombre de la red que aparece una vez el terminal móvil se conecte a la red, en este caso se toma el nombre: “LuchoLTE” como prueba para ambos SIMs.

The screenshot shows the GRSIMWrite software interface with the following configuration details:

- Reader(PC/SC):** Generic Smart Card Reader Interface 0
- Common Parameter:**
  - ATR: 3B9F94801FC78031E073FE2113578681098698621880
  - Type: LTE(VH02)LTE+GSM
  - Language: English
  - ADN: [Empty]
  - ICCID: 89511200000000019F
  - Inc (DEC20): [Empty]
  - PIN1: 1234
  - PUK1: 88888888
  - PIN2: 1234
  - PUK2: 88888888 (ASC8)
  - ADM: 3838383838383838 (HEX16/8)
- GSM/WCDMA/LTE:**
  - CDMA/EVDO/CSIM | VoLTE/ISIM | Java | PKCS#15/AC
  - GSM Parameter:**
    - IMSI18: 809716120000000001
    - IMSI15: 7161200000000001
    - ACC: 0002
    - AD: 00000002
    - Inc KI: AFF0D7814FB7E2E1D10738E3AACBCBE4 (HEX32)
    - PLMN: 46000
    - EHPLMN: 71612
    - FPLMN: 71606; 71615; 71617
    - HPLMN: 05 (HEX2) | GID1: | GID2: |
    - SMSP: + (ASC) | MSISDN: 9076543211 | Inc (ASC)
    - SPN: LuchoLTE (ASC)
    - ECC: |
    - Algorithm: Comp128-1 (checked) | Comp128-2 | Comp128-3 | Milenage
- LTE/WCDMA Parameter:**
  - IMSI18: 809716120000000001
  - IMSI15: 7161200000000001
  - ACC: 0002
  - AD: 00000002
  - Inc KI: AFF0D7814FB7E2E1D10738E3AACBCBE4 (HEX32)
  - OPC: 68D993C7F735DBF6DC21DBEB1CD9D5B6 (HEX32)
  - OP: | (HEX32)
  - PLMNwAct: 71612:4000; 71612:8000; 71612:0080
  - OPLMNwAct: 71612:4000; 71612:8000; 71612:0080
  - HPLMNwAct: 71612:4000; 71612:8000; 71612:0080
  - EHPLMN: 71612
  - FPLMN: 71606; 71615; 71617
  - HPPLMN: 05 (HEX2) | GID1: | GID2: |
  - SMSP: + (ASC) | MSISDN: 9076543211 | Inc (ASC)
  - SPN: LuchoLTE (ASC)
  - ECC: |
  - Algorithm: Milenage (checked) | XOR | R&C Para | Other files | Same with GSM

*Figura 3.16 - Programa GRSIMWrite con la configuración del primer SIM. Fuente: Elaboración propia*

Luego de esto, en el software se edita el archivo user\_data.csv, que contiene a los parámetros que identifican a las tarjetas SIM, y es usado por el HSS, que esta internamente en el archivo de configuración del EPC. Aquí se registra los valores de cada parámetro (IMSI, KI, OPC) de cada SIM configurado previamente.

```

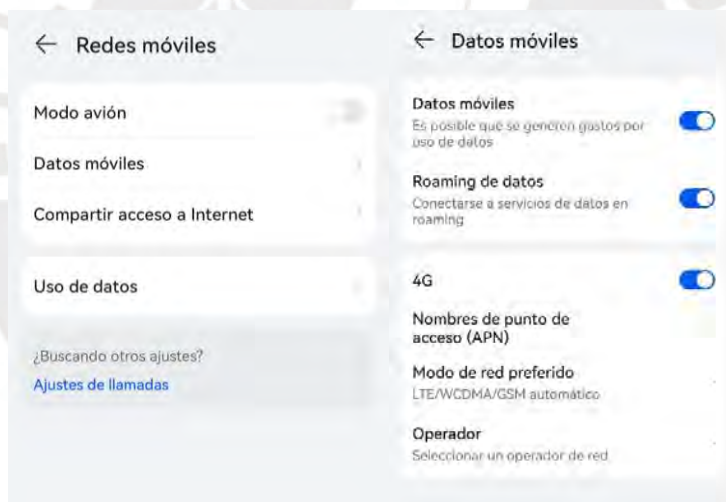
GNU nano 6.2 user_db.csv
#
# .csv to store UE's information in HSS
# Kept in the following format: "Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP/OPc,AMF,SQN,QCI,IP_alloc"
#
# Name: Human readable name to help distinguish UE's. Ignored by the HSS
# Auth: Authentication algorithm used by the UE. Valid algorithms are XOR
#       (xor) and MILENAGE (mil)
# IMSI: UE's IMSI value
# Key: UE's key, where other keys are derived from. Stored in hexadecimal
# OP_Type: Operator's code type, either OP or OPc
# OP/OPc: Operator Code/Cyphered Operator Code, stored in hexadecimal
# AMF: Authentication management field, stored in hexadecimal
# SQN: UE's Sequence number for freshness of the authentication
# QCI: QoS Class Identifier for the UE's default bearer.
# IP_alloc: IP allocation strategy for the SPGW.
#           With 'dynamic' the SPGW will automatically allocate IPs
#           With a valid IPv4 (e.g. '172.16.0.2') the UE will have a statically assigned IP.
#
# Note: Lines starting by '#' are ignored and will be overwritten
ue1,mil,716120000000001,aff0d7814fb7e2e1d10738e3aacbcbe4,opc,6bd993c7f735dbf6dc21dbeb1cd9d5b6,8000,00000000ed8,7,dynamic
ue2,mil,716120000000002,44fabae5cb07bcaae82e91ba04705a3d,opc,a5e23dd2b9d6581612e5bd22456d4b34,8000,00000000112c,7,dynamic

```

*Figura 3.17 - Configuración de usuarios en el software. Fuente: Elaboración propia*

### Fase 5: Configuración del UE

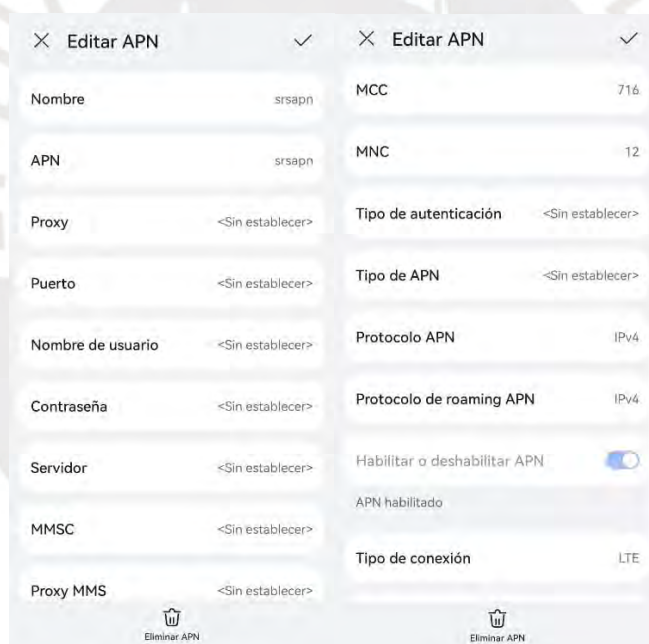
Aquí se inicia la configuración del móvil que actuará como UE, y en este caso, se ha usado uno de los equipos mencionados (Huawei Mate 20 Lite). Para ello, se inserta el SIM programado en el teléfono. Luego, se define un nuevo APN en “Redes móviles”.



*Figura 3.18 - Configuración en “Redes móviles” para el terminal móvil. Fuente: Elaboración propia*

La configuración del APN debe estar de igual forma a los datos configurados en los archivos del eNB y EPC. A continuación, se explican los campos a configurar para la conexión a la red, acompañado de la Figura 3.19, que muestra el ajuste en el equipo móvil:

- ❖ Nombre: En este campo puede ir cualquier nombre.
- ❖ APN: En este campo se debe ingresar el mismo nombre que el APN anterior en la configuración de la base de datos. En este caso, se ha dejado el nombre que aparece en el archivo epc.conf: “srsapn”
- ❖ MCC: 716, código asociado a Perú, contenido en la tarjeta SIM y el archivo de registro (userdb.csv).
- ❖ MNC:12, código de red no asociado a un operador móvil local, en la tarjeta SIM y el archivo de registro.
- ❖ Portadora: LTE, por la tecnología a utilizar y soportada por el equipo móvil.
- ❖ Protocolo: IPv4



**Figura 3.19 - Creación del APN en el terminal móvil . Fuente: Elaboración propia**

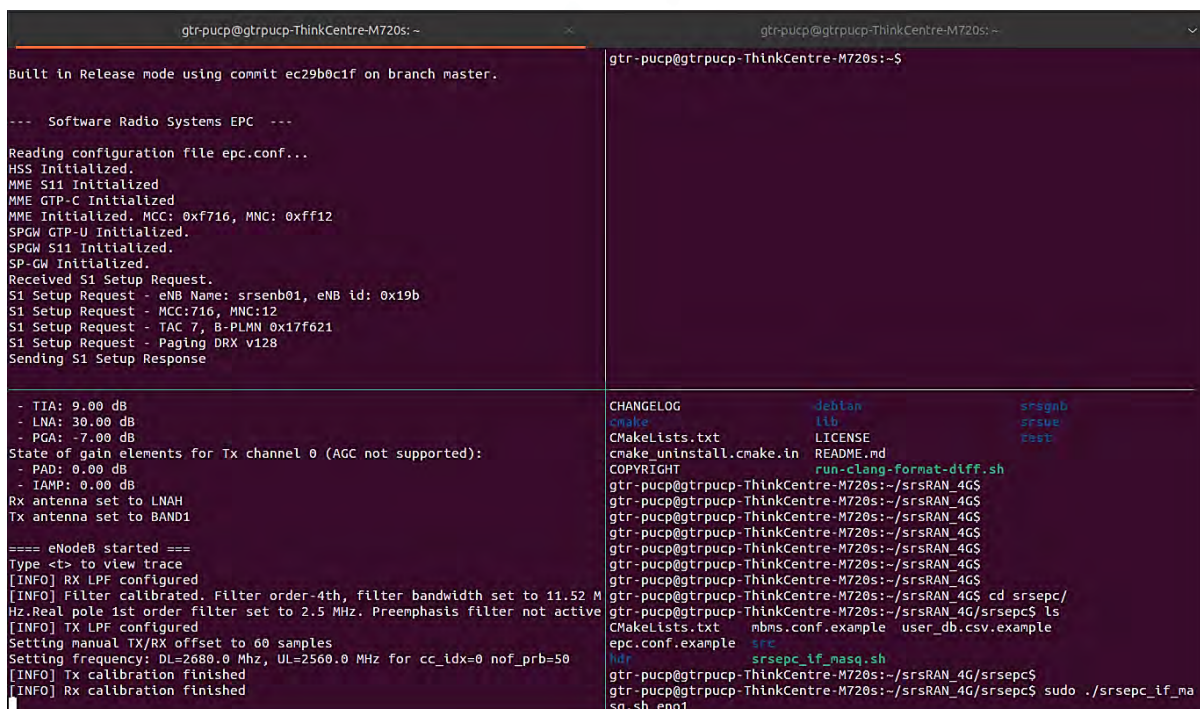
Finalmente, este APN debe aparecer en la lista con el nombre de “srsapn” como se observa en la Figura 3.20.



**Figura 3.20 - Nombre del APN en el terminal móvil . Fuente: Elaboración propia**

## Fase 6: Ejecución del software

Para este último paso, se usa la herramienta de Linux tmux, para ejecutar varios comandos en diferentes ventanas, pero en un solo terminal, y en simultáneo. Se puede instalar usando el siguiente comando: `sudo apt install tmux`. En la Figura 3.21, se muestra la ejecución de los comandos con permisos de administrador, seguido de los resultados que se deben mostrar como salida, una vez que se hayan seguido los pasos anteriores. Se ejecuta primero el EPC, y luego el eNB.



```

gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s: ~
Built in Release mode using commit ec29b0c1f on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

Reading configuration file epc.conf...
HBS Initialized.
MME S11 Initialized
MME GTP-C Initialized
MME Initialized, MCC: 0xf716, MNC: 0xff12
SPGW GTP-U Initialized.
SPGW S11 Initialized.
SP-GW Initialized.
Received S1 Setup Request.
S1 Setup Request - eNB Name: srsenb01, eNB id: 0x19b
S1 Setup Request - MCC:716, MNC:12
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0x17f621
S1 Setup Request - Paging DRX v128
Sending S1 Setup Response

- TIA: 9.00 dB
- LNA: 30.00 dB
- PGA: -7.00 dB
State of gain elements for Tx channel 0 (AGC not supported):
- PAD: 0.00 dB
- IAMP: 0.00 dB
Rx antenna set to LNAH
Tx antenna set to BAND1

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
[INFO] RX LPF configured
[INFO] Filter calibrated. Filter order-4th, filter bandwidth set to 11.52 M
Hz.Real pole 1st order filter set to 2.5 MHz. Preemphasis filter not active
[INFO] TX LPF configured
Setting manual TX/RX offset to 60 samples
Setting frequency: DL=2680.0 Mhz, UL=2560.0 MHz for cc_idx=0 nof_prb=50
[INFO] Tx calibration finished
[INFO] Rx calibration finished

CHANGELOG                               -debian                               srsqnb
cmake                                     lib                                  srsepc
CMakeLists.txt                          LICENSE                             Fast
cmake_uninstall.cmake.in                README.md
COPYRIGHT                                run-clang-format-diff.sh

gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G$ cd srsepc/
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G/srsepc$ ls
CMakeLists.txt  mbms.conf.example  user_db.csv.example
epc.conf.example  src
hdr               srsepc_if_masq.sh
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G/srsepc$
gtr-pucp@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:~/srsRAN_4G/srsepc$ sudo ./srsepc_if_ma
sq.sh eno1

```

**Figura 3.21 - Ejecución de los comandos usando la herramienta tmux. Fuente: Elaboración propia**

Luego, para permitir la salida de los terminales a Internet, se debe ejecutar el siguiente comando (`sudo ./srsepc_if_masq.sh "nombre de interfaz de red"`), para habilitar el IP forwarding y configurar una regla NAT para el sistema [52]. Los terminales móviles al conectarse, se les asigna una dirección IP en el rango 172.16.0.0/24 y se crea una nueva interfaz de red virtual para el tráfico. El software srsRAN cuenta con un comando para este propósito, solo se debe especificar la interfaz de red física de la máquina. Ahora en los equipos móviles se debe escanear la red automáticamente para ver todas las redes disponibles. Si no hay ningún error, debería aparecer la red como "71612". Seleccionamos esa red, y luego de cargar por un

momento, el mensaje que debe salir es:” registrado en la red”, y debe aparecer los símbolos de la red de datos 4G. Podemos verificar que se conectó a la red en Ajustes → Estado del teléfono → Estado → Red, como en la Figura 3.22.



*Figura 3.22 - Escaneo de la red en el terminal móvil (izquierda), y estado de la conexión (derecha). Fuente: Elaboración propia*

Para esta primera solución, se prueba el servicio de voz con Asterisk, un servidor VOIP de código abierto usado para centrales telefónicas privadas, que usa el protocolo SIP. Para su instalación, se usó la siguiente referencia, donde se explican los comandos a ejecutar [63]. Una vez instalado el servidor en la PC, se procede a realizar la configuración de 2 archivos en particular: extensions.conf y pjsip.conf en la ruta /etc/asterisk, con permisos de administrador para la edición. Los parámetros a editar de ambos archivos se encuentran en el Anexo B5, donde se han creado 2 extensiones de prueba (100 y 200). Luego, se detiene el servicio, inmediatamente se reinicia, y luego se puede verificar el estado con el comando de la Figura 3.23.

```

root@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:/home/gtr-pucp# systemctl status asterisk
● asterisk.service - LSB: Asterisk PBX
   Loaded: loaded (/etc/init.d/asterisk; generated)
   Active: active (running) since Fri 2024-10-18 20:22:14 -05; 4 days ago
     Docs: man:systemd-sysv-generator(8)
    Tasks: 35 (limit: 18749)
   Memory: 61.9M
         CPU: 1h 15min 6.572s
   CGroup: /system.slice/asterisk.service
           └─3258 /usr/sbin/asterisk -U asterisk -G asterisk

oct 18 20:22:14 gtrpucp-ThinkCentre-M720s systemd[1]: Starting LSB: Asterisk PBX...
oct 18 20:22:14 gtrpucp-ThinkCentre-M720s asterisk[3234]: * Starting Asterisk PBX: asterisk
oct 18 20:22:14 gtrpucp-ThinkCentre-M720s asterisk[3234]:   ...done.
oct 18 20:22:14 gtrpucp-ThinkCentre-M720s systemd[1]: Started LSB: Asterisk PBX.
root@gtrpucp-ThinkCentre-M720s:/home/gtr-pucp#

```

*Figura 3.23 - Estado del servicio de Asterisk ejecutándose correctamente. Fuente: Elaboración propia*

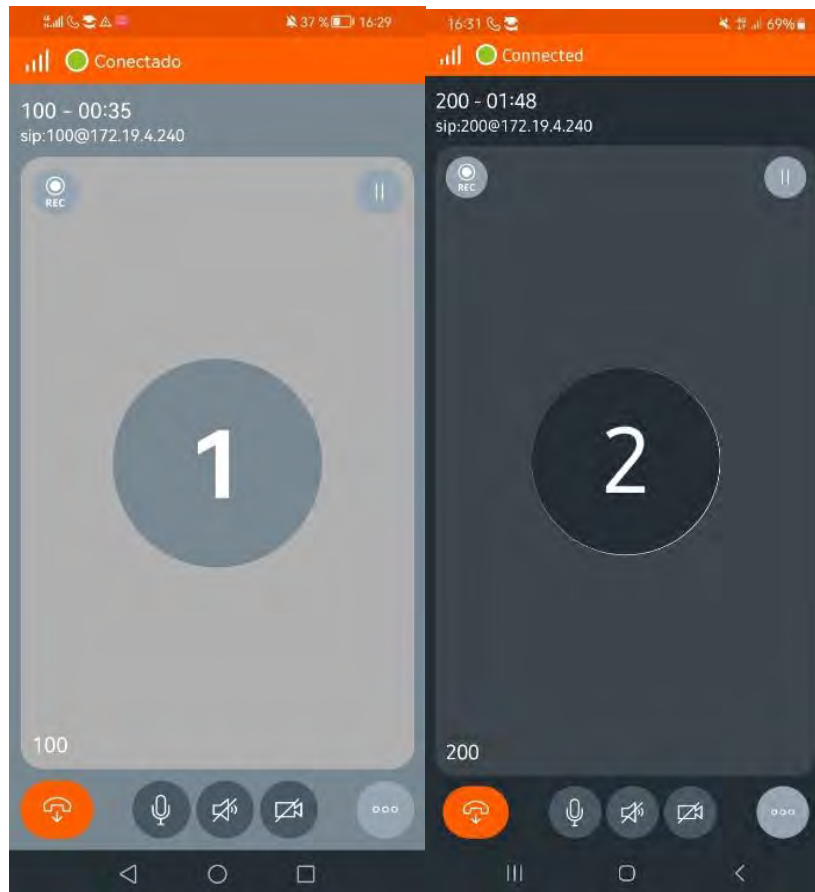
Ahora en los terminales móviles, se necesita el uso de una aplicación softphone para la prueba con Asterisk, como Zoiper, 3CX, entre otros. En este caso, para una mayor facilidad, se instala la aplicación Linphone, usado en los laboratorios del curso de Redes en este último año para temas vistos con VOIP, que se puede descargar del *Play Store*. Después, se debe crear una cuenta SIP con los siguientes parámetros de configuración de nuestro servidor en ambos equipos:

**Nombre: 100**

**Contraseña: gtrpucp**

**Dirección IP servidor: 172.19.4.240**

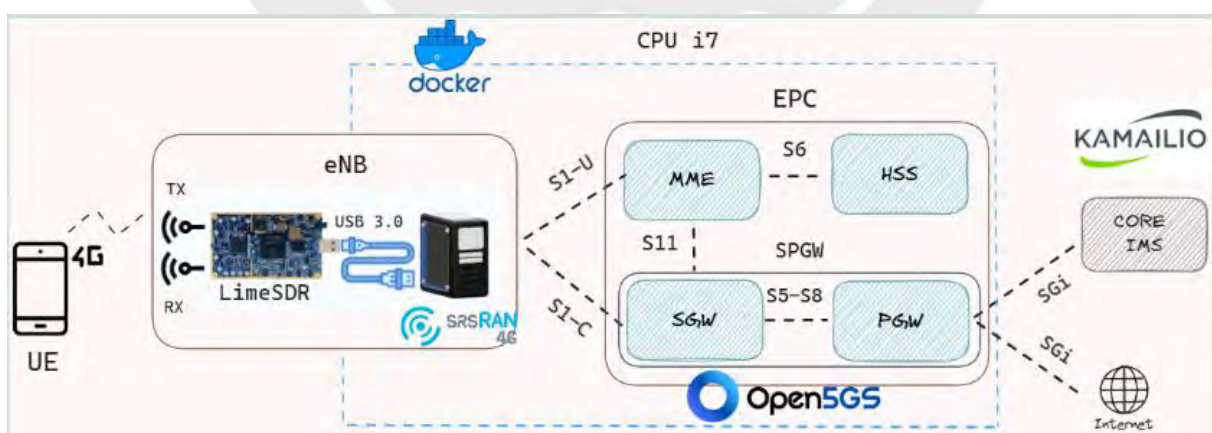
Luego se hace clic en “Aceptar”, y así la extensión debe quedar conectada. Para el caso de la segunda extensión, solo cambia el nombre por 200. Los demás parámetros se mantienen para facilidades. Para finalizar, se realiza una llamada de prueba, desde la extensión 100 a la 200, donde en la Figura 3.24 se establece la llamada VOIP en la red LTE.



*Figura 3.24 - Llamada establecida VOIP. Fuente: Elaboración propia*

En los Anexos J1 y J2, se encuentra una prueba de los parámetros de las estadísticas sobre la llamada en curso entre ambos anexos.

### 3.4.2.3 Instalación y configuración con VoLTE



*Figura 3.25 - Arquitectura de la solución VOLTE. Fuente: [74]*

Para llevar a cabo la implementación del prototipo de la estación base 4G-LTE basada en SDR, se desarrolló un proceso dividido en tres fases principales, estructuradas de la siguiente manera:

### Fase 1: Preparación del servidor

Se implementó todo el entorno de red en un único equipo con procesador Intel Core i5, 16 GB de RAM y sistema operativo Linux Ubuntu 22.04 LTS (64 bits). Se decidió esta configuración debido a la disponibilidad de hardware y para facilitar la gestión centralizada del sistema.

### Fase 2: Instalación de los contenedores Docker

Para la prueba del prototipo, se debe contar con una red 4G (eNB, EPC y un servidor IMS). Por lo tanto, se descargó un repositorio en GitHub (docker\_open5gs) que a través de un entorno Docker permite crear contenedores independientes para cada componente de la red (EPC con Open5GS, eNB con srsRAN, IMS con Kamailio). Los pasos clave incluyeron:

- Instalación de Docker y Docker-Compose.
- Creación de un archivo “.env” con los parámetros clave de la red (MNC, MCC, APN).
- Construcción de las imágenes de los servicios.
- Previamente, a esta segunda fase, se debe realizar la instalación de paquetes/librerías para la correcta instalación del software en un repositorio de GitHub, los cuales se detallan en el flujo de la Figura 3.26

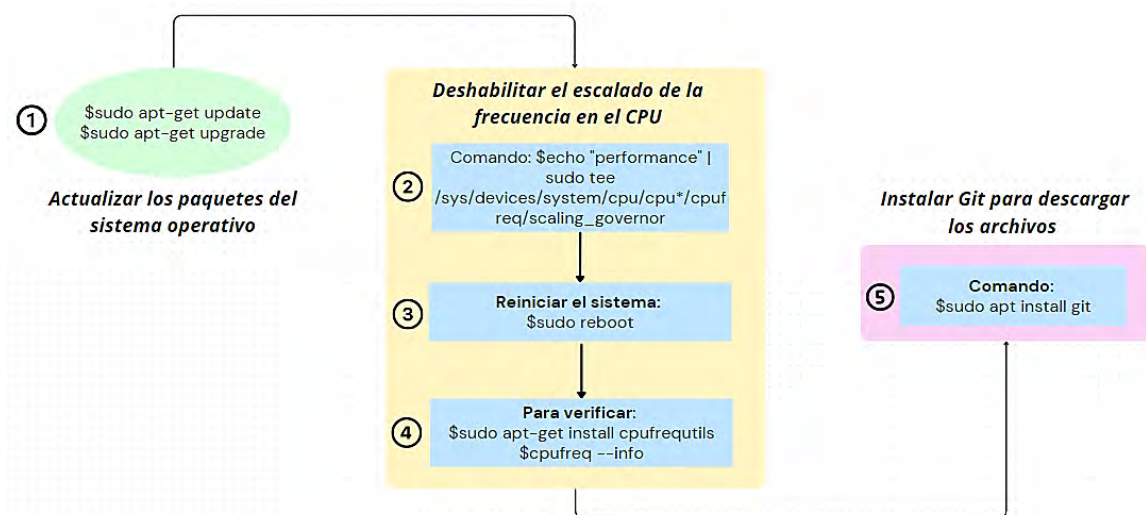


Figura 3.26 - Pasos previos para la solución VoLTE. Fuente: [74]

Mientras que, en la Figura 3.27, se empieza construyendo las imágenes de Docker para los servicios a partir de los repositorios en GitHub, y también en el Anexo C1 [61]:

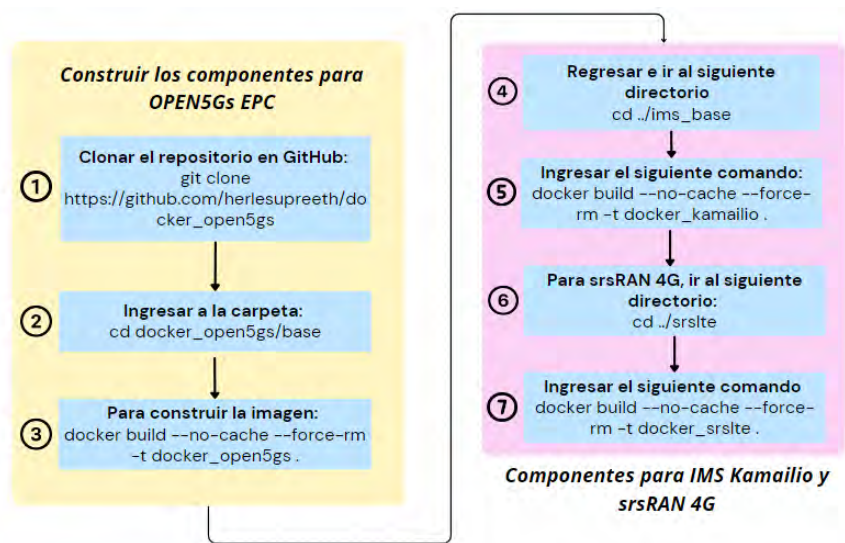


Figura 3.27 - Construcción de las imágenes para la solución VoLTE. Fuente: [61], [74]

Para construir las imágenes Docker adicionales, se usan los comandos de la Figura 3.28 [61]:

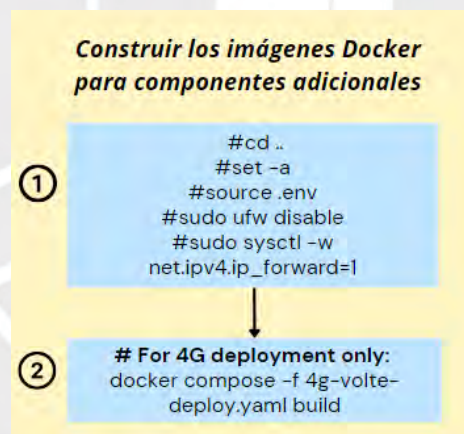
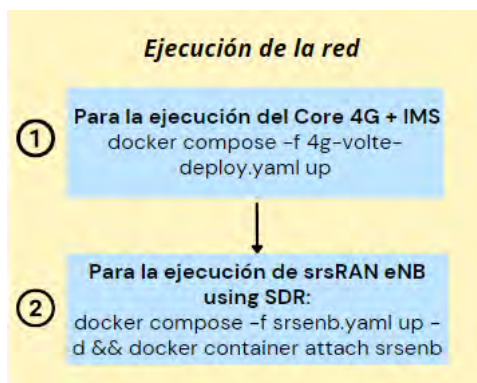


Figura 3.28 - Despliegue de la solución VoLTE. Fuente: [61], [74]

Después de aplicar y guardar los cambios, se procede a ejecutar los comandos mostrados en la Figura 3.29, distribuyéndolos en distintas ventanas de terminal para llevar a cabo la ejecución de la red [61].



*Figura 3.29 - Ejecución de los componentes de IMS, Core 4G y srsRAN. Fuente: [61], [74]*

### Fase 3: Configuración de Open5GS (Core LTE)

Se implementó Open5GS como núcleo de la red LTE, proporcionando las funciones de MME, SGW y PGW. La configuración incluyó:

- La creación de los parámetros de la SIM en Open5GS, con IMSI, Ki, OPC. En la Figura 3.30 se muestra un ejemplo de la creación del SIM, con los parámetros a configurar:

001010000000001

Subscriber Configuration

8617330428934497 ---IMESV	SERVICE_GRANTED (0) --- Subscriber Status (TS 29.272 7.3.29)	mme.epc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org ---MME Hostname
aff0d7814fb7e2e1d10738e3aacbce4 ---K	0 ---Operator Determined Barring (TS 29.272 7.3.30)	epc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org --- MME Realm
6bd993c7f735dbf6dc21ddeb1cd9d5b6 ---OPc		Not Purged ---UE is Purged at MME
8000 ---AMF		1 Gbps ---DL
1494 ---SQN		1 Gbps ---UL

SST:1 (Default S-NSSAI)

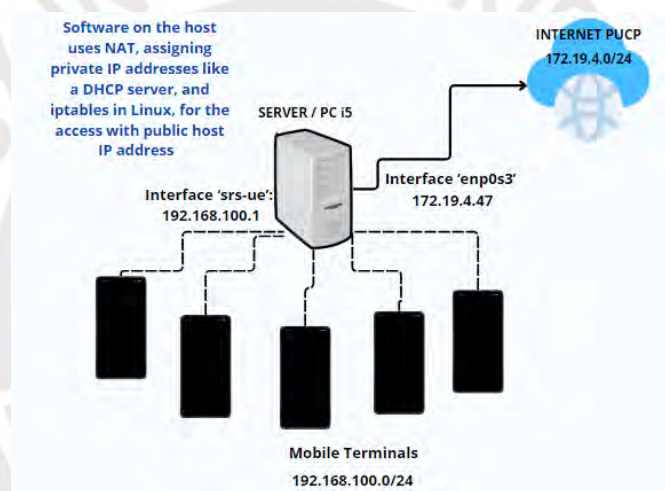
DNN/APN	Type	5QI/QCI	ARP	Capability	Vulnerability	MBR DL/UL	GBR DL/UL
internet	IPv4	9	8	Disabled	Disabled	1 Gbps / 1 Gbps	
ims	IPv4	5	1	Disabled	Disabled	3850 Kbps / 1530 Kbps	
		1	2	Enabled	Enabled	128 Kbps / 128 Kbps	128 Kbps / 128 Kbps
		2	4	Enabled	Enabled	128 Kbps / 128 Kbps	128 Kbps / 128 Kbps

*Figura 3.30 - Configuración del primer SIM en Open5GS. Fuente: Elaboración propia*

- Para la configuración de rangos IP para los APN de Internet y VoLTE, se puede desplegar de dos formas:
  - eNB y (EPC+IMS) /Open5GS se despliegan en un único equipo host, o multihost en la que el eNB se despliega en un equipo distinto del (EPC+IMS) /Open5GS [61]. Debido a la cantidad de equipos disponibles, se escoge la primera

alternativa, la cual se configura en el archivo “.env”, considerándose los siguientes parámetros:

- MCC: 001 / MNC: 01 → Se utilizaron estos valores por ser estándares de pruebas, para evitar conflictos con operadores comerciales y para habilitar VoLTE.
- Rango de direcciones IP: 192.168.100.0/24 para APN de Internet y 192.168.101.0/24 para VoLTE, los cuales son asignados a los terminales móviles, además de indicar que para la salida a Internet a través de una de las interfaces físicas del computador con el segmento 172.19.4.0/24, según la Figura 3.31.



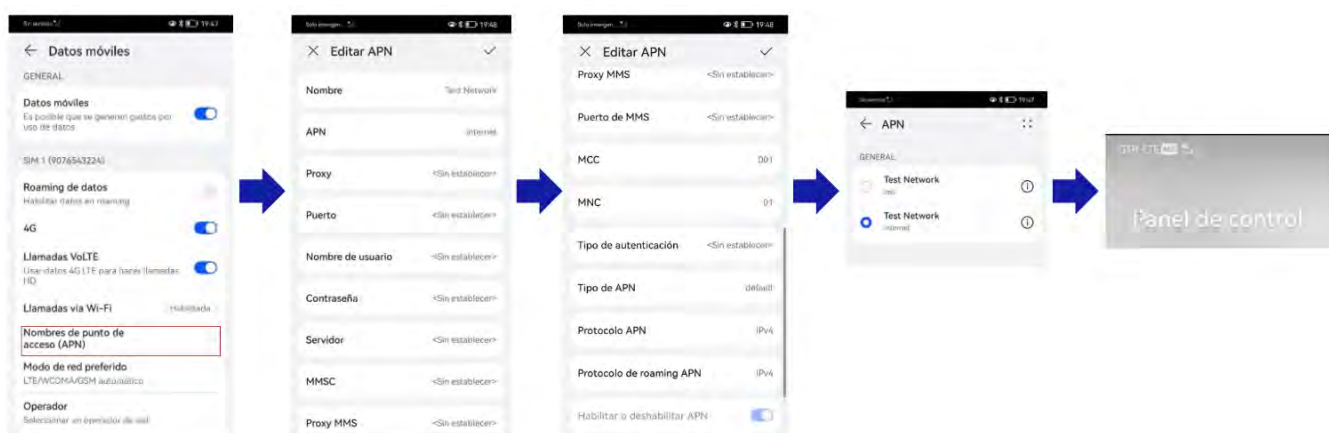
*Figura 3.31 - Esquema de direccionamiento de la red del software instalado. Fuente: [74]*

- Para un segundo SIM, se sigue el proceso anterior. A continuación, se muestra el registro de 2 tarjetas en la Figura 3.32:



*Figura 3.32 - Configuración de ambos SIM en Open5GS. Fuente: Elaboración propia*

- Registro del IMSI y MSISDN en OsmoHLR, detallado para ambos SIMs en el Anexo C2. Luego de ello, se debe indicar los parámetros de estas tarjetas SIM en el PyHSS, base de datos relacionada con el servidor IMS. En el Anexo C3, se explican los pasos para un SIM; para añadir más tarjetas, cambiar los parámetros IMSI, MSISDN, etc.
- Creación de los APNs, uno para Internet y otro para IMS, en los teléfonos móviles. Finalmente, el terminal se conecta a la red, con la opción de VOLTE activada por defecto. El nombre de la red en este caso es “GTR-LTE”.



*Figura 3.33 - Creación de APNs (Internet y ims) para terminal móvil. Fuente: Elaboración propia*

### 3.4.3 Subsistema de energía

Dada la necesidad de garantizar el suministro eléctrico confiable en zonas rurales o aisladas, donde no existe acceso a la red eléctrica convencional o su conexión implica altos costos e infraestructura compleja, se opta por una solución fotovoltaica como alternativa energética sostenible. En particular, se selecciona un sistema fotovoltaico del tipo off-grid, ya que permite total independencia de la red pública, asegurando autonomía energética. A diferencia de los generadores diésel, que requieren combustible constante, generan ruido y emisiones contaminantes, la energía solar es limpia, renovable y de bajo mantenimiento a largo plazo. Asimismo, a diferencia de los sistemas on-grid, que dependen de la presencia de una red eléctrica para funcionar y no garantizan autonomía en caso de fallos, el sistema off-grid ofrece

mayor robustez en contextos remotos. Esta configuración incluye paneles solares, un controlador de carga, que regula el flujo de energía hacia las baterías; un banco de baterías (de plomo-ácido, por su menor costo, o de litio, por su mayor densidad energética y vida útil); y un inversor, que convierte la corriente continua (DC) de las baterías a corriente alterna (AC) para alimentar dispositivos. Por tanto, para este sistema, primero se calcula el consumo promedio de los componentes usando un equipo medidor, resumido en la Tabla 3.9. El análisis energético muestra que la demanda diaria total del sistema asciende a 4,291.2 Wh/día, considerando un 20% adicional por pérdidas de conversión, almacenamiento y cableado. Para suplir esta demanda, se ha dimensionado un campo fotovoltaico compuesto por 3 paneles solares de 500 Wp cada uno, los cuales, bajo condiciones de radiación solar mínima (4.27 horas pico solares diarias en el mes más crítico), son capaces de generar 6,405 Wh/día. Esto da una relación carga/descarga de 1.49, lo cual garantiza que incluso en condiciones climáticas desfavorables el sistema puede sostener la operación de los equipos, generando un 49% más energía de la estrictamente requerida. En cuanto al almacenamiento, se ha configurado un banco de baterías con 10 unidades de 100 Ah a 12 V, lo que proporciona una capacidad total de 12,000 Wh. Considerando una profundidad de descarga del 80%, se cuenta con 9,600 Wh de energía útil, lo que permite una autonomía de 2.2 días sin generación solar. Esto es especialmente importante para asegurar continuidad durante días nublados o lluviosos. Este cálculo se realizó de acuerdo a lo sugerido por el Ministerio de Energía y Minas [12].

**Tabla 3.9 - Cálculo de la cantidad de paneles y baterías. Fuente: Elaboración propia**

Cargas	Cantidad	Horas	Potencia (W)	Constante	W-h/día
Estacion base LTE	1	24	50.0	1	1,200
Inversor	1	24	8.5	1	204
Satelite Starlink	1	24	90.0	1	2,160
Controlador solar	1	24	0.5	1	12

Total energía necesaria en un día **3,576 w-h/día**

Perdidas **1.2 %**

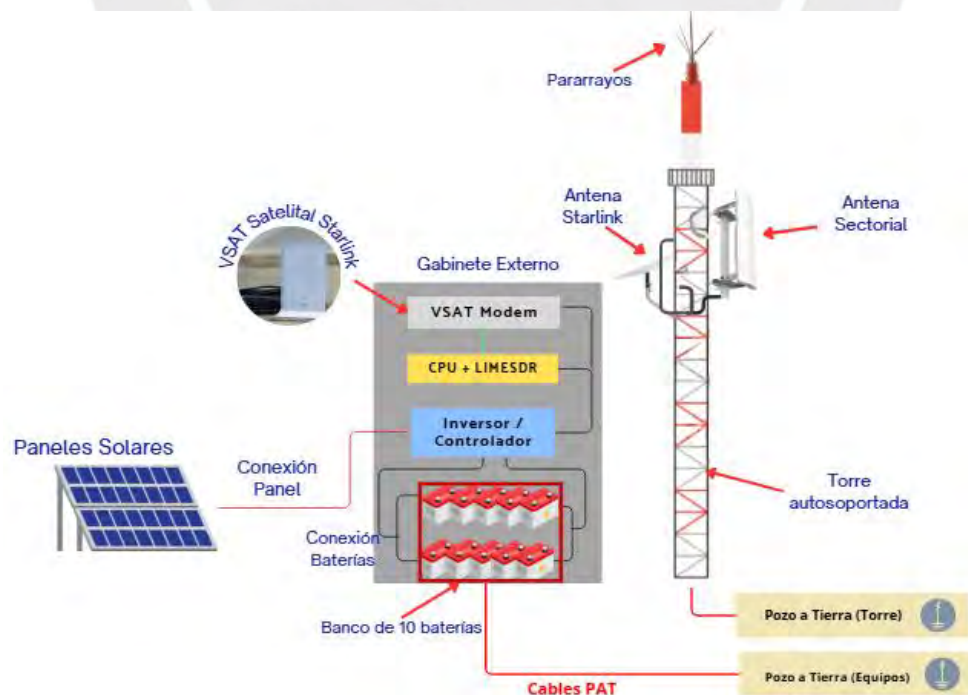
Total energía necesaria en un día **4,291.2 w-h/día**

Numero de paneles	<b>3</b>
Potencia pico del modulo	500 Wp
Radiacion a 1000w/m2(peor mes) en horas	4.27 h/día
Total energía generada	6,405 w-h/día
Relacion carga/descarga	<b>1.49</b>

Numero de Baterías	<b>10</b>
Capacidad de una bateria	100 Ah
Voltaje de bateria	12 V
Capacidad de banco de bateria	12,000 w-h
Profundidad de descarga	0.8
Dias de autonomia	<b>2.2</b>

### 3.4.4 Subsistema de infraestructura y protección eléctrica

En cuanto al **sistema de infraestructura**, estará compuesto por una torre y un gabinete *Outdoor* con grado de protección IP65. En el gabinete se alojarán los equipos principales, que incluyen la estación base LTE (compuesta por una PC, LimeSDR, ver Figura 3.34) además de las baterías necesarias para su funcionamiento. En cuanto a la torre, sería del tipo autoportada, y además la altura, que se ha definido en 12 metros. Esta decisión responde a las características de los entornos rurales, donde la mayoría de las viviendas suelen ser de un solo piso, con alturas promedio de entre 4 y 5 metros. La estructura autoportada también ofrece ventajas como mayor estabilidad mecánica y menor espacio en el terreno, al no necesitar tensores o anclajes, lo cual es útil cuando se dispone de áreas con difícil acceso. La torre deberá cumplir con los estándares establecidos por la norma E.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) del Perú, referente a cargas por viento [13], y también la norma TIA/EIA-222-H, que regula el diseño estructural de torres para telecomunicaciones [14]. Sobre el subsistema de **protección eléctrica**, de acuerdo a sugerencia del CNE en zonas rurales [10], se considerará un pozo a tierra con una resistencia por debajo de 5 *Ohmios*, y un sistema de pararrayos.



*Figura 3.34 - Diseño del subsistema de energía, infraestructura y protección eléctrica para la estación base. Fuente: Elaboración propia*

## Capítulo 4. Evaluación integral: Viabilidad técnica, económica, legal y ambiental de la propuesta desarrollada

### 4.1 Resumen de las características de la solución

La solución plantea una estación base LTE, a partir del uso de la tecnología SDR, con equipos de bajo costo, y el software Open Source, para brindar el acceso al servicio móvil en las zonas rurales con baja densidad poblacional, con los servicios de voz e Internet. En la Tabla 4.1, se describe las características detalladas de la solución.

Tabla 4.1 - Características de la solución. Fuente: [60]

Campo	Descripción
SDR	Hardware: Uso del equipo LimeSDR para transmisión y recepción de señales
	Software Open Source: srsRAN, Open5GS y Kamailio como plataformas de código. Además, el uso de Asterisk como servidor VOIP.
Máquinas para ejecución	Por lo menos un equipo para la instalación y ejecución del código, que cumpla con los mínimos requerimientos
Tarjetas SIM LTE	Para la conexión del terminal móvil a la red LTE en ejecución, se debe configurar con los parámetros propios, y también para el servicio VoLTE.
Antenas	Son el medio por el cual el equipo móvil realiza la conexión para el acceso al servicio de telefonía 4G
Materiales adicionales	Uso de un cable 3.0 para la conexión física entre el LimeSDR y la máquina, y un cable Ethernet para la salida Internet.
Energía e infraestructura	Energía fotovoltaica e infraestructura con equipos de bajo costo.

## 4.2 Análisis económico y financiero

Esta evaluación es fundamental para analizar la viabilidad y sostenibilidad en las zonas rurales de una estación base celular 4G-LTE basada en SDR. El enfoque económico se centra en desglosar los costos en cuatro subsistemas: telecomunicaciones, energía, infraestructura y protección eléctrica, identificando áreas críticas para optimizar recursos y maximizar el impacto en comunidades con acceso limitado a la conectividad. Por su parte, el análisis financiero propone alternativas que garanticen la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

### 4.2.1 Análisis económico

Algunas consideraciones son: a la fecha que se realizaron los cálculos de los precios (09/06/2025), la tasa de cambio de sol a dólar fue de 3,65 soles, y se trabaja con esa tasa de cambio de referencia, y consideran los gastos de importaciones. La sigla PU que se verán en las siguientes tablas significa “Precio unitario”.

#### 4.2.1.1 Subsistema de telecomunicaciones

En este apartado, se calcula el precio unitario aproximado de cada equipo a utilizar para la solución propuesta, así como la suma total de todos los componentes, en la Tabla 4.2:

*Tabla 4. 2 - Costos de equipos de telecomunicaciones. Fuente: Elaboración propia*

Ítem	Descripción	Cantidad	PU	Subtotal
1	Equipo LimeSDR	1	\$1 350,00	S/ 4 927,50
2	Pack de 5 tarjetas USIM LTE + lectora	1	\$120,00	S/ 438,00
3	CPU i7 16 GB RAM	1	S/ 2 000,00	S/ 4 000,00
4	Tarjetas SIM adicionales	10	\$15,00	S/ 547,50
5	Antena Starlink	1	S/ 1 450,00	S/ 2 900,00
6	Accesorios adicionales (Cable USB 3.0)	1	S/ 30,00	S/ 30,00
7	Antena Sectorial UBIQUITI 2X2 MIMO 2.4GHz	1	S/ 639,00	S/ 639,00
			<b>TOTAL</b>	<b>S/ 13 482,00</b>

En cuanto a estos precios, se justifican en base a lo siguiente:

- ❖ El costo del equipo LimeSDR es de una empresa local de importaciones. También se adquirió 1 pack de 5 tarjetas, lectora y programa, adicionalmente de 10 tarjetas SIM, para conectar más dispositivos móviles. La cotización se encuentra en el Anexo M (pág. 125).
- ❖ Se cotiza el precio aproximado de un CPU con las características requeridas para la ejecución del software (memoria, almacenamiento, tipo de procesador).
- ❖ El costo de la antena de Starlink es aproximadamente de S/ 1 450 [67].

#### 4.2.1.2 Subsistema de energía

En cuanto al sistema de suministro energético, se optó por una solución basada en energía fotovoltaica, al ser una alternativa técnicamente viable y eficiente para entornos rurales que carecen de acceso a la red eléctrica. Esta opción permite garantizar varios días de autonomía ante posibles interrupciones o eventualidades. El resumen de los costos correspondientes a cada componente de este subsistema se encuentra en la Tabla 4.3:

*Tabla 4. 3 - Costos de equipos de energía. Fuente: Elaboración propia*

Ítem	Descripción	Cantidad	PU	Subtotal
1	Panel solar 500 Wp	3	S/ 579,66	S/ 1 738,98
2	Inversor / Controlador 3000W 24VDC	1	S/ 446,60	S/ 446,60
3	Batería 12 VDC 100 Ah	10	S/ 438,06	S/ 4.380,60
4	Soporte panel solar	1	S/ 386,90	S/ 386,90
			<b>Total</b>	S/ 6 953,08

Las cantidades de cada componente son acordes a lo calculado en el capítulo 3 sobre el dimensionamiento del sistema de energía. Los precios han sido cotizados en el Anexo M (pág. 123).

#### 4.2.1.3 Subsistema de infraestructura

A continuación, se indican los precios de los componentes asociados a las estructuras en la siguiente tabla:

*Tabla 4. 4 - Costos de equipos de infraestructura. Fuente: Elaboración propia*

Ítem	Descripción	Cantidad	PU	Subtotal
1	Gabinete de Piso para Exterior	1	S/ 2 000,00	S/ 4 000,00
2	Torre de 10 metros	1	S/ 2 492,00	S/ 2 492,00
3	Soporte para antenas	3	S/ 93,75	S/ 281,25
			<b>TOTAL</b>	S/ 6 773,25

Para un cálculo estimado de estos precios, para el primer componente, el gabinete, se ha previsto que alcanzaría tanto para el alojamiento del servidor físico como para la cantidad de baterías, y estaría debajo de la torre, por lo tanto, dicho gabinete tiene el costo aproximado, según la cotización de una importadora local (Anexo M, pág. 124 y 127).

#### 4.2.1.4 Subsistema de protección eléctrica

Similar al caso anterior, se detallan los costos de los equipos de protección eléctrica, considerando un pararrayos encima de la torre, y el precio de un pozo a tierra (Anexo M, pág. 127) considerando 2 pozos, uno para el pararrayos y otro para los equipos, y se recomienda una resistencia menor a 10 Ohm según el CNE:

*Tabla 4. 5- Costos de equipos de protección eléctrica. Fuente: Elaboración propia*

Ítem	Descripción	Cantidad	PU	Subtotal
1	Pozo a tierra vertical, con pararrayos tetrapuntal	2	S/ 1 615,00	S/ 3 230,00
			<b>TOTAL</b>	S/ 3 230,00

#### 4.2.1.5 Costos totales

Finalmente, el costo total del prototipo en un entorno rural sería el siguiente:

*Tabla 4. 6 - Costos totales. Fuente: Elaboración propia*

Resumen Presupuestal		Subtotales (S/.)
Recursos Humanos		S/ 10 050,00
Servicios logísticos		S/ 2 000,00
Equipos y Materiales		S/ 36 767,58
<b>Presupuesto</b>	<b>CAPEX</b>	<b>S/ 48 817,58</b>

La justificación de los costos de “Recursos humanos” y “Servicios logísticos” se adjuntan en el Anexo N. La sección de “Equipos y Materiales” es la suma de los costos totales de los 4 subsistemas.

#### 4.2.2 Análisis financiero

En cuanto al análisis financiero, una vía de financiamiento sería presentar el prototipo a un Operador Móvil de Infraestructura Rural (OIMR) o como parte de un acuerdo con un Operador Móvil Virtual (OMV), permitiendo realizar pruebas piloto en comunidades pequeñas. También es recomendable postular a fondos de investigación del sector público o privado, que puedan respaldar el desarrollo tecnológico y su validación en campo. Si el prototipo logra mejoras en la estabilidad de red, acceso a internet y calidad de llamadas, se podría implementar bajo un modelo comunitario de redes gestionadas localmente, mediante acuerdos con la comunidad para establecer un cobro simbólico por el servicio, adaptado a su capacidad económica. Para estimar la viabilidad del modelo, deben considerarse los costos mensuales de operación, como el servicio de internet satelital Starlink (S./140 / mes), y proyectar los ingresos mensuales, considerando referencialmente los planes pospago más bajos por cada operador móvil (Anexo L), con lo cual se calcula la rentabilidad esperada de la solución a través de parámetros como el VAN, TIR, IR; presentando la información en la siguiente tabla:

*Tabla 4. 7 - Resultados del cálculo del VAN, TIR, IR. Fuente: Elaboración propia*

WACC	CCPP	11,00%
	VAN	S/ 2 506,22
	TIR	13,02%
	IR	1,05

El cálculo se explica a detalle en el Anexo O, se consideran 55 usuarios y un plan de tarifa de bajo costo, según el Anexo L (de 30 soles), y en base a esto se calculan los ingresos por ventas en ese año. Los gastos incluyen el costo del servicio Starlink y el mantenimiento. Se obtiene un VAN positivo, lo que indica que el proyecto genera un valor adicional respecto al costo del capital invertido. Esto significa que, descontando los flujos futuros al WACC, el proyecto dejaría un excedente de S/ 2 506,22, lo cual es favorable. El TIR es mayor que el WACC (13,02% > 11,00%), lo que refuerza la viabilidad del proyecto. Esto sugiere que el

retorno esperado supera el costo de financiarlo, lo cual es clave para decidir su ejecución. Un IR (Índice de Rentabilidad) mayor a 1, implica que, por cada sol invertido, se obtiene un retorno de S/ 1,05, lo que significa una rentabilidad baja para la solución en un entorno rural. Desde una perspectiva, lo ideal sería entablar alianzas con entidades públicas, como PRONATEL o los gobiernos regionales; o de cooperación internacional como el BID.

### **4.3 Análisis de idoneidad ambiental y sostenibilidad**

En el capítulo anterior se diseña un sistema de energía que se basa en el uso de paneles fotovoltaicos para la estación base. Desde el punto de vista ambiental, no se produce ningún efecto negativo en la comunidad rural y alrededores, ya que se aprovecha la luz solar como medio para la alimentación de los equipos un sistema de energía de menor costo. La sostenibilidad de la solución dependería del encargado quien tome el proyecto de un futuro despliegue a cabo, ya sea de una entidad del Estado o del sector privado, que garantice su operación y mantenimiento, principalmente para que la población beneficiada continúe recibiendo la conectividad a dicho servicio móvil. Además de ello, para las propuestas de los sistemas de energía e infraestructura se incluyen la cantidad de equipos y materiales esenciales para duración prolongada o en caso pase algún imprevisto.

## **4.4 Análisis de idoneidad social y cultural**

### **4.4.1 Beneficiarios directos e indirectos**

El beneficio principal para la población es el acceso a la telefonía móvil 4G, incluyendo voz e Internet. Con esto, se logra de alguna manera cerrar la brecha digital en nuestro país, para el aporte a la conectividad y comunicación de estas comunidades, tanto interna como externamente, que incluye la mejora a nivel económico, social, educativo, entre otros, y la calidad de vida de los ciudadanos. Para el caso de los indirectos (operadoras móviles), sirve como una solución a la conectividad en las zonas donde no existe infraestructura móvil, y generar una ganancia económica en estas poblaciones. Las instituciones públicas locales pueden ver un impacto positivo para integrarse al acceso a Internet, o en todo caso, con el uso de sus infraestructuras para la instalación de la solución, por ser un lugar principal a donde mayormente las personas acceden.

## **4.5 Análisis de idoneidad frente a la salud y el bien público**

### **4.5.1 Salud**

En cuanto a la salud, se sabe que las señales de RF no afectan a la población, ya que trabajan en un rango de frecuencia menor a la de los rayos Gamma, que son los más radiactivos para el ser humano a largas duraciones. Lamentablemente, a pesar de las publicaciones y conferencias de la OMS sobre este tema, cierta población todavía continúa con la creencia de que dichas señales transmitidas por las antenas producen enfermedades como el COVID-19. Esto es un punto de tema a conversar con la población para la concientización y la importancia que trae una solución para reducir la falta de acceso a la conectividad.

### **4.5.2 Seguridad**

Sobre esta sección, la solución cuenta con diferentes configuraciones desde distintos niveles para evitar problemas en los componentes de la red. A nivel del Core, se pueden realizar

configuración usando protocolos como TLS para la señalización en el software Open5GS y Kamailio. Además, entre la estación base y el Core, se puede usar IPSec para la seguridad en esta interfaz. También es necesaria un nivel de autenticación en la base de datos de Kamailio y Open5GS. A nivel de acceso, es importante realizar la protección en el hardware SDR a través de una interfaz que permita monitorear algún parámetro que pueda variar y no sea normal.

Para los subsistemas de energía e infraestructura, se debería proteger físicamente todos los equipos que se encuentren al interior y exterior del gabinete. Esto puede ser a través de un cerco perimétrico que incluya a la torre y el gabinete, y así evitar cualquier inconveniente relacionado a actos de robo y vandalismo.



## **Capítulo 5. Resultados y pruebas del prototipo**

Para las pruebas se explican las siguientes consideraciones:

Se realizaron en dos entornos distintos: uno dentro de la oficina del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR), y otro en el sexto piso del pabellón O (azotea). El primer lugar se escogió en base a la interferencia y realizar un primer ensayo de las pruebas, mientras que el segundo se elige por ser un lugar abierto y con línea de vista para simular un entorno rural.

En el ambiente de laboratorio, se probó con diferentes modelos de antenas, unas de tipo directivas, y otras dos de tipo omnidireccional, con diferencia en los valores de ganancia, mientras que en la azotea se usaron las antenas que dieron los mejores resultados en el primer lugar de prueba. Por temas de espacio, en este capítulo se pondrá solo los resultados de un tipo de antena. Las demás pruebas y sus resultados se pueden ver en el Anexo D.

La cantidad de equipos celulares que se han podido conseguir es limitada, alrededor de 5 teléfonos móviles de la marca Huawei, ya que tienen la opción habilitada del servicio de VOLTE sin requerir de ningún permiso de parte de un operador en su configuración interna. En la Tabla 5.1 se muestran los tipos de celulares usados:

*Tabla 5.1 - Modelos de celulares Huawei usados para pruebas. Fuente: [74]*

Modelo	Descripción	Bandas de frecuencia en LTE
Mate 20 Lite	Uso para datos y voz	7, 12, 18, 19, 28
P30 Lite LP		1, 3, 4, 7, 8, 20
P Smart 2019		1, 3, 7, 8, 20
P30 Lite CP		1, 3, 4, 7, 8, 20
Y7 2017	Equipo de monitoreo	1, 3, 7

Para la medición de los parámetros importantes, se han utilizado herramientas como “htop”, por ejemplo para ver el porcentaje usado del servidor por los procesos de la ejecución del software, y aplicaciones móviles como OpenSignal y G-NetTrack, para medir los valores de tasa de bajadas, subida, latencia y valores de recepción en el móvil (RSRP); Signal Spy para medir la calidad de la señal en las llamadas de voz; y Ping Tools para observar la respuesta de la conexión de los teléfonos hacia el servidor.

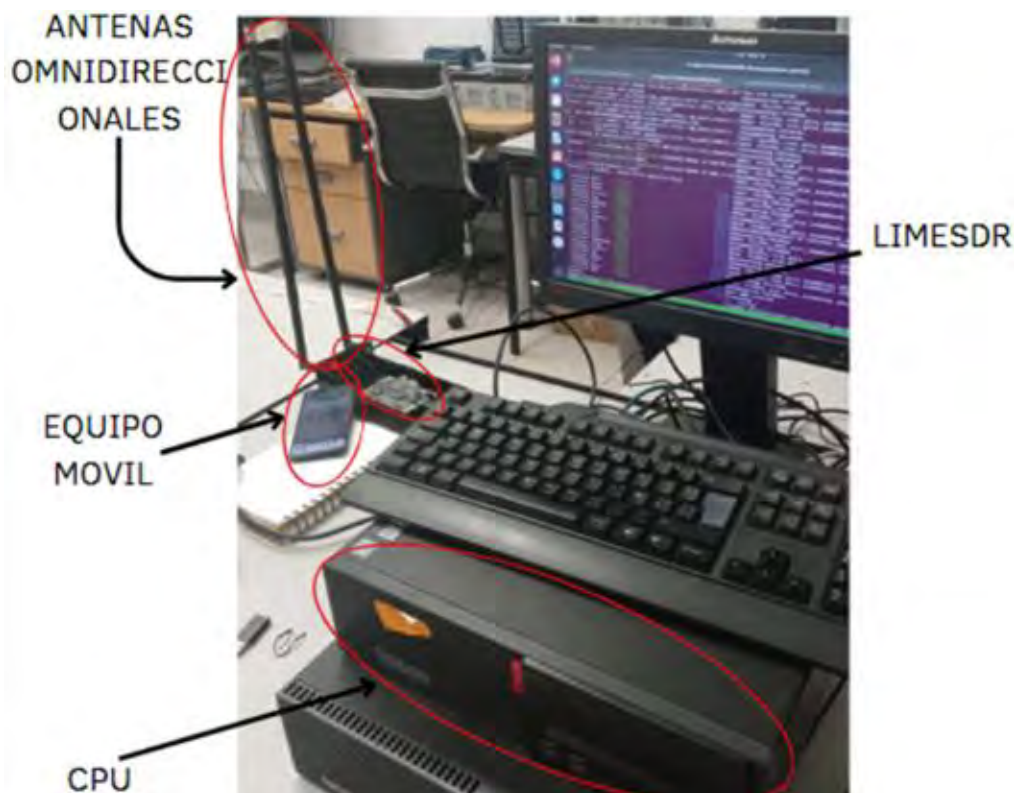
Con respecto a la banda de frecuencia a trabajar, por la Tabla 5.1, para este caso se usa la número 7, debido a la coincidencia en los teléfonos de la lista. Cabe detallar que se podría trabajar con otra banda, pero no se lograría una conexión entre todos los equipos.

**En interiores (Ambiente de laboratorio):**

**Usando antenas omnidireccionales, con ganancia de 10 dBi:**



*Figura 5.1 - Antenas omnidireccionales de 10 dBi de ganancia. Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5.2 - Entorno de pruebas (CPU + LIMESDR + Antenas + Teléfono móvil). Fuente: Elaboración propia*

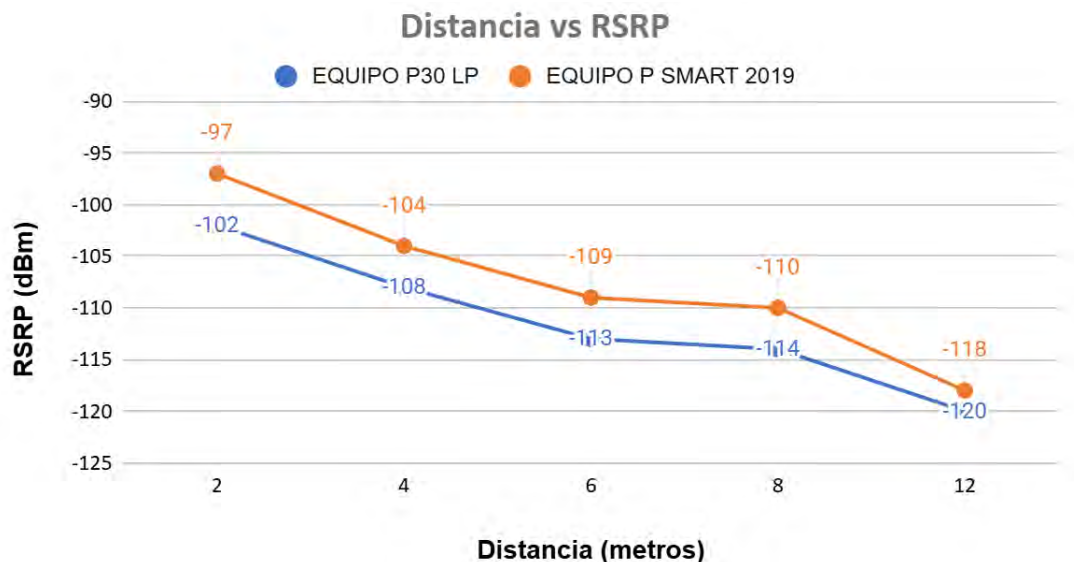
Con valores de  $tx\_gain = 80$  y  $rx\_gain = 40$ , se realiza las pruebas con 2 equipos celulares (P30 LITE LP y P SMART 2019), evaluando los mismos parámetros, pero ahora considerando la distancia desde la ubicación del equipo SDR. En la Tabla 5.2, se resume los valores obtenidos de las mediciones con el primer teléfono, mientras que en la Tabla 5.3 se encuentran las mediciones para el segundo celular. En la Figura 5.3 se muestra la gráfica de los resultados de la distancia versus los valores de recepción (RSRP) para ambos equipos, y en la Figura 5.4, se muestra la distancia con la tasa de bajada (DL) y subida (UL).

*Tabla 5.2 - Resultados de parámetros usando antenas omnidireccionales (Huawei P30 LP). Fuente: Elaboración propia*

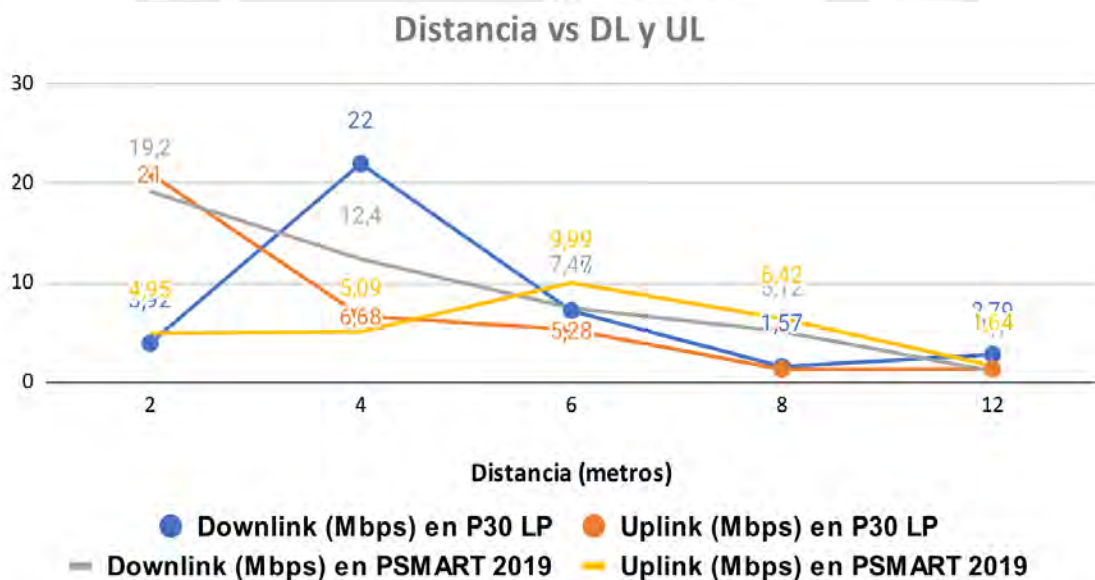
Distancia (metros)	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia (ms)
2	-102	21	3,92	23
4	-108	6,68	22	26
6	-113	5,28	7,19	30
8	-114	1,3	1,57	28
12	-120	1,33	2,79	24

**Tabla 5.3 - Resultados de parámetros usando antenas omnidireccionales (Huawei P Smart)**  
Fuente: Elaboración propia

Distancia (metros)	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia (ms)
2	-97	19,2	4,95	21
4	-104	12,4	5,09	24
6	-109	7,47	9,99	32
8	-110	5,12	6,42	30
12	-118	1,1	1,64	34



**Figura 5.3 - Distancia vs RSRP en interiores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart).** Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.4 - Distancia vs DL y UL en interiores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart).** Fuente: Elaboración propia

En el Anexo D, se indican las pruebas realizadas con antenas directivas y omnidireccionales con menor ganancia, además de los valores de los tiempos de respuesta (ping) desde los equipos hacia el servidor.

## En exteriores

Para las pruebas en este espacio, se ha considerado el mejor valor de  $tx\_gain=80$  y  $rx\_gain=40$  de las realizadas en interiores. Además, se ha realizado la prueba de medición de parámetros de datos con los modelos Huawei P30 LP y P Smart 2019, para realizar una mejor comparativa con las pruebas en interiores y usando los mismos celulares. En la Figura 5.5 se observa el entorno de la ubicación, donde se tuvo que trasladar los equipos y materiales adicionales para el funcionamiento del prototipo.



*Figura 5.5 - Entorno de pruebas en exteriores. Fuente: Elaboración propia*

Considerando los parámetros  $tx\_gain$  y  $rx\_gain$ , se llevaron a cabo mediciones de cobertura en base al comportamiento del terminal móvil, tales como nivel de señal, latencia y velocidades de descarga y subida respectivamente. Pruebas realizadas desde los 2m hasta los 16m. En la Tabla 5.4 se presentan los resultados usando un solo terminal móvil.

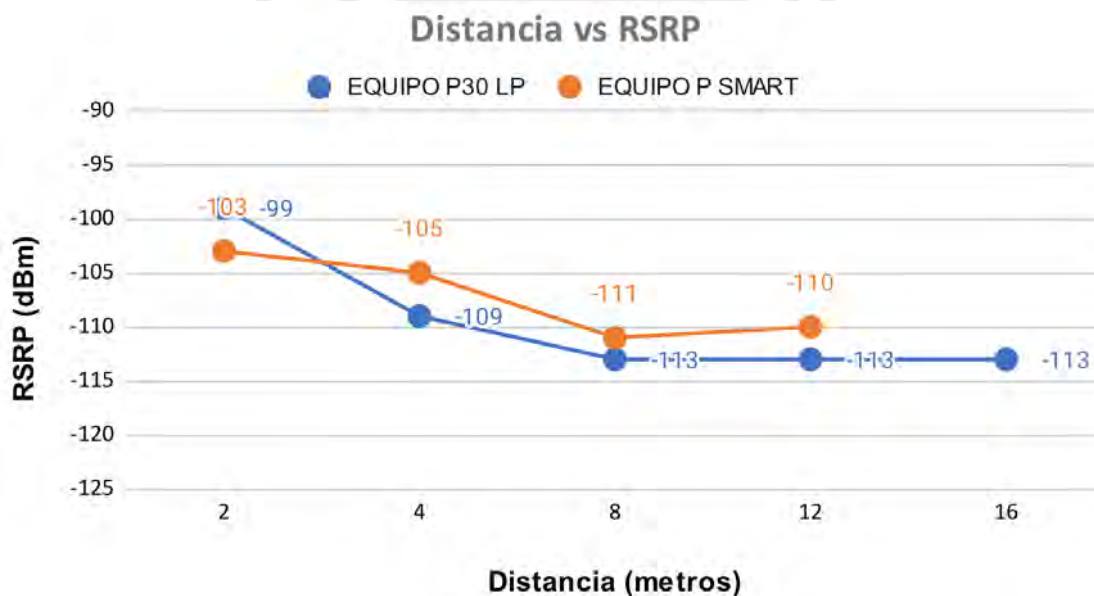
*Tabla 5.4 - Resultados de parámetros en exteriores (Huawei P30 Lite LP). Fuente: [74]*

Distancia (metros)	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia (ms)
2	-99	12,5	3,98	23
4	-109	2,41	2,04	40
8	-113	1,33	4,32	20
12	-113	2,39	4,09	32
16	-113	2,37	0,15	33

Posterior a la prueba con un solo terminal móvil, se procedió a incrementar a dos terminales móviles (ver Figura 5.6), se evaluó el nivel de señal versus distancia, logrando una distancia máxima de 16m para el equipo P30 LP, mientras que el equipo Huawei P Smart 2019 solo logró una conexión de 12 m. Además, los resultados del segundo móvil se observan en la Tabla 5.5:

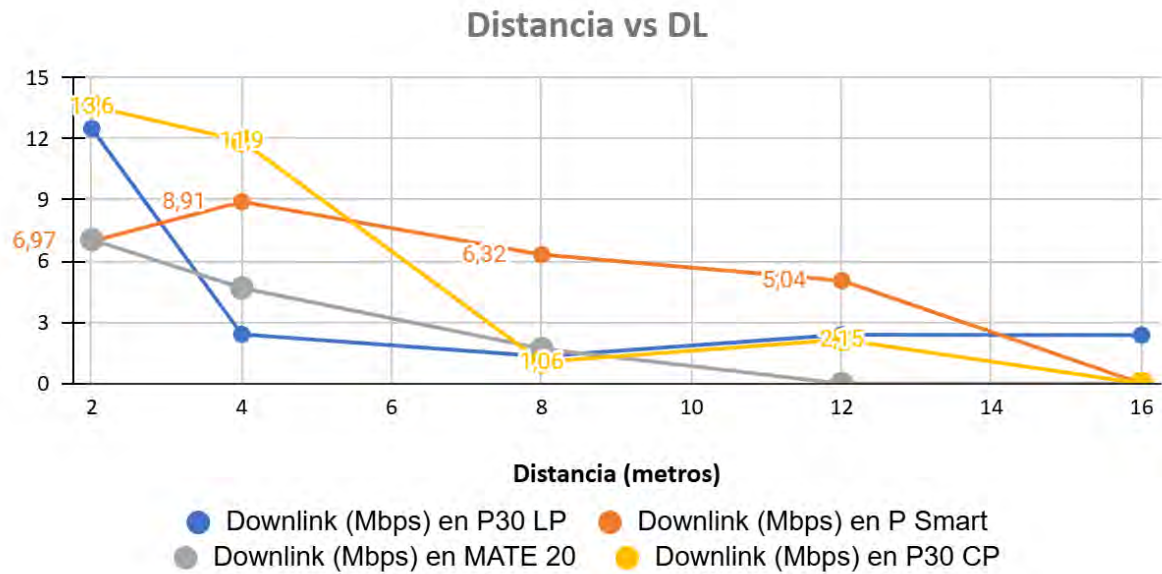
*Tabla 5.5 - Resultados de parámetros en exteriores (Huawei P Smart)*  
Fuente: Elaboración propia

Distancia (metros)	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia (ms)
2	-103	6,97	6,34	32
4	-105	8,91	8,15	29
8	-111	6,32	3,7	27
12	-110	5,04	6,42	30
16	SIN VALOR	0	0	0

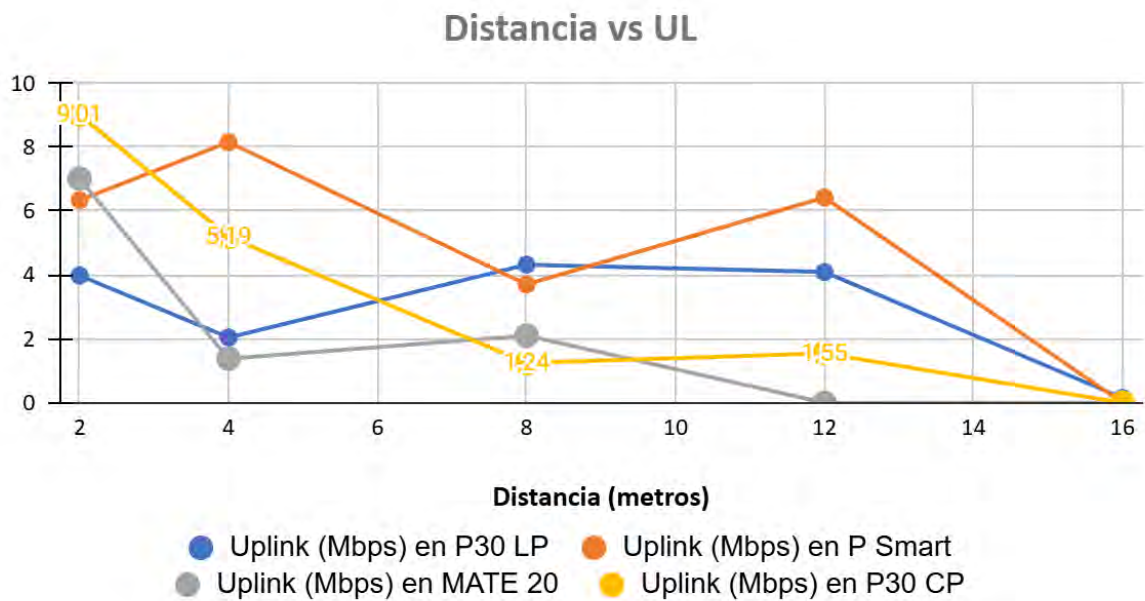


*Figura 5.6 - Distancia vs RSRP en exteriores (Huawei P30 LP vs Huawei P Smart). Fuente: [74]*

Luego se incrementó a cuatro terminales móviles, donde se procedió a realizar mediciones de velocidad tanto de descarga y subida. Los resultados se muestran en las Figuras 5.7 y 5.8.



*Figura 5.7 - Distancia vs DL en exteriores (Huawei P30 LP, P Smart, MATE 20 y P30 CP). Fuente: [74]*



*Figura 5.8 - Distancia vs UL en exteriores (Huawei P30 LP, P Smart, MATE 20 y P30 CP). Fuente: Elaboración propia*

En el Anexo F, con la herramienta de registro de G-Net Track, se ha obtenido un mapa de cobertura del prototipo 4G-SDR con las pruebas en exteriores, tomada desde uno de los terminales móviles.

### Calidad de llamadas de voz

Para evaluar la calidad de las llamadas de voz usando VoLTE, se consideró la percepción del usuario en el tiempo de establecimiento de la llamada y la claridad del audio a diferentes distancias del equipo SDR. Para cuantificar esta calidad, se empleó el parámetro MOS, el cual varía de 1 al 5, donde 1 representa una señal muy débil y 5 indica una calidad excelente [46].

Con este enfoque, se realizaron pruebas utilizando dos celulares con la siguiente numeración:

Equipo 1: Huawei P Smart 2019 → Número: 9076543227

Equipo 2: Huawei Mate 20 Lite → Numero: 9076543224

*Tabla 5.6 - Medición de parámetros de calidad de voz. Fuente: [74]*

Distancia (metros)	MOS	¿Llamada establecida?	¿Se escucha la voz?
2	5	SI	SI
4	5	SI	SI
6	4	SI	SI
8	4	SI	SI
12	1	NO	NO

### Comparativa entre soluciones VOIP y VOLTE

De las pruebas realizadas con ambas soluciones (VOIP y VOLTE), en la Tabla 5.7 se muestra una comparación resaltando los parámetros más importantes para el servicio de voz:

*Tabla 5.7 - Comparación entre solución VOIP y VOLTE. Fuente: Elaboración propia*

Parámetros	VOIP	VOLTE
DL	9,23 KB	2 MB
UL	9,99 KB	1 MB
MOS	2m: 4	2m: 5
	6m: 1	6m: 4
	8m: 1	8m: 3
	12m: 1	12m: 2
Ping hacia el servidor (ms)	30	25
Códec	PCMU	AMR-WB
Compatibilidad con celulares	Todos	Huawei
Consumo energético (W)	28,19	47,28

Considerar que en el caso de VOLTE, no fue posible medir el consumo de DL y UL, para ello se usa la siguiente estimación: consumo aproximado = 1 MB \* minuto. Las pruebas de las llamadas fueron entre 1 y 2 minutos.



## CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado con éxito un sistema 4G usando la tecnología SDR, teniendo como hardware el equipo LimeSDR y 3 plataformas de softwares Open Source (srsRAN, OPEN5GS, Kamailio), con un consumo de 35.7% de CPU y alrededor de 2GB de RAM, durante operación normal.
2. Además, se realizó el diseño de los subsistemas de energía, infraestructura y protección eléctrica, como una arquitectura integral del prototipo 4G. Como parámetros técnicos, se calcula un consumo promedio de 3kW/h por día, y se considera una autonomía de 2 días, que aseguran el funcionamiento continuo del sistema, y su operatividad en condiciones reales.
3. Finalmente, a través de los entornos de prueba controlados, se realizó la evaluación del prototipo, conectando 5 terminales móviles con acceso Internet y estableciendo 2 llamadas de voz, con 1 medición cada 2 metros hasta 16 metros de distancia, y el monitoreo de los siguientes parámetros: tasas de subida y bajada, RSRP, y latencia.
4. Según los resultados de las pruebas en exteriores, con el prototipo se obtienen velocidades máximas de DL de 13,6 Mbps y 9,01 Mbps en UL, con un puntaje MOS de 1 con distancias mayores a 10 metros, que indica una calidad deficiente de servicio móvil para llamadas de voz.
5. Sobre el análisis de cobertura de la solución (Anexo K), las pruebas demuestran una gran diferencia entre el valor teórico calculado de 1 km, y el experimental de 10 metros. Esta discrepancia resalta la importancia de considerar las condiciones reales del entorno, las limitaciones de potencia del SDR y otros factores que no se contemplan en el modelo teórico. Por tanto, debe ser cuidadosamente evaluado en una futura implementación en zonas rurales, donde las condiciones ambientales pueden afectar el desempeño del sistema.

## RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

1. Para la mejora de la cobertura del equipo SDR, se podría probar con equipos USRP de modelos recientes, como el x310 y x410, para evaluar el desempeño del prototipo en cuanto a los parámetros de medición (tasa de bajada y subida, latencia, ancho de banda) y a la conexión de más de 5 equipos en simultáneo, incluyendo equipos adicionales como amplificadores o antenas de mayor ganancia.
2. Las pruebas en interiores y exteriores se realizaron en un entorno controlado, no afectando lo usado y restringido por los operadores concesionados en dichas frecuencias, actualmente de Claro y Bitel en la banda 7.
3. Una observación a tener en cuenta es que la solución de VoLTE se ha logrado establecer con celulares de la marca Huawei, debido a que, en otras marcas como Samsung y Xiaomi, existe una restricción por parte del fabricante en la configuración interna del teléfono que permite habilitar las opciones de red (ejemplo: llamadas sobre VoLTE) a la par con el registro de la base de datos del operador móvil comercial [69].
4. En cuanto al espectro, dado que se utiliza la banda 7 de LTE por la similitud en todos los equipos móviles de prueba, sería necesario la autorización sobre una porción del espectro para 4G, que por ejemplo puede facilitarse a través un OIMR, más aún si se planea implementar el prototipo en un entorno rural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INEI, “Estaciones base o sites instaladas para telecomunicaciones por departamento - Telecomunicaciones y otros servicios de información”. Compendio Estadístico Perú, 2022. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1872/cap21/ind21.htm](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1872/cap21/ind21.htm) (Acceso: May. 23, 2024).
- [2] INEI, Resultados Definitivos 2017, Tomo V, Lima, 2018. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1544/00TOMO\\_05.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1544/00TOMO_05.pdf) (Acceso: May. 23, 2024).
- [3] REDGE, "Comunidades Rurales que mueven al país," 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.redge.org.pe/sites/default/files/Comunidades%20rurales.pdf> (Acceso: May. 23, 2024).
- [4] INEI, Censo Nacional 2017 - Directorio de Centros Poblados Tomo I, Lima, 2018. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1541/tomo1.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/tomo1.pdf) (Acceso: May. 23, 2024).
- [5] O. Molina, "Comunidades indígenas en el Perú: diversidad, desigualdad y pandemia," El Comercio, 2021. [En línea]. Disponible: <https://elcomercio.pe/economia/opinion/comunidades-indigenas-en-el-peru-diversidad-desigualdad-y-pandemia-por-oswaldo-molina-noticia/?ref=ecr> (Acceso: May. 30, 2024).
- [6] Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, “Integración urbano rural para el desarrollo sostenible en el Perú,” Lima, 2023. [En línea]. Disponible: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4389919/DNPE%20Integracion%20urbano-rural\\_050423.pdf?v=1680733974](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4389919/DNPE%20Integracion%20urbano-rural_050423.pdf?v=1680733974) (Acceso: May. 30, 2024).
- [7] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Resolución Ministerial N° 245-2017-MTC-01.03. [En línea]. Disponible: <https://www.osiptel.gob.pe/media/zj1bln3t/rm-245-2017-mtc.pdf> (Acceso: Jun. 30, 2024).
- [8] OSIPTEL, “Los servicios públicos de telecomunicaciones en los hogares peruanos”. [En línea]. Disponible: <https://sociedadtelecom.pe/wp-content/uploads/2022/07/ERESTEL-2021-120722-3.pdf> (Acceso: May. 23, 2024).
- [9] OSIPTEL, PUNKU (El portal a la información de las telecomunicaciones). [En línea]. Disponible: <https://punku.osiptel.gob.pe/> (Acceso: Jun. 30, 2024).
- [10] Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad - Suministro 2011," Resolución Ministerial N° 214-2011-MEM/DM, Lima, 2011. [En línea]. Disponible: <https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2011/Mayo/05/RM-214-2011-MEM-DM.pdf> (Acceso: May. 17, 2024).
- [11] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Infraestructura para conectar - Alternativas para la conectividad rural de servicios móviles en el Perú”. [En línea]. Disponible :

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4928694/INFRAESTRUCTURA%20PARA%20CONECTAR%20-%20Alternativas%20para%20la%20conectividad%20rural%20de%20servicios%20m%C3%B3viles%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf> (Acceso: May. 23, 2024).

[12] Ministerio de Energía y Minas, "Especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural," Lima, 2024. [En línea]. Disponible: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5249142/PROYECTO%20DE%20RESOLUCI%C3%93N%20DIRECTORAL.pdf> (Acceso: May. 17, 2024).

[13] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, Norma Técnica E.020: Cargas, Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú, 2006. [En línea]. Disponible: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366640/50%20E.020%20CARGAS.pdf> (Acceso: May. 17, 2024).

[14] Telecommunications Industry Association, ANSI/TIA-222-H: Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas and Small Wind Turbine Support Structures, Arlington, VA, EE. UU., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.towernx.com/downloads/TIA-222-H-Commentary-Rev-1-03252022.pdf> (Acceso: Feb. 17, 2024).

[15] M. Codon, "Implementación de red LTE con Software-Defined Radio". Proyecto final, Ingeniería de Telecomunicaciones, UNSAM, Buenos Aires, Argentina, 2019. [En línea]. Disponible: <https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/1128/1/TING%20ESCYT%202019%20CMN.pdf> (Acceso: Feb. 17, 2024).

[16] D. Martínez García, "Despliegue de un prototipo de red 4G-LTE con OpenAirInterface para entorno didáctico", Trabajo de fin de grado, Esc. Tec. Ing. Telecomunicación, UPM, Madrid, España, 2018. [En línea]. Disponible: [https://oa.upm.es/53088/1/TFG\\_DAVID\\_MARTINEZ\\_GARCIA.pdf](https://oa.upm.es/53088/1/TFG_DAVID_MARTINEZ_GARCIA.pdf) (Acceso: Feb. 19, 2024).

[17] F. García Espigares, "Prototipo de una estación base 4G usando Open Air Interface," Trabajo de fin de grado, Ing. de Tecnologías de Telecomunicación, UGR, Granada, España, 2017. [En línea]. Disponible: [https://wpd.ugr.es/~jorgenavarro/thesis/2017\\_TFG\\_FranciscoGarciaEspigares.pdf](https://wpd.ugr.es/~jorgenavarro/thesis/2017_TFG_FranciscoGarciaEspigares.pdf) (Acceso: Feb. 19, 2024).

[18] INEI, Resultados definitivos del III Censo de Comunidades Nativas, Tomo I, Lima, 2018. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1598/](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1598/) (Acceso: May. 23, 2024).

[19] INEI, Población Económicamente activa por condición de ocupación y características de la población ocupada, Lima, 2018. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1676/03.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1676/03.pdf) (Acceso: May. 23, 2024).

[20] INEI, Resultados definitivos del I Censo de Comunidades Nativas, Tomo II, Lima, 2018. [En línea]. Disponible:

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1599/](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1599/)  
(Acceso: May. 23, 2024).

[21] ITU, "El acceso a Internet en los hogares de las zonas urbanas duplica el de las zonas rurales", Ginebra, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/es/mediacentre/Pages/pr27-2020-facts-figures-urban-areas-higher-internet-access-than-rural.aspx#:~:text=Seg%C3%BAn%20se%20indica%20en%20la%20edici%C3%B3n%20de%202020,brechas%20de%20conectividad%20y%20de%20acceso%20a%20Internet> (Acceso: Ago. 20, 2024).

[22] "Despliegue de Estaciones Base Celular en el Perú," Sociedad Telecom, 2018. [En línea]. Disponible: <https://sociedadtelecom.pe/2018/08/20/despliegue-de-estaciones-base-celular-en-el-peru/#popup> (Acceso: Jun. 20, 2024).

[23] "TeleSemana", Panorama de mercado - Perú. [En línea]. Disponible: <https://www.telesemana.com/panorama-de-mercado/peru/> (Acceso: Ago. 20, 2024).

[24] INEI, Perú Rural - Telecomunicación. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1855/cap02.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1855/cap02.pdf) (Acceso: May. 26, 2024).

[25] "Release 8". 3GPP. [En línea]. Disponible: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-8> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[26] LTE Encyclopedia. [En línea]. Disponible: <https://web.archive.org/web/20210304232429/https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-network-infrastructure-and-elements> (Acceso: May. 26, 2024).

[27] SRS - Software Radio Systems. [En línea]. Disponible: <https://www.softwareradiosystems.com/about-us/> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[28] Open LTE - An open source 3GPP LTE implementation. [En línea]. Disponible: <https://sourceforge.net/p/openlte/wiki/Home/> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[29] S. García, "Implementación de un prototipo de estación base LTE, como herramienta experimental utilizando el SDR BladeRF," Trabajo de fin de grado, Fac. Energía, las Industrias y Recursos No Renovables, Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Loja, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible: [https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/28252/1/SergioFabian\\_GarciaMinchala.pdf](https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/28252/1/SergioFabian_GarciaMinchala.pdf) (Acceso: Jun. 30, 2024).

[30] Charbox. OpenEPC Portable 4G network on Raspberry Pi. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=nD7iv4rsnKs> (Acceso: Feb. 26, 2024).

[31] YateBTS. YateBTS.com in Unified Core Network by David Burgess. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=dDlrR0EZRfi> (Acceso: Feb. 26, 2024).

[32] M. Gómez, "Despliegue de un prototipo de red 3G/4G con OpenUMTS/OpenLTE y OpenAirInterface para entorno didáctico," Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de

Madrid, España, 2019. [En línea]. Disponible: [https://oa.upm.es/55237/1/TFG\\_MARCOS\\_GOMEZ\\_PLATON.pdf](https://oa.upm.es/55237/1/TFG_MARCOS_GOMEZ_PLATON.pdf) (Acceso: Feb. 19, 2024).

[33] Ettus Research by a National Instruments Brand, “USRP B210 USB Software Defined Radio (SDR)”, Ettus Research. [En línea]. Disponible: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[34] “USRP-2901 Specifications”, NI. [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2901-specs/page/specs.html> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[35] “BladeRF 2.0 micro XA9,” Nuand. [En línea]. Disponible: <https://www.nuand.com/product/bladerf-xa9/> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[36] “USRP-2920 Specifications”, NI. [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2920-specs/page/specs.html> (Acceso: Jun. 30, 2024).

[37] “Arquitectura de protocolo y red LTE | TELETOPIX.ORG”. Telecom Techniques Guide. [En línea]. Disponible: <https://teletopix.org/es/arquitectura-de-protocolo-y-red-lte/> (Acceso: May. 26, 2024).

[38] J. Muñoz, “Estudio de la arquitectura de protocolos de LTE”. Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2016. [En línea]. Disponible: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98231/pfc\\_build.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98231/pfc_build.pdf) (Acceso: May. 27, 2024).

[39] “OFDMA - Telecompedia”. Telecompedia. [En línea]. Disponible: <https://telecompedia.net/ofdma/> (Acceso: Feb. 27, 2024).

[40] “Evolución de la arquitectura en 3GPP”. [En línea]. Disponible: [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/154/A4.pdf?sequence=4#:~:text=3GPP%20Versi%C3%B3n%208%20\(R8\)&text=La%20soluci%C3%B3n%20LTE%20permite%20flexibilidad,de%20la%20disponibilidad%20del%20espectro](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/154/A4.pdf?sequence=4#:~:text=3GPP%20Versi%C3%B3n%208%20(R8)&text=La%20soluci%C3%B3n%20LTE%20permite%20flexibilidad,de%20la%20disponibilidad%20del%20espectro) (Acceso: May. 26, 2024).

[41] “Diseño de una solución de conectividad para la cuenca del Río Santiago” - Grupo de Telecomunicaciones Rurales, PUCP, 2019. [En línea]. Disponible: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2224831/Dise%C3%B1o%20de%20una%20soluci%C3%B3n%20de%20conectividad%20para%20la%20cuenca%20del%20r%C3%ADo%20Santiago.pdf> (Acceso: Feb. 19, 2024).

[42] M. Quiñones, J. P. Tene, K. Rohoden, and C. Carrión, “Sistema de conmutación y control de llamadas basado en OpenBTS y Asterisk”. [En línea]. Disponible: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/download/740/675/2323> (Acceso: Feb. 19, 2024).

[43] “Frecuencias de bandas 2G, 3G, 4G/LTE y 5G en Perú”. Móviles.info - Características, comparador, opiniones y precios. [En línea]. Disponible: <https://moviles.info/frecuencias/peru/> (Acceso: Jun. 30, 2024).

- [44] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez-Romero, y O. Sallent, "LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles," 2010. [En línea]. Disponible: <https://www.collegesidekick.com/study-docs/4616566> (Acceso: May. 30, 2024).
- [45] Arquitectura de una red LTE. (s.f.). IPv6. [En línea]. Disponible: [https://www.ipv6go.net/lte/arquitectura\\_red\\_lte.html](https://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.html) (Acceso: May. 30, 2024).
- [46] ITU-T, "Methods for subjective determination of transmission quality," Recommendation P.800, Aug. 1996. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I> (Acceso: May. 27, 2024)
- [47] "LTE WCDMA ICCID SIM USIM 4G Lector de tarjetas seguro programador con 5 unids tarjeta programable en blanco + SIM personalizar herramientas solo para sistema Windows por XCRFID". [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.de/-/en/XCRFID-Programmer-Programmable-Personalise-Windows/dp/B07H9CW3CV> (Acceso: Ago. 27, 2024).
- [48] E. V. Ortiz, "¿Puede Claro desplegar LTE en la banda de 850 o 1900 MHz? – Parte 2". Consultado: 27 de agosto, 2024. [En línea]. Disponible: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/tekinfo/2013/08/12/puede-claro-desplegar-lte-en-la-banda-de-850-o-1900-mhz-parte-2/> (Acceso: Ago. 27, 2024).
- [49] "Canales de comunicación LTE", *Stack*. [En línea]. Disponible: <https://isolution.pro/es/t/lte/lte-communication-channels/canales-de-comunicacion-lte> (Acceso: May. 30, 2024).
- [50] "Installation guide - srsRAN 4G 23.11 documentation", Srsran.com. [En línea]. Disponible en: [https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/general/source/1\\_installation.html](https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/general/source/1_installation.html) (Acceso: Ago. 30, 2024).
- [51] "OYEITIMES lector de tarjetas SIM, escritor + 5 piezas, 2FF/3FF/4FF, programable, 4G, VoLTE, ISIM, tarjeta USIM, WCDMA, GSM, USIM, herramientas de personalización". [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.com.mx/OYEITIMES-Herramientas-programador-programables-herramientas/dp/B0CQC7836N> (Acceso: Ago. 27, 2024).
- [52] P. Greenland, "Private LTE with LimeSDR and srsRAN – part 1 (software)", Quantulum.co.uk. [En línea]. Disponible: <https://www.quantulum.co.uk/blog/private-lte-with-limesdr-and-srsran-part-1-software/> (Acceso: Set. 10, 2024).
- [53] SoapySDR Build Guide "BuildGuide". [En línea]. Disponible: <https://github.com/pothosware/SoapySDR/wiki/BuildGuide> (Acceso: Set. 10, 2024).
- [54] "Lime Suite - Myriad-RF Wiki". Myriad-RF Wiki. [En línea]. Disponible: [https://wiki.myriardrf.org/Lime\\_Suite#Building\\_from\\_source](https://wiki.myriardrf.org/Lime_Suite#Building_from_source) (Acceso: Set. 15, 2024).
- [55] "LimeSDR USB", Myriardrf.org. [En línea]. Disponible: <https://myriardrf.org/projects/component/limesdr/> (Acceso: Set. 15, 2024).
- [56] E. Velarde, "Link Budget y Modelos de Propagación", Power Point Presentation, Curso de Comunicaciones Móviles, Lima, 2023.
- [57] "Batería GEL 12V 100Ah Tensite", Autosolar.pe. [En línea]. Disponible: <https://autosolar.pe/baterias-de-gel-12v/bateria-gel-12v-100ah-tensite> (Acceso: Oct. 15, 2024).

- [58] “Inversor Cargador 3000W 24V MPPT 50A Must Solar”, Autosolar.pe. [En línea]. Disponible: <https://autosolar.pe/inversores-cargadores-24v/inversor-cargador-3000w-24v-mppt-must-solar> (Acceso: Oct. 15, 2024).
- [59] “Panel Solar 500W Deep Blue 3.0 JA Solar”, Autosolar.pe. [En línea]. Disponible: <https://autosolar.pe/paneles-solares-24v/panel-solar-500w-deep-blue-30-ja-solar> (Acceso: Oct. 15, 2024).
- [60] “Gabinete de 38RU de Piso”, HJE PERU ELECTRONIC. [En línea]. Disponible: <https://hje.pe/?product=gabinete-de-38ru-de-piso> (Acceso: Mar. 15, 2025).
- [61] S. Herle, “docker\_open5gs: Docker files to run open5gs + IMS + eNB + gNB + NR-UE in a docker”. [En línea]. Disponible: [https://github.com/herlesupreeth/docker\\_open5gs](https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs) (Acceso: Set. 15, 2024)
- [62] “Ubuntu”, Docker Documentation. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/desktop/install/linux/ubuntu/> (Acceso: Set. 12, 2024)
- [63] Thelinuxcode.com. [En línea]. Disponible: <https://thelinuxcode.com/install-asterisk-ubuntu-22-04/> (Acceso: Ago. 30, 2024).
- [64] “Open5Gs”. [En línea]. Disponible: <https://open5gs.org/> (Acceso: Nov. 15, 2024).
- [65] “The kamailio SIP server project - the open source SIP server”, Kamailio.org. [En línea]. Disponible: <https://www.kamailio.org/w/> (Acceso: Nov. 15, 2024).
- [66] “Antena Sectorial MIMO 15dBi 2x2”. [En línea]. Disponible: <https://www.tp-link.com/pe/business-networking/antenna-and-accessory/tl-ant2415ms/#overview> (Acceso: Nov. 15, 2024).
- [67] “Starlink”. Starlink. [En línea]. Disponible: <https://www.starlink.com/pe> (Acceso: Nov. 15, 2024).
- [68] “PROYECTO DE REGLAMENTO GENERAL DE CALIDAD DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DE TELECOMUNICACIONES”. Portal del Usuario - OSIPTEL. [En línea]. Disponible: <https://www.osiptel.gob.pe/media/5yeboxwk/resol050-2024-cd-proyecto-norma.pdf> (Acceso: Nov. 20, 2024).
- [69] “VoLTE IMS Android Carrier Privileges - Cellular Network Infrastructure - Open Source Mobile Communications”. Open Source Mobile Communications. [En línea]. Disponible: [https://osmocom.org/projects/cellular-infrastructure/wiki/VoLTE\\_IMS\\_Android\\_Carrier\\_Privileges](https://osmocom.org/projects/cellular-infrastructure/wiki/VoLTE_IMS_Android_Carrier_Privileges) (Acceso: Nov. 30, 2024).
- [70] “Especificaciones de celular Huawei Mate 20 Lite”. [En línea] Disponible: <https://www.tiomovil.com/especificaciones/huawei/mate-20-lite/sne-lx1/> (Acceso: Nov. 30, 2024).
- [71] A. Ghayas, "What is the difference between IMS and VoLTE?," Commsbrief.com, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://commsbrief.com/what-is-the-difference-between-ims-and-volte/>
- [72] OSIPTEL, “Checa tu plan”, Checatuplan.pe. [En línea]. Disponible en: [https://www.checatuplan.pe/checatuplan\\_movil](https://www.checatuplan.pe/checatuplan_movil) (Acceso: Abr. 7, 2025).

[73] “¿Cuánto ancho de banda usas para navegar en 4G?”. [En línea]. Disponible: <https://gadgerss.com/2016/12/08/cuanto-ancho-banda-usas-navegar-4g-lte/> (Acceso: Nov. 07, 2024).

[74] L. F. Ramos Torres, D. Auccapuri Quispetupa, y C. D. Córdova Bernuy, “Development of 4G base station for rural areas based on LimeSDR”, en Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): “Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society”, 2025. [En línea]. Disponible: [https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/full-papers/Contribution\\_2132\\_final\\_a.pdf](https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/full-papers/Contribution_2132_final_a.pdf) (Acceso: Ago. 22, 2025).



# ANEXOS

## Anexo A

Tabla A1. Bandas LTE. Fuente: [48]

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL\_low}$ – $F_{UL\_high}$	$F_{DL\_low}$ – $F_{DL\_high}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6 <sup>1</sup>	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	789 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Reserved	Reserved	FDD
16	Reserved	Reserved	FDD
17	704 MHz – 718 MHz	734 MHz – 748 MHz	FDD
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz – 3490 MHz	3510 MHz – 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz – 728 MHz	FDD <sup>2</sup>
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD

## Anexo B

### Comandos para la instalación del software para la solución con VOIP

Anexo B1: Comandos para la instalación y actualización de paquetes necesarios

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
echo "performance" | sudo tee
/sys/devices/system/cpu/cpu*/cpufreq/scaling_governor
sudo apt install git
```

Anexo B2: Comandos para la instalación de SoapySDR

```
sudo apt-get install cmake g++ libpython3-dev python3-
numpy swig
git clone --branch soapy-sdr-0.8.1
https://github.com/pothosware/SoapySDR.git
cd SoapySDR
mkdir build
cd build
cmake ..
make -j`nproc`
sudo make install -j`nproc`
sudo ldconfig
SoapySDRUtil --info
sudo ./install.sh
```

Anexo B3: Comandos para la instalación de LimeSuite

```
sudo apt-get install git g++ cmake libsqlite3-dev
sudo apt-get install libsoapyhdr-dev libi2c-dev libusb-
1.0-0-dev
```

```
sudo apt-get install libxgtk3.0-dev freeglut3-dev
git clone https://github.com/myriadrf/LimeSuite.git
cd LimeSuite
git checkout stable
mkdir builddir && cd builddir
cmake ../
make -j4
sudo make install
sudo ldconfig
cd LimeSuite/udev-rules
sudo ./install.sh
```

#### Anexo B4: Comandos para la instalación de srsRAN

```
git clone https://github.com/srsRAN/srsRAN_4G.git
cd srsRAN_4G
mkdir build
mkdir build
cmake ../
make
make test
sudo make install
srsran_install_configs.sh user
```

#### Anexo B5: parámetros de configuración para Asterisk

##### 2.5.1 archivo pjsip.conf

```
GNU nano 6.2 /etc/asterisk/pjsip.conf
[transport]
type=transport
protocol=udp
bind=0.0.0.0

[100]
type=endpoint
context=default
disallow=all
allow=ulaw
aors=100
auth=100auth
transport=transport

[100]
type=aor
max_contacts=1

[100auth]
type=auth
auth_type=userpass
username=100
password=gtrpucp

[200]
type=endpoint
context=default
disallow=all
allow=ulaw
aors=200
auth=200auth
transport=transport

[200]
type=aor
max_contacts=2

[200auth]
type=auth
auth_type=userpass
username=200
password=gtrpucp
```

### 2.5.2 archivo extensions.conf

```
GNU nano 6.2 /etc/asterisk/extensions.conf
[default]

exten => 100,1,Dial(PJSIP/100)
exten => 100,2,Hangup()

exten => 200,1,Dial(PJSIP/200)
exten => 200,2,Hangup()
```

## Anexo C

### Comandos para la solución con VOLTE

Anexo C1: Comandos para la instalación y ejecución de docker\_open5gs con Docker

```
# Para las imágenes de Docker con los componentes del Core Open5gs EPC/5GC
git clone https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs
cd docker_open5gs/base
docker build --no-cache --force-rm -t docker_open5gs .
```

```
# Para las imágenes de Docker con los componentes de Kamailio
cd ../ims_base
docker build --no-cache --force-rm -t docker_kamailio .
```

```
# Para las imágenes de Docker con los componentes de srsRAN 4G
cd ../srslte
docker build --no-cache --force-rm -t docker_srslte .
```

#Para construir las imágenes para los componentes adicionales

```
cd ..
set -a
source .env
sudo ufw disable
sudo sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1
```

#Para el despliegue de 4G:

```
docker compose -f 4g-volte-deploy.yaml build
```

#Para la configuración de la red

NOTA: Editar solo el archivo .env con los parámetros mencionados en el apartado 3.4.2.3

#Para el despliegue de la red:

#Para el Core 4G + IMS

```
docker compose -f 4g-volte-deploy.yaml up
```

# Para srsRAN eNB con SDR

```
docker compose -f srsenb.yaml up -d && docker container
attach srsenb
```

#Para el provisioning del SIM en el Core Open5GS:

En el navegador, poner lo siguiente: <https://<Docker IP host>:9999>, ingresar con las siguientes credenciales:

Username: admin

Password: 1423

Anexo C2: Registro del IMSI y MSISDN en OsmoHLR

```
docker exec -it osmohlr /bin/bash
$ telnet localhost 4258
OsmoHLR> enable
OsmoHLR#
```

Para el SIM 1:

```
OsmoHLR# subscriber imsi 0010100000000001 create
OsmoHLR# subscriber imsi 0010100000000001 update msisdn
9076543224
```

Para el SIM 2:

```
OsmoHLR# subscriber imsi 0010100000000002 create
OsmoHLR# subscriber imsi 0010100000000002 update msisdn
9076543225
```

Anexo C3: Registro del SIM en PyHSS

1. En el navegador, escribir lo siguiente: [172.19.4.147\(IP host\): 8080/docs/](http://172.19.4.147:8080/docs/)
2. Seleccione apn → Create new APN → Try it out. Luego, en la sección payload use el siguiente JSON y luego Execute:

```
{
  "apn": "internet",
  "apn_ambr_dl": 0,
  "apn_ambr_ul": 0
}
```

Tomar nota de **apn\_id** especificado en el **cuerpo de la respuesta** en la **respuesta del servidor** para **Internet APN**.

3. Repetir el proceso para el siguiente APN ims:

```
{
  "apn": "ims",
  "apn_ambr_dl": 0,
  "apn_ambr_ul": 0
}
```

Tomar nota de **apn\_id** especificado en el **cuerpo de la respuesta** en la **respuesta del servidor** para **ims APN**.

4. A continuación, seleccione auc → Create new AUC → Try it out. En la sección de carga útil utilice el siguiente ejemplo JSON para rellenar ki, opc y amf para su SIM y luego pulse Execute:

```
{
  "ki": "8baf473f2f8fd09487ccccbd7097c6862",
  "opc": "8E27B6AF0E692E750F32667A3B14605D",
  "amf": "8000",
  "sqn": 0,
  "imsi": "0010100000000001"
}
```

5. A continuación, seleccione subscriber → Create new SUBSCRIBER → Try it out. Luego, en carga útil utilice el siguiente ejemplo JSON para rellenar IMSI, auc\_id y apn\_list para su SIM y luego pulse Execute:

```
{
  "imsi": "0010100000000001",
  "enabled": true,
  "auc_id": 1,
}
```

```

"default_apn": 1,
"apn_list": "1,2",
"msisdn": "9076543224",
"ue_ambr_dl": 0,
"ue_ambr_ul": 0
}

```

Donde:

- ❖ **auc\_id** es el ID del AUC creado en los pasos anteriores
- ❖ **default\_apn** es el ID del APN de **internet** creado en los pasos anteriores
- ❖ **apn\_list** es la lista separada por comas de los ID de APN permitidos para el UE, es decir, el ID de APN para **Internet** y el APN de **ims** creado en los pasos anteriores.

6. Por último, seleccione **ims\_subscriber** -> **Create new IMS SUBSCRIBER** -> **Try it out**.

Luego, en la sección payload utilice el siguiente ejemplo JSON para rellenar IMSI, MSISDN, msisdn\_list, scscf\_peer, scscf\_realm y scscf para su SIM y luego **Execute**:

```

{
  "imsi": "0010100000000001",
  "msisdn": "9076543224",
  "sh_profile": "string",
  "scscf_peer": "scscf.ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org",
  "msisdn_list": "[9076543224]",
  "ifc_path": "default_ifc.xml",
  "scscf": "sip:scscf.ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org:6060",
  "scscf_realm": "ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org"
}

```

## Anexo D

### Resultados de pruebas

#### Pruebas en interiores

##### 1. Usando antenas directivas, con ganancia entre 7 - 10 dBi:

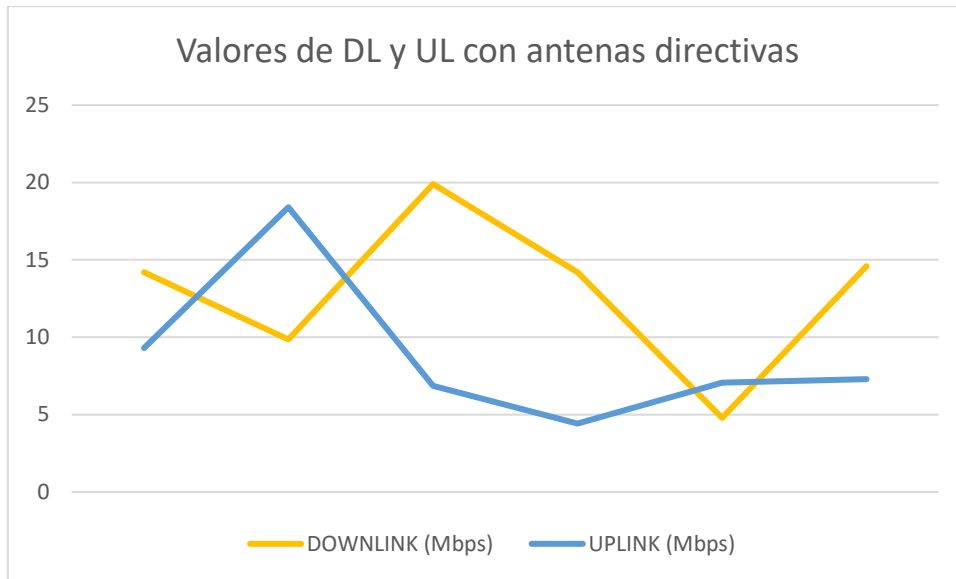


*Figura D1 - Entorno de pruebas con antenas directivas. Fuente: Elaboración propia*

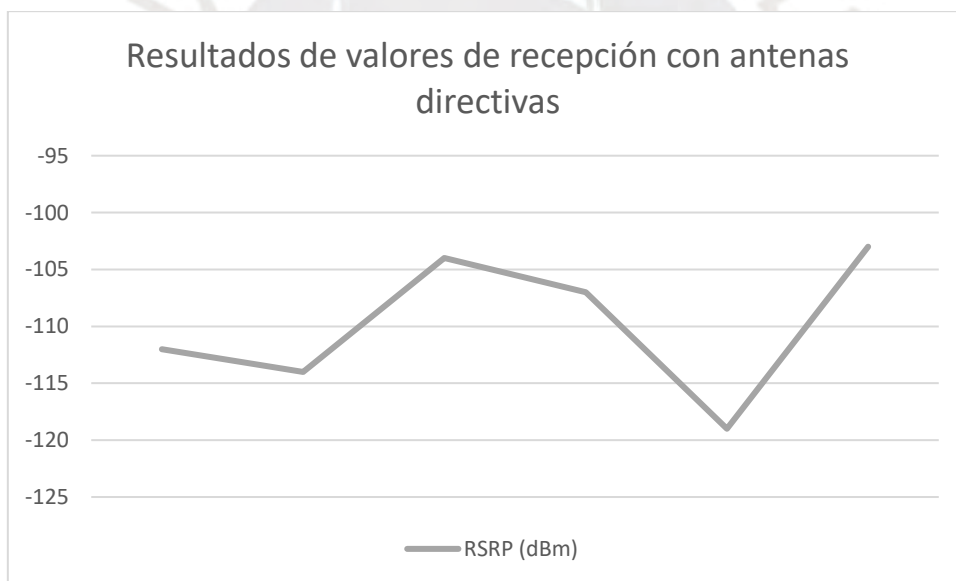
Respecto a la configuración del LimeSDR, se decidió modificar los valores de ganancia de transmisión y recepción (tx\_gain y rx\_gain), para observar el comportamiento con respecto a los valores recibidos en un teléfono. Para este caso inicial, se probó con un solo terminal móvil (Huawei P Smart 2019). En la Tabla, se observa los valores obtenidos de los parámetros usando las aplicaciones mencionadas líneas arriba, mientras que en las Figuras se observa gráficamente estos resultados:

*Tabla D1 - Valores de parámetros usando antenas directivas. Fuente: Elaboración propia*

tx_gain	rx_gain	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia(ms)
80	40	-112	14,2	9,30	29
66	47	-114	9,86	18,4	22
80	75	-104	19,9	6,86	24
70	75	-107	14,2	4,42	26
60	75	-119	4,79	7,06	35
85	75	-103	14,6	7,30	106



*Figura D2 - Valores de tasa de bajada (Downlink) y subida (Uplink), con antenas directivas. Fuente: Elaboración propia*



*Figura D3 - Valores de recepción en el terminal móvil (RSRP). Fuente: Elaboración propia*

## 2. Usando antenas omnidireccionales, con ganancia entre 3 - 6 dBi:

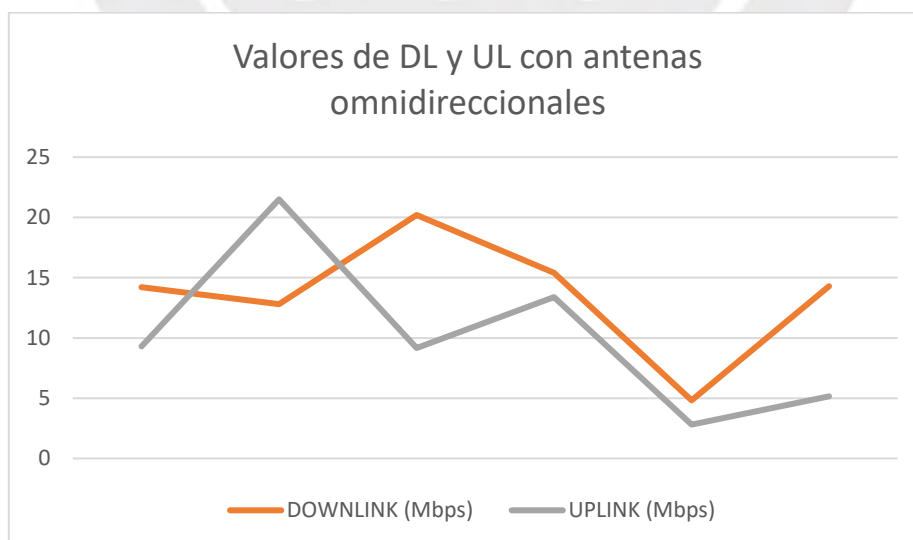


*Figura D4 - Primer modelo de antenas omnidireccionales. Fuente: Elaboración propia*

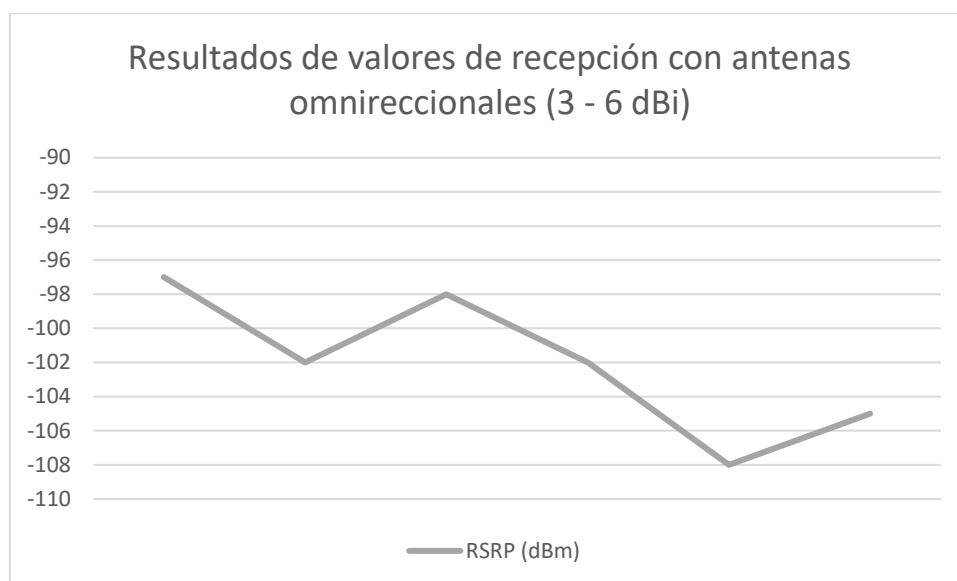
Similar al primer caso, se muestra la Tabla D2, y las Figuras D5 y D6, con la medición de los resultados con este arreglo de antenas:

*Tabla D2. Valores de parámetros usando antenas directivas. Fuente: Elaboración propia*

tx_gain	rx_gain	RSRP (dBm)	DOWNLINK (Mbps)	UPLINK (Mbps)	LATENCIA (ms)
80	40	-97	14,2	9,3	29
66	47	-102	12,8	21,5	25
80	75	-98	20,2	9,16	24
70	75	-102	15,4	13,4	22
60	75	-108	4,82	2,81	115
85	75	-105	14,3	5,15	28



*Figura D5 - Valores de Downlink y Uplink con primer tipo de antenas omnidireccionales. Fuente: Elaboración propia*



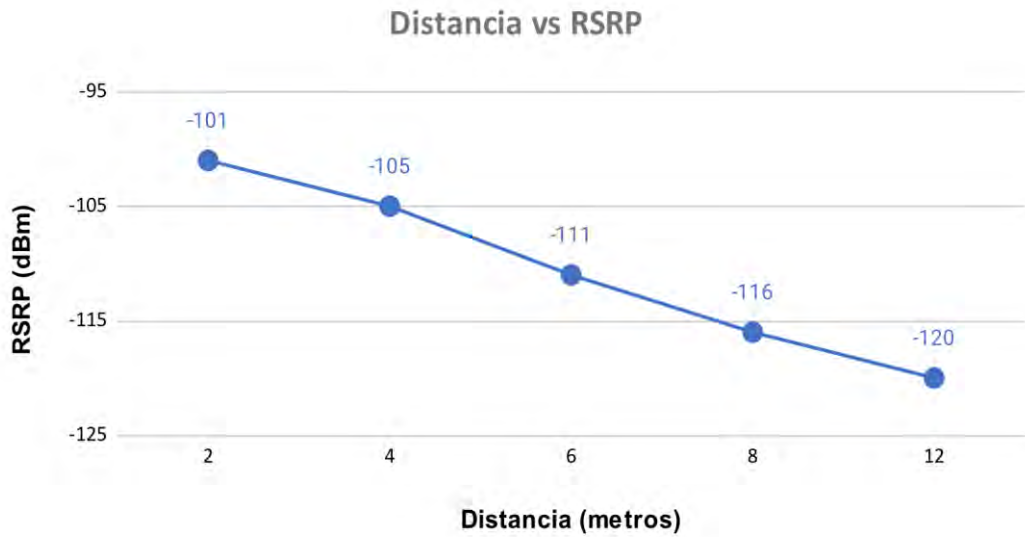
*Figura D6 - Valores de Recepción (RSRP) con primer tipo de antenas omnidireccionales. Fuente: Elaboración propia*

### Equipo Huawei Mate 20 Lite

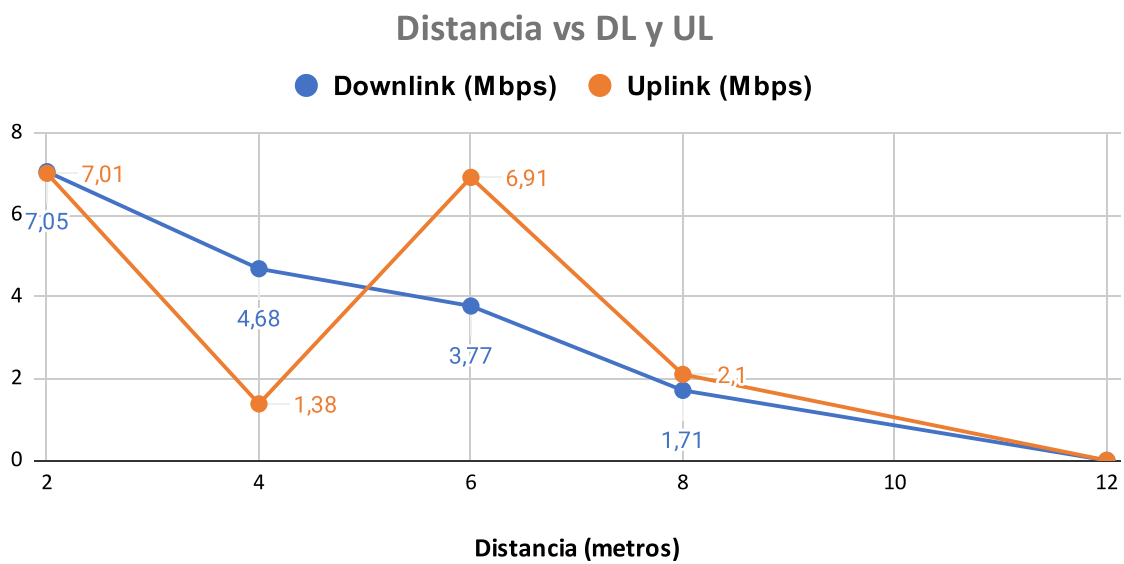
*Tabla D3. Valores de parámetros usando antenas omnidireccionales. Fuente: Elaboración propia*

Distancia (metros)	RSRP (dBm)	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latencia (ms)
2	-101	7,05	7,01	27
4	-105	4,68	1,38	25
6	-111	3,77	6,91	22
8	-116	1,71	2,1	32
12	-120	0	0	0

En base a los valores obtenidos de las mediciones, en las Figuras D7 y D8, se observa con mejor detalle la tendencia de la distancia con respecto a los valores de recepción (RSRP), y con respecto a los enlaces de *Downlink* y *Uplink*.



*Figura D7 - Distancia vs RSRP con antenas omnidireccionales (Huawei Mate 20 Lite). Fuente: Elaboración propia*



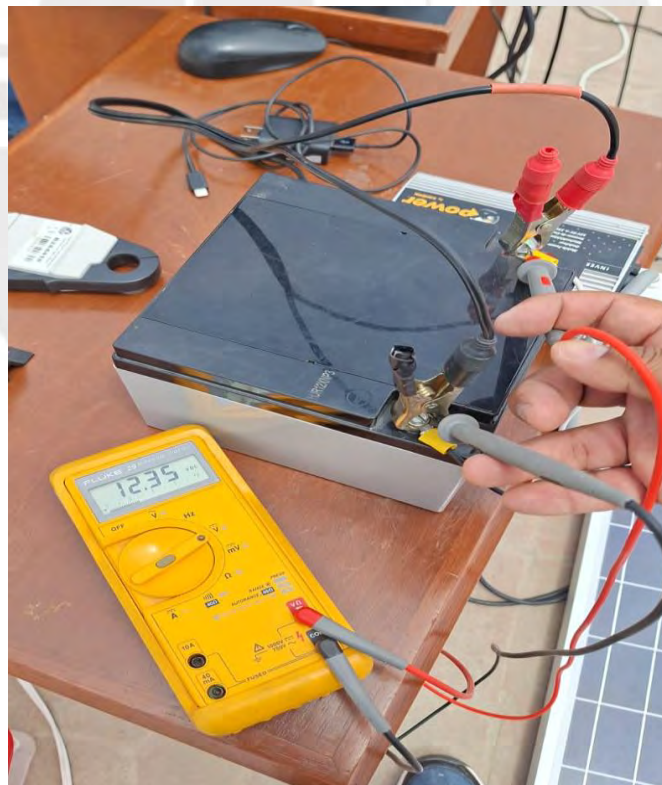
*Figura D8 - Distancia vs DL y UL con antenas omnidireccionales (Huawei Mate 20 Lite). Fuente: Elaboración propia*

## Anexo E

### Pruebas en exteriores



*Figura E1 - Consumo del inversor + CPU + equipo SDR. Fuente: Elaboración propia*



*Figura E2 - Mediciones de consumo sin equipos conectados. Fuente: Elaboración propia*



*Figura E3 - Escenario de pruebas con equipos de telecomunicaciones y energía conectados.  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura E4 - Escenario de pruebas con equipos de telecomunicaciones (equipo SDR con antenas) y celulares de prueba. Fuente: Elaboración propia*



*Figura E5 - Consumo de corriente con equipos conectados. Fuente: Elaboración propia*

*Tabla E1. Porcentaje de uso del CPU usando herramienta “htop” con 5 equipos. Fuente: Elaboración propia*

Cantidad de equipos conectados en simultaneo	Porcentaje de CPU	Porcentaje de memoria RAM
5	35,70%	11,4 %

## Anexo F

*Tabla F1 - Especificaciones LimeSDR USB TYPE A. Fuente: [55]*

Product Details	
Part Number	LimeSDR
Manufacturer	Lime Microsystems
Description	Open-Source Software-Defined Radio from 100 kHz to 3.8 GHz
General Parameters	
Configuration	OEM Board
Type	Transceiver
Frequency	100 KHz to 3.8 GHz
Bandwidth	61.44 MHz
Output Power	0.01 W
GPSDO	No
Software	Snappy Ubuntu Core
Application	Radio astronomy, RADAR, 2G to 4G cellular basestation, Media streaming, IoT gateway, HAM radio, Wireless keyboard and mice emulation and detection, Tire pressure monitoring systems, Aviation transponders, Utility meters, Drone command and control, Test an
Connectors	10 U.FL connectors (6 RX, 4 TX)
Dimensions	100x60 mm
Note	MIMO:2x2

## Anexo G



*Figura G1 - Mapa de cobertura del prototipo 4G-SDR (Tecnología 4G). Fuente: Elaboración propia*



*Figura G2 - Mapa de cobertura del prototipo 4G-SDR (Valores de RSRP). Fuente: Elaboración propia*

## Anexo H

### Información sobre velocidades teóricas de los enlaces de subida y bajada en 4G

Depende del valor de BW que se use en el duplexaje (FDD), por ejemplo, si utiliza 10 MHz (50 RB), como el que se ha configurado en el equipo LimeSDR, el uso del espectro es 10+10 MHz.



\* La tabla de velocidades es en un entorno de laboratorio con 1 solo usuario. En entornos reales dicha velocidad es menor (verificar con Speed Test).

*Figura H1 – Uso de FDD en el enlace de subida y bajada*

Según la imagen anterior, la velocidad teórica para 10 MHz sería de 100 Mbps, para un sólo usuario cerca a la estación base. La velocidad obtenida en un entorno real es menor al teórico. Uno puede saber este valor, si tiene un equipo Samsung, marcando el siguiente código `*#0011#`. En la siguiente gráfica se muestra una serie de resultados en los que se aprecia la diferencia de ancho de banda utilizado: 1,4+1,4 MHz, 10+10MHz y 20+20 MHz [73].

ServiceMode	ServiceMode	ServiceMode
MAS	MAS	MAS
<b>LTE-BASIC Info</b>	<b>LTE-BASIC Info</b>	<b>LTE-BASIC Info</b>
Band:2 BW: 1.4MHz	Band:2 BW: 10MHz	Band:28 BW: 15MHz
DL & UL Frequency: 0 / 0	DL & UL Frequency: 700 / 18700	DL & UL Frequency: 9435 / 27435
MIMO Mode/MIMO RI: TBD / -	MIMO Mode/MIMO RI: TBD / 1	MIMO Mode/MIMO RI: TBD / 2
Serving Cell ID:102 (PCI:0)	Serving Cell ID:101 (PCI:280)	Serving Cell ID:252 (PCI:188)
Registered PLMN: 716 10	Registered PLMN: 716 10	Registered PLMN: 716 10
RSRP:- RSRQ:- RSSI:-	RSRP:-100 RSRQ:-7 RSSI:-85	RSRP:-75 RSRQ:-9 RSSI:-51
TAC:40511 SINR:-19	TAC:13791 SINR:-5	TAC:14191 SINR: 17
RRC: IDLE	RRC: CONNECTED	RRC: CONNECTED
Tx Pwr: -	Tx Pwr: 23	Tx Pwr: 2
Ant RSRP Diff:0(Avg:0)	Ant RSRP Diff:-14(Avg:-11)	Ant RSRP Diff:-8(Avg:-4)
CA:NONE, SC_NUM:0	CA:NONE, SC_NUM:0	CA:NONE, SC_NUM:0
RB(DL/UL):0/0	RB(DL/UL):9/3	RB(DL/UL):0/8
Max RB(DL/UL):0/0	Max RB(DL/UL):9/8	Max RB(DL/UL):4/8
IMEI Status : OK	IMEI Status : OK	IMEI Status : OK

*Figura H2 - Ejemplos de medición de valores del tipo y ancho de banda*

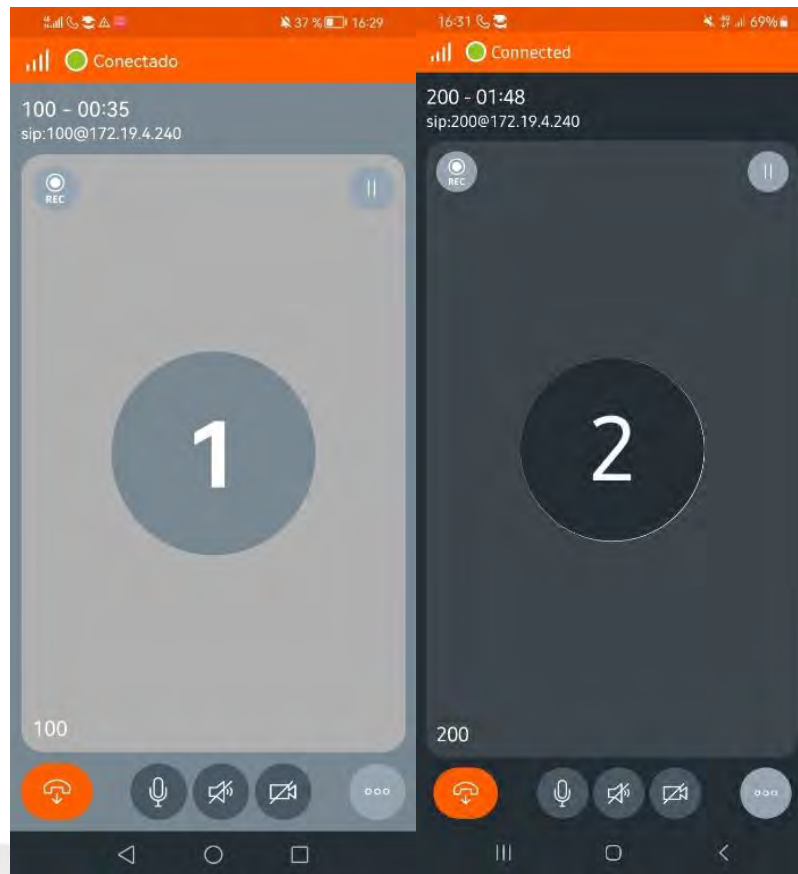
## Anexo I

Tabla II. Fórmulas para el cálculo de los valores mínimos de velocidad y asimetría. Fuente: [68]

INDICADOR	DETALLES
CVM	<p><b>Cumplimiento de Velocidad Mínima</b></p> <p><b>Definición:</b> Es el porcentaje de mediciones (TTD) de las velocidades de bajada y subida que cumplen con la velocidad mínima.</p> <p>Para el caso de las mediciones de velocidad del servicio de Internet que cumple con los parámetros de banda ancha, la fórmula es la siguiente:</p> $CVM = \frac{\sum \frac{\text{Valor resultante de la medición TTD expresado en Mbps}}{\text{Velocidad nominal contratada expresado en Mbps}}}{\text{Total de mediciones TTD}} \times 100\% \geq 70\%$ <p>En tanto, para mediciones de velocidad del servicio de Internet que no se encuentra definido como banda ancha, se debe aplicar la siguiente fórmula:</p> $CVM = \frac{\text{Número de mediciones TTD} \geq 40\% \text{ de la velocidad contratada}}{\text{Total de mediciones TTD}} \times 100\%$ <p><b>Donde:</b></p> <p>TTD es la tasa de transferencia de datos (Ver Anexo N° 2).</p> <p>Asimismo, se considera en la evaluación, el error de muestreo, el cual depende de la cantidad de muestras colectadas.</p>
ASIMETRÍA	<p><b>Asimetría: velocidad de bajada / velocidad de subida</b></p> <p><b>Definición:</b> es el cociente entre la velocidad de bajada y la velocidad de subida</p> <p><b>Fórmula:</b></p> $\text{Asimetría} = \frac{\sum \left( \frac{\min[V_{sm}, V_{sc}]}{\min[V_{bm}, V_{bc}]} \right) \times 100\%}{\text{Total de mediciones TTD}} \geq 33.33\%$ <p><b>Donde:</b></p> <p><math>V_{sm}</math>: Velocidad de subida resultante de la medición TTD expresada en Mbps.  <math>V_{sc}</math>: Velocidad de subida contratada expresada en Mbps.  <math>V_{bm}</math>: Velocidad de bajada resultante de la medición TTD expresada en Mbps.  <math>V_{bc}</math>: Velocidad de bajada contratada expresada en Mbps.</p> <p>Se calcula como el promedio de los coeficientes de asimetría de cada medición. Para aquellos casos en que una medición de velocidad de subida y/o bajada resulte por encima de su valor contratado, para el cálculo de la asimetría, corresponde el valor de la velocidad contratada.</p>
VP	<p><b>Velocidad Promedio (bajada y subida)</b></p> <p><b>Definición:</b> Es el promedio aritmético de las mediciones TTD realizadas.</p> <p><b>Fórmula:</b></p> $VP = \frac{\text{Valor resultante de la medición TTD}}{\text{Total de mediciones TTD}}$ <p><b>Tasa de transferencia de datos (TTD):</b> Definido como la velocidad media de transferencia de datos desde el usuar servidor de prueba (ISP, NAP, Tramo internacional, bajada: sentido servidor-usuario; subida: sentido usuario-servidor) periodo determinado, medido en bits por segundo.</p> <p><b>Fórmula:</b></p> $TTD = \frac{\text{Volumen de datos (bits)}}{\text{Duración de la prueba (segundos)}}$

Nota: El valor de asimetría debe ser mayor del 33.33%

## Anexo J



*Figura J1 - Prueba de llamada VOIP entre 2 anexos. Fuente: Elaboración propia*



*Figura J2 - Parámetros de la llamada VOIP. Fuente: Elaboración propia*

## Anexo K

### Análisis del radio de cobertura del prototipo 4G

Con base en las pruebas de campo realizadas a la solución 4G-LTE basada en SDR, se observó que el radio de cobertura experimental en exteriores fue de aproximadamente **10 metros**, debido a que, al superar esta distancia, la calidad de la señal disminuyó notablemente, afectando la estabilidad de la conexión. Esta distancia tan reducida puede atribuirse a diversos factores prácticos como las limitaciones de potencia de transmisión del SDR, interferencias del entorno, obstrucciones físicas, y pérdidas en los elementos de conexión del sistema. En contraste, el radio de cobertura teórico se estimó en 1.08 km, aplicando un modelo de pérdida de trayectoria logarítmica (Ecuación 1.1) con los siguientes parámetros:

*Ecuación 1.1 - Formula para el cálculo de Link Budget en Uplink. Fuente: [56]*

$$P_M + G_M - \text{shadow fading margin} - \text{orientation/body loss} - L_P + G_A - L_C + G_D = S_{\min}$$

Where:

- $L_P$  = Path loss between base station and mobile station (dB)
- $P_M$  = Mobile station transmitter power (24 dBm = 250 mW)
- $G_M$  = Mobile station antenna gain (0 dBi)
- $L_C$  = Typical base station receiver antenna cable and filter loss (2 dB)
- $G_A$  = Typical base station receiver antenna gain (18 dBi)
- $G_D$  = Diversity Gain (5 dB)
- $S_{\min}$  = Base Station receiver sensitivity (dBm)

- $P_m$ : 23 dBm (valor aprox. de potencia del móvil)
- $G_m$ : 0
- SFM: 12,8
- Orientation body: 3 dB
- $G_a$ : 10 dBi (antena conectada al SDR)
- $L_c$ : 2 dB
- $G_d$ : 5dB
- $S$  (min): -120 dBm (valor de la recepción del SDR)

Con esto:  $L_p = 124,2 \text{ dB} = 122,8 + 35,2 \log(d)$  [56], donde “d” es el radio de cobertura, que resulta aproximadamente de **1,08 km**, asumiendo condiciones ideales. La gran diferencia entre el valor teórico (1.08 km) y el valor experimental (10 m) se explica por condiciones reales no consideradas en el modelo teórico, como:

- Potencia de transmisión efectiva limitada del SDR, mucho menor que la de estaciones base comerciales.
- Pérdidas adicionales no modeladas, como interferencias locales, obstáculos, y ruido del entorno.
- Configuración del entorno de pruebas, incluyendo la conectividad a Internet del campus, que puede afectar el rendimiento observado.
- Frecuencia de operación (Banda 7 – 2600 MHz), que tiene mayor atenuación por obstáculos y por el aire, comparada con bandas más bajas.



## Anexo L

## Comparación entre planes postpago por operador móvil [72]

## Plan Pospago de Bitel

## Plan Pospago de Entel

Operador	Nombre del Plan	Datos	Precio
Bitel	PLAN FLASH 29.90	20 GB	S/ 29.9
Entel	POWER 29.90	10 GB	S/ 29.9
Movistar	PLAN MI MOVISTAR S/29.90	10 GB	S/ 29.9
Claro	MAX 29.90	10 GB	S/ 29.9

Como se puede observar entre los planes más bajos de los 4 operadores, el costo aproximadamente es de 30 soles en todos los casos. Se considera este precio base en el cálculo de los ingresos anuales por usuario.

## Anexo M

## Cotizaciones de los componentes de los subsistemas

## Cotizaciones de los componentes del subsistema de energía



## Presupuesto #11656

**Autosolar Energía del Perú S.A.C.**

RUC 20602492118

Megacentro Lurín km 29,5 Panamericana Sur, Referencia: Frente a

Campomar, Parada Puente Vidu,

15047 Lurín, Lima

01 715 1357

autosolar@autosolar.pe

**Luis Ramos**

0

luis.ramos@pucp.edu.pe

Documento	Número	Agente	Fecha	Validez de la oferta
Presupuesto	11656	Alex Rony Barzolo Barrientos	09.06.2025	15 días, salvo cambio de tarifa

Código	Descripción	Cantidad	Precio ud	Subtotal
1006012	Panel Solar LONGI LR5-66HPH HIM05 505W	3	S/. 579,66	S/. 1.738,98
9001021	Placa Potencia 3.5kW 24V Suntaic Micros	1	S/. 446,60	S/. 446,60
1708238	Batería GEL 12V 100Ah Tensite	10	S/. 438,06	S/. 4.380,60
1501662	Estructura 3 Paneles 144c 15º Inclinada Falcat	1	S/. 386,90	S/. 386,90

Descuento	Envío	Subtotal	IGV	Total
S/. 638,62	S/. 0,00	S/. 6.953,08	S/. 1.251,56	S/. 8.204,64

CONTINUAR CON EL PEDIDO

PARA TRAMITAR EL PEDIDO DEL PRESUPUESTO, PULSE AQUI

Si realiza el pago por transferencia bancaria, indique en el concepto el n° de presupuesto y mande el justificante de pago a alex.barzolo@autosolar.pe.

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. Cuenta en Soles - Banco de crédito del Perú (BCP)          | 194-2448005-0-22        |
| 2. Cuenta en Soles - Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA)   | 0011-0397-0100013290-70 |
| 3. Cuenta en Soles - Banco Internacional del Perú (INTERBANK) | 6373001500225           |
| 4. Cuenta en Dólares - Banco de crédito del Perú (BCP)        | 194-2552861-1-83        |
| 5. Cuenta en Dólares - Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA) | 0011-0397-0100013304-79 |

## Cotización de gabinete exterior con bandejas



**HJE PERU ELECTRONIC E.I.R.L.**  
 RUC 20611147687  
 AV. ENRIQUE FERMI 510 URB. FIORI , SAN MARTÍN DE PORRES , LIMA - LIMA  
 D. Comercial: AV. ENRIQUE FERMI 510 URB. FIORI  
 Central telefónica: +51903582697 | +51925785139  
 Email: ventas@hje.pe  
 Web: www.hje.pe  
 VENTAS DE RACK, GABINETE, CAMARAS DE SEGURIDAD

COTIZACIÓN  
 COT-00001449

Cliente: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU Fecha de emisión: 2025-06-05 / 18:20:11  
 RUC: 20155945860  
 Dirección: AV. UNIVERSITARIA NRO. 1801 URB. PANDO , San Miguel , Lima - LIMA  
 T. Pago: Contado  
 Vendedor: Administrador





COD.	CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	P.UNIT	DTO.	TOTAL
1028	1	NIU	GABINETE EXTERIOR DE 38RU DE PISO	4,200.00	0.00	4,200.00
1034	3	NIU	BANDEJA DE 4 OREJAS	150.00	0.00	450.00
<b>OP. GRAVADAS: S/</b>						<b>3,940.68</b>
<b>IGV: S/</b>						<b>709.32</b>
<b>TOTAL A PAGAR: S/</b>						<b>4,650.00</b>

### Información adicional:

**PAGOS:**  
**SALDO: S/ 4,650.00**



**Cotización de los equipos de telecomunicaciones (equipo SDR, lectora con tarjetas y adicionales)**

 <b>SUN GROUP COMPANY E.I.R.L.</b> <small>RUC: 20520643258</small> <small>Av. Mariscal Cornejo N° 357 - PUNTO LIBRE</small> <small>Telefono: 844 2758 - Email: 43571221</small>					
<small>Automatización industrial, proyectos llave en mano, ensamblaje de tableros industriales, diseño y reparación de equipos electrónicos industriales</small> <small>ABB SIEMENS AuCom legend AD SANTRONIC 3M Antalis LUNTRONIC</small>					
<b>COTIZACION 5066-2025</b>					COTIZACION N°: 5066
Lima, 7 de junio del 2025					
SEÑORES:					
Pontificia Universidad Católica del Perú					
ATENCION:					
Ing. Luis Ramos					
REFERENCIA:					
Partes					
ITEM	CANT	UNID	DESCRIPCION	P/U	V. TOTAL
01	01	Uni	<b>CONTROL CARD</b> Flexible, next-generation, open source software-defined radio 	1350.00	\$1,350.00
02	01	Uni	<b>SIM CARD READER</b> OYEITIMES lector de tarjetas SIM + 5 uds 2FF/3FF/4FF programable 4G VoLTE ISIM tarjeta USIM WCDMA GSM USIM + herramientas personalizadas SIM 	120.00	\$120.00
03	01	10	<b>OYEITIMES Tarjeta SIM LTE USIM</b> Programable en blanco 4G VoLTE ISIM WCDMA GSM Nano Tarjeta Micro SIM 2FF 3FF 4FF 	15.00	\$150.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$1,620.00</b>
Son: Mil seis cientos veinte con 00/100 dólares americanos					
* El Precio NO Incluye IGV					
<b>CONDICIONES COMERCIALES</b>					
TIEMPO DE ENTREGA:	15 días				
FORMA DE PAGO:	Contado contraentrega				
GARANTIA:	12 meses				VALIDEZ DE LA OFERTA

## Cotización de antena sectorial UBIQUITI



### TELENOR PERÚ S.R.L

PRINCIPAL » JR : ORBEGOSO #860 C.C  
ELECTRONICA CENTRAL INT 2A - TRUJILLO

[ESPECIALISTA EN REDES Y  
TELECOMUNICACIONES]  
Telf: 044- 244489 / 943900821  
Email : ventas@telenorperu.com /  
info@telenorperu.com  
WWW.TELENORPERU.COM

RUC 20600270169

**PROFORMA**

0001-0001762

<b>DOCUMENTO</b>	RUC 20155945860	<b>FECHA EMISIÓN</b>	10/06/2025
<b>CLIENTE</b>	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU	<b>FECHA VENCIMIENTO</b>	-
<b>DIRECCIÓN</b>	AV. UNIVERSITARIA - NRO: 1801 - URBANIZACION PANDO - SAN MIGUEL	<b>MONEDA</b>	SOLES

CANT.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P. UNIT.	TOTAL	
1.00	AM-2G15-120	UBIQUITI ANTENA 2.4 GHZ SECTORIAL 15DBI, 120º 2X2 MIMO - *AM-2G15-120	UNIDADES	639.00	639.00	
SON SEISCIENTOS TREINTA Y NUEVE Y 00/100 SOLES						
				<b>GRAVADO</b>	S/	541.53
				<b>I.G.V. 18%</b>	S/	97.47
				<b>TOTAL</b>	<b>S/</b>	<b>639.00</b>

<b>USUARIO</b>	ADMIN - 10/06/2025 01:32 PM
<b>OBSERVACIONES</b>	NO INCLUYE COSTOS DE ENVÍO.
<b>CONDICIÓN DE PAGO</b>	CONTADO
<b>CUENTAS BANCARIAS</b>	BBVA: S/ 0011-0619-0100004645 - TELENOR PERU S.R.L CCI : 011-619-000100004645-46
	BN - DETRACCIONES : 00-749-007931

## Cotización de torre autoportada con sistema de protección eléctrica



# EQUIPO SOLAR S.A.C

RUC 20605399577

Diseño, Suministro e Instalación de Sistemas de Energía Solar  
Diseño y Fabricación de Estructuras Metálicas  
Soluciones y Servicios en Telecomunicaciones



Lima 11 de junio del 2025

COT.473 - 2025

Señores:  
P.U.C.P  
Presente.-

Atención: **Ing. Luis Ramos.**

Referencia: Torre auto soportada de 10 metros y sistema pozo a tierra.

**De mi mayor consideración:**

En atención a su amable requerimiento permítanos ofrecerle las estructuras que detallamos a continuación:

### PROPUESTA ECONOMICA

Item	Descripción	Cant	Costo	Total
1	<p>Torre auto soportada de 10 metros de 80x80cm, galvanizado en caliente compuesto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; El primer tramo vertical es de ángulo de 2" x 3/16" de 4 metros.</li> <li>&gt; El segundo tramo vertical es de ángulo de 2" x 3/16" de 3 metros.</li> <li>&gt; El tercer tramo vertical es de ángulo de 1 1/2" x 3/16" de 3 metros.</li> <li>&gt; Todas las diagonales y horizontales son de ángulo de 1 1/2" x 1/8".</li> <li>&gt; Las planchas de la base son de 3/8" de espesor.</li> <li>&gt; Las placas de unión de ángulos son de planchas de 4.5mm de espesor.</li> </ul> <p>Incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los pernos de anclaje y toda la pemeoría de ensamble.</li> </ul> <p>Peso estimado de la torre: 495kg</p>	1 und	S/ 7,890.00	S/ 7,890.00
2	<p>Sistema de protección contra descargas atmosféricas, compuesto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 01 pararrayos tetrapuntal tipo Franklin</li> <li>&gt; 01 mástil de pararrayos de 1.5metros</li> <li>&gt; 14 metros de cable de cobre desnudo 1/0AWG de 50mm2</li> <li>&gt; 12 metros de fleje de cobre de 80mm x 1mm para pozo a tierra.</li> <li>&gt; 03 saco de cemento conductor.</li> <li>&gt; 02 sacos de bentonita.</li> <li>&gt; 04 aisladores tipo carrete de 1 sola vía para bajada de cable de cobre desnudo.</li> <li>&gt; 04 soporte de aisladores.</li> <li>&gt; 02 grapas tipo Crosby.</li> </ul>	1 und	S/ 1,615.00	S/ 1,615.00
<b>SUB TOTAL</b>				S/ 9,505.00
<b>IGV</b>				S/ 1,710.90
<b>TOTAL</b>				S/ 11,215.90

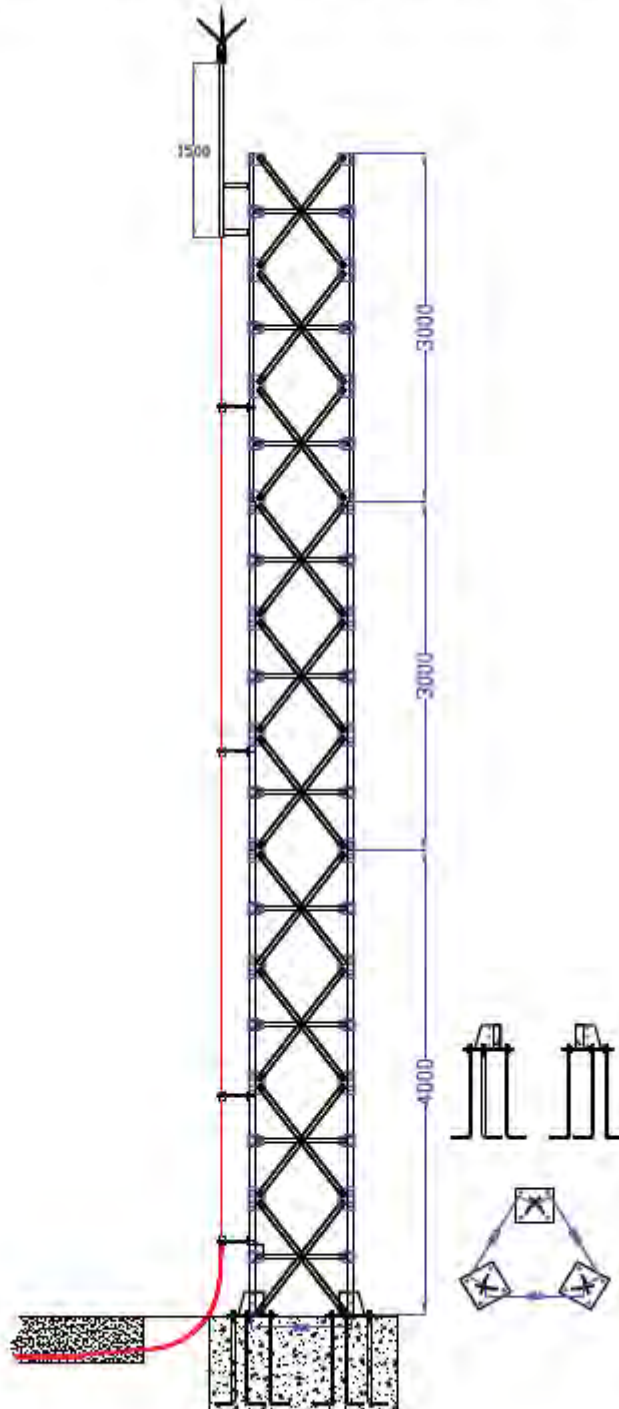
### CONDICIONES COMERCIALES:

<b>Moneda</b>	Los precios están en Soles.
<b>Forma de pago</b>	50% de adelanto y 50% contra entrega.
<b>Tiempo de entrega</b>	15 días luego de colocada la orden de compra.
<b>Validez de la oferta</b>	14 días
<b>Lugar de recepción</b>	Las estructuras serán entregadas en nuestros talleres
<b>Cta Corriente BCP Soles</b>	191-8421171-0-32
<b>CCI Soles BCP</b>	002-19100842117103256

**EQUIPO SOLAR S.A.C.**

Edson Dante Puente Curt  
Gerente General

## TORRE AUTOSOPORTADA DE 10 METROS CON SISTEMA POZO A TIERRA



## Anexo N

## Flujo de caja de la solución

Recursos Humanos	Costos (S/.)	Días	Cant.	Subtotales (S/.)	
Ingeniero	S/ 350,00	7	1	S/ 2.450,00	Para el proceso de instalación, se propone 2 días de viaje y 5 días correspondientes a las tareas de instalación.
Técnico	S/ 200,00	7	2	S/ 2.800,00	
Traslados de personal	S/ 1.500,00	1	3	S/ 4.500,00	
Seguros	S/ 300,00	1	1	S/ 300,00	
				<b>S/ 10 050,00</b>	
Servicios logísticos	Costos (S/.)	Subtotales (S/.)			
Traslado de equipos y materiales	S/ 2.000,00	S/ 2.000,00			
		<b>S/ 2 000,00</b>			
Equipos y Materiales	Costos (S/.)	Subtotales (S/.)			
Telecomunicaciones	S/ 13.482,00	S/ 13.482,00			
Suministro de Energía	S/ 6.953,08	S/ 6.953,08			
Protección Eléctrica	S/ 3 230	S/ 3 230,00			
Infraestructura	S/ 13.103	S/ 13.102,50			
		<b>S/ 36 767,58</b>			
Resumen Presupuestal		Subtotales (S/.)			
Recursos Humanos		S/ 10.050,00			
Servicios logísticos		S/ 2.000,00			
Equipos y Materiales		S/ 36.767,58			
Presupuesto	CAPEX	<b>S/ 48.817,58</b>			

**Anexo O****Cálculo del VAN, TIR, IR**

Usuarios x mes		<b>55</b>	Desviación					
	Usuarios x año	660	0%					
		<b>660</b>						
	<b>Precio del servicio x usuario</b>	<b>S/ 30,00</b>						
		0	1	2	3	4	5	
100%	# de Usuarios		660	660	660	660	660	660
	Precio Ticket Servicio		S/ 30,00	S/ 30,00	S/ 30,00	S/ 30,00	S/ 30,00	S/ 30,00
	Ingresos total		S/ 19.800	S/ 19.800	S/ 19.800	S/ 19.800	S/ 19.800	S/ 19.800
149	Mensualidad Starlink		S/ 1.788	S/ 1.788	S/ 1.788	S/ 1.788	S/ 1.788	S/ 1.788
12	Mantenimiento		S/ 2.400	S/ 2.400	S/ 2.400	S/ 2.400	S/ 2.400	S/ 2.400
50%	Costo de ventas		S/ 4.188	S/ 4.188	S/ 4.188	S/ 4.188	S/ 4.188	S/ 4.188
	<b>Margen Bruto</b>		<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>
	<b>EBITDA</b>		<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>	<b>S/ 15.612</b>
5%	Depreciación		S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764
	EBIT		S/ 5.848	S/ 5.848	S/ 5.848	S/ 5.848	S/ 5.848	S/ 5.848
	Impuestos		S/ 1.725	S/ 1.725	S/ 1.725	S/ 1.725	S/ 1.725	S/ 1.725
	<b>NOPAT</b>		<b>S/ 4.123</b>	<b>S/ 4.123</b>	<b>S/ 4.123</b>	<b>S/ 4.123</b>	<b>S/ 4.123</b>	<b>S/ 4.123</b>
	Depreciación		S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764	S/ 9.764
	Capex	<b>S/ 48.818</b>						
	Inv capital de trabajo							
	<b>Flujo de caja Libre</b>	<b>-S/ 48.818</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>
	Prestamos.		S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0
	Amortizaciones de la Deuda.		S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0
	Intereses.		S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0	S/ 0
	<b>Flujo de caja financiero</b>	<b>-S/ 48.818</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>	<b>S/ 13.887</b>
	Saldo de caja Acumulado		S/ 13.887	S/ 27.773	S/ 41.660	S/ 55.547	S/ 69.433	

<b>WACC</b>	CCPP	<b>11,00%</b>
	<b>VAN</b>	<b>S/ 2 506,22</b>
	TIR	<b>13,02%</b>
	IR	<b>1,05</b>