



Análisis de calidad de servicio y cobertura de sistemas de cuarta generación de telefonía celular en los interiores de edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí.

Fraga Caiza, Dennis Marcelo y Gallo Sánchez, César Joel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Altamirano Carrillo, Carlos Daniel, PhD.

23 de enero del 2023

13/02/23, 16:14

Trabajo Titulación - Fraga - Gallo

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Revisión Tests

NOMBRE DEL ALUMNO

DENNIS MARCELO FRAGA CAIZA



NOMBRE DEL ARCHIVO

DENNIS MARCELO FRAGA CAIZA - Trabajo Fraga - Gallo

SE HA CREADO EL INFORME

13 feb 2023

Resumen

Fragmentos marcados	10	0,9 %
Fragmentos citados o entrecuillados	1	0,1 %

Coincidencias de la Web

arcotel.gob.ec	3	0,3 %
uva.es	2	0,2 %
gsma.com	1	0,1 %
puentedehiemo.org	1	0,1 %
es.tl	1	0,1 %
wikipedia.org	1	0,1 %
servenvolp.com	1	0,1 %
uta.edu.ec	1	0,1 %

1 de 11 fragmentos

Fragmento del alumno **MARCADO**

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Mejor coincidencia en la Web

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. ÁREA: ...

Repositorio Universidad Técnica de

Ambato <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/36148/1/PR055ec.pdf>

2 de 11 fragmentos

Fragmento del alumno **MARCADO**



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

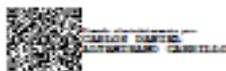
Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "Análisis de calidad de servicio y cobertura de sistemas de cuarta generación de telefonía celular en los interiores de edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí" fue realizado por los señores Fraga Calza, Dennis Marcelo y Gallo Sánchez, César Joel, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 13 de febrero de 2023

Firma



Ing. Carlos Daniel Altamirano Carrillo, PhD

C.C. 1715060040



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Fraga Caiza, Dennis Marcelo** y **Gallo Sánchez, César Joel**, con cedula de ciudadanía n°1003118708 y 1721526976, declaramos que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **Análisis de calidad de servicio y cobertura de sistemas de cuarta generación de telefonía celular en los interiores de edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 13 de febrero de 2023

Firma

Fraga Caiza, Dennis Marcelo

C.C. 1003118708

Gallo Sánchez, César Joel

C.C. 1721526976



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Nosotros, **Fraga Caiza, Dennis Marcelo** y **Gallo Sánchez, César Joel**, con cedula de ciudadanía n°1003118708 y 1721526976, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis de calidad de servicio y cobertura de sistemas de cuarta generación de telefonía celular en los interiores de edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 13 de febrero de 2023

Firma

Fraga Caiza, Dennis Marcelo

C.C. 1003118708

Gallo Sánchez, César Joel

C.C. 1721526976

Dedicatoria

Dedico el proyecto de investigación de mis padres, Antonio y Juanita quienes con cariño, bondad, empatía y determinación han sabido apoyarme en todo momento convirtiéndose en una base importante en mi vida. A mi hermana Patricia quien ha sabido cuidarme y brindarme su ayuda incondicional en todo momento. A mis hermanos Mauricio, Verónica, Vinicio, Paul y Alejandro quienes han estado en las buenas y en las malas acompañándome en este proceso. Este logro es para todos ustedes.

Dennis Marcelo Fraga Caiza

Este trabajo de titulación está dedicado a mis padres Edmundo y Gloria que con tanto esfuerzo, dedicación y amor me han brindado sus mejores ejemplos, valores y su inmenso apoyo incondicional para mi formación primero como persona y luego como profesional. A mi hermano Brayan que siempre ha estado en todo momento conmigo. Esto es de ustedes.

César Joel Gallo Sánchez

Agradecimiento

Agradezco a Dios por otorgarme salud y fuerza para lograr este objetivo por el cual tanto he trabajado.

A mi madre Juanita quien es una persona valiente, honesta y trabajadora, todo esto me ha motivado a seguir adelante y nunca rendirme ante cualquier adversidad.

A mi padre Antonio quien me ha demostrado como ser tolerante y orgulloso al verme cumplir mis metas.

A mi hermana Patricia por haberme apoyado incondicionalmente durante el transcurso de mi carrera, sabiendo comprenderme y confiar en cada decisión que he tomado.

A mis hermanos Mauricio, Verónica, Vinicio, Paul y Alejandro quienes me han brindado su mano en todo momento. A mis sobrinos con los cuales he compartido lindos momentos.

A mi princesa Victoria quien me motiva diariamente con su sonrisa para superar cada reto que me propongo en mi vida.

A los docentes del departamento de eléctrica, electrónica y telecomunicaciones que me ofrecieron un sinnúmero de enseñanzas y conocimiento durante toda la carrera.

Al personal del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE) que me dieron un espacio para realizar este proyecto.

A Fernando Lara quien me brindó soporte durante el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos con los que he compartido hermosos momentos dentro y fuera de la universidad.

Finalmente, quiero brindar mi más sincero agradecimiento al Ing. Daniel Altamirano por su dedicación, comprensión y paciencia durante el desarrollo del proyecto.

Dennis Marcelo Fraga Caiza

Agradecimiento

Agradezco a mi Dios por ser mi guía, mi fortaleza y esa luz que día a día alumbra mi camino.

A mis padres Edmundo y Glorita que son la principal motivación para alcanzar mis objetivos. Por enseñarme el amor verdadero de una familia y ser mi mayor ejemplo de trabajo, lucha, perseverancia, constancia en todo momento, por levantarme en esos momentos de caídas, por haberme enseñado sus valores que me han formado como una persona de bien y por siempre encontrar la manera de verme feliz.

A mi hermano que es mi alma gemela y mejor amigo, que en todo momento está conmigo brindándome su hombro en los momentos malos y también estando en los momentos felices. A mis familiares que siempre han estado pendientes de mí.

A mis compañeros y amigos que a lo largo de este camino he conocido, gracias por brindarme su amistad y haberme permitido formar parte de grandes momentos juntos, en especial a Juanka, Kevin y Smaylin que han estado conmigo desde los inicios de la carrera, donde hemos pasado momentos de tristeza y felicidad, desveladas y amanecidas, que nos han llevado a formar una linda amistad y más que amigos ser como hermanos.

A mi tutor Ing. Daniel Altamirano por permitirme hacer parte de este proyecto, por sus consejos, paciencia y su guía para poder culminar este trabajo.

Al Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE) por abrirnos las puertas de sus instalaciones y brindarnos todas las facilidades y ayuda para el desarrollo de este proyecto.

A mi compañero de tesis Dennis por su tiempo, conocimientos, dedicación y ayuda que nos ha permitido finalizar de la mejor manera este trabajo de titulación.

A todos los llevo en mis mejores recuerdos, gracias por su tiempo y por estar en esos momentos que pasaran a ser especiales en mi vida, desde lo más profundo de mi corazón.

César Joel Gallo Sánchez

Índice de Contenidos

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Agradecimiento.....	8
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo I	20
Planteamiento del problema de investigación	20
Antecedentes	20
Justificación.....	21
Objetivos	23
<i>Objetivo General</i>	23
<i>Objetivos Específicos</i>	23
Capítulo II	24
Fundamento Teórico.....	24
Redes de telefonía móvil.....	24
Cuarta Generación Long Term Evolution (LTE).....	24
Arquitectura de red LTE	26
<i>E-UTRAN</i>	26
<i>User Equipment (UE)</i>	27
<i>Evolved Packet Core (EPC)</i>	27
Redes 4G en Ecuador.....	28

	10
Industria y Regulación de los servicios móviles.....	30
Generalidades.....	30
ARCOTEL.....	30
GSMA.....	31
Aspectos regulatorios del espectro radioeléctrico.....	32
Radio Definido por Software RDS.....	34
Arquitectura.....	35
<i>Antenas</i>	36
<i>RF Front-End</i>	36
<i>DAC y ADC</i>	37
<i>Digital Front End</i>	37
<i>CPU</i>	38
<i>Memoria</i>	39
Software y Hardward.....	39
Indicadores clave de rendimiento (KPI) de una red 4G.....	40
Calidad de Servicio (QoS).....	40
RSRP.....	42
RSRQ.....	42
RSSNR.....	43
Tasa de datos.....	43
Latencia.....	44

	11
Capítulo III	45
Metodología e Implementación	45
Materiales.....	45
Implementación	46
<i>Desarrollo y configuración.....</i>	<i>47</i>
<i>Ejecución de servicio 4G.....</i>	<i>52</i>
Metodología de evaluación.....	56
<i>Características.....</i>	<i>56</i>
<i>Condiciones para elegir los indicadores a medir.....</i>	<i>57</i>
<i>Definición de Lugares dentro del campus Universitario ESPE donde se realizan las mediciones.....</i>	<i>58</i>
<i>Aplicaciones móviles usadas para medir los KPI</i>	<i>60</i>
Escenario de Prueba 1	60
Escenario de Prueba 2.....	65
Capitulo IV	71
Análisis de Resultados.....	71
Introducción.....	71
Descripción de las pruebas realizadas	71
<i>Escenario de Prueba 1: Pruebas de cobertura y calidad de servicio en estación radio base 4G implementada en SDR (ESPE_LTE).....</i>	<i>71</i>
<i>Escenario de Prueba 2: Pruebas de cobertura y calidad de servicio de Operadoras móviles comerciales dentro del campus Universitario.....</i>	<i>80</i>

<i>Encuesta MOS Experiencia del Usuario de la red ESPE_LTE</i>	92
Mapas de Cobertura.....	97
<i>CLARO</i>	98
<i>MOVISTAR</i>	98
<i>CNT</i>	99
Conclusiones	104
Recomendaciones	105
Trabajos Futuros	106
Bibliografía.....	107
Apéndices	111

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Resultados de test de velocidad y calidad de la señal recibida en el UE.....</i>	72
Tabla 2 <i>Resultados de test de calidad de video.....</i>	78
Tabla 3 <i>Tasa de rendimiento promedio</i>	79
Tabla 4 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE.....</i>	81
Tabla 5 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en edificio central ESPE</i>	83
Tabla 6 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en edificio MED</i>	84
Tabla 7 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en edificio de posgrados.....</i>	86
Tabla 8 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en Coliseo ESPE.....</i>	87
Tabla 9 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en Biblioteca ESPE.....</i>	89
Tabla 10 <i>Resultados test de video operadoras comerciales en Biblioteca ESPE.....</i>	90
Tabla 11 <i>Rangos de KPIs según normativa SMA-QoS-9 ARCOTEL</i>	92
Tabla 12 <i>Condiciones RF en redes LTE.....</i>	92
Tabla 13 <i>Niveles de Potencia RSRP de redes 4G en Ecuador.....</i>	97
Tabla 14 <i>Escala de rendimiento por color mediante la aplicación mapa de cobertura móvil... </i>	100

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama simplificado de red LTE</i>	26
Figura 2 <i>Arquitectura EPC</i>	28
Figura 3 <i>Esquema de la arquitectura general de la SDR</i>	36
Figura 4 <i>Etapas de RX en SDR</i>	37
Figura 5 <i>Etapas de TX de SDR</i>	38
Figura 6 <i>Implementación de equipos para red LTE</i>	46
Figura 7 <i>Diagrama de USRP</i>	46
Figura 8 <i>Arquitectura LTE de srsLTE</i>	48
Figura 9 <i>Configuración de parámetros MCC y MNC en archivo epc.conf</i>	49
Figura 10 <i>Configuración de parámetros MCC y MNC en archivo enb.conf</i>	49
Figura 11 <i>Software GRSimWrite</i>	50
Figura 12 <i>Configuración de archivo user_db.csv</i>	52
Figura 13 <i>Sistema de lanzamiento de red LTE</i>	53
Figura 14 <i>Interfaz de módulo ENB</i>	53
Figura 15 <i>Interfaz de EPC</i>	54
Figura 16 <i>Tabla de enmascaramiento de la red LTE</i>	54
Figura 17 <i>Interfaz de red LTE</i>	55
Figura 18 <i>Red LTE en smartphone</i>	55
Figura 19 <i>Campus Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sangolquí</i>	59
Figura 20 <i>Escenario de Prueba 1</i>	61
Figura 21 <i>Radio Base 4G sobre tecnología SDR</i>	62
Figura 22 <i>Antena colocada en exteriores del CICTE</i>	62
Figura 23 <i>Toma de datos radio base red ESPE_LTE dentro del CICTE</i>	63
Figura 24 <i>Toma de datos en radio base en exteriores del CICTE a 20m de distancia</i>	63
Figura 25 <i>Toma de datos radio base en exteriores del CICTE a 200m de distancia</i>	64

Figura 26 Toma de datos radio base red ESPE_LTE en exteriores del CICTE a 300m de distancia.....	64
Figura 27 Toma de datos operadoras comerciales en Edificio Administrativo	65
Figura 28 Toma de datos operadoras comerciales en Edificio Central.....	66
Figura 29 Toma de datos operadoras comerciales en Edificio MED.....	66
Figura 30 Toma de datos operadoras comerciales en Laboratorios de Electrónica.....	67
Figura 31 Toma de datos operadoras comerciales en Coliseo.....	67
Figura 32 Toma de datos operadoras comerciales en Biblioteca	68
Figura 33 Toma de datos operadoras comerciales en Centro de Investigación y Posgrado.....	68
Figura 34 Interfaz con datos medidos en Network Cell info Lite con métricas LTE.....	69
Figura 35 Interfaz con datos medidos en nPerf con métricas de video.....	69
Figura 36 Relación de Potencia vs Distancia de red ESPE_LTE.....	73
Figura 37 Mediciones de calidad de la señal vs distancia	74
Figura 38 Mediciones de RSSNR vs distancia	75
Figura 39 Mediciones de Velocidad de Descarga vs RSSNR.....	75
Figura 40 Mediciones de Velocidad de carga vs RSSNR.....	76
Figura 41 Mediciones de Latencia vs potencia de la señal.....	77
Figura 42 Mediciones de Latencia vs RSSNR.....	77
Figura 43 Tasa de rendimiento promedio vs distancia UE.....	80
Figura 44 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE.....	81
Figura 45 Tasa de rendimiento promedio de operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE.....	82
Figura 46 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en edificio central ESPE	82

Figura 47 Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales edificio central ESPE	83
Figura 48 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en bloque MED.....	84
Figura 49 Tasa de rendimiento promedio de operadoras móviles comerciales bloque MED	85
Figura 50 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Centro de investigación y Posgrados	85
Figura 51 Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales en el edificio de posgrados ESPE.....	86
Figura 52 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Coliseo ESPE	87
Figura 53 Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales coliseo ESPE	88
Figura 54 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Biblioteca ESPE.....	88
Figura 55 Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales biblioteca ESPE ...	89
Figura 56 Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Laboratorios de electrónica ESPE.....	90
Figura 57 Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales en laboratorios electrónica ESPE.....	91
Figura 58 Encuesta MOS Calidad de Servicio.....	93
Figura 59 Resultados obtenidos a primera pregunta de encuesta.....	93
Figura 60 Resultados obtenidos a segunda pregunta de encuesta	94
Figura 61 Resultados obtenidos a tercera pregunta de encuesta.....	94
Figura 62 Resultados obtenidos a cuarta pregunta de encuesta	95
Figura 63 Resultados obtenidos a quinta pregunta de encuesta	96
Figura 64 Resultados obtenidos a sexta pregunta de encuesta	96
Figura 65 Mapa de cobertura Operadora Claro.....	98
Figura 66 Mapa de cobertura Operadora Movistar.....	98
Figura 67 Mapa de cobertura Operadora CNT.....	99

Figura 68 *Mapa de Cobertura Operadora Claro en interiores de la Universidad.....*101

Figura 69 *Mapa de Cobertura Operadora Movistar en interiores de la Universidad.....*102

Figura 70 *Mapa de Cobertura Operadora CNT en interiores de la Universidad.....*103

Resumen

El proyecto presenta el análisis de la calidad de servicio (QoS) y cobertura de los sistemas de telefonía celular cuarta generación (4G) en los interiores de las edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Matriz. Para este fin, se investiga el funcionamiento, y las características principales de la tecnología 4G con su arquitectura y se considera la metodología relacionada con la calidad de servicio, satisfacción de usuario y cobertura basados en la guía GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation Guideline” y la normativa nacional propuesta por la ARCOTEL publicada en “Parámetros de calidad (QoS) del Servicio Móvil Avanzado”. Como punto de partida se realizará el análisis de la operadora móvil implementada en la ESPE usando la tecnología de radio definida por software (RDS). Para la toma de mediciones y procesamiento de datos se utilizan herramientas de hardware como teléfonos celulares con tecnología 4G, equipos de medición disponibles en los laboratorios y herramientas de software para mediciones de 4G. Posteriormente, se realizará el mismo análisis sobre las operadoras comerciales y se mostrará los resultados medidos de calidad de servicio y cobertura en distintas zonas de la ESPE con énfasis en los interiores de las edificaciones de la Institución. Finalmente se propondrá un plan de mejora, considerando la normativa vigente para las zonas con QoS deficiente.

Palabras clave: Radio definido por software, Cuarta Generación Telefonía Celular, Calidad de Servicio

Abstract

The project presents the analysis of the quality of service (QoS) and coverage of fourth generation (4G) cellular telephone systems inside the buildings of the University of the Armed Forces-ESPE Headquarters campus. For this purpose, the operation and the main characteristics of 4G technology with its architecture are investigated and the methodology related to the quality of service, user satisfaction and coverage based on the GSMA guide "4G/5G Network Experience Evaluation Guideline" is considered. " and the national regulations proposed by ARCOTEL published in "Quality parameters (QoS) of the Advanced Mobile Service". As a starting point, the analysis of the mobile operator implemented in the ESPE using radio technology defined by software (RDS) will be carried out. To take measurements and process data, hardware tools such as cell phones with 4G technology, measurement equipment available in laboratories, and software tools for 4G measurements are used. Subsequently, the same analysis will be carried out on the commercial operators and the measured results of service quality and coverage will be shown in different areas of the ESPE with emphasis on the interiors of the Institution's buildings. Finally, an improvement plan will be proposed, considering the current regulations for areas with deficient QoS.

Keywords: Software Defined Radio, Fourth generation of Cellular Telephony, Quality of service

Capítulo I

Planteamiento del problema de investigación

Antecedentes

Los sistemas de comunicaciones móviles cada vez se encuentran en constante desarrollo y evolucionan llegando a crearse nuevos sistemas con nuevas tecnologías donde los equipos celulares son compatibles con la diversa gama de tecnologías y sus servicios ya sean en voz, datos o multimedia. Toda esta creciente demanda de servicios y usuarios conlleva a ofrecer un nivel alto en la calidad de servicio (QoS). Las situaciones descritas anteriormente, hacen que las operadoras móviles migren a nuevas tecnologías que brinden una mayor eficiencia espectral como es el caso de LTE (Long Term Evolution), donde se requieren cambios en la arquitectura que soporta cada tecnología (Campo et al., 2018).

Según el último censo realizado durante 2020-2021 sobre la situación digital de Ecuador, se determinó que el país cuenta con 17.77 millones de habitantes, de los cuales 13.82 millones hacen uso de dispositivos móviles celulares que corresponden al 77.8% de los habitantes en el país, de este porcentaje 10.5 millones de ecuatorianos tienen conectividad a tecnología 4G (Intel, 2021).

Hoy en día la tecnología más usada en el Ecuador es 4G-LTE (Fourth Generation - Long Term Evolution) que comenzó a funcionar a partir del año 2013 y ofreciendo una mejora en acceso a la red y gran capacidad para el uso de datos. CNT fue la primera empresa en lanzar al mercado esta tecnología a finales del año 2013 y posteriormente las empresas de Movistar y Claro hacen el lanzamiento al mercado a mediados del año 2015 (Reinoso, 2017).

La tecnología de Radio definida por Software (SDR) se ha venido impulsando a partir de la década de los 90, y actualmente está teniendo un impacto muy importante dentro del ámbito investigativo. Este impacto está justificado en la capacidad para desplegar un sin número de protocolos de radiocomunicaciones sin la necesidad de cambios en el hardware, más bien, se realizan modificaciones o actualizaciones en el software garantizando la interoperabilidad de un

mismo hardware para trabajar en distintos escenarios. Un claro ejemplo es el despliegue de una red WiFi que usa la banda de 2.4GHz o el desarrollo de redes celulares de segunda generación que trabajen en la banda de 900MHz usando un mismo dispositivo electrónico. Otros ejemplos donde se viene usando esta tecnología es en el Internet de las cosas (IoT), comunicaciones V2V, comunicaciones espaciales y en el ámbito militar (Castilla, 2020).

Justificación

La calidad de servicio que brindan los operadores móviles es de vital importancia para los usuarios, ya que permite comparar entre el servicio y su grado de satisfacción, este es el indicador fundamental para conocer si los usuarios se encuentran satisfechos con la calidad de servicio de su operadora móvil se traduce en un cliente que pueda recomendar hacia otros usuarios con comentarios positivos y sobre todo con la fidelidad del consumidor hacia la operadora móvil (Tisalema, 2019). La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), es el ente regulador que se encarga de evaluar los parámetros de calidad de servicio de los operadores basados en su normativa que considera recomendaciones de organismos internacionales como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Alianza móvil global (GSMA), entre otras.

El presente proyecto se enfocará en el análisis de la calidad de servicio y cobertura de redes de telefonía móvil 4G LTE en los interiores de las edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí, que cuenta con un área de 48.2 hectáreas y dispone del servicio de operadoras móviles comerciales (Claro, Movistar y CNT) y una operadora móvil de laboratorio implementada con tecnología de radio definido por software. Esta última operadora se ha diseñado con fines educativos para que los estudiantes realicen distintas pruebas de funcionamiento de tal forma que puedan experimentar sobre estándares de telecomunicaciones.

Al no existir guías educativas de la estación radio base institucional que permitan sistematizar didácticamente su uso y experiencia evaluando parámetros de calidad se

realizarán pruebas en forma de laboratorios didácticos donde se tomarán medidas de potencia y se verificará la calidad del servicio considerando parámetros que se detallan más adelante. Estos análisis se extenderán a las operadoras móviles comerciales que prestan su servicio dentro de la institución para comprobar ciertas observaciones empíricas que han detectado diversos puntos con servicio deficiente que no cuentan con tecnología 4G, y a través de los resultados obtenidos en este proyecto corroborar la fiabilidad de los datos que presentan las operadoras móviles comerciales, al mismo tiempo conocer los factores que interfieran en el desempeño de las redes móviles que nos permitan plantear soluciones.

Se ha considerado realizar mediciones de cobertura y calidad de servicio en los siguientes puntos: Edificio Central, Edificio Administrativo, Edificio MED, Laboratorios de Electrónica, Biblioteca, Coliseo, Nuevo Centro de Investigaciones y en el caso de requerir otro punto pertinente a analizar se lo incluirá durante el desarrollo del proyecto. Dichas zonas han sido tomadas como puntos de interés ya que existen antecedentes de estudiantes y docentes donde expresan la deficiente o escasa cobertura 4G, como es el caso de los laboratorios de electrónica y zonas del coliseo donde es fácil percibir el limitado servicio de la tecnología 4G. Otro punto donde se plantea realizar el análisis de cobertura y calidad de servicio es el Centro de Investigaciones, ya que, al ser una edificación nueva no existen estudios relacionados con referencia a este tema.

El proyecto considera una amplia gama de herramientas en hardware como SDR, smartphones, analizadores de espectro y software compatibles con 4G como srsRAN, Opensignal, Network cell info, entre otros. Estas herramientas permiten realizar mediciones de la calidad de servicio que garanticen la experiencia del usuario basándose en los parámetros de la guía GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation Guideline”, del cual se pueden considerar como indicadores clave de rendimiento a la señal de referencia potencia recibida (RSRP), Relación señal/interferencia más ruido (SINR), calidad de video a través de las métricas bit rate y initial buffering delay, llamada LTE por medio tasa de llamadas exitosas, tono

de devolución de llamada, MOS, pérdida de paquetes, jitter y latencia (GSMA, 2022). De modo complementario basándonos en la norma SMA-QoS-9 de la ARCOTEL que indica los parámetros de calidad de servicio móvil avanzado se planea analizar el nivel mínimo de la señal de cobertura de una red 4G y RSR (Arcotel, Parámetros de calidad para servicio móvil avanzado, 2018).

Objetivos

Objetivo General

Analizar la calidad de servicio y cobertura de sistemas de cuarta generación de telefonía celular en los interiores de edificaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE campus Sangolquí.

Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros de calidad de servicio y cobertura de las redes móviles 4G basados en la guía GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation Guideline” y en la normativa de la ARCOTEL “Parámetros de calidad de servicio móvil avanzado”.
- Evaluar los parámetros de calidad de servicio y cobertura usando la operadora móvil de la ESPE basada en SDR.
- Evaluar los parámetros de calidad de servicio y cobertura de las operadoras móviles 4G comerciales en zonas interiores de edificaciones del campus Universitario.
- Verificar las mediciones obtenidas entre la operadora institucional y operadoras comerciales para realizar una comparación justa con métricas equiparables.
- Elaborar dos guías de laboratorio educativas de la estación radio base institucional que permitan sistematizar didácticamente su uso para fortalecer la enseñanza/aprendizaje.
- Elaborar un plan de mejora basado en la normativa vigente que permita solventar los problemas de calidad de servicio y cobertura encontrados al realizar las pruebas.

Capítulo II

Fundamento Teórico

Redes de telefonía móvil

Las redes de telefonía móvil también conocidos como sistemas de comunicaciones móviles, cumplen con la función de brindar servicio de conectividad a una determinada zona o territorio.

En la última década, el número de suscriptores a sistemas de telefonía móvil ha superado el número de sistemas de telefonía fija. Por lo tanto, se ha podido evidenciar que los teléfonos móviles se han convertido en el principal medio de comunicación por radio.

Una comunicación móvil se puede definir como cualquier conexión de radio entre dos terminales, al menos uno de los dispositivos es móvil o fijo en una ubicación no delimitada, mientras que el otro terminal puede ser fijo como una estación base. Esta definición se aplica a cualquier enlace de comunicación, ya sea de móvil a móvil o de fijo a móvil. De hecho, los enlaces de móvil a móvil suelen ser enlaces de móvil a fijo a móvil, si consideramos el concepto de "movilidad" este puede referirse a diversas formas de transporte, ya sean automóviles, trenes, aviones, etc., o simplemente a personas que circulan por las calles.

Un aspecto destacable de las redes móviles es proveer de movilidad al usuario, proporcionar ancho de banda e infraestructura virtualizada debido a que no requieren de una estructura física para reducir costos y resultan ser escalables (Chimbo, 2012).

Cuarta Generación Long Term Evolution (LTE)

La tecnología de cuarta generación 4G (4th generation of celular networks) o Long Term Evolution (LTE) es un servicio de red móvil desarrollada por la 3GPP (3rd Generation Partnership Project) mejorando las tecnologías 2G refiriéndose a EDGE/GSM y 3G que abarca HSPA/HSDPA/UMTS con el objetivo optimizar el acceso a la red y mejorar el desempeño en el uso de datos. Una red 4G permite utilizar más servicios y aplicaciones que tecnologías

anteriores porque dispone de parámetros de calidad (QoS) en cada externo y esto se logra por su arquitectura de red mejorada (García & Margarita, 2017).

El ITU-R ha especificado requisitos para definir a un servicio de telefonía de cuarta generación conocido como IMT-Advanced. Parte del requisito consiste en una red totalmente conmutada por paquetes, contando con arquitectura fundamentada totalmente en el protocolo IP (Protocolo de Internet) para acelerar la transferencia de datos, obteniendo hasta 100 Mb/s para alta variabilidad y más de 1 Gb/s para entornos relativamente estáticos, lo que ofrece interoperabilidad con los estándares existentes, canalizaciones flexibles, baja latencia, entre otros (Maltez y Valle, 2019).

LTE se desarrolló con el objetivo de simplificar e integrar la tecnología UMTS y cuenta con varios enfoques entre los cuales están:

- Asegurar y garantizar la competitividad del sistema de comunicaciones 3G en el futuro.
- Atender las demandas de los usuarios ofreciendo velocidades más elevadas y mejorando la calidad de servicio.
- Simplificación de costes, al reutilizar estaciones existentes.
- Implementación de un sistema de optimización de paquetes conmutado.

La primera definición de tecnología LTE apareció en la Release 8 impulsada por la 3GPP, pues suponía la base para las especificaciones posteriores, comercialmente a la tecnología LTE se le ha dado el nombre de 4G-LTE.

A partir del año 2010 con la definición y publicación de la Release 10 de LTE (LTE-Advanced), la tecnología LTE se convirtió en la propuesta del 3GPP que ayude a cumplir los requisitos y especificaciones dados por el estándar de cuarta generación (Martinez D. , 2019).

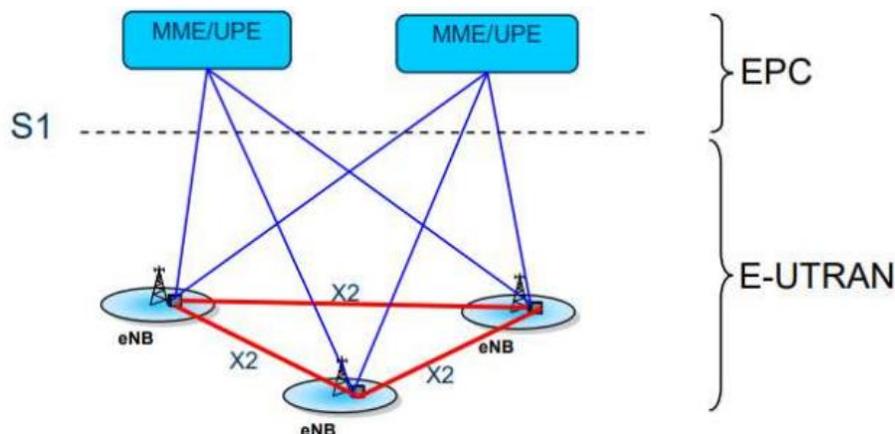
Arquitectura de red LTE

La arquitectura del sistema de cuarta generación LTE se encuentra comprendido por un grupo de nodos e interfaces interconectados que comunican a los terminales móviles y con una estación base, como se puede observar en la Figura 1.

LTE está comprendida por dos bloques: *Radio Access Network (RAN)* Red de Acceso al Radio y *Core Network (CN)* o Núcleo de Red. El núcleo de red también conocido como *Evolved Packet Core (EPC)* y la red de acceso radio es una mejora al sistema UMTS que disponía la tecnología 3G siendo ahora *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*. En conjunto se lo conoce como EPS (Sistema de Conmutación de Paquetes Evolucionado) (Codón, 2019).

Figura 1

Esquema reducido de red LTE



Nota. Tomado de *Utra-Utran Long Term Evolution (LTE)*, por Codón, D, 2019, (<https://n9.cl/e1un5>).

E-UTRAN

La red de acceso de radio es una red distribuida por estaciones base, denominadas estaciones base evolucionadas (ENodeB), que están interconectadas entre sí, mediante la interfaz X2 y se utilizan principalmente para funciones de radio multicelulares. Por otro lado, conectan al núcleo de red mediante una interfaz S1.

Las principales funciones de la E-UTRAN son:

- Funciones ARQ, comprensión de cabecera para manejar paquetes que administren y configuren el sistema.
- Funciones seguridad para mejorar la protección de integridad y cifrado de la red.
- Entrelazado, modulación y codificación.

User Equipment (UE)

Los UE o terminales de usuario se conectan a los eNode mediante la interfaz radio o también denominada Uu.

El UE consta de un USIM (Universal Subscriber Identity Module), que identifica a los usuarios que pertenecen a la red y permite trasladar a un diferente dispositivo sin la necesidad de modificar su identidad de red.

Evolved Packet Core (EPC)

El núcleo de red es una red de servidores, routers y otros componentes encargados de gestionar el tráfico de la red. Funciona solo en paquetes conmutados que usan el protocolo IP en la capa de red (Codón, 2019). EPC está conformado por varios bloques que permiten su funcionamiento y se detallan a continuación:

- **MME** (*Mobility Management Entity*), la Entidad de gestión de la movilidad se dispone de las funciones del plano de control, se gestionan los suscriptores de la red para mejorar la seguridad reconociendo a los usuarios, cifrado y protegiendo la integridad de datos, de modo que realice la localización de usuarios y procesos de movilidad. Permite la conexión entre eNodeB y el núcleo de la red, a través de la interfaz S1-MME indicando el tráfico de señalización entre ellos.
- **HSS** (*Home Subscriber Server*), se considera un bando de datos con información del usuario y la suscripción de red, identifica a los usuarios por el

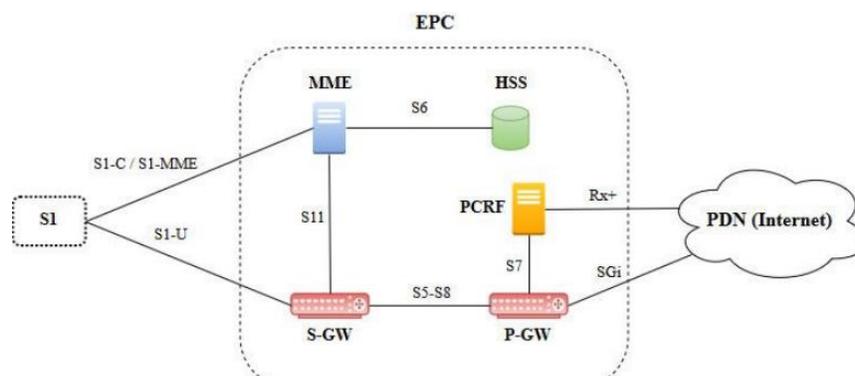
IMSI (Identidad internacional del Suscriptor *Móvil* o *International Mobile Subscriber Identity*).

- **S-GW** (*Service Gateway*), es un router de enlace que forma el punto de borde de la interfaz de conmutación de paquetes con el eNodeB.
- **P-GW** (*PDN Gateway*), Es el nodo que conecta a la red EPC con varias redes IP externas que llegan a la red de paquetes de datos (PDN) o el internet, se asignan IP para gestionar políticas de control y la tarificación pertinente al usuario (Martinez D. , 2019).

La arquitectura detallada del núcleo de red se puede observar en la Figura 2.

Figura 2

Arquitectura EPC



Nota. Tomado de *arquitectura completa del núcleo de red*, por Martínez, J, 2018, (<https://n9.cl/em9ui>).

Redes 4G en Ecuador

A nivel mundial Ecuador se encuentra en el puesto 28 de 78 países con mayor velocidad de navegación de internet 4G LTE, con velocidades promedio de 25 Megabytes por segundo en descarga, esta cifra es muy importante ya que Singapur es la primera nación con velocidades de 45Mbps. Los países que se ubican en los primeros lugares ya tienen muchos años de experiencia en el despliegue de esta tecnología y Ecuador ha tenido un gran impacto en el despliegue de redes de telecomunicaciones de cuarta generación (Intel, 2021).

La tecnología 4G en Ecuador tuvo sus inicios a finales del año 2013, siendo la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT) la pionera en despliegue de esta tecnología. Más adelante, en el año 2015 las operadoras privadas Claro y Movistar empiezan con el despliegue 4G y lanzan al mercado, gracias a este trabajo hoy en día más del 78% de la población ecuatoriana cuenta con el servicio y cobertura de internet 4G LTE (Mintel, 2021).

En el Ecuador existen cuatro empresas líderes que hacen uso de bandas de frecuencia para el despliegue de la tecnología 4G, esta son Movistar, Claro, CNT y Tuenti.

- Conecel (Claro): Dispone de la banda 4 que abarca la frecuencia de 1700/2100 MHz.
- Otecel (Movistar-Tuenti): Dispone de la banda 2 que cubre la frecuencia 1900 MHz.
- CNT: Dispone de la banda 4 cubriendo 1700/2100 MHz y usa la adicionalmente la banda 28 de 700 MHz (Sánchez, 2020).

Existen categorías LTE que definen la capacidad de la red en los límites de velocidad. En Ecuador, como en la mayoría de los países, utilizamos una red de clase 3 y su velocidad de descarga especificada que no supera los 100 Mb/s, siendo esta una cifra netamente teórica en comparación de los valores reales que son mucho más bajos del valor mencionado.

En Ecuador existen 67 bandas LTE numerados del 1 al 67 que son sintonizados con el uso de dispositivos móviles con antenas de las operadoras móviles para el intercambio de información. Además, existen 17 categorías numeradas del 0 al 16 que determinan la velocidad en que puede trabajar la red LTE de forma teórica (Sánchez, 2020).

Crowdsourcing Open Signal ha ido recopilando datos sobre el rendimiento LTE en el Ecuador de las operadoras móviles (Claro, Movistar y CNT) obteniendo resultados muy interesantes que a continuación se detallan:

- Movistar: DownLink 19.7 Mbps, UpLink 10.9 Mbps, latencia 138ms y una confiabilidad del 97%

- Claro: DownLink 18.7 Mbps, UpLink 11.6 Mbps, latencia 154ms y una confiabilidad del 100%
- CNT: DownLink 15 Mbps, UpLink 3.2 Mbps, latencia 215ms y una confiabilidad del 98% (Sánchez, 2020).

Industria y Regulación de los servicios móviles

Generalidades

Ecuador cuenta con reglamentos para los servicios de telefonía móvil que permiten la regulación, control y aprobación del desarrollo de teléfonos móviles sobre la red móvil pública.

A partir de 2014, Ecuador introdujo la tecnología 4G, pero anteriormente creía que era necesario discutir algunos aspectos técnicos en la legislación de telecomunicaciones. Proponer proyectos de corto y mediano plazo de acuerdo con la política de promoción de la industria de las telecomunicaciones con el objetivo de promover tecnologías punteras en el diseño, creación y desarrollo de sistemas de información de telecomunicaciones (Chimbo, 2012).

Para que una tecnología sea implementada es necesario tener en cuenta el marco regulatorio que rige en el Ecuador. Por ello en el 2009 por decreto Ejecutivo N.8 firmado por el presidente Rafael Correa, se crea el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (Mintel) que es el encargado de coordinar acciones de apoyo y garantizar el correcto uso y el acceso igualitario a los servicios en el amplio campo de las Telecomunicaciones con la motivación del desarrollo en armonía de la sociedad y el buen vivir para la población ecuatoriana (Chimbo, 2012).

ARCOTEL

Dentro de las entidades adscritas y relacionadas al Mintel, tenemos La Agencia de regulación y control de las telecomunicaciones (ARCOTEL), que es el organismo encargado de la administración y control de las Telecomunicaciones, espectro radioeléctrico y su gestión, también de los aspectos técnicos en la gestión de los medios de comunicación social que estén

usando frecuencias del espectro radioeléctrico o que instalen y operen redes de Telecomunicaciones dentro del Ecuador (Arcotel, 2022).

Dentro de las competencias más importantes que ejerce la Arcotel, se tienen:

- Elaborar, modificar, actualizar y aprobar el Plan Nacional de Frecuencias
- Tener control en las valoraciones económicas para el uso y asignación de las frecuencias por otorgamiento y renovación
- Ejercer el control técnico de los medios de comunicación sociales que hagan uso de frecuencias ya sea de video y audio.
- El monitoreo y control del uso del espectro radioeléctrico
- Autorizar la cesión, transferencia de los títulos habilitantes. Además, establecer los términos, condiciones y plazos de los títulos habilitantes.
- Recaudar los costos económicos por la prestación de servicios de telecomunicaciones.
- Realizar estudios de zonas de las telecomunicaciones y publicar sus estadísticas para mantener informada a la población (Arcotel, 2022).

El título habilitante, es el nombre jurídico que se otorga por la prestación de un servicio del régimen general de telecomunicaciones. Además, se encarga de controlar el uso correcto del espectro radioeléctrico, de los cuales se tiene distintos servicios para prestaciones de servicios de telecomunicaciones, estos son: móvil avanzado, móvil avanzado a través de operador móvil virtual (OMV), telefonía fija, Portador, transporte internacional modalidad cable submarino, Transporte internacional modalidad segmento espacial, telecomunicaciones móviles por satélite, valor agregado, acceso a internet, troncalizado (Arcotel, 2022).

GSMA

Es la GSM Association, por sus siglas en inglés Global System for Mobile Communications, es una organización a nivel mundial que unifica el ecosistema móvil para

crear, desarrollar y ofrecer innovaciones para empresas con grandes cambios con el objetivo del bien estar y prosperidad humana. GSMA representa a las empresas, organismos de operadoras móviles y sus adyacentes en todo el ecosistema móvil, donde se enfocan en tres grandes pilares que son: Conectividad para el bien, servicios-soluciones para la industria y alcance-difusión (Gsma, 2022).

- Conectividad para el Bien: Involucra a los gobiernos y sociedad en general para promover políticas que faciliten la innovación digital con el fin de reducir la desigualdad mundial.
- Servicios y soluciones de Industria: Gestiona la interoperabilidad y tecnología para que los dispositivos móviles funcionen adecuadamente enfocados en los campos de la IoT, 5G, fraude y seguridad.
- Alcance y Difusión: Información sobre los avances tecnológicos del ecosistema móvil a través de plataformas a todo el mundo (Gsma, 2022).

Aspectos regulatorios del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico está constituido por un conjunto de ondas electromagnéticas o hertzianas por debajo de los 3000 GHz que se propagan por el espacio libre. Por medio del espectro radioeléctrico se pueden brindar diversos servicios de telecomunicaciones con el objetivo del desarrollo social, económico y para el buen vivir de la sociedad. En el Ecuador el espectro es considerado un sector estratégico, por lo tanto, se reserva el derecho de administración, control, gestión y regulación por parte del estado. Dentro de este contexto la constitución de la república lo define como un recurso natural limitado que pertenece al dominio público, inalienable e imprescriptible del Estado (Arcotel, 2022).

A partir del espectro radioeléctrico se pueden derivar servicios esenciales como: Comunicaciones satelitales, inalámbricas y móviles, radiodifusión sonora, televisión y televisiva, transporte, radiolocalización, entre otras. En Ecuador estos servicios están establecidos por la

Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada, por lo tanto, los servicios abiertos al uso de derecho público se dividen en servicios portadores y finales (Chimbo, 2012).

En la actualidad el espectro radioeléctrico adquiere la consideración de recurso limitado por aumento de la demanda en el desarrollo tecnológico de innovadores servicios en nuevas bandas de frecuencias y con el uso eficiente del espectro, tal es el caso de la televisión digital o la compartición de diversos servicios en una misma banda de frecuencias como el caso de la tecnología de banda ultra ancha (LLanos, 2013).

La licencia que se otorga a una persona natural para que tenga uso del espectro radioeléctrico tiene como objetivo hacer cumplir los derechos que el licenciado obtiene en relación a las condiciones y exclusiones. Esta licencia especifica los parámetros técnicos de operación del sistema de telecomunicaciones que se va a utilizar, además se especifica el tiempo de duración de la licencia, los señalamientos de aplicación del régimen de infraestructura y las sanciones al incumplimiento de las normas. Para concesión de frecuencias para radio y televisión, la licencia toma el modelo de contrato de concesión de frecuencias. El espectro es entregado a quien posee un mejor conocimiento y experiencia en su uso promoviendo la competencia en el mercado. En la licencia se especifica la duración de la concesión que es de diez años para una persona con nacionalidad ecuatoriana y la oportunidad de renovación por el mismo tiempo mencionado, siempre y cuando el concesionario que ha operado la frecuencia haya cumplido con los lineamientos y parámetros autorizados de acuerdo con la ley. En el contrato también constan las disposiciones que el concesionario debe tener si este arrienda su banda o estación de radiodifusión, donde se afirma que el concesionario asume toda la responsabilidad social pero el estado sigue manteniendo la regulación y control (LLanos, 2013).

Este recurso es de un altísimo valor para fines públicos y privados donde las características técnicas inherentes definen un comportamiento específico para su uso. La creciente demanda del uso del espectro en el Ecuador ha permitido tener leyes que regulan su

correcto uso ya que es un bien de dominio público que pueden ser usado por todos los ciudadanos, por lo tanto, la ley establece un régimen del operador dominante que especifica las obligaciones que estos deben tener, entre los cuales se tiene:

- Prestar sus servicios con costos justos ya que la superintendencia de telecomunicaciones puede realizar auditorias para el control de sobrepresión
- No discriminar a ningún usuario y otorga un trato igualitario bajo las mismas condiciones
- Otorgar facilidades de interconexión entre redes de telecomunicaciones de forma eficiente
- Otorgar y facilitar el libre acceso a información técnica necesaria para el correcto uso de los servicios
- Otorgar información pertinente sobre los entes de regulación y control para no cometer alguna irregularidad en el uso de los servicios
- Otorgar información claro sobre los títulos habilitantes con los requisitos previos para la obtención de bandas de frecuencias del espectro (LLanos, 2013).

Radio Definido por Software RDS

Software Defined Radio o Radio Definido por Software, es un término usado en principio por el Dr. Joseph Mitola en su artículo de 1992 "Revisión de software de radio, evaluaciones clave y direcciones futuras", en el que señaló la transición de un sistema de radio dominados por el diseño de hardware a sistemas donde gran cantidad de la funcionalidad está definida por software en una computadora personal o un sistema integrado, es decir, en un mismo hardware se realizan varias aplicaciones simplemente modificando la configuración a nivel de software, debido al amplio número de frecuencias que soportan los equipos (Codón, 2019).

Las radios definidas por software tienen una utilidad significativa para los servicios de telefonía celular, que deben atender una amplia variedad de protocolos de radio cambiantes en tiempo real, se puede utilizar para implementar tecnologías simples de módem de radio. A largo

plazo, se espera que SDR se convierta en la tecnología dominante en las comunicaciones por radio. La FPGA (Field Programmable Gate Array) es el circuito electrónico programable que se encarga de controlar el funcionamiento de una SDR. Su programación se realiza mediante un lenguaje de descripción como VHDL (Very High Speed Integrated Hardware Description Language). La mayoría de los FPGA modernas integran procesadores de señales digitales (DSP) de alto rendimiento, ideales para implementar aplicaciones SDR con uso intensivo de recursos que proporcionan un procesamiento de señales más rápido y eficiente (Martinez D. , 2019).

Arquitectura

La arquitectura SDR es muy similar a la arquitectura de receptor de RF tradicional en el sentido de que se basa en una arquitectura heterodina que cambia la frecuencia de entrada original a una frecuencia diferente a la original.

Previamente, la frecuencia se encaminaba a través de un receptor de baja potencia, luego se acondiciona con un amplificador de bajo ruido LNA (*Low Noise Amplifier*) y un filtro de RF, esta señal pasa por un mezclador para obtener una nueva señal, posteriormente se filtra nuevamente para demodular la señal recibida (Cabrera, 2019).

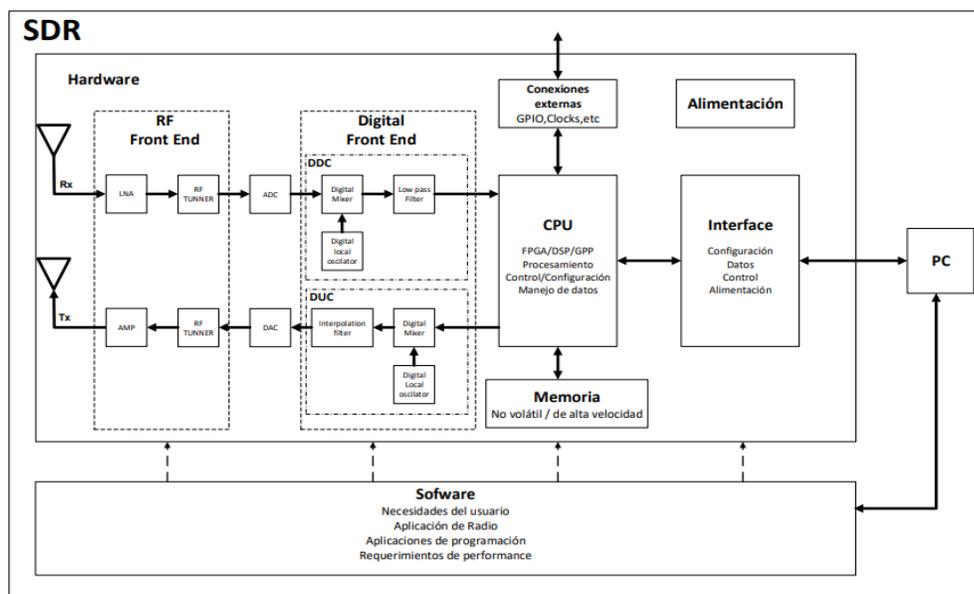
La arquitectura SDR debe soportar el desarrollo de nuevas plataformas o servicios de hardware y software, y para ello debe cumplir con las siguientes características:

- Permite que el software defina las implementaciones del sistema al programar o configurar el hardware existente, reutilizando el mismo hardware para diferentes aplicaciones sin cambiar el sistema físico.
- Digitalización de señales para procesamiento y almacenamiento en el sistema.
- Dispone de capacidad para recibir y transmitir señales de RF dependiendo de la aplicación, permitiendo frecuencias más bajas o altas en una determinada aplicación.

En la Figura 3, se muestra la arquitectura SDR y todos sus componentes.

Figura 3

Esquema de la arquitectura general de la SDR



Nota. Tomado de *Diseño de Radio Definido por Software*, por Cabrera O, 2019, (<https://n9.cl/nzq21>).

Antenas

La antena transmisora transforma la energía eléctrica en ondas electromagnéticas y la antena receptora realiza el proceso contrario. Para los SDR diseñados para múltiples modos y/o bandas de amplia frecuencia, la selección antena es fundamental para desarrollar una aplicación. En la mayoría de los casos, los rangos de frecuencia amplios o los modos múltiples requerirán más de una antena para cubrir esos rangos/modos (Cabrera, 2019).

Algunas de las antenas que se pueden utilizar en SDR son: Antena bidireccional, Antena monopolo, Antena omnidireccional, Antena inteligente de matriz adaptativa, etc.

RF Front-End

Su principal característica es que se encarga de recibir y transmitir señales en distintas frecuencias.

En modo de TX permite que la señal analógica llega a una frecuencia intermedia mediante un mixer y posteriormente se amplifica para ser transmitida.

En modo de RX captura a la señal de RF, pasa por un amplificador de bajo ruido (LNA) lo que permite amplificar señales débiles y minimizar el ruido.

DAC y ADC

El Conversor Análogo-Digital y el Conversor Digital-Análogo se encargan de dirigir la recepción y transmisión de la señal respectivamente, al mismo tiempo funcionan como enlace para comunicar el Front End de Radio Frecuencia y el Front End Digital (Cabrera, 2019).

Digital Front End

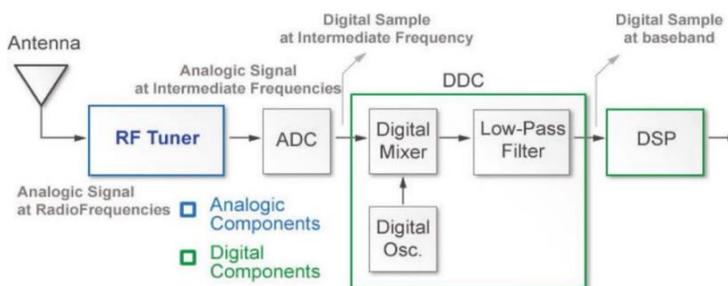
Digital Front-End realiza la función de Conversión Digital Descendente DDC (*Digital Down Converter*) y Conversión Digital Ascendente DUC (*Digital Up Converter*), en la Figura 4 se esquematiza las etapas de recepción de la SDR (Alvarez, 2018).

DDC dispone de 3 bloques:

- Mixer digital
- Oscilador digital
- Filtro pasa bajos

Figura 4

Etapa de RX en SDR



Nota. Tomado de *diseño de un sistema SDR mediante FPGA para la recepción de dispositivos RFID*, por Álvarez. D, 2018, (<https://n9.cl/rla8l>).

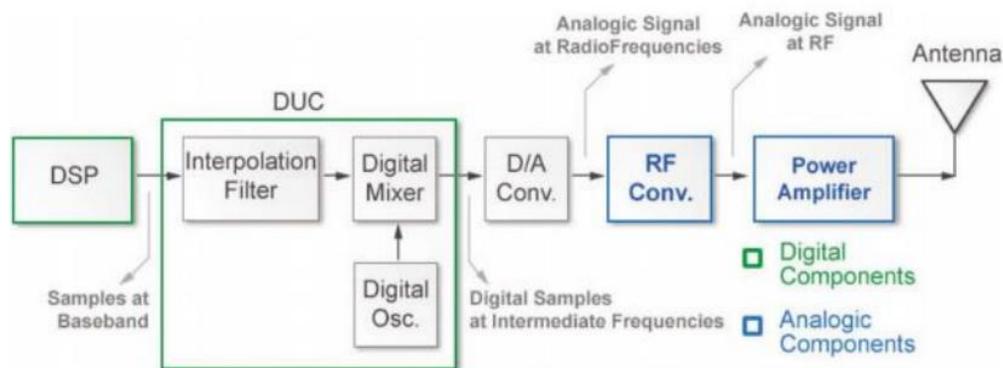
DUC:

- Mixer digital
- Oscilador local digital
- Filtro de interpolación

DUC permite trasladar a la señal en banda base a una frecuencia intermedia que facilite el muestreo de la señal, se realiza el proceso contrario en DDC, pero teniendo en cuenta la frecuencia de Nyquist en el procesamiento de la señal. En la Figura 5 se esquematiza las etapas de transmisión de la SDR (Alvarez, 2018).

Figura 5

Etapas de TX de SDR



Nota. Tomado de diseño de un sistema SDR mediante FPGA para la recepción de dispositivos RFID, por Álvarez. D, 2018, (<https://n9.cl/rla8l>).

CPU

Su principal función es controlar, configurar y manejar datos entre diferentes módulos, al mismo tiempo procesa algoritmos de encriptación.

En su mayoría se usan FPGAs que son dispositivos que nos permiten reprogramar el hardware (Alvarez, 2018).

Memoria

La memoria es aquella que ejecuta los recursos de cómputo y la capacidad de almacenamiento de datos para el sistema, son necesarias memorias de alta velocidad y al mismo tiempo que estas no sean volátiles (Alvarez, 2018).

Software y Hardware

El hardware de la plataforma SDR consta de un procesador de propósito general (GPP), un procesador de señal digital (DSP) y una matriz de puertas lógicas programables en campo (FPGA) (Martinez D. , 2019).

Para seleccionar un hardware adecuado se recomienda clasificarlos en 2 factores principales y son:

- Precio: Asequible (\$ 40 a \$ 200), intermedio (\$ 200 a \$600) y alto (más de \$ 600).
- Público objetivo: principiantes, usuarios avanzados y profesionales (investigación y docencia).

Uno de los dispositivos más usados de la familia SDR es:

USRP

Universal Software Radio Peripheral, desarrollado por la compañía Ettus Research que pertenece a la empresa National Instruments.

El equipo USRP se utiliza principalmente en aplicaciones profesionales y de investigación que enfatizan el área de trabajo, como teléfonos móviles, monitoreo de espectro de radiofrecuencia, radioaficionados, navegación por satélite, sistemas de radar, etc. Según los factores de calificación, los dispositivos de la serie USRP son más caros, ofrecen un rango de frecuencia muy amplio y un alto ancho de banda, y están destinados al nivel avanzado: investigadores y profesionales (Martinez D. , 2019).

Todos los dispositivos USRP se controlan mediante Controladores de Hardware Universal de Ettus Research UHD (Universal Hardware Driver).

Los dispositivos SDR se programan y se controlan mediante software implementado en ordenadores, previamente se requieren instalar controladores o drivers compatibles con el dispositivo SDR, esto permite traducir las opciones y operaciones seleccionadas por el usuario.

Existen varias alternativas de código abierto que garantizan su trabajo y estos usan lenguajes de programación basados en C y Python, estos pueden ser: SDRuno, CubicSDR u Open Air Interface, también es posible usar aplicaciones específicas para redes de comunicaciones móviles o receptores de televisión digital se usan: OpenLTE y srsLTE (Martinez D. , 2019).

SRSLTE

Es una implementación de software para aplicaciones LTE compatible con *Release 8* de 3GPP y se desarrolló por la empresa *Software Radio System* (SRS) (Software Radio Systems, 2022).

Cuenta con una librería LTE que soporta las redes E-UTRAN y eNodeB, y además nos permite configurar el núcleo de red (EPC). El software cuenta con 3 módulos:

- Módulo srsUE, permite emular terminales de usuario UE.
- Módulo srsENB, aplicación para la creación eNodeB.
- Módulo srsEPC, implementa el núcleo de red.

Indicadores clave de rendimiento (KPI) de una red 4G

Calidad de Servicio (QoS)

Calidad de Servicio (QoS) es el término utilizado para definir la capacidad que posee una red para garantizar distintos niveles de servicios en distintos escenarios de tráfico.

También se puede definir como el rendimiento extremo a extremo de los distintos servicios electrónicos desde el lado de la percepción del usuario final (Martinez J. , 2018).

Los parámetros de QoS son:

- Ancho de Banda

- Retardo (delay)
- Pérdida de paquetes (packet loss)
- Variación de retardo (jitter)

Ancho de Banda es la capacidad de transmisión de datos en bits por segundo que viajan a través de un medio, esta capacidad disminuye por entornos negativos, tales como, los retardos que empeoran la calidad del servicio. El retardo o delay, es la variación temporal o el retraso del flujo de datos en llegar a su destino, esta métrica se puede evidenciar fácilmente en una videoconferencia con el retardo de la voz y la señal de video. El Jitter ocurre cuando los paquetes enviados desde el origen no llegan en el debido orden al destino o en un tiempo determinado, es decir, existe una variación de latencia (Martínez J. , 2018).

QoS toma la importancia cuando es necesario diferenciar entre usuarios y servicios, en este sentido, los parámetros de QoS deben permitir al prestador del servicio poder ofrecer distintos modos de acceso a los servicios que está ofreciendo ya que estos tienen distintos requisitos de desempeño, tal como, el ancho de banda y retardo. Por otra parte, también es necesario diferenciar entre los usuarios, es decir, distinguir el trato por grupos de usuarios para acceder al mismo servicio (Rueda & Vargas, 2019).

Dentro de los conceptos clave para QoS en redes LTE está asociado a la clasificación de servicios en clases. Estas clases de servicios forman una corriente de paquetes que contienen recursos importantes de acuerdo a la importancia o prioridad del servicio. Existe una clasificación de la QoS para los servicios enfocado en la perspectiva del usuario, estas son: convencional, streaming, background e interactiva. La clase de tipo convencional agrupa servicios cuyos requerimientos son muy rigurosos y estrictos, ya que, depende exclusivamente de la perspectiva del usuario, un ejemplo son las llamadas VoIP. El servicio background agrupa servicios cuyos requerimientos QoS no son muy rigurosos puesto que el usuario envía y recibe datos en un segundo plano, tal es el ejemplo de la transferencia de paquetes y archivos (Rueda & Vargas, 2019).

RSRP

Reference Signal Received Power (SRSP) por sus siglas en inglés, la potencia recibida de la señal de referencia es una métrica que se relaciona con la intensidad de la señal específica de la celda utilizada en la recepción celular y las decisiones de transferencia. También se define como la potencia promedio de las señales piloto recibidas, se expresa en dBm y se utiliza principalmente para la clasificación entre las diferentes celdas celulares con respecto a su cantidad de señal (Farhana et al., 2015).

Visto desde el lado del usuario, existe una correlación entre la RSRP y la QoS para una celda en los entornos exteriores. Existen tres rangos en los que se clasifica la RSRP de acuerdo con el valor dado en dBm. Si se el valor es mayor a -75 dBm se puede esperar una QoS excelente siempre y cuando no existan muchos suscriptores usando el mismo ancho de banda, si se encuentra entre -75 y -95 dBm, se espera una mínima degradación de la QoS, por ejemplo, el throughput se reducirá en un 30 a 50% si el valor RSRP se encuentra entre -75 a -95 dBm. Si RSRP se encuentra por debajo de -95 dBm la QoS es inaceptable y finalmente en el rango de -108 a -100 dBm el rendimiento decae hasta cero siendo este el peor escenario (Kreher & Gaenger, 2016).

RSRQ

Metrical Signal Received Quality (RSRQ) por sus siglas en inglés, la medición de la calidad de señal recibida de referencia es una métrica que se encarga de determinar la calidad de la señal específica celular y se mide en dB. Se utiliza principalmente para clasificar entre diferentes celdas celulares de acuerdo con la calidad de su señal, similar a la métrica RSRP. Se puede emplear para la toma de decisiones entre una señal buena y una que sea rechazada por su bajo nivel de calidad .

RSSNR

Reference Signal Signal to Noise Ratio (RSSNR) por sus siglas en inglés, la relación señal a ruido de la señal de referencia es una métrica que se utiliza para medir la calidad de la señal en dB, esta métrica no se encuentra dentro de las especificaciones de 3GPP (3rd Generation Partnership Project) sino que es definida por el proveedor UE (Simpson & Sun, 2018). Las empresas de telefonía móvil siempre buscan maximizar la RSSNR en cada rincón donde brindan el servicio para dar la mejor experiencia posible a sus usuarios con transmisiones a grandes potencias o con la minimización del ruido y la interferencia. La optimización de esta métrica conlleva a una mayor capacidad en la estación radio base, además permite una modulación de mayor orden, dando como resultado un mayor grado de satisfacción con los clientes y más altas tasas de transferencias de datos. Un buen valor de RSSNR es muy importante para maximizar el rendimiento y capacidad de los datos, cuando mayor sea el RSSNR mayor será la modulación que se pueda lograr y por ende mayor y mejor será la tasa de datos que experimente el usuario (ISCO, 2022).

Tasa de datos

Se define como la proporción de datos que se transmiten en unidad de tiempo que se mide en bits por segundo (bps) o la velocidad a la que se tramiten los datos, dicho en otras palabras, es la cantidad de datos que se mueven de forma satisfactoria desde un origen hacia un destino durante un periodo determinado, representando la cantidad útil de información que se transfiere por unidad de tiempo, esta puede variar durante una misma conexión de red según el protocolo que se esté usando en la transmisión y el tipo de datos de tráfico, en ingles también es conocido como throughput. En la actualidad se mide en megabits o gigabits por segundo (Vesga & Granados, 2012).

Latencia

Latencia se define como el tiempo que se demora un paquete en llegar desde el origen hasta el destino, también llamado retardo. Este no es un problema solo de redes no orientadas a la conexión, sino, es un problema muy general que se encuentran en las redes de telecomunicaciones, tal es el ejemplo, de la latencia en enlaces satelitales donde son frecuentes valores de latencia muy elevados debido a las grandes distancias que recorre la información (Anaya, 2020).

La latencia por lo general debe tener valores inferiores a los 150ms, esto se debe, a que el oído humano puede detectar valores de latencia entre 250 ms a 200ms esto en el caso de personas con el oído bastante sensible. Si se supera este valor de umbral, la comunicación puede ser bastante molesta y en otros casos de muy mala calidad, con cortes o no muy entendible. No existe una solución sencilla para mejorar estos valores, casi siempre dependen de los equipos por donde pasan los paquetes de datos, una solución puede ser la reserva de un ancho de banda de fuente a destino o aplicar técnicas de señalización para intentar que los equipos logren percibir el tráfico de datos en tiempo real y sean tratados con mayor prioridad (Anaya, 2020).

Capítulo III

Metodología e Implementación

En este capítulo, describiremos la implementación de una red 4G LTE basada en arquitectura SDR mediante software LTE de código abierto, posteriormente se detalla la metodología empleada para evaluar la calidad del servicio de telefonía móvil desde la perspectiva del usuario.

Materiales

Los materiales empleados en el desarrollo del proyecto son:

Hardware:

- PC (Procesador Intel 10ma generación de 16 núcleos)
- Motherboard MPG Z490 GAMING CARBON WIF
- USRP X310
- Antenas Bidireccionales de 9dBi
- Smartphone
- Cable ethernet
- USIM (Reconfigurable)

Software

- Sistema operativo Dragon OS basado en Lubuntu
- Grabador de SIM GRSIMWrite 3.10
- Network Cell info Life
- Aplicación IPERF para móvil
- Software srsLTE

Figura 6

Implementación de equipos para red LTE

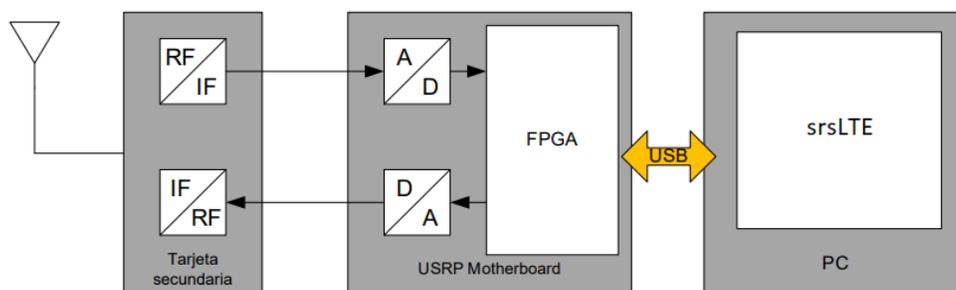


Implementación

Hoy en día existen numerosos proyectos de SDR que se están llevando a cabo, entre ellos se destaca srsLTE, este es un software de código abierto que implementa una estación base de telefonía LTE a partir de una arquitectura SDR mediante USRP X310, el diagrama funcional de Universal Radio Software Perimetral se evidencia en la Figura 7:

Figura 7

Diagrama de USRP



La implementación del proyecto empieza instalando un entorno de desarrollo, en una PC de propósito específico que nos permita utilizar y procesar información proporcionada por la USRP X310. En la computadora se instaló el sistema operativo DragonOS Focal (20.04)

basados en Ubuntu para aplicación de Radio Definido por Software (RDS). Para esto se ejecutaron los siguientes comandos:

```
$ sudo add-apt-repository ppa:softwareradiosystems/srsran
```

```
$ sudo apt-get update
```

```
$ sudo apt-get install srsran -y
```

Posteriormente se instalan los paquetes precompilados desde el repositorio de docs.srsran.com con el comando:

```
$ sudo apt-get install build-essential cmake libfftw3-dev libmbedtls-dev libboost-program-  
options-dev libconfig++-dev libsctp-dev
```

Del mismo modo, se necesita instalar el controlador UHD y sus bibliotecas que permiten la comunicación entre la computadora y la tarjeta USRP ejecutando el comando:

```
$ sudo apt-get install libuhd-dev libuhd003 uhd-host
```

El siguiente paso necesario es verificar si el controlador UHD se encuentra instalado y actualizado, conectando la USRP y ejecutando el comando:

```
$ uhd_usrp_probe
```

Si todos los archivos funcionan correctamente, se puede configurar los archivos base el servicio de red 4G usando el comando:

```
$ sudo srsRAN_install_configs.sh <user/service>
```

Este comando instala varios archivos de configuración que nos permiten modificar para establecer la red.

- epc.conf
- enb.conf
- user_db.csv

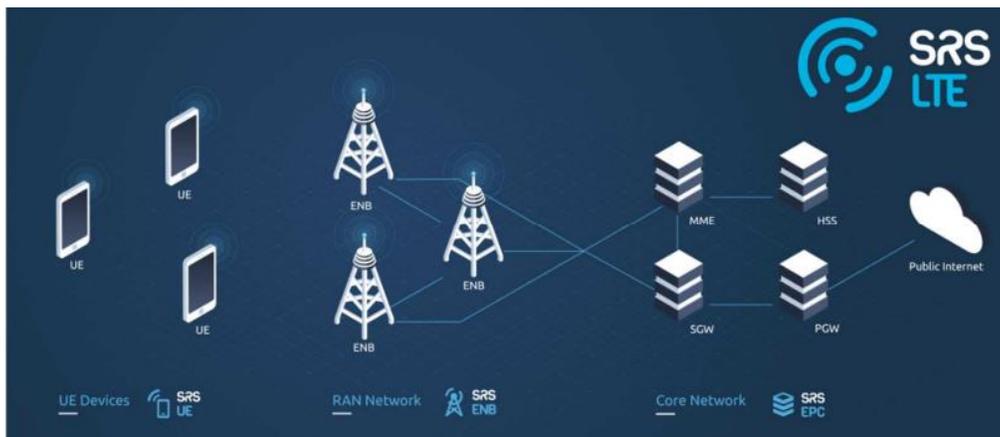
Desarrollo y configuración

El paquete de software srsLTE cuenta con tres módulos: srsUE, srsENB y srsEPC. Esta vez solo se utilizaron dos módulos, srsENB y srsEPC, porque el terminal de usuario fue

implementado con dispositivos celulares físicos, por lo que no se necesitó una solución de software.

Figura 8

Arquitectura LTE de srsLTE



Nota. Tomado de *Cost Ue*, por Software Radio System srsLTE, 2022, (https://docs.srsran.com/en/latest/app_notes/source/cots_ue/source/index.html#cots-ue-appnote).

Luego, se desarrolla la etapa de configuración en los archivos `epc.conf` y `enb.conf`, como se mencionó en el capítulo 2, el primero es la arquitectura física de la red, el segundo contiene los parámetros principales del núcleo de red. En ambos archivos se modifican los valores de MCC (*Mobile Country Code*) y MNC (*Mobile Network Code*), como se puede visualizar en la Figura 9 y 10 respectivamente.

Figura 9

Configuración de parámetros MCC y MNC en archivo *epc.conf*

```

22 | #####
23 | [mme]
24 | mme_code = 0x1a
25 | mme_group = 0x0001
26 | tac = 0x0007
27 | mcc = 901
28 | mnc = 70
29 | mme_bind_addr = 127.0.1.100
30 | apn = srsapn
31 | dns_addr = 8.8.8.8
32 | encryption_algo = EEA0
33 | integrity_algo = EIA1
34 | paging_timer = 2
35 |
36 | #####

```

Nota. Tomado de *COST UE*, por Software Radio System srsLTE, 2022, (https://docs.srsran.com/en/latest/app_notes/source/cots_ue/source/index.html#cots-ue-appnote).

Figura 10

Configuración de parámetros MCC y MNC en archivo *enb.conf*

```

18 | #####
19 | [enb]
20 | enb_id = 0x19B
21 | mcc = 901
22 | mnc = 70
23 | mme_addr = 127.0.1.100
24 | gtp_bind_addr = 127.0.1.1
25 | s1c_bind_addr = 127.0.1.1
26 | n_prb = 50
27 | #tm = 4
28 | #nof_ports = 2
29 |
30 | #####

```

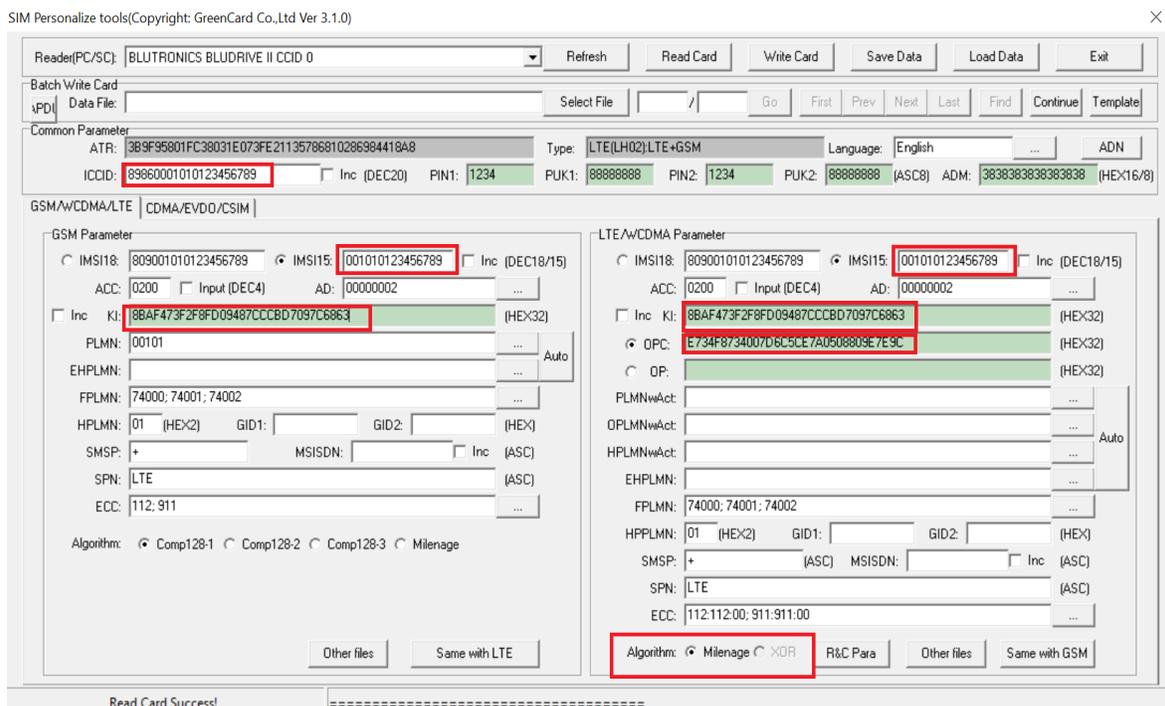
Nota. Tomado de *COST UE*, por Software Radio System srsLTE, 2022, (https://docs.srsran.com/en/latest/app_notes/source/cots_ue/source/index.html#cots-ue-appnote).

La banda 7 fue seleccionada para la implementación de la red, principalmente porque es una banda aún no se encuentra asignada lo que evita interferencias con operadoras comerciales dado que trabaja en la frecuencia de 2685 MHz en Downlink y 2665 en Uplink.

Los terminales de usuario (UE) se añaden al archivo user_db.csv que tiene información de cada tarjeta USIM (Universal Subscriber Identity Module), utilizando el software Gsimwrite versión 3.10 y un grabador de tarjetas SIM de la marca Blutrionics que permite configurar valores mediante su interfaz gráfica como se presenta en la Figura 11.

Figura 11

Software GRSimWrite



Los parámetros modificados son los siguientes:

- IMSI15 (International Mobile Subscriber Identity): número de identificación del usuario de 15 proporcionado por la operadora móvil. Está integrado por MCC+MNC+MSIN, una muestra es el que está presente en la interfaz gráfica 901700123456789, cuyo MCC es 901 y MNC es 70 y el número de suscriptor móvil (MSIN) es 0123456789. Los valores

de MCC y MNC en este caso también pueden ser 001 y 01 si se configuran valores por defecto de la USIM utilizada.

- ICCID ((Integrated Circuit Card Identifier): Es un código de 22 dígitos que identifica USIM para una determinada aplicación, los dos primeros dígitos son cruciales para telecomunicaciones y están definidos por el número 89+MCC+MNC+MSIN.
- KI: Es una clave de 32 dígitos hexadecimales que permite cifrar el código del operador.
- OPC (Operator Code): Código del operador es idéntico para todas las tarjetas USIM
- OPC (Derived Operator Code): Es el código que se forma de KI+OP para brindar encriptación a la SIM. Para pruebas de campo se recomienda dejar su configuración por defecto.

Esta información se guarda en el archivo user_db.csv siguiendo el siguiente formato:

"Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP,AMF,SN,QCI,IP_alloc"

- Name: Cualquier Nombre para identificar al UE.
- Auth: XOR o milenage.
- AMF: Es el campo de gestión para la autenticación.
- SN: Número de 48 bits que permite recargar la autenticación.
- QCI: Identificador de categoría para la calidad de servicio.
- IP_alloc: IP asignada a la red.

Las variables AMF y SN son valores aleatorios generados por el dispositivo móvil para el algoritmo de autenticación, en este proyecto se definieron los valores de AMF, SN, QCI e IP_Alloc con los siguientes siguientes valores:

- AMF=9000
- SN= 00000000000060f8
- QCI=9
- IP_Alloc=dinamic

Al configurar el parámetro de IP_Alloc como se describe anteriormente se asigna una IP correspondiente a la red LTE en implementada dinámicamente, si no se agrega este valor es necesario realizar una asignación manual de esta IP, el archivo user_db.csv queda configurado de la siguiente manera:

Figura 12

Configuración de archivo user_db.csv

```

1 | #
2 | # .csv to store UE's information in HSS
3 | # Kept in the following format: "Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP,AMF,SQN,QCI,IP_alloc"
4 | #
5 | # Name:      Human readable name to help distinguish UE's. Ignored by the HSS
6 | # IMSI:      UE's IMSI value
7 | # Auth:      Authentication algorithm used by the UE. Valid algorithms are XOR
8 | #             (xor) and MILENAGE (mil)
9 | # Key:       UE's key, where other keys are derived from. Stored in hexadecimal
10 | # OP_Type:   Operator's code type, either OP or OPc
11 | # OP/OPc:   Operator Code/Cyphered Operator Code, stored in hexadecimal
12 | # AMF:      Authentication management field, stored in hexadecimal
13 | # SQN:      UE's Sequence number for freshness of the authentication
14 | # QCI:      QoS Class Identifier for the UE's default bearer.
15 | # IP_alloc: IP allocation strategy for the SPGW.
16 | #           With 'dynamic' the SPGW will automatically allocate IPs
17 | #           With a valid IPv4 (e.g. '172.16.0.2') the UE will have a statically assigned IP.
18 | #
19 | # Note: Lines starting by '#' are ignored and will be overwritten
20 | ue3,mil,901700000020936,4933f9c5a83e5718c52e54066dc78dcf,opc,fc632f97bd249ce0d16ba79e6505d300,9000,0000000060f8,9,dynamic

```

Nota. Tomado de *COST UE*, por Software Radio System srsLTE, 2022,

(https://docs.srsran.com/en/latest/app_notes/source/cots_ue/source/index.html#cots-ue-appnote).

Ejecución de servicio 4G

Una vez que se completada la configuración inicial, se realiza prueba de funcionamiento del sistema para esto ingresamos a la carpeta donde se encuentran los archivos de configuración en este caso ESPE_SRSLTE y ejecutamos el comando: python3 ESPE_SRSLTE.py

Figura 13

Sistema de lanzamiento de red LTE

```

root@estacio4glte: ~/Desktop/ESPE_SRSLTE
File Edit Tabs Help
root@estacio4glte:~/Desktop/ESPE_SRSLTE# python3 ESPE_SRSLTE.py
RADIO BASE ESPE

Sistema de Lanzamiento de SDR - SRSLTE

Versión de Sistema de Control
posix

Validación de directorios
Estado del sistema de validación %d 0
Directorio de SRSLTE comprobado
Directorio de configuración comprobado
Directorio de enmascaramiento comprobado

CONTINUAR

Configuración alto rendimiento
net.core.wmem_max = 2426666
Verificación de conectividad con SDR
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_3.15.0.0-release
-----
-- UHD Device 0

```

Esto activa dos terminales que comunican los módulos ENB y EPC, como se observa en la Figura 14 y 15 respectivamente.

Figura 14

Interfaz de módulo ENB

```

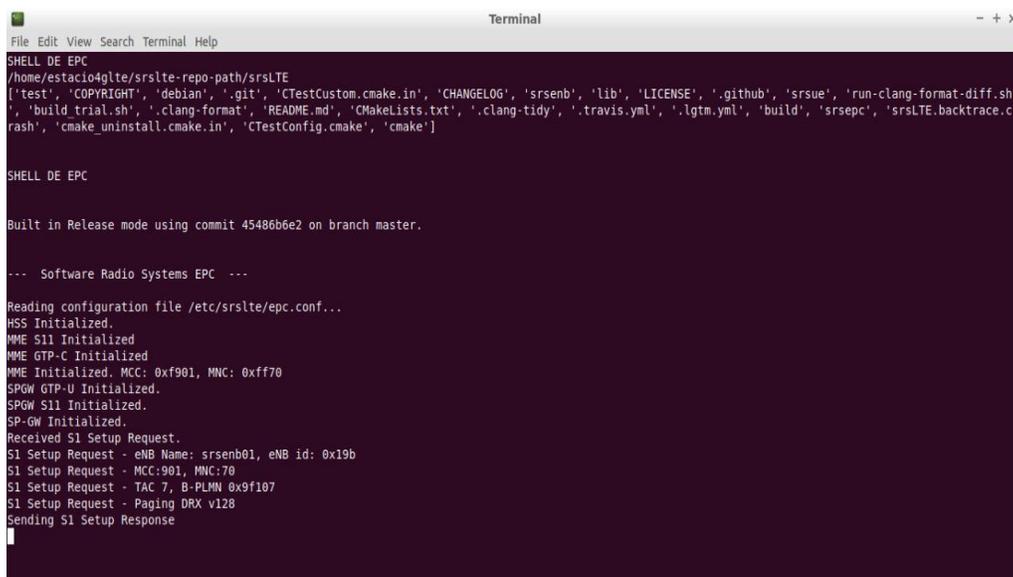
Terminal
File Edit View Search Terminal Help
Opening 1 channels in RF device=default with args=default
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_3.15.0.0-release
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Opening USRP channels=1, args: type=x300, master_clock_rate=184.32e6
[INFO] [X300] X300 initialization sequence...
[INFO] [X300] Maximum frame size: 1472 bytes.
[INFO] [X300] Radio 1x clock: 184.32 MHz
[INFO] [0/DmaFIFO_0] Initializing block control (NOC ID: 0xF1F0D00000000000)
[INFO] [0/DmaFIFO_0] BIST passed (Throughput: 1299 MB/s)
[INFO] [0/DmaFIFO_0] BIST passed (Throughput: 1298 MB/s)
[INFO] [0/Radio_0] Initializing block control (NOC ID: 0x12AD100000000001)
[INFO] [0/Radio_1] Initializing block control (NOC ID: 0x12AD100000000001)
[INFO] [0/DDC_0] Initializing block control (NOC ID: 0xDDC0000000000000)
[INFO] [0/DDC_1] Initializing block control (NOC ID: 0xDDC0000000000000)
[INFO] [0/DUC_0] Initializing block control (NOC ID: 0xD0C0000000000000)
[INFO] [0/DUC_1] Initializing block control (NOC ID: 0xD0C0000000000000)
Setting frequency: DL=2685.0 Mhz, UL=2565.0 MHz for cc_idx=0

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
Starting plot for worker_id=0
Creating plot window 'srsENB PCI 1'...
QStandardPaths: XDG_RUNTIME_DIR not set, defaulting to '/tmp/runtime-root'

```

Figura 15

Interfaz de EPC



```

Terminal
File Edit View Search Terminal Help
SHELL DE EPC
/home/estacio4glte/srslte-repo-path/srslTE
['test', 'COPYRIGHT', 'debian', '.git', 'CTestCustom.cmake.in', 'CHANGELOG', 'srsehb', 'lib', 'LICENSE', '.github', 'srsehb', 'run-clang-format-diff.sh', 'build_trial.sh', 'clang-format', 'README.md', 'CMakeLists.txt', '.clang-tidy', '.travis.yml', '.lgtm.yml', 'build', 'srsehb', 'srslTE.backtrace.c', 'rash', 'cmake_uninstall.cmake.in', 'CTestConfig.cmake', 'cmake']

SHELL DE EPC

Built in Release mode using commit 45486b6e2 on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

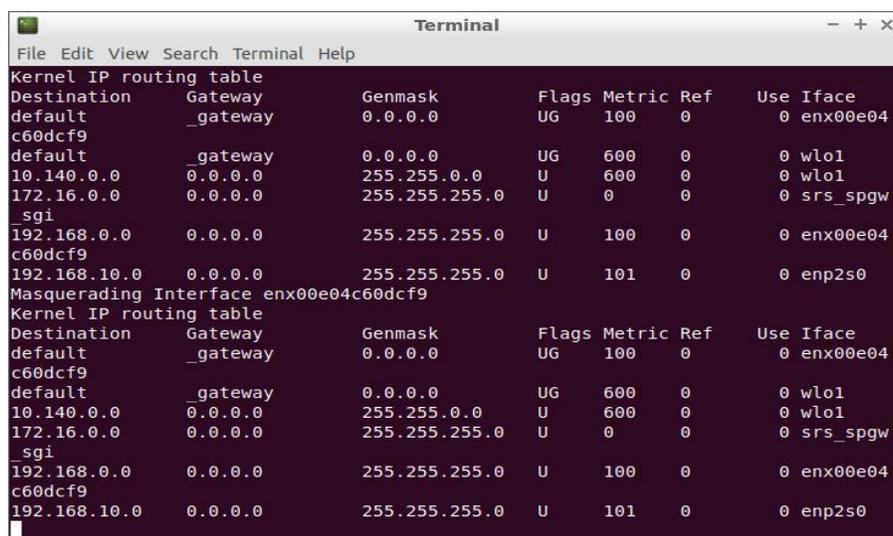
Reading configuration file /etc/srslte/epc.conf...
HSS Initialized.
MME S11 Initialized
MME GTP-C Initialized
MME Initialized. MCC: 0xf901, MNC: 0xff70
SPGW GTP-U Initialized.
SPGW S11 Initialized.
SP-GW Initialized.
Received S1 Setup Request.
S1 Setup Request - eNB Name: srsehb01, eNB id: 0x19b
S1 Setup Request - MCC:901, MNC:70
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0x9f107
S1 Setup Request - Paging DRX v128
Sending S1 Setup Response

```

Quando el núcleo de red envíe la primera trama de información al ENB esto habilitará el enmascaramiento de la red, En la Figura 16 se muestra la tabla de enrutamiento IP.

Figura 16

Tabla de enmascaramiento de la red LTE



```

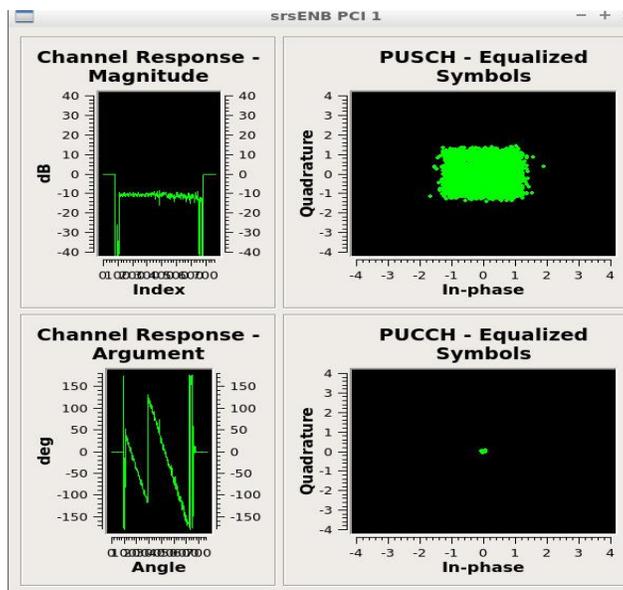
Terminal
File Edit View Search Terminal Help
Kernel IP routing table
Destination Gateway Genmask Flags Metric Ref Use Iface
default gateway 0.0.0.0 UG 100 0 0 enx00e04c60dcf9
c60dcf9
default gateway 0.0.0.0 UG 600 0 0 wlo1
10.140.0.0 0.0.0.0 255.255.0.0 U 600 0 0 wlo1
172.16.0.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 0 0 0 srs_spgw
_sgi
192.168.0.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 100 0 0 enx00e04c60dcf9
c60dcf9
192.168.10.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 101 0 0 enp2s0
Masquerading Interface enx00e04c60dcf9
Kernel IP routing table
Destination Gateway Genmask Flags Metric Ref Use Iface
default gateway 0.0.0.0 UG 100 0 0 enx00e04c60dcf9
c60dcf9
default gateway 0.0.0.0 UG 600 0 0 wlo1
10.140.0.0 0.0.0.0 255.255.0.0 U 600 0 0 wlo1
172.16.0.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 0 0 0 srs_spgw
_sgi
192.168.0.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 100 0 0 enx00e04c60dcf9
c60dcf9
192.168.10.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 101 0 0 enp2s0

```

Posteriormente, en la Figura 17 se muestra la interfaz correspondiente a la red LTE con su respectivo canal de uplink y downlink.

Figura 17

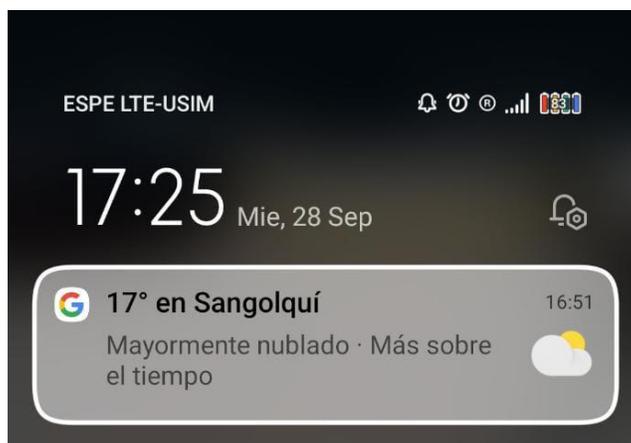
Interfaz de red LTE



Finalmente validamos la ejecución de la red insertando la USIM dentro del smartphone para visualizar la red ESPE_LTE_USIM implementada en el dispositivo móvil.

Figura 18

Red LTE en smartphone



En el Apéndice A, se puede examinar de manera más detallada la implementación de la red LTE, solventando problemas que se presentan en la configuración del servicio.

Metodología de evaluación

A continuación, se detalla el proceso y metodología usada para la obtención de los datos mediante métricas LTE para verificar el comportamiento, desempeño y los límites de cobertura dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE tanto de las operadoras móviles comerciales (Claro, Movistar, CNT) y de la radio base implementada.

La metodología para la toma de datos que se ha usado en este proyecto es por Drive Test, el cual permite realizar pruebas de calidad y desempeño de una red móvil LTE a través de indicadores KPI, para ello se usan aplicaciones móviles que permitan recolectar los datos más relevantes de los canales y eventos que esté experimentando la red. Drive Test se realiza para saber los límites y optimizar la cobertura de la red implementada, de esta manera se pueden resolver problemas sabiendo los lugares donde existen problemas de cobertura y calidad de servicio que experimentan los usuarios (Apolo, 2012).

Características

Para aplicar la metodología Drive Test y obtener datos que permitan medir el desempeño de los servicios móviles celular y pueda cumplir con las normas técnicas, se procede de la siguiente manera:

- Seleccionar los equipos móviles donde se van a instalar las tarjetas SIM para las pruebas.
- Configurar los equipos a utilizarse de acuerdo con los parámetros y condiciones en base a las necesidades y métricas relevantes escogidas para poder determinar la calidad de servicio y cobertura de tecnología 4G.
- Los terminales móviles que va a utilizar el usuario para las pruebas deben tener características de transmisión y/o recepción de la tecnología a usarse en este proyecto 4G y en las bandas de frecuencia en las que estos operan, en este caso las bandas de 1900/2100 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz.

- Establecer los lugares donde se van a realizar las medidas dentro del Campus Universitario y realizar un recorrido preliminar para confirmar la captura de datos por parte de los terminales móviles
- Las mediciones se realizan en periodos continuos con el fin de mantener la veracidad e integridad de los datos en entornos expuestos a cambios por parte de las operadoras móviles a corto plazo (Sutel, 2017).

Lo que se va a usar serán Aplicaciones móviles para medir los KPI (Medidor Clave de Desempeño), GPS, radio base sobre tecnología SDR y una antena bidireccional. Para realizar las evaluaciones por medio de drive test en pruebas de campo, la intensidad de señal debe ser medida en los exteriores del espacio geográfico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Condiciones para elegir los indicadores a medir

Las métricas han sido escogidas enfocadas a la perspectiva a los proveedores de servicio y en el usuario, ya que estos son los que evalúan la calidad de servicio, desempeño, cobertura, grado de satisfacción y experiencia en video al momento del uso de la red de acuerdo con cuatro puntos muy importantes que son:

- Necesidades de QoS del usuario
- Oferta de QoS del proveedor de servicio
- QoS conseguida o entregada (Itu, 2001).

Las métricas por medir se han escogido de acuerdo con aspectos enfocados en la calidad de servicio que ofrece la radio base implementada en la Universidad ESPE y a la perspectiva del usuario. Dentro de las mediciones a realizarse para su análisis 4G se ha escogido los siguientes KPIs: RSRP (Potencia de señal recibida de referencia), RSRQ (Calidad de señal recibida de referencia), RSSNR (Señal de referencia Relación señal/ruido), velocidad de carga y descarga (Uplink, Downlink), latencia y Jitter. Para la parte de video mediciones de:

carga inicial, tasa de rendimiento, datos consumidos, todas estas para 360p, 720p y 1080p. Cada una de estas métricas se explica en capítulo 2.

Estas métricas se han seleccionado basados en la guía GSMA "4G/5G Network Experience Evaluation Guideline, donde explican los rangos y el desempeño de redes 4G dentro de los rangos normales. Además de estas métricas antes mencionadas, también se evalúa la red basándose en la normativa de la ARCOTEL para el control del espectro radioeléctrico mediante la norma de calidad para la prestación del servicio móvil avanzado, de acuerdo con el análisis de parámetros de calidad, la norma cuenta con varios incisos SMA-QoS que permiten controlar y corregir mapas de cobertura, servicio de datos UpLink y DownLink del abonado prestador. Para este proyecto se ha de referirse al cumplimiento únicamente para la tecnología 4G, basándonos en el inciso SMA-QoS-9 donde se especifica el nivel mínimo de señal en una determinada zona es de -85 dBm y esto es independientemente de la tecnología.

Definición de Lugares dentro del campus Universitario ESPE donde se realizan las mediciones

Para definir los lugares donde se va a realizar las respectivas pruebas y mediciones, primero se hace un estudio en base a reportes o experiencias de estudiantes, docentes, público en general del porqué de alguna forma se hayan detectado problemas de cobertura o calidad de servicio de las redes 4G que operan dentro de la Universidad. Se toma en cuenta lugares estratégicos que son las principales edificaciones del campus donde es mayormente concurrido por la comunidad universitaria para no tener excesos de redundancia en los datos medidos.

Las operadoras móviles comerciales que operan con tecnología 4G dentro del campus ESPE, son las ya conocidas Movistar, Claro y CNT que prestan sus servicios en la institución.

Figura 19

Campus Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sangolquí



Una vez delimitado el área geográfica de la universidad, tal como se muestra en la Figura 19, se seleccionan los lugares donde se van a realizar las pruebas, estos son los siguientes:

- Edificio Administrativo
- Edificio Central (Bloques A y B)
- Edificio MED (Bloques C y D)
- Centro de Investigación y Posgrados
- Coliseo
- Biblioteca
- Laboratorios de Electrónica
- Centro de Investigación científica y tecnológica del Ejército – CICTE

Aplicaciones móviles usadas para medir los KPI

Las aplicaciones móviles principales para realizar las medidas tanto de la calidad de servicio como cobertura de las operadoras móviles y radio base 4G sobre SDR implementada en la Universidad que se han usado son: Network Cell Info Lite, nPerf y analizadores de espectro.

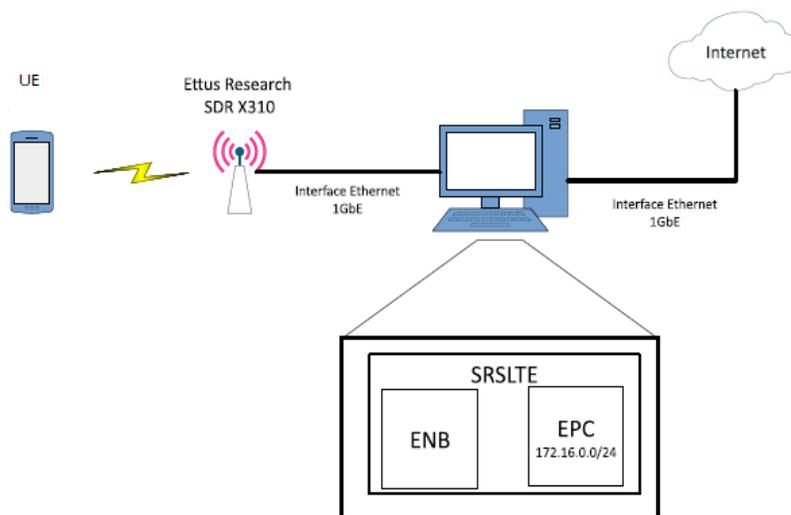
Para la parte de calidad de servicio LTE se usa Network Cell Info Lite que permite obtener información valiosa los distintos KPIs LTE, dentro de ellos se mide la potencia de señal, la banda en que está operando la red, RSRP, RSSNR, RSRQ, latencia, Jitter. Para observar la frecuencia de operación se utiliza un analizador de espectros.

Para la parte de análisis de video se usa la aplicación nPerf, ya que, usa un algoritmo único que permite realizar las mediciones con precisión del uplink y downlink, además dispone de una red de servidores programados para transmitir velocidades que son necesarias para saturar el Internet y así obtener datos más exactos y fiables. En nPerf se realizan mediciones de tasa de rendimiento, carga inicial, datos consumidos para video en calidad 360p, 720p y 1080p.

Para realizar los mapas de cobertura se va a utilizar la aplicación Mapa de Cobertura Móvil, que recopila los datos de potencia de cada operadora móvil en cada sector recorrido y mediante una escala establecida de dBm se marca en el mapa con colores la intensidad de señal que existe en el lugar donde se realiza la medición.

Escenario de Prueba 1

En esta sección se presenta la forma en la cual se realizaron las medidas para analizar la calidad de servicio y cobertura entre el UE y la red 4G ESPE_LTE. En la Figura 20, se observa el diagrama de bloques del escenario.

Figura 20*Escenario de Prueba 1*

En el escenario de prueba 1 se realizan las mediciones KPIs que nos permitan observar el comportamiento de la red, los parámetros evaluados son RSRP, RSRQ, RSSNR, velocidad de carga y descarga de la red, latencia y experiencia de video variando la distancia del UE respecto a la antena transmisora.

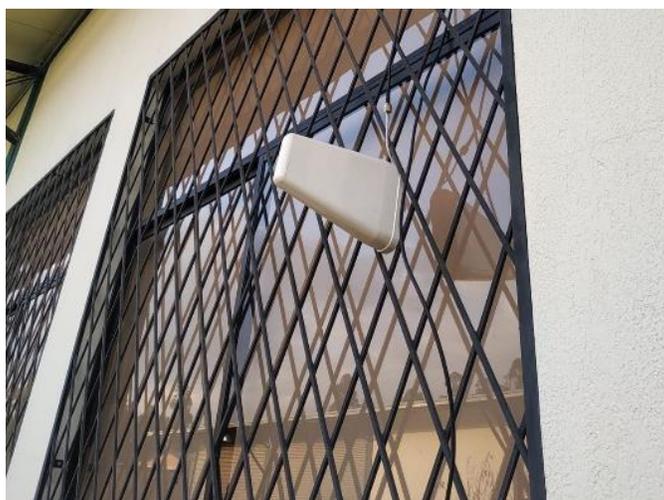
Como primera instancia se coloca la tarjeta SIM grabada con los parámetros de la radio base en un teléfono celular apto para servicio 4G, luego la radio base se coloca en un lugar fijo, en este caso se coloca dentro del Centro de Investigación científica y tecnológica del Ejército – CICTE y la antena en un lugar alto para que pueda abarcar la mayor cantidad de área de cobertura como se observan en las Figuras 21 y 22.

Figura 21

Radio Base 4G sobre tecnología SDR

**Figura 22**

Antena colocada en exteriores del CICTE



En el dispositivo móvil estarán instaladas las aplicaciones que permitan medir los KPI. Para realizar las medidas primero se coloca el usuario con su UE a un metro de distancia con respecto a la radio base y posteriormente se miden a intervalos de 12 metros para ir observando el comportamiento y desempeño de la red, como se muestra en las Figura 23, 24, 25 y 26.

Figura 23

Toma de datos radio base red ESPE_LTE dentro del CICTE

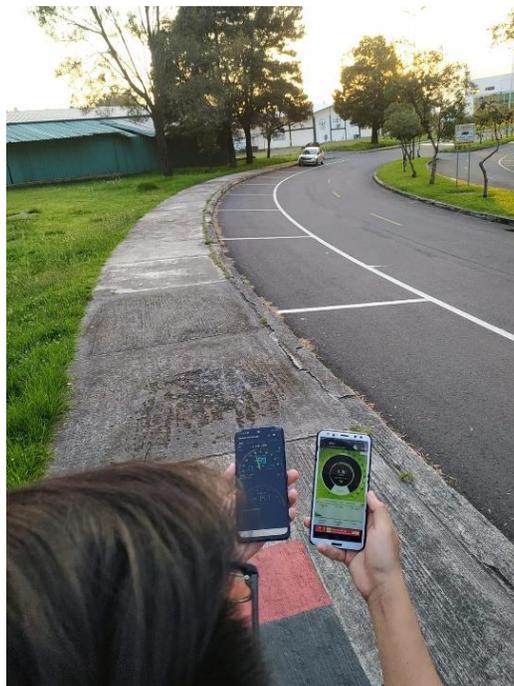
**Figura 24**

Toma de datos en radio base en exteriores del CICTE a 20m de distancia

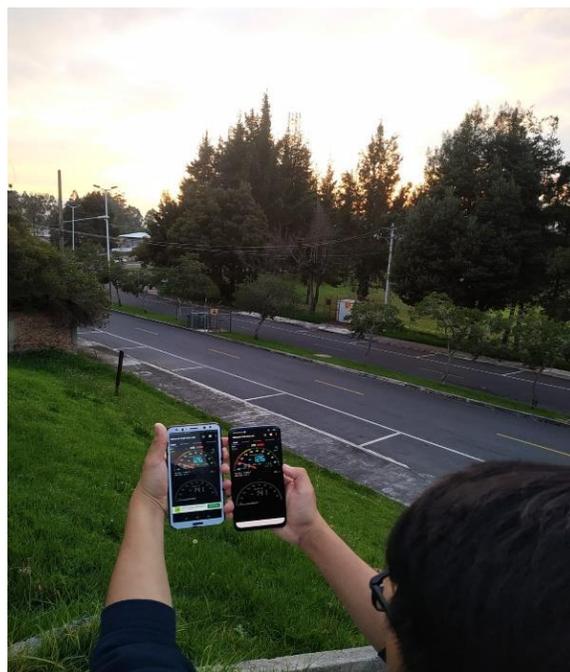


Figura 25

Toma de datos radio base en exteriores del CICTE a 200m de distancia

**Figura 26**

Toma de datos radio base red ESPE_LTE en exteriores del CICTE a 300m de distancia



Escenario de Prueba 2

En esta sección se explica las pruebas realizadas para medir la calidad de servicio y cobertura de las operadoras móviles dentro del campus. Donde se tiene tres tarjetas SIM, una de cada operadora móvil (Movistar, Claro y CNT) y tres teléfonos celulares marcas Samsung, Huawei y Xiaomi. De esta forma se realizan las pruebas en los puntos seleccionados dentro de la Universidad, como se observan en las Figuras 27, 28, 29, 30, 31 y 32

Figura 27

Toma de datos operadoras comerciales en Edificio Administrativo

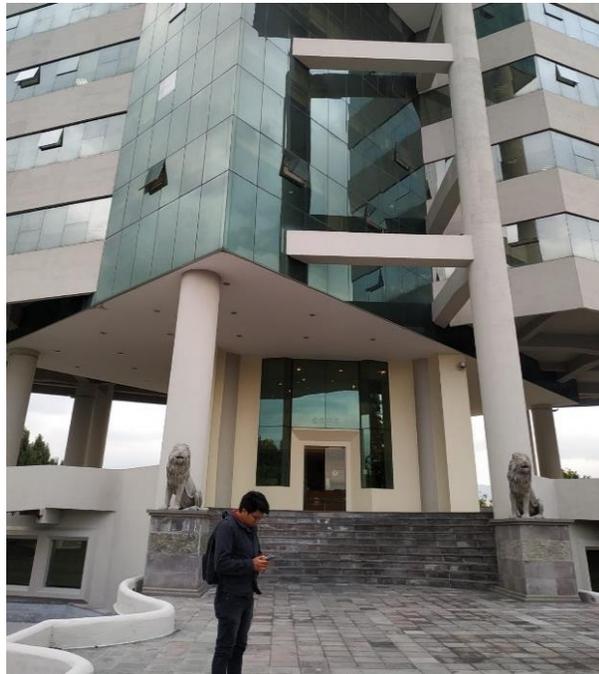


Figura 28

Toma de datos operadoras comerciales en Edificio Central

**Figura 29**

Toma de datos operadoras comerciales en Edificio MED



Figura 30

Toma de datos operadoras comerciales en Laboratorios de Electrónica

**Figura 31**

Toma de datos operadoras comerciales en Coliseo

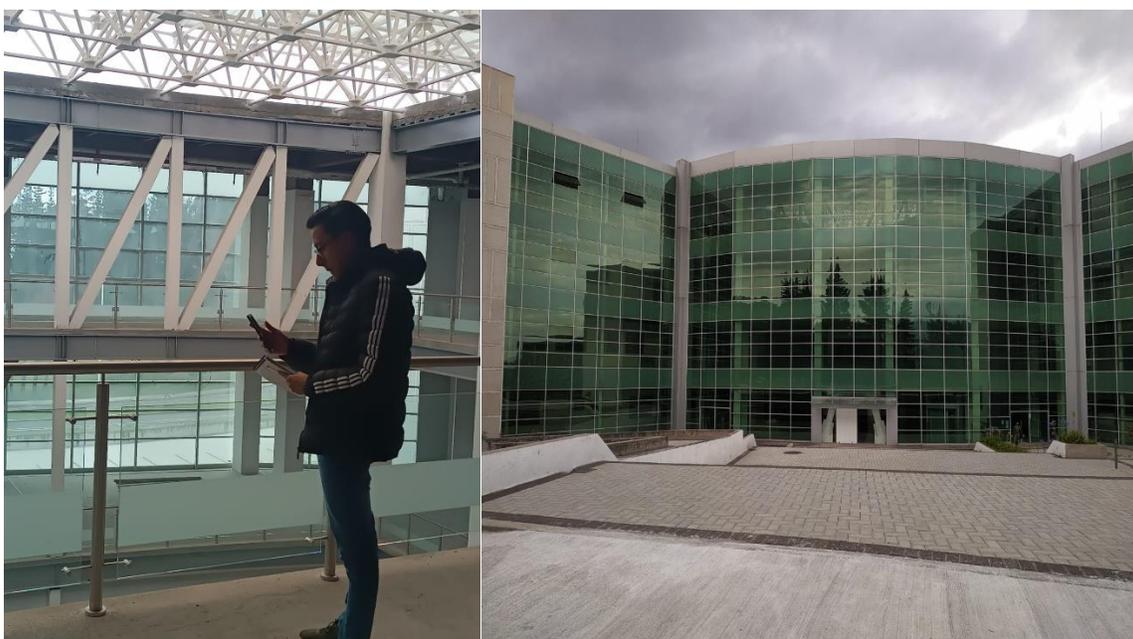


Figura 32

Toma de datos operadoras comerciales en Biblioteca

**Figura 33**

Toma de datos operadoras comerciales en Centro de Investigación y Posgrado



En las Figuras 34 y 35 se muestra la interfaz del comportamiento de las aplicaciones móviles para la toma de datos en Network Cell Info Lite y nPerf, cabe mencionar que estas

medidas se realizan para las tres operadoras móviles comerciales en los mismos lugares seleccionados.

Figura 34

Interfaz con datos medidos en Network Cell info Lite con métricas LTE

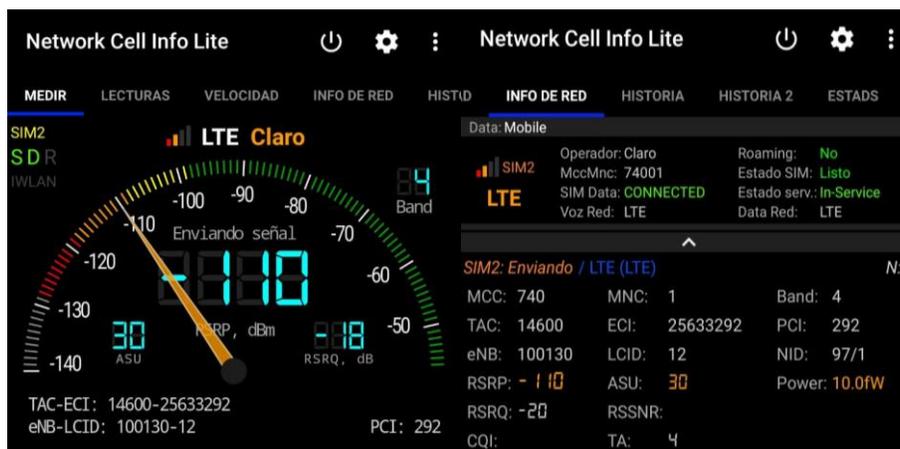


Figura 35

Interfaz con datos medidos en nPerf con métricas de video



A partir de la toma de datos y experimentado el funcionamiento de la radio base ESPE_LTE, se plantea un laboratorio educativo que se titula “Experiencia del usuario de la red 4G sobre tecnología Radio Definida por Software SDR” que se encuentra en el Apéndice B al final de este documento, donde los estudiantes o el público en general puedan realizar estas

mismas pruebas y experimentar el funcionamiento de la red 4G a través de los distintos servicios móviles dentro del campus universitario

Todos los datos recopilados tanto de la radio base 4G ESPE_LTE y de las operadoras comerciales se coloca en unas tablas para su respectivo análisis en el capítulo IV.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

Introducción

En este capítulo se muestra la recopilación de resultados obtenidos mediante la metodología Drive test previamente presentada, para obtener datos comparables con las métricas presentadas en la guía de GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation” y seguir la norma vigente de calidad para la prestación del servicio móvil avanzado en su sección SMA-QoS-9.

Descripción de las pruebas realizadas

Se han realizado dos escenarios de pruebas para el desarrollo del proyecto y se presentan a continuación:

Escenario de Prueba 1: Pruebas de cobertura y calidad de servicio en estación radio base 4G implementada en SDR (ESPE_LTE)

Los datos obtenidos se tomaron mediante Network Cell info life y nPerf aplicaciones disponibles para Android y iOS, que recopilan información en tiempo real de la red LTE como se observa en la Figura 34 y 35 respectivamente.

Siguiendo la metodología drive test, establecemos un punto fijo donde se ubique la estación radio base y variamos la distancia del terminal de usuario cada 12 metros hasta para establecer el radio de cobertura de la red y al mismo tiempo recolectar los KPIs o indicadores claves de rendimiento que nos permitan identificar el estado de la operadora móvil, a continuación se presenta la tabla de resultados de la operadora ESPE_LTE donde se realizaron 26 mediciones lo que equivale a 300 metros de cobertura.

Tabla 1*Resultados de test de velocidad y calidad de la señal recibida en el UE*

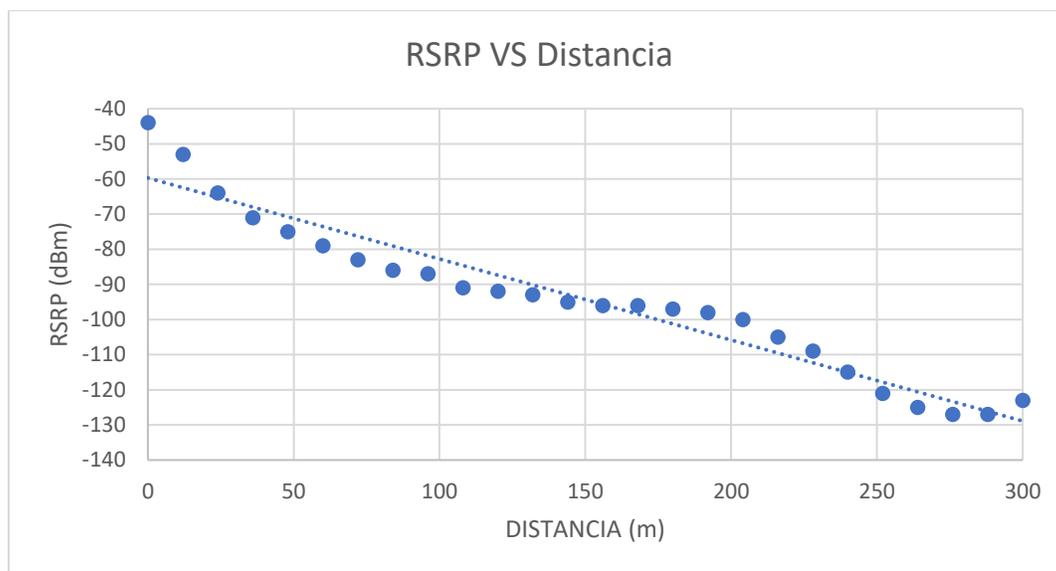
Número de medición	Distancia de referencia RB (m)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSNR (dB)	Velocidad DL (Mbps)	Velocidad UL (Mbps)	Latencia(ms)
1	0	-44	-10	9	12,24	11,98	37
2	12	-53	-4	9	10,24	12,89	40
3	24	-64	-6	17	9,32	13,06	36
4	36	-71	-4	16	8,3	11,96	43
5	48	-75	-7	15	8,28	8,01	39
6	60	-79	-4	14	8,2	6,82	37
7	72	-83	-4	14	7,77	5,79	33
8	84	-86	-4	13	7,57	5,57	33
9	96	-87	-4	12	7,75	4,91	30
10	108	-91	-8	11	7	6,94	40
11	120	-92	-6	11	6,45	5,3	60
12	132	-93	-7	10	5,19	1,75	40
13	144	-95	-4	9	4,17	1,5	30
14	156	-96	-4	8	4,02	1,46	45
15	168	-96	-4	7	3,24	1,12	63
16	180	-97	-4	6	7,66	2,11	75
17	192	-98	-5	5	6,68	4,55	353
18	204	-100	-4	4	0,45	0,24	378
19	216	-105	-4	4	0,79	0,12	405
20	228	-109	-4	4	4,03	0,15	631
21	240	-115	-6	3	x	X	X
22	252	-121	-10	2	x	X	X
23	264	-125	-13	2	x	X	X
24	276	-127	-15	1	x	X	X
25	288	-127	-13	1	x	X	X
26	300	-123	-11	-1	x	X	X

En la Figura 36 se representa la variación de potencia de la señal (*RSRP*) y la distancia del terminal de usuario en referencia a la antena transmisora, se visualiza una pendiente descendente, esto indica que ambos parámetros son inversamente proporcionales, si el UE se encuentra a menor distancia respecto a la antena cuenta con una potencia alta y a medida que el UE se aleja de la antena la potencia se reduce hasta perder totalmente la señal de la red. Esto se debe a que ya no existe línea de vista directa entre la antena transmisora y el equipo de usuario.

Se debe considerar que para valores mayores a -65 dBm existe un efecto de alto ruido, afectando directamente a la velocidad de la red LTE, mientras que para valores inferiores a -120 dBm el UE consume más recursos para conservar el servicio LTE.

Figura 36

Relación de Potencia vs Distancia de red ESPE_LTE



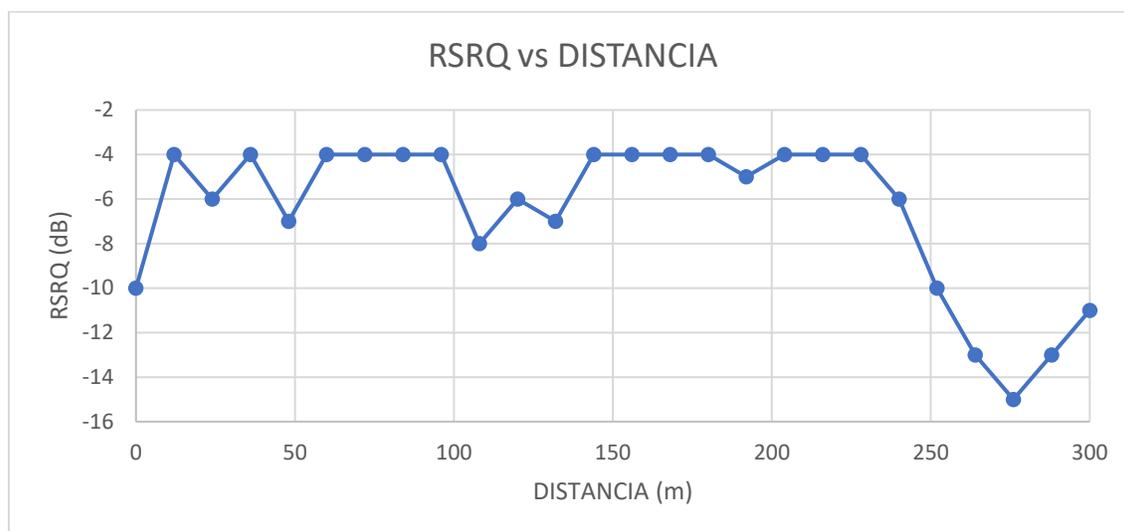
En el gráfico se muestra que el último valor detectado fue de -123 dBm alcanzando los 300 metros de cobertura y el valor de potencia más elevado fue de -44 dBm indicando que las condiciones de radiofrecuencia son excelentes al estar a cero metros de la antena.

La potencia que transite la radio base es de muy buena calidad hasta en un radio de 100 m pero su rendimiento disminuye desde los 200 m hasta los 300 m, como se muestra en la Figura 36

En la Figura 37, se observan los valores de RSRQ o calidad recibida de la red 4G, estos varían de acuerdo con su ubicación, este parámetro nos permite identificar ruido o interferencia en la red. Se determinó que para valores mayores a -8 dB el UE recibe de forma muy sencilla la señal mientras que con valores menores a -10 dB la velocidad disminuye debido a que se dificulta la recepción de la red.

Figura 37

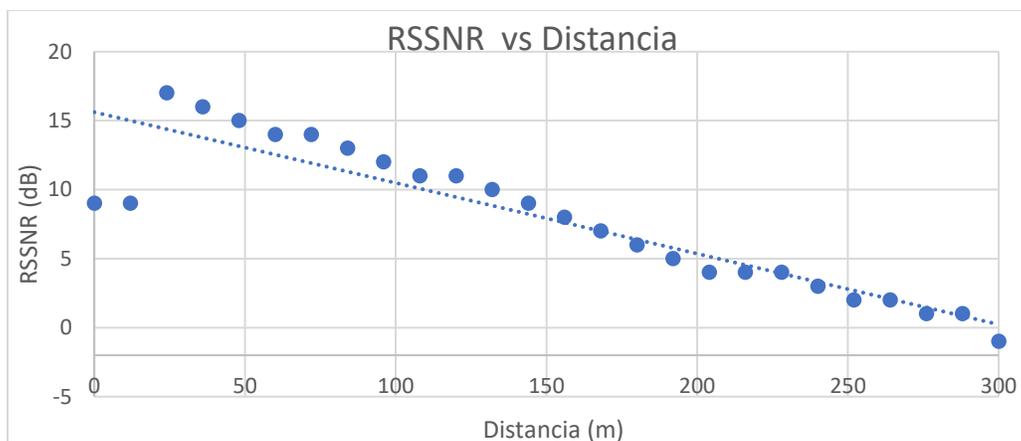
Mediciones de calidad de la señal vs distancia



En la Figura 38 se observa los datos correspondientes a la variación la relación señal a ruido modificando distancia del UE, si el usuario se encuentra a menor distancia la relación señal a ruido es excelente, pero si se encuentra excesivamente cerca existe un efecto de alto ruido y esto afecta la velocidad LTE, de igual forma si la potencia es inferior a -120 dBm la red ya no genera la velocidad adecuada para el estándar y se consume mayor cantidad de recursos para mantener el servicio. La gráfica indica que la relación señal a ruido y la distancia son inversamente proporcionales.

Figura 38

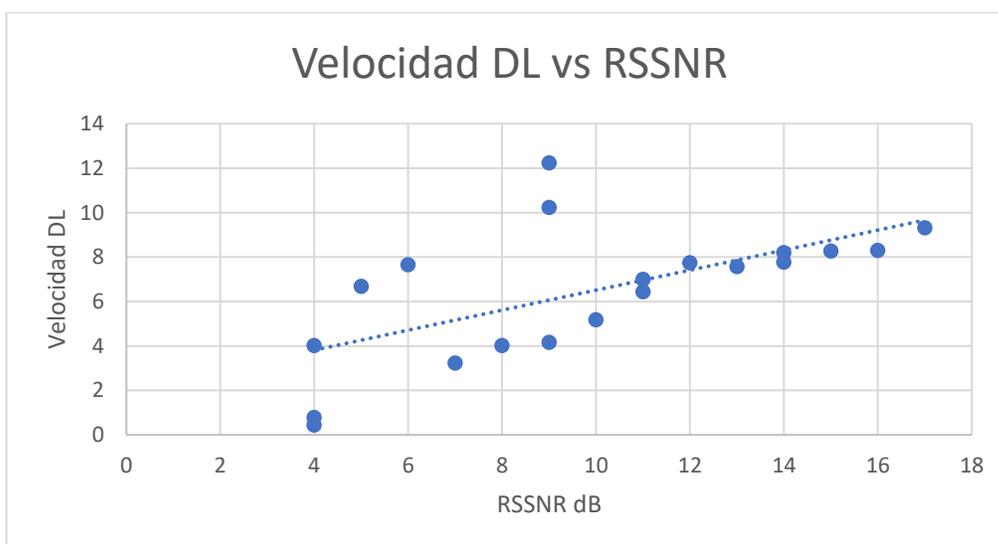
Mediciones de RSSNR vs distancia



En la Figura 39 se observa que la relación entre la velocidad de descarga y RSSNR, indica que ambos parámetros son directamente proporcionales, la relación señal a ruido varía en función de las condiciones del medio.

Figura 39

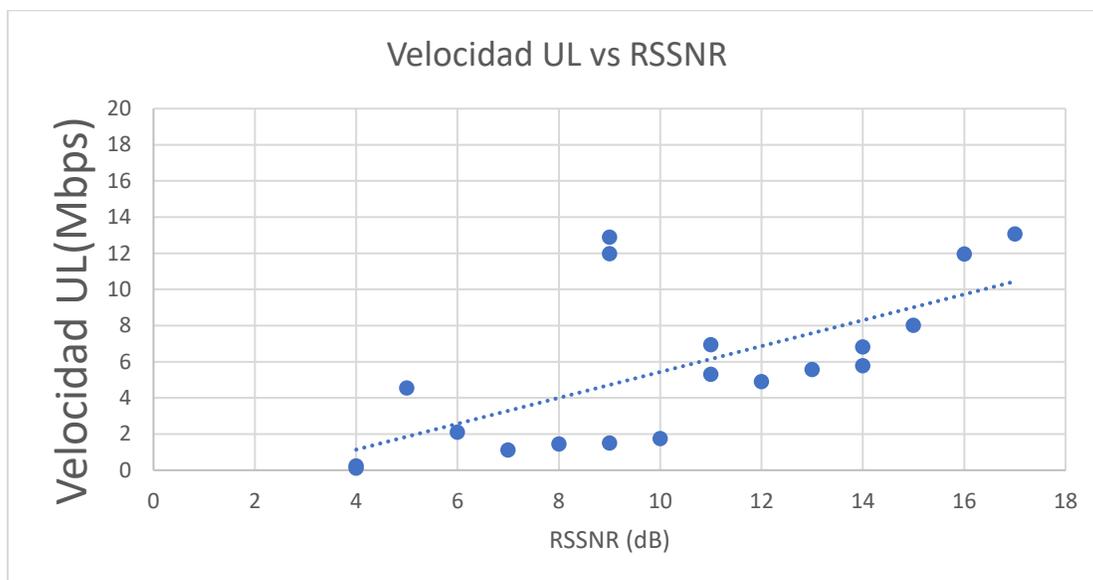
Mediciones de Velocidad de Descarga vs RSSNR



En la Figura 40 se observa que la relación entre la velocidad de carga y RSSNR, indica que ambos parámetros son directamente proporcionales, la relación señal a ruido varía en función de las condiciones del medio.

Figura 40

Mediciones de Velocidad de carga vs RSSNR

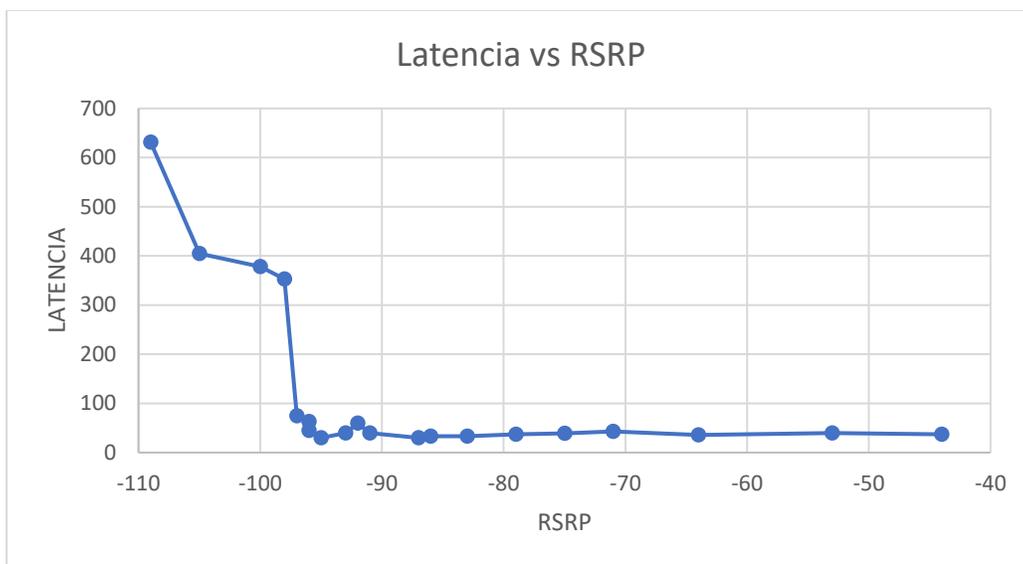


La Figura 41 nos permite reconocer que en áreas con poca cobertura la latencia es alta, debido a que la potencia es muy deficiente esto prolonga la latencia de transmisión, en condiciones normales se puede asegurar una latencia menor a 100 ms.

De igual forma la latencia aumenta mientras se va alejando el UE de la radio base, esto ocurre porque el nivel de potencia disminuye y el nivel de respuesta aumenta.

Figura 41

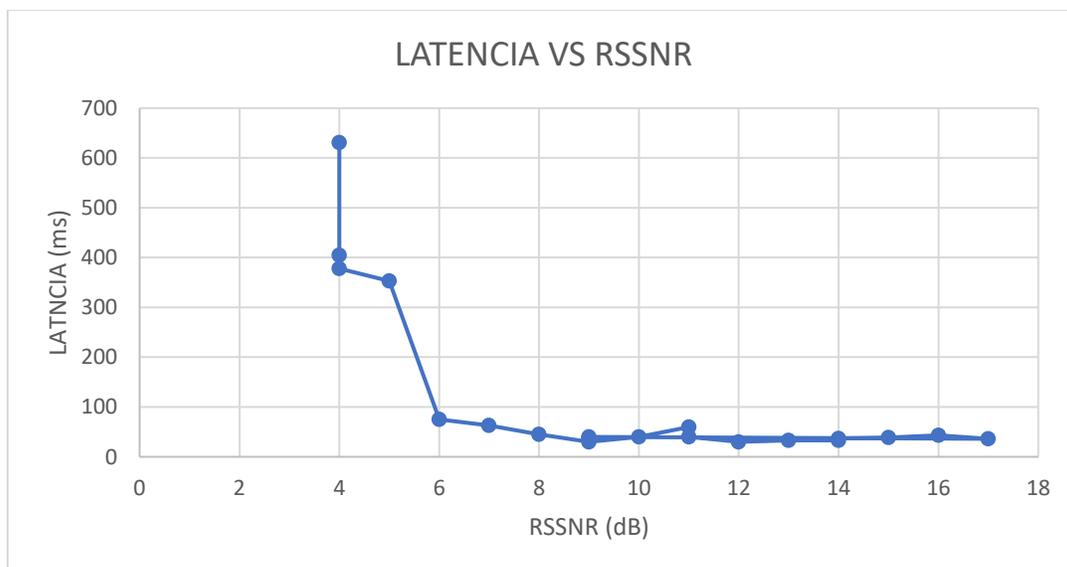
Mediciones de Latencia vs potencia de la señal



La Figura 42 muestra la dependencia en los parámetros de latencia y la relación señal a ruido indicando que, para valores inferiores a 6 dB la latencia supera los 100 ms, lo que provoca un retraso en la transmisión de la señal.

Figura 42

Mediciones de Latencia vs RSSNR



- Pruebas de Video

Estas pruebas se realizan en las mismas condiciones, reproduciendo videos cortos de distinta calidad para determinar la experiencia del usuario al utilizar la red basándonos en requisitos mínimos de rendimientos descritos en la guía de GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation”, entre estos están el congelamiento de fotogramas y el tiempo inicial de reproducción.

En la tabla 2 se muestran los resultados del test de calidad, para valores superiores a los 240 metros no se pueden reproducir videos porque la potencia supera los -120 dBm dificultando la condición de red LTE.

Tabla 2

Resultados de test de calidad de video

Distancia(m) con referencia a RB	Calidad de imagen (p)	Resolución	Tasa de rendimiento (%)	Carga inicial(s)	Datos consumidos (MB)
0	360	640x360	97,45	0,27	0,97
0	720	1280x720	95,64	0,46	3,64
0	1080	1920x1080	93,53	0,7	6,63
12	360	640x360	97,09	0,31	0,97
12	720	1280x720	93,36	0,72	3,64
12	1080	1920x1080	91,83	0,7	6,63
36	360	640x360	92,38	0,83	0,97
36	720	1280x720	83,39	2	3,64
36	1080	1920x1080	72,5	3,8	6,63
60	360	640x360	92,38	0,83	0,97
60	720	1280x720	83,39	2	3,64
60	1080	1920x1080	72,5	3,8	6,63
84	360	640x360	92,12	0,86	0,96
84	720	1280x720	75,48	3,26	3,19

Distancia(m) con referencia a RB	Calidad de imagen (p)	Resolución	Tasa de rendimiento (%)	Carga inicial(s)	Datos consumidos (MB)
84	1080	1920x1080	73,34	3,64	6,61
108	360	640x360	90,38	1,07	0,97
108	720	1280x720	81,66	2,25	3,54
108	1080	1920x1080	70,71	4,15	6,61
132	720	1280x720	75,6	3,6	6,63
156	720	1280x720	68,8	4,7	6,63
180	720	1280x720	35,9	7,4	0,97
204	720	1280x720	16,2	8,7	6,63
228	720	1280x720	9,8	10,9	6,63
240	720	1280x720	0	X	X

Tabla 3

Tasa de rendimiento promedio

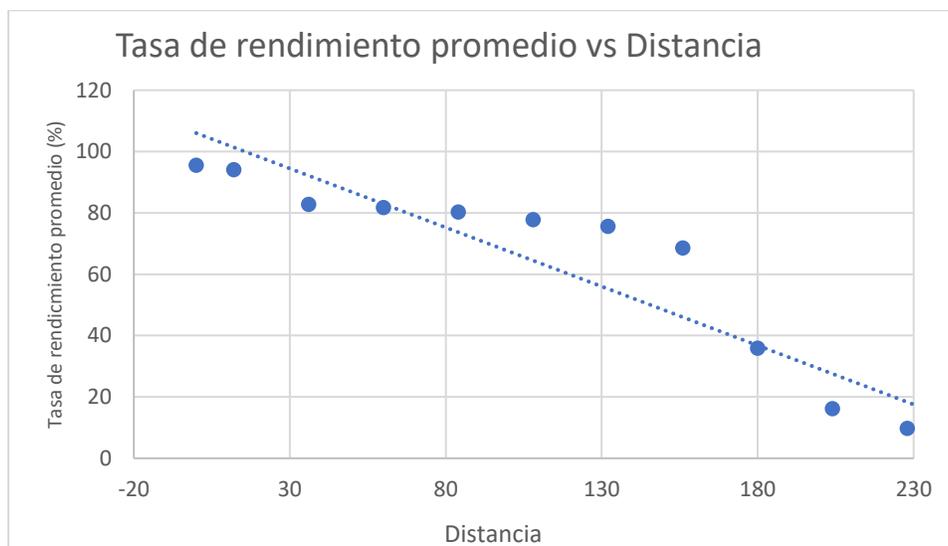
Distancia(m) con referencia a RB	Tasa de rendimiento promedio (%)
0	95,54
12	94,09
36	82,76
60	81,72
84	80,31
108	77,8
132	75,6
156	68,6
180	35,9
204	16,2
228	9,8
240	0

En la Figura 43 se muestra la relación entre la tasa de rendimiento promedio y la distancia del terminal de usuario a la antena transmisora, indica que ambos parámetros son

inversamente proporcionales, si aumentamos la distancia del UE la tasa de rendimiento disminuye. Los resultados indican que dentro de un radio de 84 m se obtiene un rendimiento excelente, a partir de ahí baja su calidad.

Figura 43

Tasa de rendimiento promedio vs distancia UE



Escenario de Prueba 2: Pruebas de cobertura y calidad de servicio de Operadoras móviles comerciales dentro del campus Universitario

Los datos obtenidos se tomaron mediante Network Cell info life y nPerf aplicaciones disponibles para Android y IOS siguiendo la metodología Drive Test.

- Edificio Administrativo

Figura 44

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE

**Tabla 4**

Resultados test de video operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE

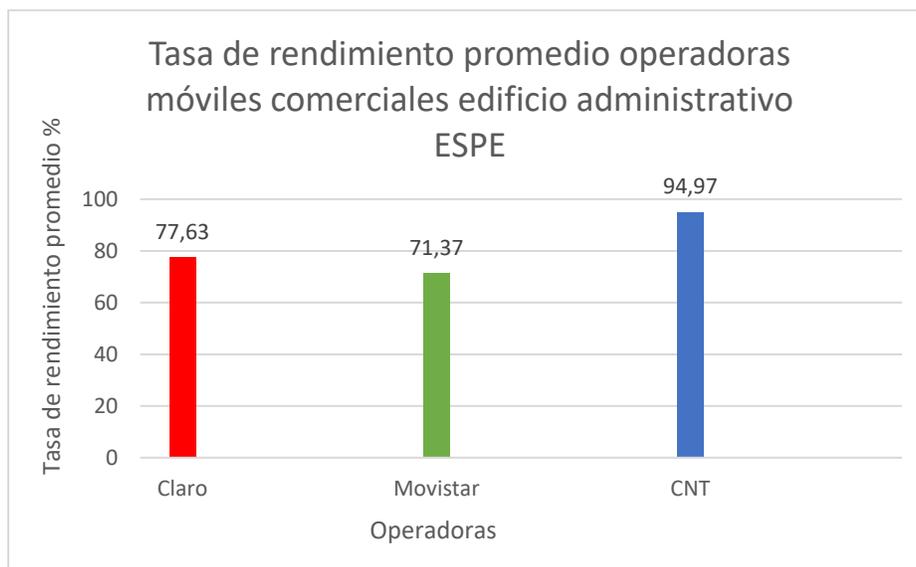
Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	77,63
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	71,37
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	94,97
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 45 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del edificio administrativo ESPE, se puede observar claramente que CNT se impone ante Claro y Movistar contando con un

rendimiento de 94,97% en la reproducción de videos, brindando excelente experiencia al usuario.

Figura 45

Tasa de rendimiento promedio de operadoras comerciales en edificio administrativo ESPE



- Edificio Central (Bloques A y B)

Figura 46

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en edificio central ESPE



Tabla 5

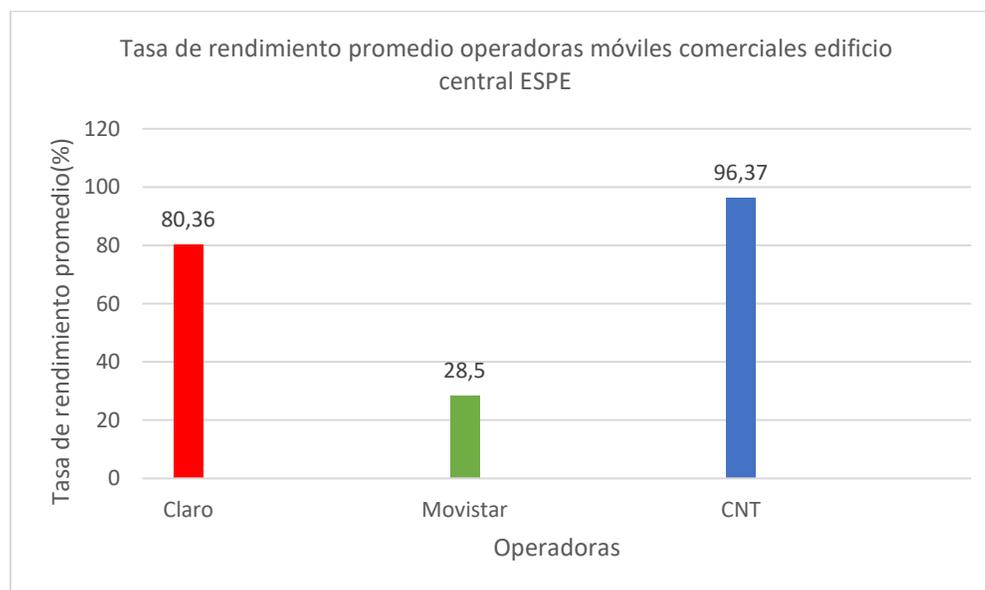
Resultados test de video operadoras comerciales en edificio central ESPE

Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	80,36
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	28,5
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	96,37
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 47 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del edificio central ESPE, se puede observar que CNT y Claro cuentan con excelente servicio, mientras que movistar es bastante deficiente en este sector.

Figura 47

Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales edificio central ESPE



- Edificio MED (Bloques C y D)

Figura 48

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en bloque MED



Tabla 6

Resultados test de video operadoras comerciales en edificio MED

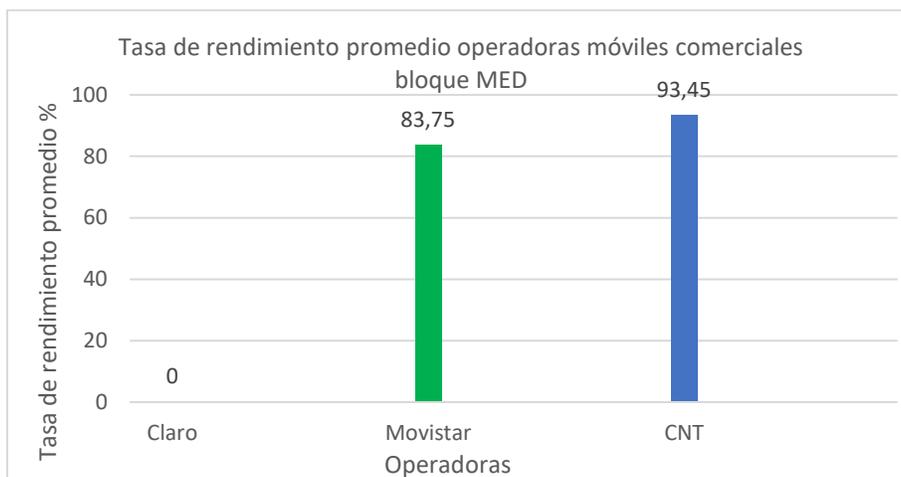
Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	X
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	83,75
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	93,45
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 49 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del bloque MED, se puede observar que

Movistar y CNT cuentan con buen servicio, mientras que en Claro no tiene cobertura 4G en este sitio.

Figura 49

Tasa de rendimiento promedio de operadoras móviles comerciales bloque MED



- Centro de Investigación y Posgrados

Figura 50

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Centro de investigación y Posgrados



Tabla 7

Resultados test de video operadoras comerciales en edificio de posgrados

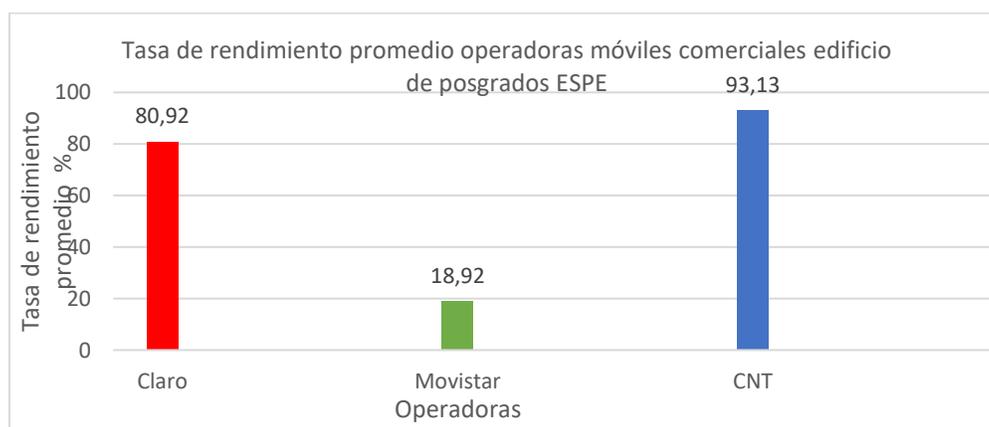
Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	80,92
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	18,92
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	93,13
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 51 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del edificio de posgrados, puede observar que Claro y CNT cuentan con buen servicio, pero que en Movistar cuenta con un deficiente nivel de cobertura, los estudios y mediciones realizados en esta nueva edificación son muy relevantes en el desarrollo de la investigación al no existir análisis previos en el sitio.

Figura 51

Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales en el edificio de posgrados

ESPE



- Coliseo Gral. Miguel Iturralde

Figura 52

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Coliseo ESPE



Tabla 8

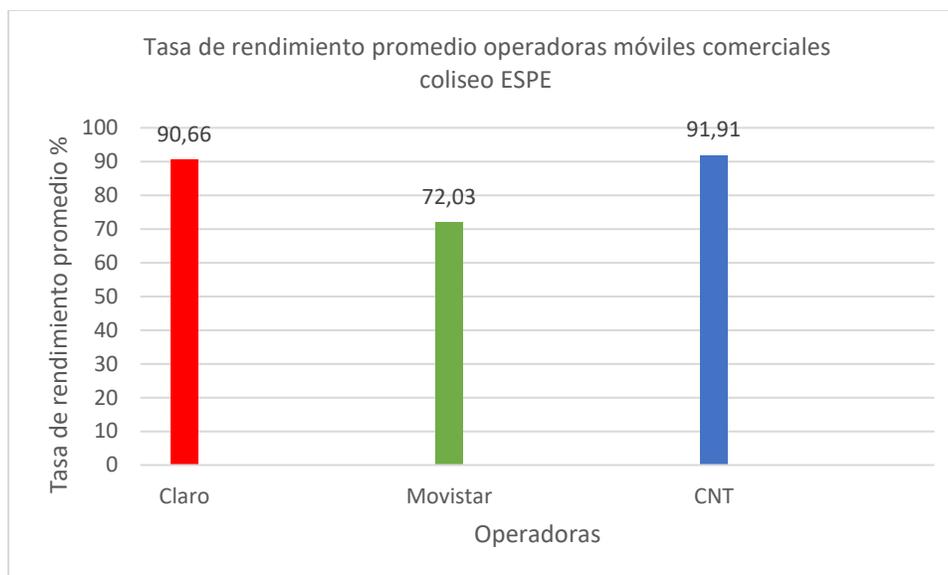
Resultados test de video operadoras comerciales en Coliseo ESPE

Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	90,66
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	72,03
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	91,91
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 53 se gráfica la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del edificio central ESPE, se puede observar que en este punto se cuenta con buen servicio de cobertura 4G.

Figura 53

Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales coliseo ESPE



- Biblioteca Alejandro Segovia

Figura 54

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Biblioteca ESPE



Tabla 9

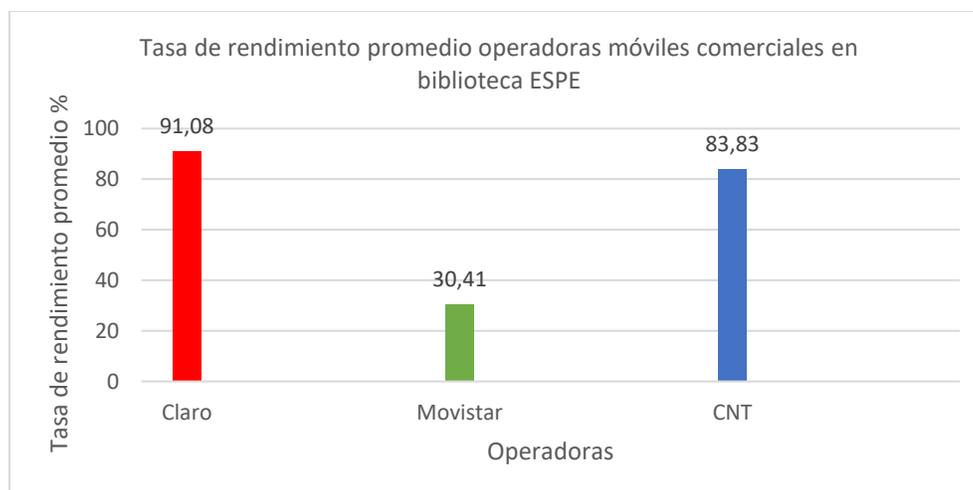
Resultados test de video operadoras comerciales en Biblioteca ESPE

Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	91,08
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	30,41
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	83,83
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 55 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores del biblioteca ESPE, se puede observar que Claro es la operadora con mayor rendimiento en el sitio, seguida de CNT, mientras que en Movistar tiene señal muy deficiente específicamente en el subsuelo de la edificación, donde se realizó la medición.

Figura 55

Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales biblioteca ESPE



- Laboratorios de Electrónica

Figura 56

Test de video mediante nPerf para operadoras comerciales en Laboratorios de electrónica ESPE

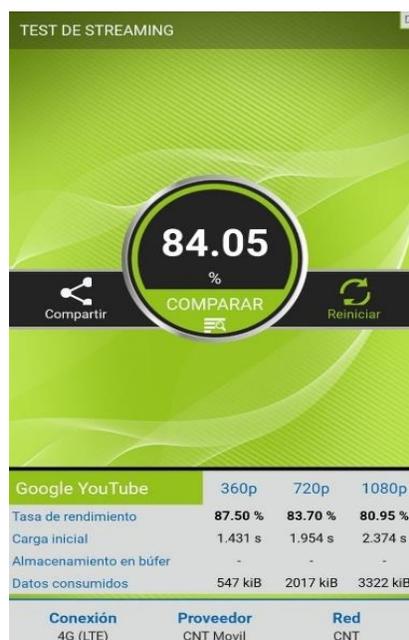


Tabla 10

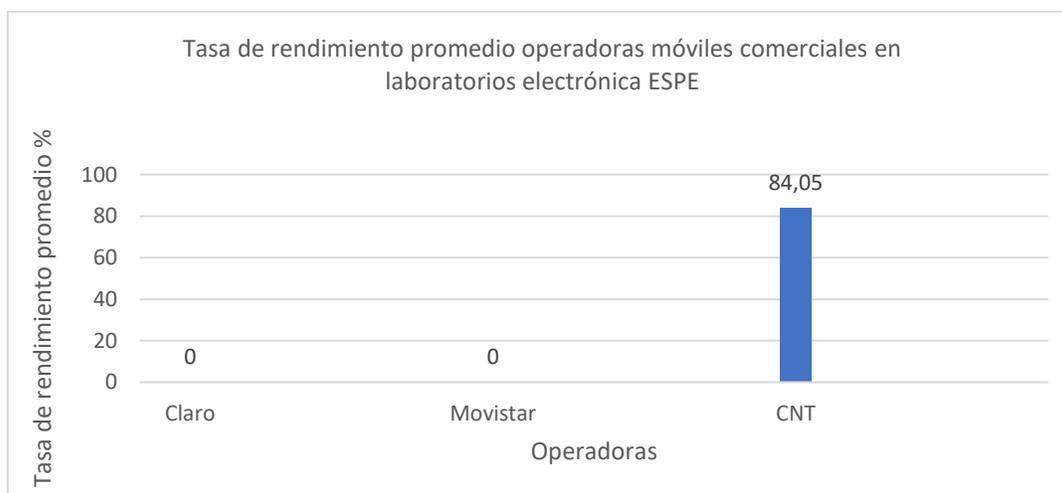
Resultados test de video operadoras comerciales en Biblioteca ESPE

Operadora	Calidad de video	Resolución	Tasa de rendimiento promedio (%)
Claro	360	640x360	X
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
Movistar	360	640x360	X
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	
CNT	360	640x360	84,05
	720	1280x720	
	1080	1920x1080	

En la Figura 57 se muestra la tasa de rendimiento promedio de las operadoras comerciales que brindan servicio 4G en los interiores y exteriores del laboratorio de electrónica ESPE, se puede observar que Movistar y Claro no cuentan con servicio en el sitio, mientras que en CNT es la única operadora que tiene un excelente rendimiento a pesar de la mala ubicación en la que se encuentran los laboratorios.

Figura 57

Tasa de rendimiento promedio operadoras móviles comerciales en laboratorios electrónica ESPE



El siguiente análisis va a referirse al cumplimiento únicamente para la tecnología 4G, basándonos en el inciso SMA-QoS-9 donde se especifica el nivel mínimo de señal en una determinada zona es de -85 dBm y esto es independientemente de la tecnología. Con los resultados obtenidos previamente se verifica que la red en condiciones normales cuenta con una potencia adecuada de funcionamiento, como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11

Rangos de KPIs según normativa SMA-QoS-9 ARCOTEL

SITIO	Rx Level (2G)	RSCP (3G)	RSRP (4G)
Zona de medición	≥ -85 dBm	≥ -85 dBm	≥ -85 dBm

Solo se puede comparar el KPI de RSRP de la normativa de la Arcotel SMA-QoS-9, ya que, este trabajo está enfocado al análisis de datos y video y dicha normativa se enfoca más en análisis de parámetros VoLTE.

Tabla 12

Condiciones RF en redes LTE

Condiciones RF	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSNR (dB)
Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Bueno	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
Media	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
Deficiente	≤ -100	< -20	≤ 0

Encuesta MOS Experiencia del Usuario de la red ESPE_LTE

Para evaluar la experiencia del usuario al usar la red ESPE_LTE, se ha realizada una encuesta MOS a 20 personas que probaron el funcionamiento de la red a través de sus teléfonos celulares, cabe mencionar que los usuarios que probaron poseen distintas marcas de teléfonos celulares. A continuación, se presenta la encuesta y sus resultados.

Figura 58

Encuesta MOS Calidad de Servicio



En la encuesta se plantean seis preguntas concretas que evalúan y validan la experiencia del usuario de la red ESPE_LTE implementada sobre tecnología SDR.

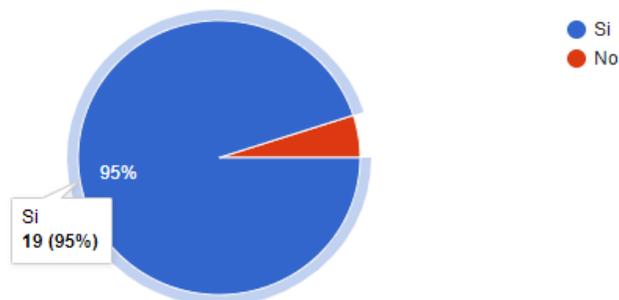
En la primera pregunta se plantea de forma directa el funcionamiento de la red en los celulares de los usuarios teniendo el 95% que representa 21 usuarios que muestran que si les funciona la red y solo el 4.5% que representa a un usuario que indica que no le funciona la red. Como se observa en la Figura 59.

Figura 59

Resultados obtenidos a primera pregunta de encuesta

Funciona la red ESPE_LTE en su celular?

20 respuestas



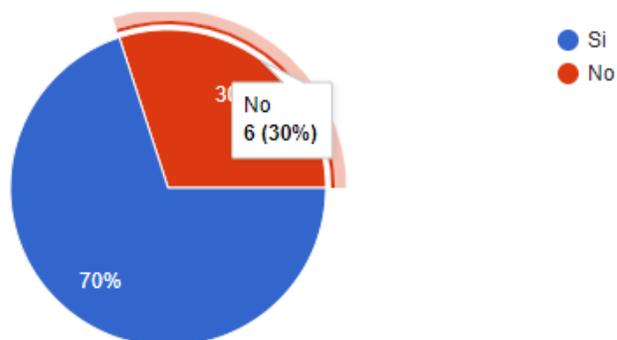
La segunda pregunta, evalúa el acceso a internet en los teléfonos móviles de los usuarios, teniendo el 70% que representa a 14 usuarios que indican que si tienen acceso a internet y 6 usuarios indican que no tienen acceso a internet, tal como se indica en la Figura 60.

Figura 60

Resultados obtenidos a segunda pregunta de encuesta

Tiene acceso a Internet?

20 respuestas



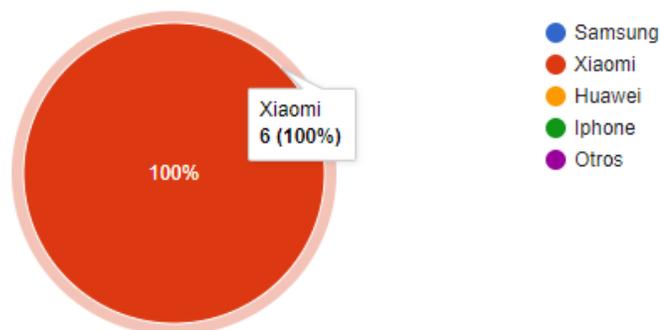
Al existir usuarios que no tienen acceso al internet, se plantea la tercera pregunta que es exclusiva para los usuarios con problema de acceso al internet. Se pregunta la marca del teléfono celular con la que están probando la red ESPE_LTE. Como se observa en la Figura 61, los 6 usuarios que no lograron acceder a internet poseen la marca de celular Xiaomi.

Figura 61

Resultados obtenidos a tercera pregunta de encuesta

Si su respuesta fue No en la anterior pregunta, especifique que marca de teléfono celular esta usando?

6 respuestas



La cuarta pregunta evalúa la experiencia que ha tenido el usuario al momento de usar la red ESPE_LTE en general, dando como resultado que el 55% que representa a 11 usuarios

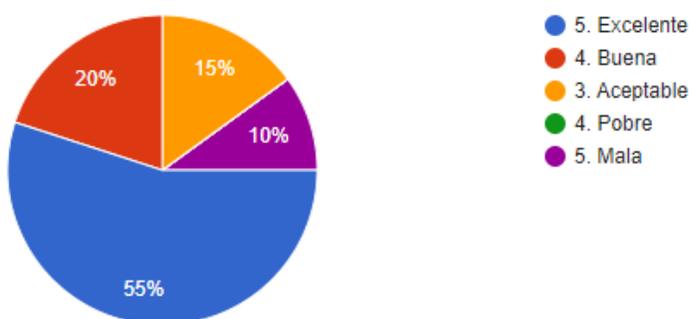
que indican una excelente experiencia, es decir nivel cinco dentro de la escala MOS. Además, 4 usuarios indican que el nivel es Buena, 3 usuarios que es Aceptable y 2 usuarios indica que es Mala, como se muestra en la Figura 62.

Figura 62

Resultados obtenidos a cuarta pregunta de encuesta

En General, que le pareció la experiencia de usar la red ESPE_LTE?

20 respuestas



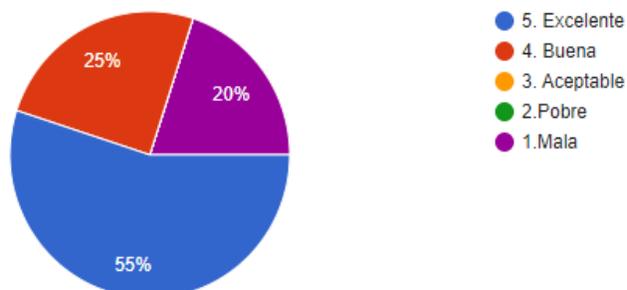
La pregunta cinco evalúa la calidad de video al momento de su reproducción, dando como resultados que el 55% de los usuarios tuvieron una excelente experiencia con la calidad de video, es decir no tuvieron cortes y el video se reprodujo de forma ininterrumpida. Además, 6 usuarios que representa el 20% tuvieron una mala experiencia con el video, tal como se muestra en la Figura 63. Cabe mencionar que el nivel Malo está representado con los 6 usuarios que indicaron en la pregunta dos que no tuvieron acceso a internet.

Figura 63

Resultados obtenidos a quinta pregunta de encuesta

La calidad de video que se reproduce es?

20 respuestas



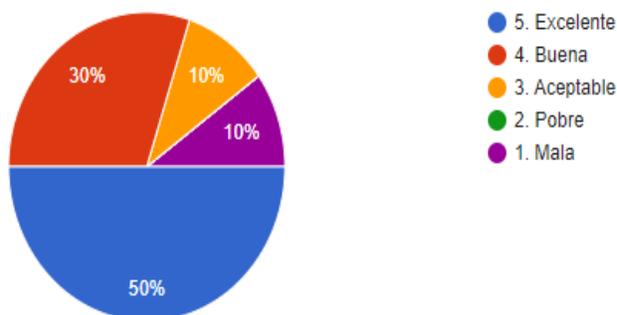
Finalmente, la pregunta seis está relacionada con el área de cobertura de la red. Donde el 50% que son 10 usuarios indican una Excelente área de Cobertura, esto quiere decir que los 300m que abarca el área de cobertura de la red ESPE_LTE es un área muy buena para el funcionamiento de la red. Además, 3 usuarios que representa el 30% indica con un nivel de satisfacción 4 que representa a Buena, el 10% que son 3 usuarios indican una Aceptable área de cobertura y solo 1 persona que es el 10% del total indica que es Mala el área de cobertura, tal como es muestra en la Figura 64.

Figura 64

Resultados obtenidos a sexta pregunta de encuesta

Que le pareció el área de cobertura de la red ESPE_LTE ?

20 respuestas



Mapas de Cobertura

Las operadoras móviles comerciales proporcionan en sus páginas web mapas de cobertura que permiten a los usuarios identificar la calidad de la señal 4G.

Estos mapas cobertura se basan en simulaciones generadas a través de modelos de propagación comúnmente utilizados en la industria de servicios de telecomunicaciones móviles comerciales y como base para el mapeo digital. La simulación se basa en el tipo de terreno, obstáculos naturales o artificiales refiriéndose a edificios, volumen de tráfico, sensibilidad del dispositivo terminal que presta el servicio, condiciones climáticas, características de la vegetación del sector y en general el estado de la estación radio base más cercana, etc.

En la Tabla 13 se muestran valores de potencia RSRP de las operadoras comerciales.

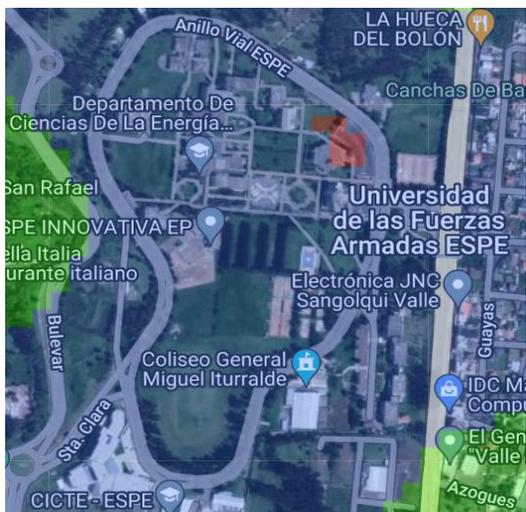
Tabla 13

Niveles de Potencia RSRP de redes 4G en Ecuador

Niveles de Potencia RSRP de redes 4G en Ecuador	
Cobertura con niveles ≥ -100 dBm	 Niveles de señal para uso en interiores y exteriores donde se permiten un óptimo servicio de datos o internet.
-120 dBm \leq Cobertura con niveles < -100 dBm	 Los niveles de señal apropiados para uso externo permiten servicios de datos.
Cobertura con niveles < -120 dBm	 No se puede garantizar la disponibilidad de los servicios de datos.

CLARO**Figura 65**

Mapa de cobertura Operadora Claro



Nota: Tomado de Mapa de cobertura CLARO, CLARO, 2023,

(<https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura/>).

MOVISTAR**Figura 66**

Mapa de cobertura Operadora Movistar



Nota: Tomado de Mapa de cobertura MOVISTAR, MOVISTAR, 2023,

(<https://www.movistar.com.ec/mapa-de-coberturas>)

CNT**Figura 67***Mapa de cobertura Operadora CNT*

Nota: Tomado de *Mapa de cobertura CNT*, CNT, 2023,
(<https://gis.cnt.gob.ec/appgeoportal/?u=-79.16996,-1.81029,7>)

En la Figura 65, 66 y 67 se muestran los mapas de cobertura de las operadoras Claro, Movistar y CNT respectivamente, donde se puede apreciar que no existen suficientes datos dentro del campus universitario que permitan conocer el estado de la red 4G. Únicamente CNT ha cubierto el área total de la Universidad.

A continuación, se muestra resultados de las mediciones realizadas mediante el software mapa de cobertura móvil desarrollado por *Molda Labs*, esta aplicación permite como usuarios capturar información de potencia en intervalos de tiempo de 20 segundos de la red 4G a la que estamos conectados y representa gráficamente estos los datos recopilados según indica la Tabla 14.

Tabla 14

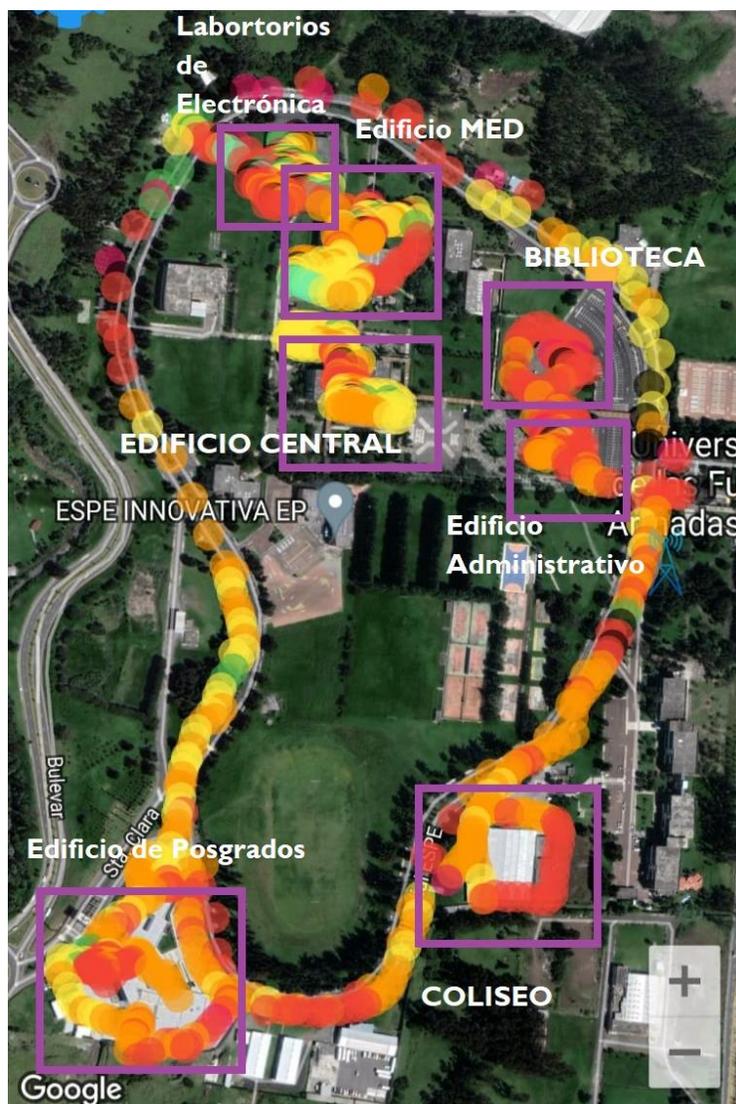
Escala de rendimiento por color mediante la aplicación mapa de cobertura móvil

Indicadores de rendimiento	
Excelente	
Bien	
Moderado	
Malo	
Muy Malo	
Sin señal	

Los datos de potencia recopilados de la señal de la operadora Claro se muestran en la Figura 68, donde el sitio con mejor servicio 4G para esta red es en el edificio MED, mientras que los sitios con menor potencia son los laboratorios de electrónica por su condición geográfica al contar con varios edificios y vegetación que obstruyen la propagación de la señal, biblioteca y edificio administrativo debido al volumen de tráfico. El nuevo edificio de posgrados cuenta con un servicio moderado y malo, mientras más nos acercamos al auditorio la potencia es más deficiente.

Figura 68

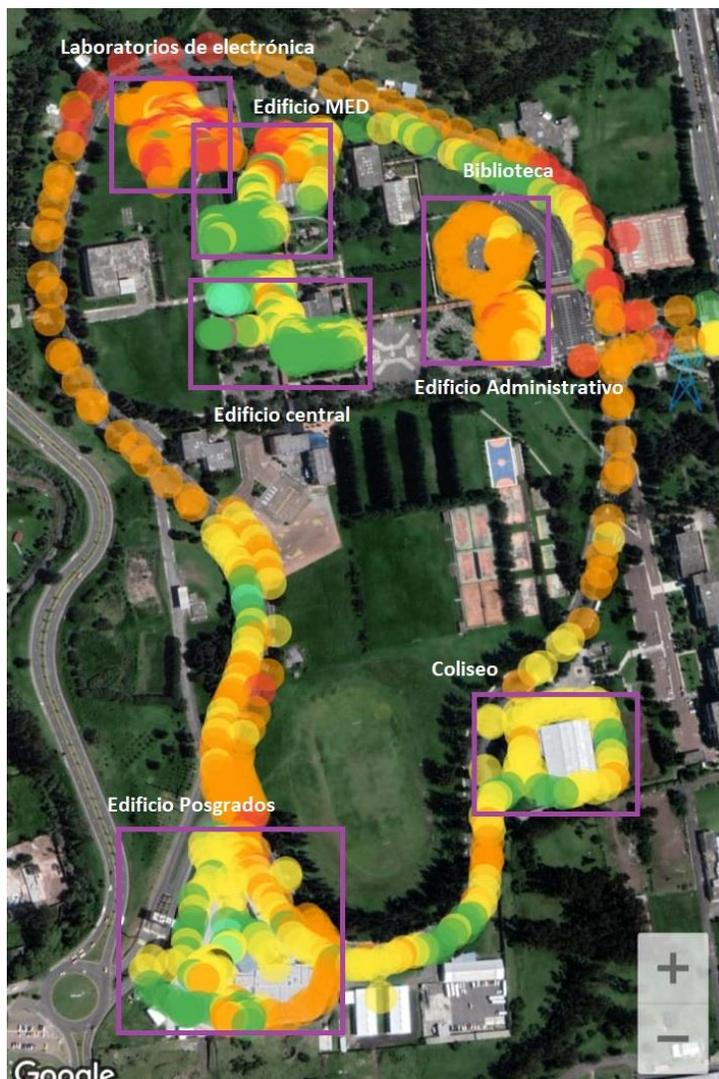
Mapa de Cobertura Operadora Claro en interiores de la Universidad



Los datos de potencia recopilados de la señal de la operadora Movistar se muestran en la Figura 69, los sitios con mejor servicio 4G para esta red son en el edificio central, MED y edificio de posgrados mientras que el sitio con menor potencia son los laboratorios de electrónica por su condición geográfica al contar con varios edificios y vegetación que obstruyen la propagación de la señal.

Figura 69

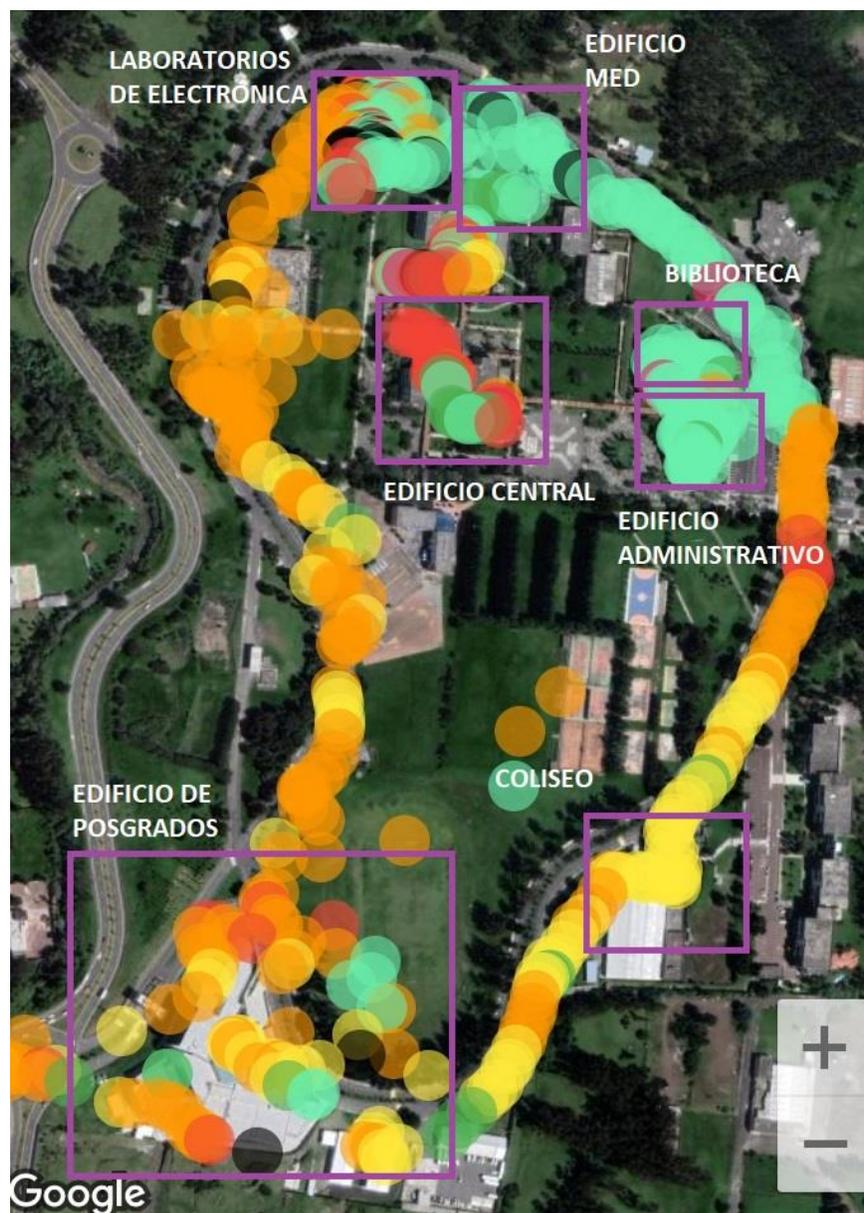
Mapa de Cobertura Operadora Movistar en interiores de la Universidad



En la Figura 70 se muestra el mapa de cobertura correspondiente a la operadora CNT, se puede notar que es la operadora que cuenta con mejor servicio en los exteriores e interiores del campus y la única que tiene señal 4G muy buena dentro de los laboratorios de electrónica.

Figura 70

Mapa de Cobertura Operadora CNT en interiores de la Universidad



Conclusiones

Se ha implementado una red 4G LTE utilizando radio definido por software (SDR) y software de código abierto dentro del espacio geográfico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, donde se han realizado distintas pruebas para verificar su desempeño y funcionamiento. Para los escenarios de prueba planteados, los resultados fueron exitosos y determinaron los niveles de radiofrecuencia dentro de un radio admisible de hasta 300 m con respecto a la radio base.

Durante las pruebas de funcionamiento se pudo observar que la red era muy estable, pero tenía varios factores que se podrían mejorar entre los cuales están aumentar su cobertura con la adquisición de amplificadores y conectándose directamente a una red de internet que posea gran ancho de banda.

Con respecto a la norma SMA-QoS-9 de la Arcotel, con los resultados obtenidos se verifica que los indicadores de rendimiento de la red 4G ESPE_LTE se encuentran dentro del nivel mínimo de señal en el área de cobertura para su funcionamiento cuyo valor de RSRP es mayor o igual a -85 dBm.

Los mapas de cobertura proporcionados por las operadoras móviles en su página web son simulaciones que toman factores geográficos, del entorno y volumen de tráfico en el sitio, pero no son reales debido a que actualmente no cubren el área completa de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por esa razón se usaron herramientas externas como la aplicación “Mapa de cobertura móvil” que permiten recopilar información de RSRP y lo gráfica en tiempo real permitiendo como usuarios conocer los sectores que tienen mejor recepción de la red 4G.

La operadora móvil comercial que mejor servicio brinda dentro del campus universitario es CNT, ya que su señal es estable dentro de los interiores de las principales edificaciones brindando una buena cobertura 4G.

Se aplicó una encuesta MOS a 20 usuarios para evidenciar que más del 60% tuvieron una experiencia de funcionamiento excelente usando la red ESPE_LTE con buena cobertura y calidad de servicio. Dentro de esta encuesta se puede evidenciar que 6 usuarios no pudieron tener acceso a internet y lo más relevante fue que todos ellos usaron la misma marca de teléfono móvil Xiaomi. Se realizó una investigación para determinar las causas que producen los fallos de datos móviles en estos equipos concluyendo que desde la versión MUI 11 se han visto afectados por un fallo de configuración del Proxy, se espera que en las próximas actualizaciones se reconfigure el APN para corregir este problema.

Si se quiere realizar una comparación justa entre las operadoras comerciales y la operadora implementada dentro de una arquitectura SDR existen dos métricas esenciales que nos permiten conocer el estado de la red que son RSRP y RSRQ. Mientras más cerca se encuentre el UE a la antena de la radio base mejor potencia va a recibir y por lo tanto mejor calidad de servicio y cobertura va a experimentar el usuario.

Dentro de este documento se plantearon dos laboratorios educativos (Apéndice A y B) que permita la enseñanza/aprendizaje de los estudiantes donde podrán verificar y experimentar el funcionamiento de la red ESPE_LTE levantando el servicio LTE hasta realizar pruebas de rendimiento de la red 4G. Además, se elaboró un plan de mejora (Apéndice C) con tres posibles soluciones que permitan mejorar la cobertura y calidad de servicio de las operadoras móviles comerciales que operan dentro del campus para el bienestar de la comunidad universitaria.

Recomendaciones

Para una mejor cobertura de la operadora ESPE_LTE implementada sobre tecnología SDR se debe colocar la antena en un lugar alto que permita tener una línea de vista directa entre el UE y la antena transmisora.

Para una mejor experiencia se recomienda utilizar teléfonos móviles con sistema operativo IOS ya que son más autónomos y no necesitan configuración del APN para el acceso a la red.

Se recomienda seguir las guías de laboratorio planteadas para evitar fallas en la configuración del servicio.

Trabajos Futuros

Desplegar una red 5G sobre la misma arquitectura SDR X310, ya que, este equipo es escalable para otras aplicaciones donde se implemente sistemas de comunicaciones.

Implementar el servicio VoLTE para realizar llamadas de voz mediante la red 4G.

Realizar un estudio de redes comunitarias y despliegue de redes privadas para brindar servicio de datos a la sociedad.

Virtualizar la red ESPE-LTE usando plataformas virtuales como Google Cloud, Amazon Web Services (AWS) y Azure de Microsoft, que permitan adquirir recursos físicos dentro de la nube y posteriormente implementar el sistema operativo con la información de la red en distintas zonas geográficas.

Bibliografía

- Alvarez, Á. (2018). *Diseño de un sistema Sdr (Radio Definida por Software) Mediante Fpga para recepción de dispositivos Rfid*. Universidad de Valladolid:
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/50027/TFG-G5208.pdf;jsessionid=2C943C8F1F0ADFE5724D2F7E0B3DAF4B?sequence=1>
- Anaya, N. (2020). *QoS-Calidad de Servicio para VoIP*. <https://elastixtech.com/qos-calidad-de-servicio-para-voip/>
- Apolo, F. (2012). *Realización de una herramienta para obtener los niveles de campo eléctrico radiado por las estaciones de radiodifusión FM en la ciudad de Quito*. Escuela Politecnica Nacional, Quito. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11490&shelfbrowse_itemnumber=44741
- Arcotel. (2018). *Parámetros de calidad para servicio móvil avanzado*. Quito: Agencia de regulación y control de las telecomunicaciones.
- Arcotel. (2022). Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones:
<https://www.arcotel.gob.ec/1-preguntas-generales/>
- ARCOTEL. (2022). *Competencias*. <https://www.arcotel.gob.ec/competencias/>
- Arcotel. (2022). *Espectro Radioeléctrico*. <https://www.arcotel.gob.ec/espectro-radioelectrico-2/>
- Cabrera, O. (2019). *Diseño de una radio definida por software*. Universidad Nacional de Río Negro: <http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3688>
- Campo, W., Bermúdez, H., Atehortua, J., & Castañeda, L. (2018). Red de comunicaciones móviles mediante radio definida por software y Usrp. *Espacios*, 39(26), 24.
<https://doi.org/https://www.revistaespacios.com/a18v39n26/a18v39n26p24.pdf>
- Castilla, A. (2020). *Despliegue y evaluación de una red celular Lte mediante soluciones Sdr*. Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/19014/425930.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Chimbo, M. (2012). Análisis de le propuesta de evolución de redes 3G y su convergencia a la tecnología 4G para redes de telefonía móvil. Cuenca, Azuay, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2072>
- Claro. (2023). *Mapas de cobertura*. <https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura/>
- CNT. (2023). *Visor Geográfico de servicios*. Mapa CNT:
<https://gis.cnt.gob.ec/appgeoportal/?u=-78.43816,-0.32238,14>
- Codón, M. (19 de 12 de 2019). *Implementación de red LTE con Software-Defined Radio* .
Universidad Nacional de San Martín:
<https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/1128/1/TING%20ESCYT%202019%20CMN.pdf>
- Farhana, A., Ramprasad, S., Roshanak, H., Kumbesan, S., & Solaiman, A. (2015). Sinr, Rsrp, Rssi and Rsrq Measurements in Long Term Evolution Networks. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 7(4), 113-123. <https://doi.org/10.5121/ijwmn.2015.7409>
- Fraga, D., y Cesar, G. (2023). *Implementación de red LTE basado en Radio Definido por Software* .
- García, D., & Margarita, P. (2017). Conectividad a Internet en zonas rurales mediante tecnologías de TDT (DVB-RCT2), o telefonía móvil (4G-LTE). *Dyna*, 85(204), 319.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.62690>
- GSMA. (2022). *4G/5G Network Experience Evaluation Guideline*. Londres: GSM Association.
<https://www.gsma.com/futurenetworks/resources/4g-5g-network-experience-evaluation-guideline/>
- Gsma. (2022). *Sobre nosotros*. <https://www.gsma.com/aboutus/>
- Isco. (2022). *Que es Sinr*. <https://iscointl.com/sinr-optimization/>
- Itu. (29 de Noviembre de 2001). *G.1000 : Calidad de servicio de las comunicaciones: Marco y definiciones*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1000-200111-l/es>

- Kreher, R., & Gaenger, K. (2016). *LTE Signaling*. Wiley.
- Lara, F., Altamirano, C., Arellano, J., y Castillo, M. (2022). *Throughput and Latency Evaluation of a 4G LTE Network Driven by SDR and Open-Source LTE Software*.
https://www.researchgate.net/publication/358322517_Throughput_and_Latency_Evaluation_of_a_4G_LTE_Network_Driven_by_SDR_and_Open-Source_LTE_Software
- LLanos, A. (2013). *Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador*. Corporación Editora Nacional. <https://doi.org/https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/3833/1/SM138-Llanos-Gestion.pdf>
- Maltez, E., y Valle, N. (Mayo de 2019). *Diseño y simulación de una red LTE-A para la Zona Urbana de la Ciudad de Granada*. <http://ribuni.uni.edu.ni/2824/1/93248.pdf>
- Martinez, D. (Julio de 2019). *Escuela técnica superior de ingeniería en sistemas de telecomunicaciones*. Despliegue de un prototipo de red 4G-LTE:
https://oa.upm.es/53088/1/TFG_DAVID_MARTINEZ_GARCIA.pdf
- Martinez, J. (2018). *Calidad de servicio (QoS)*.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/5207/208062.pdf;jsessionid=71ADB00F61B00D692DD49396BC08603B.jvm1?sequence=1>
- Mintel. (Mayo de 2021). *Agenda Digital Ecuador 2021-2022*.
<https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/Agenda-Digital-del-Ecuador-2021-2022-222-comprimido.pdf>
- Movistar. (2023). Telefónica: <https://www.movistar.com.ec/mapa-de-coberturas>
- Reinoso, J. (2017). *Análisis y evolución de desempeño de una red celular de cuarta generación LTE (Long Term Evolution) para la aplicación y prestación de nuevos servicios*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12850/1/T-ESPE-053731.pdf>
- Rueda, D., y Vargas, M. (2019). *Calidad de Servicio en Redes LTE-Advanced (Long Term Evolution-Advanced)*. Cintel, Bogota, Colombia.

https://www.researchgate.net/publication/268447670_Calidad_del_Servicio_en_Redess_LTE_Advanced_Long_Term_Evolution-Advanced

Sánchez, S. (2020, Junio 23). *4GLTE en Ecuador: Bandas, Velocidad, Compatibilidad*.

<https://www.androidjefe.com/4g-lte-ecuador/>

Simpson, O., y Sun, Y. (2018). Lte, Rsrp, Rsrq, Rssnr and local topography profile data for RF propagation planning and network optimization in an urban propagation environment.

Elsevier, 21(4), 1724-1737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.137>

Software Radio Systems. (2022). *Cots UE. Cots UE Aplicación*.

Sutel. (Julio de 2017). *Metodología de medición aplicable a los servicios de telefonía móvil del reglamento de prestación y calidad de servicios*.

https://www.sutel.go.cr/sites/default/files/audiencias/metodologia_sutel_-_servicios_de_telefonia_movil.pdf

Tisalema, S. (2019). Análisis de la calidad del servicio de las operadoras de telefonía móvil en la ciudad de Ambato. *Ciencia Digital*, 59-76.

<https://doi.org/https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.3.770>

Vesga, J., & Granados, G. (2012). Statistical Model on Throughput Behavior of LAN Networks over Power Line Communications Technology. *Ingeniería y Universidad*, 2(16), 433-447.

<https://doi.org/http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v16n2/v16n2a08.pdf>

Apéndices