



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica
Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones

**Optimización de la calidad de la red móvil 4G/LTE de
un operador móvil mediante la migración de
transmisión por microondas a fibra óptica en el distrito
de Yauri, Cusco**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de
Telecomunicaciones

AUTOR

Gerson UGARTE ZUÑIGA

ASESOR

Mg. Wilfredo Baro FANOLA MERINO

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ugarte, G. (2026). *Optimización de la calidad de la red móvil 4G/LTE de un operador móvil mediante la migración de transmisión por microondas a fibra óptica en el distrito de Yauri, Cusco*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Gerson Ugarte Zuñiga
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72794456
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Wilfredo Baro Fanola Merino
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06030740
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9041-3663
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Elías Moscoso Sánchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07206008
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Arlich Joel Portillo Allende
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10125495
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Roberto Florentino Unsihuay Tovar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	19944586
Datos de investigación	
Línea de investigación	ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA: Redes y servicios de fibra óptica
Grupo de investigación	No Aplica

Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cusco Provincia: Espinar Distrito: Yauri
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2023 – Marzo 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería de sistemas y comunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04 Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



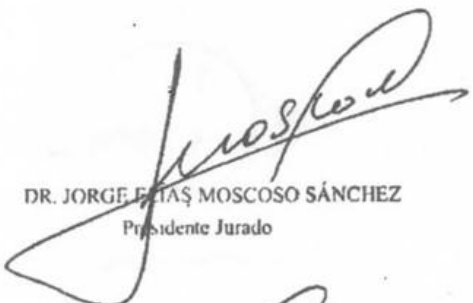
**ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE
SUFICIENCIA PROFESIONAL
ACTA N°59/FIEE-PPP/2026**

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 28 de Agosto del 2026, como Presidente de Jurado el **DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE**, el Miembro de Jurado el **MG. ROBERTO FLORENTINO UNSIHUAY TOVAR** y Miembro Asesor el **MG. WILFREDO BARO FANOLA MERINO**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **GERSON UGARTE ZUÑIGA** con código 14190251 que para optar el Título Profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA RED MÓVIL 4G/LTE DE UN OPERADOR MÓVIL MEDIANTE LA MIGRACIÓN DE TRANSMISIÓN POR MICROONDAS A FIBRA ÓPTICA EN EL DISTRITO DE YAURI, CUSCO**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 16 (DIESEISES).

Ciudad Universitaria, 28 de Agosto del 2026


DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ
Presidente Jurado


MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE
Miembro Jurado


MG. ROBERTO FLORENTINO UNSIHUAY TOVAR
Miembro Jurado


MG. WILFREDO BARO FANOLA MERINO
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **WILFREDO BARO FANOLA MERINO** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°61/FIEE-PPP/2026 del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA RED MÓVIL 4G/LTE DE UN OPERADOR MÓVIL MEDIANTE LA MIGRACIÓN DE TRANSMISIÓN POR MICROONDAS A FIBRA ÓPTICA EN EL DISTRITO DE YAURI, CUSCO**, presentado por el bachiller **GERSON UGARTE ZUÑIGA**, para optar el título profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 17% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones.

Lima, 28 de Agosto del 2026

Firma del Asesor

DNI: 06030740

Nombres y apellidos del asesor:

WILFREDO BARO FANOLA MERINO

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi familia que siempre me apoyaron y estuvieron para ser mi motivación de trabajar por mis sueños. A mis colegas y amigos que me empujaron a esforzarme por perseguir lo que me apasiona. A mi esposa Raquel que me brinda y brindó su apoyo como persistencia para lograr este resultado como fin de mi etapa universitaria.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos que me permitió aprender y desarrollarme como persona en una de las etapas más importantes de mi vida. A la empresa Claro Perú por ofrecerme la ventana de ser parte de ella y facultarme como profesional, a mis líderes y colegas de trabajo que son excelentes personas y profesionales. A mi asesor por su orientación y dedicación para culminar con el presente trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo exponer el diseño e implementación del proyecto de red orientado a mejorar la calidad del servicio móvil de un operador mediante la migración de enlaces de transmisión basados en microondas hacia una infraestructura de fibra óptica en el distrito de Yauri, provincia Espinar, ubicada en el departamento de Cusco.

La investigación se enfoca en el monitoreo y análisis de 2 indicadores clave de rendimiento (KPI, Key Performance Indicators por sus siglas en inglés) como pérdida de paquetes (Packet Loss por sus siglas en inglés) y el retardo de paquetes (Packet Delay por sus siglas en inglés).

Estos parámetros fueron evaluados antes y después de la migración de la transmisión, con el propósito de evaluar el impacto técnico del proyecto y determinar las mejoras obtenidas en el desempeño de la red móvil en la zona de estudio.

Los resultados obtenidos muestran una optimización significativa en la calidad del servicio y garantía de la rentabilidad del proyecto del operador a mediano plazo.

En conclusión, el proyecto se ejecutó de manera exitosa, fortaleciendo la infraestructura de transmisión y generando una experiencia de usuario más eficiente y confiable.

Palabras clave: KPI, calidad del servicio, red móvil, fibra óptica, microondas.

ABSTRACT

The present work aims to present the design and implementation of a network project focused on improving the quality of a mobile operator's service through the migration of microwave-based transmission links to a fiber optic infrastructure in the district of Yauri, Espinar province, located in the department of Cusco.

The research focuses on the monitoring and analysis of two key performance indicators (KPIs): Packet Loss and Packet Delay.

These parameters were evaluated before and after the transmission migration to assess the technical impact of the project and determine the improvements achieved in the mobile network performance within the study area.

The results obtained demonstrate a significant optimization in service quality, as well as the assurance of the operator's project profitability in the medium term.

In conclusion, the project was successfully executed, strengthening the transmission infrastructure and delivering more efficient and reliable user experience.

Keywords: KPI, service quality, mobile network, fiber optics, microwave

INDICE GENERAL

CARATULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	3
2.1 Institución - Actividad que desarrolla	3
2.2 Periodo de duración de la actividad.	3
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad	3
2.4 Razón social	4
2.5 Dirección postal	4
2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo	4
CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	5
3.1 Organización de la actividad	5
3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	6
3.2.1 Finalidad	6
3.2.2 Objetivos	6
3.2.2.1 Objetivo general	6
3.2.2.1 Objetivos específicos	6
3.3 Problemática	6

3.3.1	Problema General	7
3.3.2	Problemas Específicos	7
3.3.3	Justificación e importancia de la investigación	7
3.4	Metodología	9
3.4.1	Bases teóricas	9
3.4.2	Marco conceptual	14
3.5	Procedimiento	27
3.5.1	Definición del alcance y diseño del proyecto	27
3.5.2	Planificación del proyecto	29
3.5.3	Implementación y puesta en servicio del proyecto	30
3.6	Resultado de la actividad	35
CAPITULO IV: DISCUSION DE RESULTADOS		40
4.1	Descripción de la implementación	40
4.2	Evaluación Económica	42
CAPITULO V: CONCLUSIONES		49
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES		50
CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		51
CAPITULO VIII: APÉNDICE		53
Apéndice A Datasheet ATN910C-B		53
Apéndice B Datasheet NetEnginne 8000 M14		54
Apéndice C Datasheet de equipos físicos del Gestor NCE		55

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Ubicación geográfica del distrito de Yauri, Espinar, Cusco	2
<i>Figura 2</i> Organigrama de la empresa	5
<i>Figura 3</i> Población atendida por cada antena 4G en el año 2020	10
<i>Figura 4</i> Metodología por conformado de tráfico	11
<i>Figura 5</i> Esquema de FDD frente TDD en LTE	12
<i>Figura 6</i> Diagrama del Espectro electromagnético	15
<i>Figura 7</i> Esquema básico de un radio enlace por microondas	16
<i>Figura 8</i> Estructura básica de una fibra óptica	17
<i>Figura 9</i> Red BackHaul en telecomunicaciones	21
<i>Figura 10</i> Retardo de paquetes	22
<i>Figura 11</i> Prueba de ping para verificación de pérdidas de paquetes	23
<i>Figura 12</i> Arquitectura de una red LTE	24
<i>Figura 13</i> Diagrama de prueba TWAMP	25
<i>Figura 14</i> Prueba de parámetros de calidad de servicio con TWAMP	26
<i>Figura 15</i> Pruebas de rendimiento IP de una red	27
<i>Figura 16</i> Sesión TWAMP	28
<i>Figura 17</i> Topología de red inicial de las 4 estaciones base celular	29
<i>Figura 18</i> Ruta de fibra óptica desde Kunturkanqui hacia Terminal Yauri.	32
<i>Figura 19</i> Topología de red final de las 4 estaciones base celular	34
<i>Figura 20</i> Medición de pérdida de paquetes de Colon	35
<i>Figura 21</i> Medición de retardo de paquetes de Colon	36
<i>Figura 22</i> Medición de pérdida de paquetes de Circunvalación Yauri	36
<i>Figura 23</i> Medición de retardo de paquetes de Circunvalación Yauri	37
<i>Figura 24</i> Medición de pérdida de paquetes de Terminal Yauri	37
<i>Figura 25</i> Medición de retardo de paquetes de Terminal Yauri	38
<i>Figura 26</i> Medición de pérdida de paquetes de Estadio Espinar.	38

<i>Figura 27</i> Medición de retardo de paquetes de Estadio Espinar.	39
<i>Figura 28</i> Comparativo de inversión del proyecto Terminal Yauri.	48

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Ventajas y desventajas de desplegar fibra óptica	18
<i>Tabla 2</i> Características de los tipos de estaciones base celular	20
<i>Tabla 3</i> Ubicación de las estaciones del distrito de Yauri, Cusco	30
<i>Tabla 4</i> Distancia de planta externa por estación base celular	33
<i>Tabla 5</i> Equipamiento utilizado en las estaciones del distrito de Yauri, Cusco	34
<i>Tabla 6</i> Cronograma de actividades del proyecto	41
<i>Tabla 7</i> Presupuesto del gasto en capital por compra de equipos	42
<i>Tabla 8</i> Presupuesto anual de gastos operativos ante el MTC	43
<i>Tabla 9</i> Presupuesto anual de gastos operativos ante la torrera	43
<i>Tabla 10</i> Presupuesto de gasto de capital de contratista	44
<i>Tabla 11</i> Presupuesto de gasto capital del proyecto de modernización de radioenlaces microondas Yauri - Tintaya	44
<i>Tabla 12</i> Presupuesto de gasto operativo anual del proyecto de modernización de radioenlaces microondas Yauri - Tintaya	44
<i>Tabla 13</i> Presupuesto de gasto de capital por compra de equipos	45
<i>Tabla 14</i> Presupuesto de gasto de capital de contratista	46
<i>Tabla 15</i> Presupuesto del gasto de capital del proyecto de fibra óptica Yauri - Kunturkanqui	47

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de tráfico del servicio móvil constituye una constante preocupación para los proveedores de servicios de Internet (ISP, Internet Service Provider), debido al incremento sostenido en el consumo de servicios y contenidos digitales por parte de los usuarios finales. Este aumento en la demanda de capacidad dentro de las redes móviles 4G/LTE impactan directamente en la transmisión de las estaciones base de acceso de las compañías proveedoras de Internet.

Una red de un ISP que no se encuentre preparada para afrontar este crecimiento del tráfico móvil pueden presentar principalmente dos problemas en su red de acceso: pérdida de paquetes y retardo en la entrega de estos.

La red de acceso se define como aquella parte de la infraestructura del proveedor de Internet que conecta directamente con los usuarios finales; por ello, resulta fundamental garantizar una transmisión adecuada que permita soportar el incremento constante del tráfico móvil año tras año en el Perú.

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como alcance el diseño e implementación de un proyecto de migración a una red de fibra óptica en cuatro sitios del distrito de Yauri.

Esta iniciativa permitirá optimizar la calidad del servicio brindado a los usuarios finales y, a su vez, asegurar la rentabilidad de la compañía a mediano plazo.

El área de estudio se encuentra ubicada en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, departamento del Cusco. A continuación, se presenta la ubicación geográfica del área de intervención.

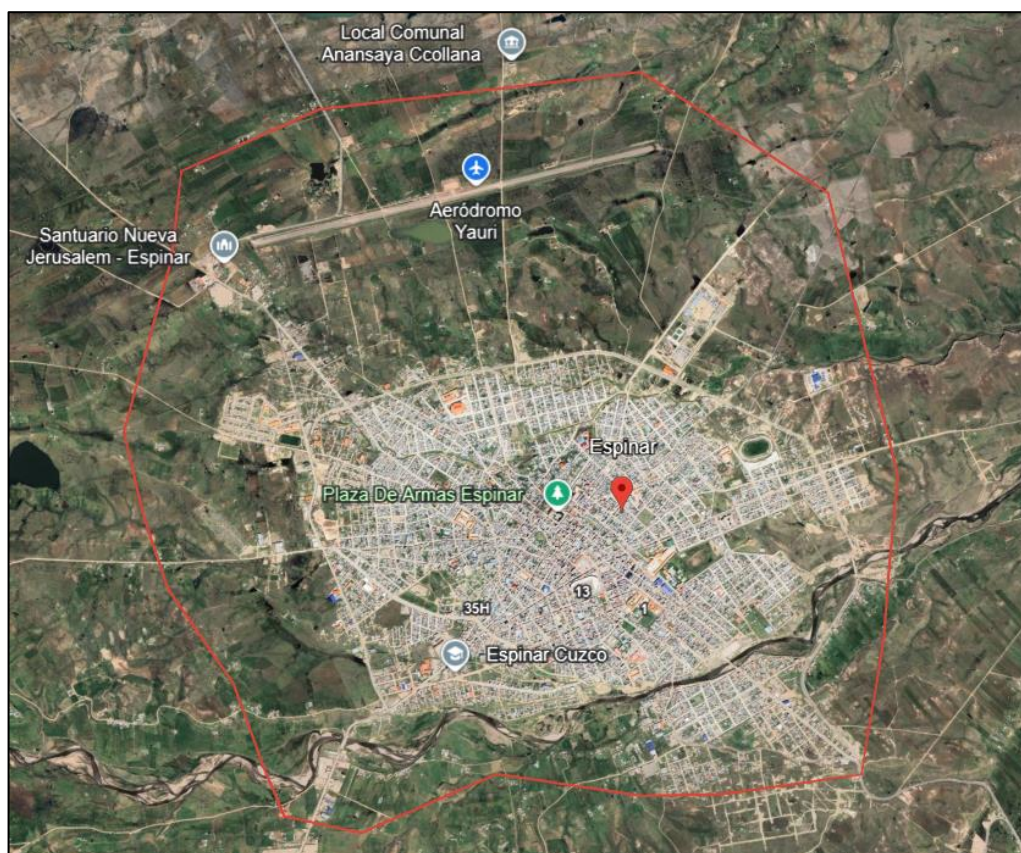


Figura 1 Ubicación geográfica del distrito de Yauri, Espinar, Cusco.

Fuente. Datos tomados de Google Earth

CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución - Actividad que desarrolla

Claro Perú es subsidiaria de América Móvil la cual opera en el Perú desde el 10 de agosto de 2005.

América Móvil es la empresa líder en servicios integrados de telecomunicaciones en Latinoamérica.

Opera bajo la marca Claro en 16 países del continente: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Puerto Rico, República Dominicana y Uruguay.

2.2 Periodo de duración de la actividad.

La actividad empezó con la factibilidad técnica y económica del proyecto del 1 de marzo del 2023 y culminó con la validación exitosa de los servicios móviles a fines de 31 de marzo de 2024.

2.3 Finalidad y objetivos de la entidad

América Móvil Perú S.A.C es un proveedor de servicios de telecomunicaciones de la más alta calidad, más amplia cobertura y en

constante innovación para anticiparnos a las necesidades de comunicación de nuestros clientes.

Generar el mayor bienestar y desarrollo personal, así como profesional de nuestros trabajadores, proporcionar bienestar y desarrollo a la comunidad y exceder los objetivos financieros y de crecimiento de nuestros accionistas.

Misión: Brindar la mejor experiencia de servicio a través de las más avanzadas soluciones de comunicación, tecnología de información y contenido digital para acelerar el desarrollo de los países donde operamos y promover la igualdad de oportunidades entre la gente

Visión: Consolidarse como la empresa líder en telecomunicaciones, actuando como agente de cambio al brindar conectividad integral con tecnología de punta.

2.4 Razón social

La empresa cuenta con la razón social América Móvil Perú S.A.C. y RUC 20467534026.

2.5 Dirección postal

La sede tecnológica de la empresa ubicada en la dirección Av. Nicolás Arriola 480 – La Victoria, Lima, Lima y el código postal es 15034.

2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo

Miguel Angel Neyra Herrera
Jefe de Redes de Transporte Urbano
mneyra@claro.com.pe

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la actividad

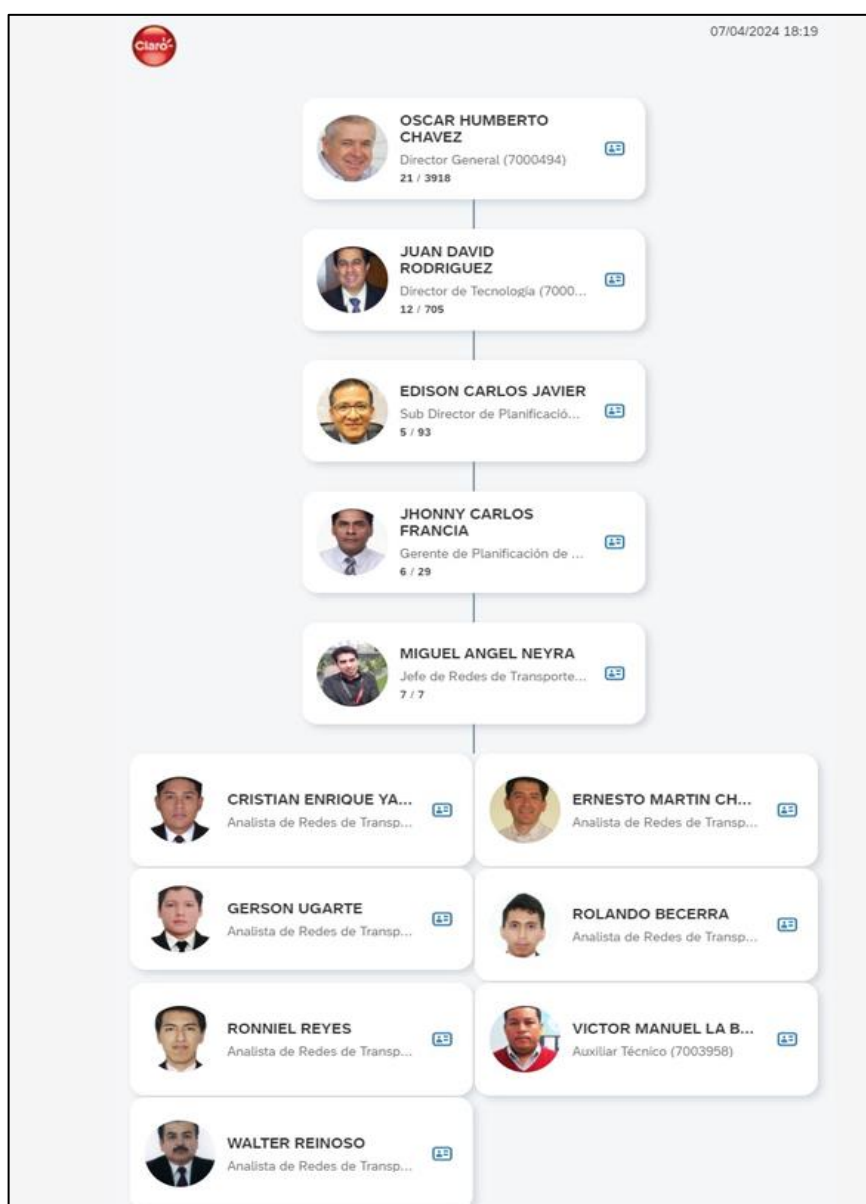


Figura 2 Organigrama de la empresa. Fuente. Datos tomados de Success Factor

3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

3.2.1 Finalidad

Diseñar y desarrollar un proyecto de red de migración de transmisión microondas a fibra óptica para optimizar la calidad de la red móvil 4G/LTE mediante la migración de 4 estaciones base celular de un operador móvil en el distrito de Yauri Cusco.

3.2.2 Objetivos

3.2.2.1 Objetivo general

Optimizar la calidad de la red móvil 4G/LTE de un operador móvil mediante la migración de transmisión a fibra óptica de 4 estaciones base en el distrito de Yauri, Cusco.

3.2.2.1 Objetivos específicos

- 1) Investigar y obtener información de la calidad del servicio móvil en 4 estaciones base celular del distrito de Yauri.
- 2) Sustentar el proyecto de red con el agregado de rentabilidad y optimización del servicio móvil 4G/LTE en el distrito Yauri.
- 3) Optimizar 2 indicadores de desempeño de la calidad del servicio móvil de las 4 estaciones para validar el éxito del proyecto.

3.3 Problemática

Los altos niveles de retardo de paquetes y pérdidas de paquetes en los servicios móviles de tecnología 4G/LTE del operador móvil en el distrito de Yauri, como consecuencia afectando la experiencia de los usuarios.

Los altos niveles de retardo de paquetes y pérdidas de paquetes en los servicios móviles de tecnología 4G/LTE del operador móvil en el distrito de Yauri, como consecuencia afectando la experiencia de los usuarios.

Estas deficiencias se manifestaron principalmente en servicios de voz sobre LTE (VoLTE), navegación y aplicaciones en tiempo real, generando interrupciones y retardos altamente perceptibles.

Las causas se asociaron a limitaciones en la capacidad de los enlaces de transmisión basados en microondas, así como a condiciones topográficas adversas y alta demanda de tráfico, factores que en conjunto deterioraron el desempeño de la red y dificultan el cumplimiento de los indicadores de calidad (KPI) establecidos por el operador móvil en Cusco.

3.3.1 Problema General

¿Cómo podemos optimizar la calidad del servicio móvil 4G/LTE de 4 estaciones base en el distrito de Yauri en Cusco de un operador móvil?

3.3.2 Problemas Específicos

Para entender el propósito del proyecto es necesario la formulación de las siguientes preguntas:

- a) ¿Cómo obtener la información de la calidad del servicio móvil de las 4 estaciones base celular previo y posterior al proyecto?
- b) ¿Cuál fue el sustento para la aprobación y generación del proyecto de red para la implementación de una red de transmisión por fibra óptica que soporte el creciente tráfico de datos móviles en las 4 estaciones base del distrito de Yauri?
- c) ¿Cómo impactó resolver la pérdida y el retardo de paquetes en la red de acceso bajo los 2 indicadores clave de desempeño (KPI) del servicio móvil 4G/LTE?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

El presente trabajo es justificado porque busca mejorar la calidad del servicio móvil 4G/LTE en el distrito de Yauri, reduciendo los niveles de latencia y pérdida de paquetes que afectan la experiencia de los usuarios y la continuidad de los servicios críticos en la zona de Cusco.

La optimización de la red permitirá incrementar la disponibilidad y eficiencia de los equipos de transmisión y acceso, beneficiando directamente al usuario de las empresas y la población local, al garantizar una mejor conectividad, cobertura y desempeño de las comunicaciones móviles.

Asimismo, esta investigación contribuye a actualizar el conocimiento sobre las tecnologías y estrategias de optimización de redes 4G utilizadas a nivel global, brindando información relevante que puede ser aplicada por los operadores que prestan servicio en regiones de condiciones geográficas y topográficas similares en el Perú.

Justificación social

El acceso al internet por la red móvil permite que las zonas urbanas y rurales logré un desarrollo económico y social de la población de Yauri. Este proyecto tiene la finalidad que mejore la calidad en rapidez y capacidad de la red móvil 4G/LTE para el consumo de datos por usuario final. Con ello el continuo desarrollo social y reducción de la brecha digital mediante un mayor uso de acceso a Internet parte de la población del distrito de Yauri.

Justificación económica

La inversión realizada en el proyecto fue evaluada técnica y económicamente, garantizando su viabilidad y rentabilidad a mediano plazo. La migración de la red de transmisión a fibra óptica permitirá ofrecer un servicio móvil de mayor calidad y capacidad, lo que incrementará el uso de datos por parte de los usuarios finales.

Este incremento en el consumo de servicios se traduce en mayores ingresos para el operador móvil, reflejando un retorno positivo de la inversión y una mejora en la eficiencia de la infraestructura de transporte del ISP.

Justificación tecnológica:

El presente trabajo radica en la necesidad de modernizar la infraestructura de transmisión del operador móvil, reemplazando los enlaces de microondas por enlaces de fibra óptica.

Esta migración permite incrementar la capacidad de transporte de datos, reducir la latencia y eliminar la pérdida de paquetes, factores que impactan directamente en la calidad del servicio móvil 4G/LTE del distrito de Yauri, provincia de Espinar, Cusco.

3.4 Metodología

3.4.1 Bases teóricas

OSIPTEL (2020) dentro de su documento de trabajo titulado “Estimación del número de estaciones base celular para atender la demanda de servicios móviles en el Perú al año 2025” realizó una comparación internacional con el fin de encontrar la posición de despliegues de antenas en el Perú frente al despliegue realizado en otros países.

Esta Información proporcionada por el portal “Open Cell ID”, el cual, mediante técnicas de crowdsourcing recoge los identificadores (Cell ID) de todas las antenas 4G instaladas en el mundo, por lo que la información corresponde a un proxy de la infraestructura de antenas desplegadas por cada país al año 2020. (OSIPTEL, 2020)

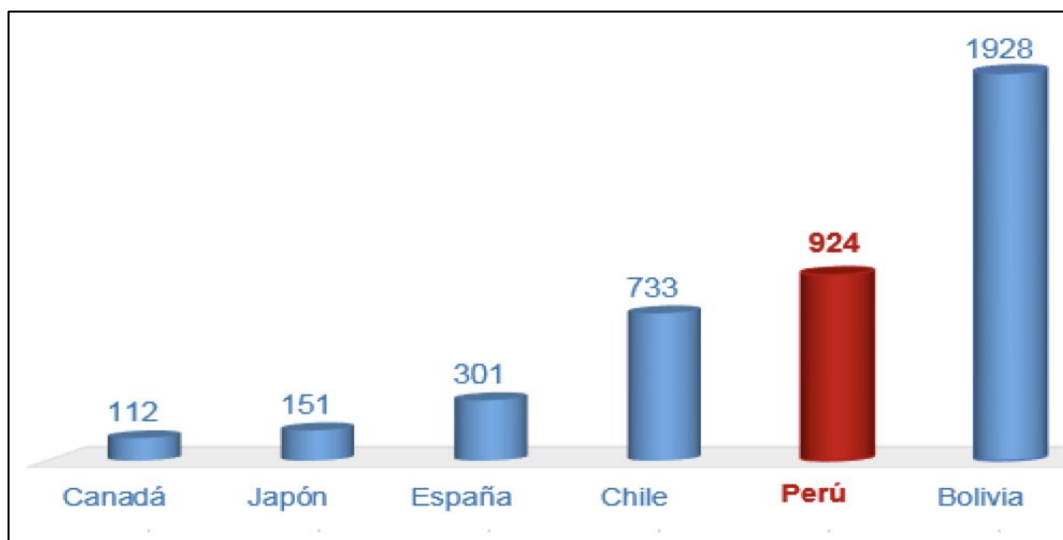


Figura 3 Población atendida por cada antenna 4G en el año 2020. Fuente. Datos tomados de OSIPTEL (2020).

La Figura 3 nos permite apreciar la siguiente información:

- En Canadá: Existe una antenna 4G que atiende a 112 personas.
- En Japón: Existe una antenna 4G que atiende a 151 personas.
- En Perú: Existe una antenna 4G que atiende a 924 personas.
- En Bolivia: Existe una antenna 4G que atiende a 1928 personas.

La capacidad que ofrece cada antenna incluyendo al equipamiento asociado es finita, por lo tanto, mientras menos personas se atiendan de una antenna, la experiencia de usuario será mejor.

Se evidencia que, en Perú, en comparación a otros países, hay una brecha de infraestructura por cubrir.

Quintana (2022) de su tesis “Técnicas de optimización de parámetros de red para la mejora de la calidad de servicio en Servicio IP” nos brinda la importancia de contar con un estudio previo del tráfico de paquetes que se genera a la red y como este influye e impacta en los dispositivos de la red de acceso.

El estudio considera lo siguiente:

- La metodología de optimización de tráfico que se aplique va a permitir minimizar la congestión de los buffers de los equipos de acceso. Por lo que propone la utilización de una técnica conformado de tráfico que previene que dichos equipos se conviertan en cuellos de botella, reduciéndose la pérdida de paquetes.
- De acuerdo con el trabajo de investigación propone que la metodología utilizada se divide en dos grandes bloques: “Análisis de tráfico” y “Conformado de tráfico”.

Según el trabajo previo, lo primero que se requiere es implementar un mecanismo de monitorización que permita capturar el tráfico de la aplicación. Luego realizar un análisis de los parámetros objetivos de calidad de servicio (QoS) como tiempo entre paquetes y tamaño de los paquetes.

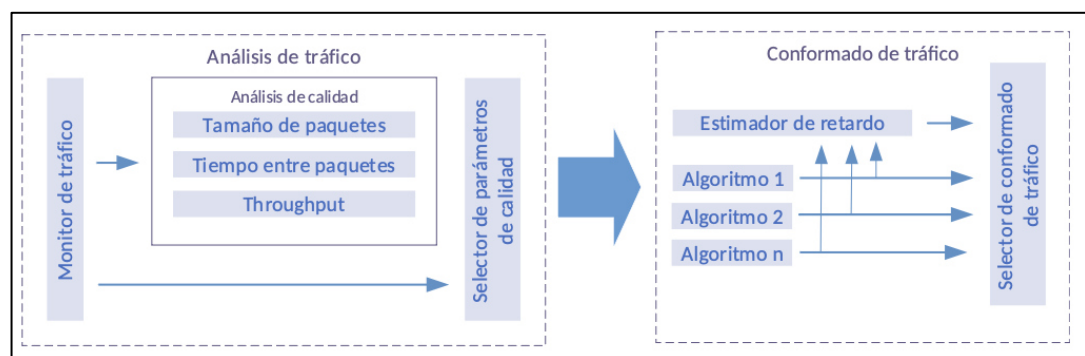


Figura 4 Metodología por conformado de tráfico. Fuente. Datos tomados de Quintana (2022).

De la tesis de (Lacalle Marcos, 2020) titulado “Evaluación e implementación de LTE-A/5G-NR para aplicaciones industriales Time-Critical” aborda que en

LTE los recursos tanto en transmisiones Downlink como Uplink poseen dimensiones de tiempo, frecuencia y espacio.

El autor considera que la dimensión espacial está recogida en capas y se puede acceder a ellas mediante el uso de múltiples antenas en transmisiones y recepción, lo que se conoce como estructura Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO).

En LTE, una trama tiene una duración temporal de 10ms, dicha trama se descompone a su vez en 10 subtramas de 1ms, las cuales contienen 2 slots de 0.5 ms de duración.

De acuerdo con lo indicado por Guillermo existen dos tipos de configuraciones para transmisión Downlink y Uplink, el tipo 1 cuenta con una multiplexación TDD (Time Domain Duplexing), el tipo 2 para una multiplexación FDD (Frequency Domain Duplexing). La característica del tipo 2 es más entendible conceptualmente debido que la estructura de tramas en LTE es de carácter temporal, por lo tanto, esta distribución simplemente utiliza distintos canales de frecuencia para subida (Uplink) como para bajada (Downlink).

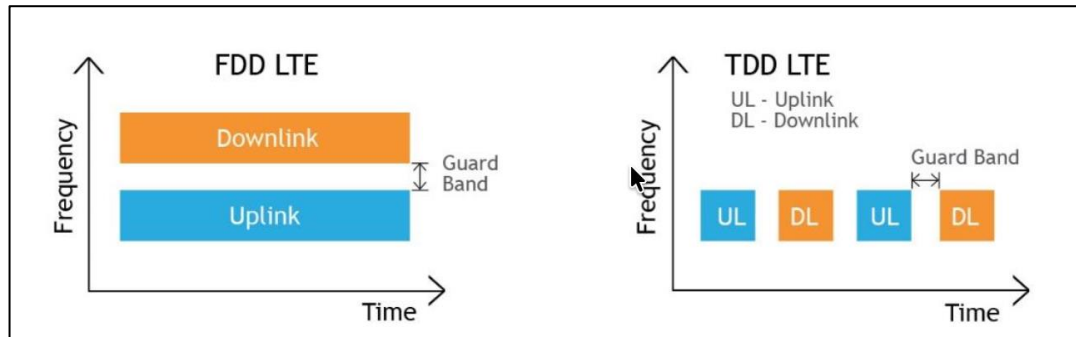


Figura 5 Esquema de FDD frente TDD en LTE. Fuente. Datos tomados de Lacalle (2020).

Martel (2020) de la tesis magistral “Impactos & Recomendaciones para el despliegue de las redes 5G en el mercado peruano” nos otorga la información de la UIT, el Perú tiene un índice de desarrollo de las TIC (IDT) de 4.85, muy inferior al promedio de los países de la Alianza del Pacífico (5.7) y de otras regiones avanzadas este bajo desarrollo en los servicios de telecomunicaciones se debería a las siguientes razones:

- Baja cobertura de servicios (solo el 30% de localidades con más de 100 habitantes cuentan con servicios de internet).
- Bajo uso (49% de la población son usuario del servicio de internet)
- Baja asequibilidad (21% de hogares no contratan el servicio de internet debido a que consideran que son tarifas elevadas)

La brecha de calidad de infraestructura fue medida por la cobertura móvil con tecnología 4G, donde según la UIT el Perú cuenta con un porcentaje de 52.2% de acceso de la población a una red móvil 4G. Por lo que identificaron metas de corto y largo plazo para reducir esta brecha. En el corto plazo, se requeriría una inversión de 28,217 millones de soles para alcanzar los niveles de acceso básico de infraestructura que serían similares con países con las mismas características socioeconómicas y geográficas.

Según lo descrito por Martel (2020) que las redes de fibra óptica constituyen un medio de transmisión principal para poder brindar los servicios de Banda Ancha debido a su alta capacidad para transportar múltiples señales y contar con la bondad de ser inmune al ruido y a las interferencias. Por lo que la adopción masiva de tecnologías inalámbricas como 4G y 5G no solo requerirán mayores estaciones base para poder brindar cobertura de alta capacidad, sino también requerirán mayores despliegues de infraestructura de fibra óptica dentro de las ciudades que permitan brindar mayor capilaridad para la conectividad de las estaciones base con la de red de los operadores.

De acuerdo con la tesis doctoral de (Sequiera Villareal, 2021) comenta que el crecimiento en la demanda de datos y las complejas arquitecturas de red que se presentan hoy en día, producen que ciertos puntos en la red se conviertan en cuellos de botella. Principalmente en las redes de acceso, debido que las capacidades son menores que en las redes de transporte.

Generalmente los enrutadores de acceso son la principal causa de pérdida de paquetes en el descarte en las colas QoS (Calidad de servicio). Con ello el retardo puede tener un impacto importante en la calidad percibida por el

usuario, ya que en niveles altos de este puede ocasionar problemas de comunicación para servicios interactivos.

Las causas principales de estos problemas en la red de acceso están relacionadas con la degradación de la señal en el medio de comunicación, cuellos de botella, problemas en el hardware o controlador.

En las redes de telecomunicaciones, la calidad es uno de los aspectos de medición que tiene un alto nivel de importancia. Por ello su monitorización continua de la calidad es una prioridad para mantener la satisfacción de los usuarios de un determinado servicio como en redes móviles o servicios de banda ancha.

El comportamiento del tráfico de las aplicaciones está ligado a como nos envían datos a la red, en este contexto, algunas aplicaciones generan datos a una tasa constante mientras que otros casos de acuerdo con patrones de tráfico que pueden llegar a ser más complejas, produciendo ráfagas de paquetes que contiene un numero de paquetes diferentes dependiendo la tecnología o servicio determinado.

3.4.2 Marco conceptual

- **Espectro electromagnético**

El espectro electromagnético es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas. Una onda electromagnética se define como la propagación simultanea de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento llamada fotón y tienen como característica ser tridimensionales debido a que se propagan en las tres direcciones del espacio, no necesitan un medio para propagarse.

Las ondas electromagnéticas se diferencian entre ellas por la longitud de onda (λ) o por la frecuencia (f) y la velocidad de propagación depende del medio,

por lo tanto, a menores longitudes de onda transporta mayor energía (Castro,2019).

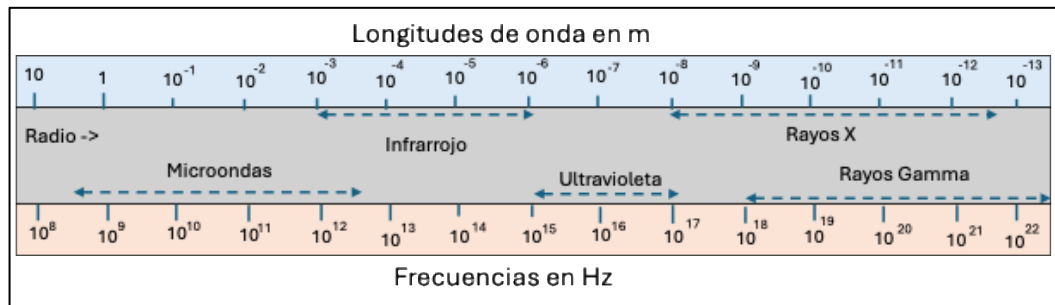


Figura 6 Diagrama del Espectro electromagnético. Fuente.Elaboración propia.

La Figura 6 representa al diagrama del espectro electromagnético ordenado en función de la longitud de onda mostrada en potencia de diez. Implícitamente nos muestra que a medida que la longitud de onda disminuye, aumentan proporcionalmente la frecuencia y la energía de la radiación.

- **Radioenlace por microondas**

Un radioenlace por microondas nos facilita la conectividad entre dos sitios (estaciones terrenas) con línea de vista (Line of Sight, LOS) usando equipo de radio con frecuencias de portadoras por encima de 1000 MHz y debajo de 40Ghz.

La forma de onda emitida puede ser analógica (convencionalmente en FM) o digital. Estos pueden transmitir diferentes servicios como voz, datos o videos entre 2 puntos fijos de la superficie terrestre con el uso de ondas electromagnéticas normadas en cada país.

Los radioenlaces son utilizados principalmente en sitios terrestres que busquen contar con una transmisión de datos que contemplen una mayor

longitud y sean guiados por sus significativas ventajas en el mercado tales como costos de oportunidad, tiempo de instalación y movilidad.

El esquema y los componentes de un radio enlace por microondas se muestra en la siguiente Figura 7:

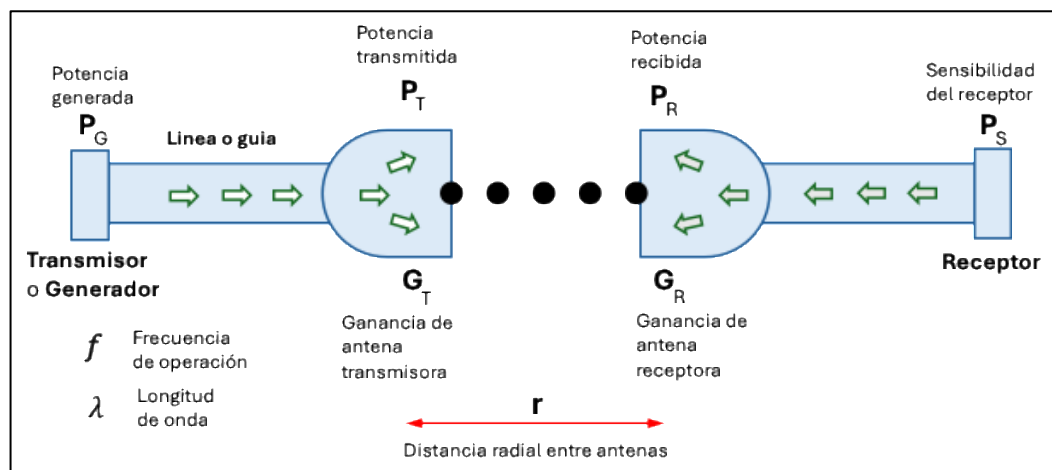


Figura 7 Esquema básico de un radio enlace por microondas. Fuente. Elaboración propia.

Un radioenlace por microondas o enlace microondas se define también como un dispositivo electrónico que está compuesto principalmente por tres componentes.

El primer componente es el transmisor, el cual es el encargado de modular la señal digital a una frecuencia portadora, esto permite que se pueda transmitir la señal por el canal aéreo.

El segundo componente es el canal aéreo que representa el medio o camino abierto para transmitir la señal, este medio debe estar libre de obstáculos y tener línea de vista entre el transmisor y receptor.

El tercer componente es el receptor, que es el responsable de recibir y demodular la señal en el lado extremo de la transmisión. El diseño de enlaces microondas presenta parámetros de configuración como la distancia, la frecuencia de operación, el ancho de banda de canal, el diámetro de antena, el tipo de modulación entre otros (Cerna Rodas, 2021).

- **Fibra óptica**

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica con perfil cilíndrico que trabaja a bajas frecuencias ópticas (radiación lumínica). La fibra óptica confina en su interior la energía electromagnética de la radiación óptica guiándola a lo largo de su eje longitudinal.

El medio físico consiste en tres partes bien diferenciadas:

- **Núcleo:** Medio por el que se conduce la señal luminosa al quedar confinada en su interior sin poder escapar debido a las reflexiones internas que se producen con el revestimiento.
- **Revestimiento:** Su función principal es confinar el haz de luz dentro del núcleo. Para ello el material cuenta con un índice de refracción menor al del núcleo.
- **Revestimiento externo:** Su misión es proteger al núcleo y al revestimiento de posibles daños mecánicos.

La Figura 8 muestra la estructura básica de una fibra óptica:

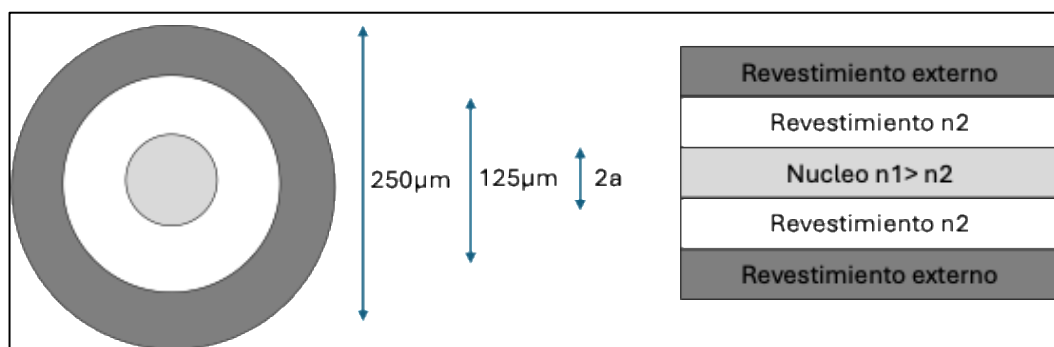


Figura 8. Estructura básica de una fibra óptica. Fuente. Elaboración propia.

La implementación de fibra óptica cuenta con ventajas y desventajas técnico-económicas de desplegarse.

Desde el punto de vista operativo, la fibra óptica también destaca por su eficiencia energética, dado que puede transportar grandes volúmenes de datos con menores requerimientos de potencia en comparación con tecnologías basadas en conductores eléctricos.

Estas características la convierten en una solución idónea para infraestructuras de telecomunicaciones de alta demanda, redes troncales, backhaul móvil y entornos que requieren elevada confiabilidad, baja latencia y proyección de crecimiento a largo plazo.

No obstante, su implementación presenta limitaciones técnicas y económicas relevantes. El despliegue inicial implica altos costos de inversión en infraestructura, equipamiento óptico y obras civiles. Adicionalmente, el medio físico posee fragilidad mecánica, siendo sensible a curvaturas excesivas, tensiones o daños durante su manipulación.

La instalación puede complejizarse en geografías adversas o zonas urbanas densas, y su operación depende de equipamiento óptico especializado. Finalmente, los procesos de mantenimiento y reparación, como empalmes y certificaciones, requieren personal técnico calificado y herramientas de alta precisión, lo que incrementa la complejidad operativa.

Se presentan en la siguiente Tabla 1. Ventajas y desventajas de desplegar fibra óptica:

Tabla 1 Ventajas y desventajas de desplegar fibra óptica

Ventajas	Desventajas
Mayor capacidad de transmisión	Alto costo de implementación

Inmunidad a interferencias electromagnéticas	Fragilidad física
Baja atenuación para determinadas distancias	Mayor dificultad de implementar de acuerdo con geografías complejas
Escalabilidad tecnológica	Dependencia de equipos ópticos
Menor consumo energético	Reparaciones complejas

- **Estación Base Celular**

La estación base celular representa el elemento fundamental dentro de la arquitectura de una red móvil, ya que concentra las funciones de acceso y transmisión que permiten la comunicación entre los usuarios finales y la red del operador.

Su correcta planificación e integración con el sistema de transporte influye directamente en los indicadores de desempeño, como la disponibilidad, la latencia y la tasa de éxito de handover.

En este sentido, Gutiérrez Mondragón (2025) señala que las estaciones base son el punto de enlace principal entre la red de acceso y el sistema de transporte, siendo determinantes en la estabilidad y eficiencia de la red móvil. Según el área de cobertura los tipos de estaciones base celular pueden ser:

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

A continuación, se muestran las características de los tipos de estaciones base celular:

Tabla 2 Características de los tipos de estaciones base celular

Tipo de nodo	Subtipo	Tipo de cobertura	Cobertura referencial	Usuarios simultáneos	Backhaul referencial	Potencia (Energía)
Macro celda	Greenfield	Normalmente urbano	Mas de 1000 metros	Más de 2000 usuarios	Fibra óptica, Microondas	10-50W
	Rooftop	Normalmente rural				
Small Cell	Femto	Outdoor, zonas de sombra que requieren señal puntual	200m a 1000 metros	1-200 usuarios	Fibra óptica, Microondas	1-6W
	Pico	Indoor, aeropuerto, estadio, hoteles	100 a 300 metros	1-30 usuarios	ADSL	0.1-0.25W
	Micro	Indoor, small office	40 metros	10 usuarios	ADSL, DSL	0.1W

- **Red Backhaul**

La red de transporte o Backhaul es un término general que es descrito como la infraestructura de transporte que es utilizado para conectar la red de acceso por radio (RAN) y el núcleo de una red móvil. Este enlace vital entre la ubicación de la antena celular y el centro de operaciones (HUB) del proveedor es un componente central de la infraestructura de red inalámbrica.

Tipo de red de transporte o Backhaul:

- Backhaul por fibra óptica: Son redes utilizadas por fibra óptica que nos ofrece capacidad y baja latencia por su tecnología.
- Backhaul Inalámbrico: Emplea enlaces microondas y radiofrecuencias para mantener conectados puntos de acceso, siendo muy útiles en zonas rurales o donde el cableado menos rentable.

- c) **Backhaul satelital:** Esta red permite conectar estaciones base celular remotas a través de tecnologías satelitales de las diferentes orbitas.

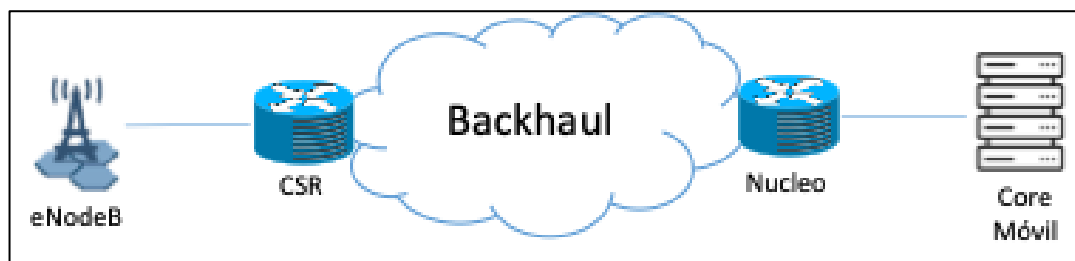


Figura 9 Red BackHaul en telecomunicaciones. Fuente. Elaboración propia.

Las redes backhaul se definen como aquella red de transporte entre la BBU y el router agregador. Están compuestas principalmente por enlaces microondas, aunque también es posible encontrar fibra óptica y cell site gateway (CSG), en algunos puntos donde encuentra cerca la planta externa de fibra óptica (Cerna Rodas, 2021)

- **Retardo de paquetes**

La latencia, también llamada delay, se refiere al tiempo que tarda en establecerse la comunicación entre dos dispositivos. En otras palabras, indica cuánto demora la transmisión de datos en un recorrido de ida y vuelta entre los equipos, es decir, el tiempo de tránsito bidireccional. Esto puede observarse, por ejemplo, entre una computadora portátil y una plataforma de videoconferencias, o entre un smartphone y un entorno virtual de clases.

La latencia se expresa en milisegundos (ms). Cuando sus valores son bajos, las aplicaciones que dependen de tiempos de respuesta rápidos como videollamadas o sesiones educativas en línea funcionan con normalidad. Por el contrario, una latencia elevada impacta negativamente en el desempeño de estas actividades ([ETSI], 2008).

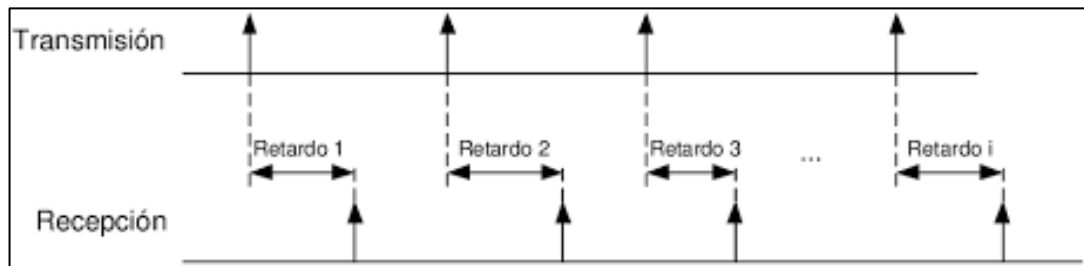


Figura 10 Retardo de paquetes. Fuente. Elaboración propia.

- **Perdida de paquetes**

La pérdida de paquetes, también llamado packet loss es un indicador clave que cuantifica la cantidad de datos que no alcanza su destino final dentro del segmento de transporte que conecta las estaciones base o nodos de acceso con la red central (core).

Esta pérdida ocurre cuando los paquetes son descartados o interrumpidos durante su recorrido, lo cual puede deberse a múltiples factores, entre ellos: congestión en los enlaces de transporte, interferencias en enlaces microondas, fallas o saturación de los equipos de agregación, errores de capa física, mantenimiento en nodos intermedios o desajustes en la capacidad y priorización del tráfico (Mostacero Agama, 2022).

Dado que el backhaul es responsable de transportar grandes volúmenes de datos provenientes de múltiples celdas o puntos de acceso, incluso un porcentaje reducido de pérdida puede tener un impacto considerable en la calidad de experiencia del usuario final.

Un aumento en la pérdida de paquetes puede generar degradación en servicios sensibles al tiempo, como voz sobre LTE/5G, videollamadas, datos móviles y sincronización de red. Por ello, en redes móviles modernas, la pérdida de paquetes es uno de los parámetros fundamentales dentro de la

evaluación de Calidad de Servicio (QoS) y desempeño del backhaul, y es monitoreada continuamente para garantizar la estabilidad y disponibilidad del servicio.

En la Figura 11, se evidencia una prueba de ping con verificación de pérdidas de paquetes.

```

Last login: Mon Dec  8 13:52:00 on ttys000
gersonug@MacBook-Pro-de-Gerson ~ % ping 8.8.8.8
PING 8.8.8.8 (8.8.8.8): 56 data bytes
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 0
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 1
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 2
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 3
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 4
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 5
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 6
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 7
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 8
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 9
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 10
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 11
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 12
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 13
ping: sendto: No route to host
Request timeout for icmp_seq 14
Request timeout for icmp_seq 15
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=16 ttl=114 time=81.675 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=17 ttl=114 time=64.403 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=18 ttl=114 time=106.716 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=19 ttl=114 time=116.218 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=20 ttl=114 time=37.453 ms
^C
--- 8.8.8.8 ping statistics ---
21 packets transmitted, 5 packets received, 76.2% packet loss
round-trip min/avg/max/stddev = 37.453/81.673/116.218/28.316 ms
gersonug@MacBook-Pro-de-Gerson ~ %

```

Figura 11 Prueba de ping para verificación de pérdidas de paquetes.
Fuente. Elaboración propia.

- **4G/LTE**

La tecnología 4G, desarrollada a inicios de los años 2000 por operadores móviles y organismos de estandarización, representa la evolución de las redes celulares hacia un sistema completamente basado en el protocolo IP. Su principal objetivo fue incrementar de manera significativa la capacidad y velocidad de transmisión, alcanzando tasas teóricas de hasta 1 Gbps para usuarios estáticos y alrededor de 100 Mbps para usuarios en movilidad.

Dentro del estándar 4G se encuentra Long Term Evolution (LTE), diseñado por el 3GPP como la base técnica de la cuarta generación. LTE introduce mejoras orientadas a ofrecer mayores anchos de banda, menor latencia y una transmisión más eficiente. En condiciones ideales, permite velocidades aproximadas de 50 Mbps en el enlace ascendente y 100 Mbps en el descendente, además de tiempos de respuesta considerablemente reducidos.

El avance de la tecnología LTE requiere de la implementación de una arquitectura simplificada compuesta principalmente por la E-UTRAN, encargada del acceso radio, y el Evolved Packet Core (EPC), que constituye el núcleo de la red. La E-UTRAN está formada por estaciones base denominadas eNodeB (ETSI, 2018).

Los cuales integran funciones que antes realizaban los controladores de red, permitiendo disminuir la latencia, mejorar la gestión de recursos y simplificar la operación de la infraestructura. Los enlaces de transmisión hacia los eNodeB pueden utilizar fibra óptica, cobre o radioenlaces.

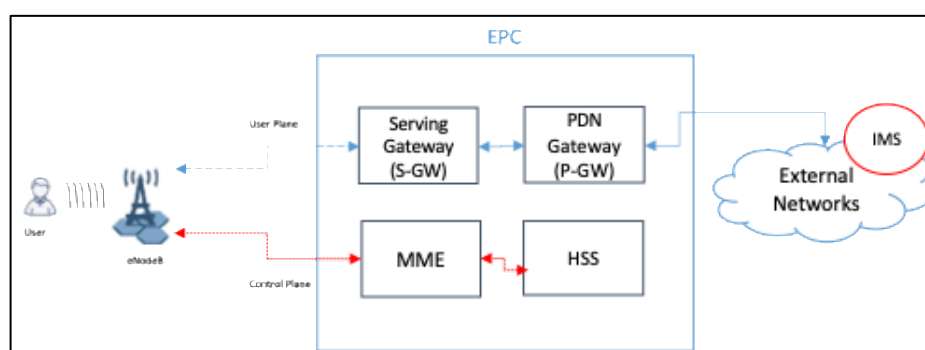


Figura 12 Arquitectura de una red LTE. Fuente. Elaboración propia

En la Figura 12, se evidencia la arquitectura de una red LTE convencional:

Como parte y evolución del estándar, LTE-Advanced (LTE-A) surgió con la versión Release 10 del 3GPP. Esta variante incorpora capacidades adicionales como mayor rendimiento, mejor cobertura, técnicas avanzadas de mitigación de interferencia y agregación de portadoras, convirtiéndose en la base de las redes 4.5G y en el puente tecnológico hacia 5G.

En conjunto, LTE y LTE-A conforman la plataforma tecnológica que permitió modernizar la red móvil hacia un sistema más eficiente, con mejores niveles de capacidad, estabilidad y baja latencia, requisitos esenciales para los servicios avanzados de banda ancha móvil (Lacalle Marcos, 2020).

- **TWAMP**

El protocolo de medición activa bidireccional (TWAMP) es una tecnología que mide el rendimiento de ida y vuelta de una red IP.

Los dispositivos que son compatibles con TWAMP cooperan para probar el rendimiento general de la red IP. Por consiguiente, se explica a continuación el proceso de TWAMP.

Procedo de TWAMP:

1. El sistema de gestión del rendimiento instruye a los dispositivos compatibles con TWAMP para establecer una prueba.
2. El dispositivo A funciona como cliente de control y activa proactivamente las estadísticas de rendimiento IP. El cliente de control establece y completa la sesión de prueba.
3. El sistema de gestión del rendimiento guarda las estadísticas recopiladas durante la sesión de prueba en una base de datos.

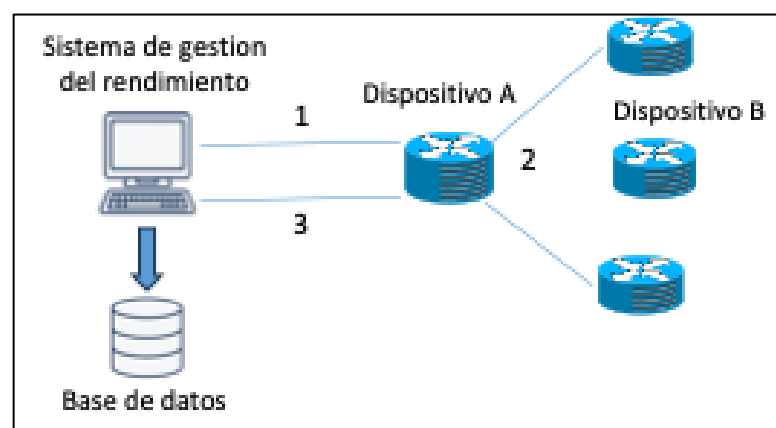


Figura 13 Diagrama de prueba TWAMP. Fuente. Elaboración propia.

Posterior a entender el proceso de establecida la sesión TWAMP. Se explica los escenarios de uso de TWAMP.

Escenario 1: Prueba de Parámetros de QoS para la Implementación

TWAMP es independiente de los servicios. Por lo tanto, puedes usar TWAMP para comprobar si la capacidad de transmisión de la red cumple con requisitos específicos de calidad de servicio (QoS) antes de que se ejecuten los servicios.

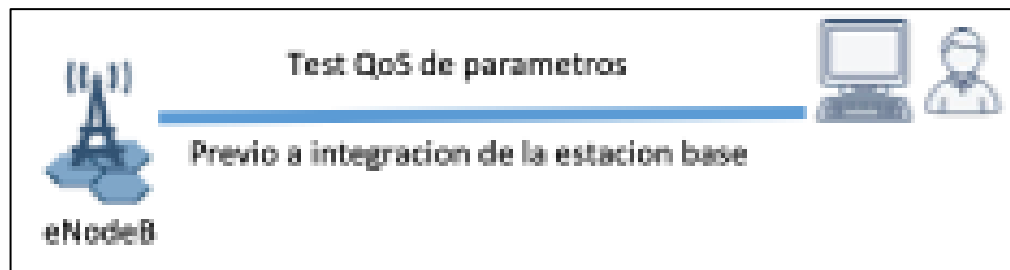


Figura 14 Prueba de parámetros de calidad de servicio con TWAMP.

Fuente. Elaboración propia.

Escenario 2: Prueba de Rendimiento IP para Localización de Fallas

Los servicios móviles son sensibles a la pérdida de paquetes y a la demora, y las fallas en la red pueden generar fácilmente quejas de los usuarios y llevar a la pérdida de clientes.

Por lo tanto, la supervisión del rendimiento en tiempo real es muy importante para los servicios móviles

Las pruebas de rendimiento IP se implementan entre los elementos de red inalámbricos (NEs), los dispositivos de transmisión (como Routers) y los equipos de prueba para evaluar el rendimiento de transmisión, como la demora de paquetes, la fluctuación (Ritter) y la pérdida. (Huawei Technologies CO., LTD., 2025)

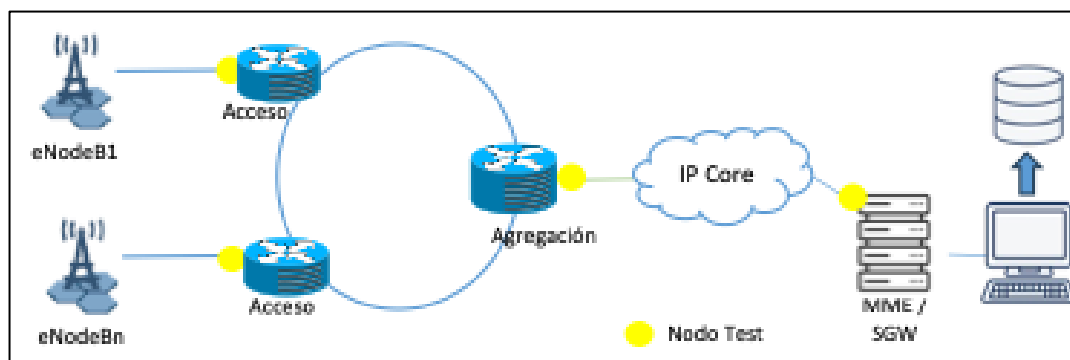


Figura 15 Pruebas de rendimiento IP de una red. Fuente. Elaboración propia.

3.5 Procedimiento

El proyecto presente contempló las siguientes principales tres etapas:

- Definición del alcance y diseño del proyecto
- Planificación del proyecto
- Implementación y puesta en servicio del proyecto

3.5.1 Definición del alcance y diseño del proyecto

El presente proyecto se formuló para atender la necesidad del operador móvil de optimizar la calidad del servicio en el distrito de Yauri, debido al aumento de la demanda de conectividad y al uso creciente de aplicaciones que requieren mayor ancho de banda y estabilidad.

La mejora del desempeño de la red en esta zona resulta esencial para asegurar una experiencia de usuario satisfactoria, consolidar la fidelidad de los clientes y mantener la sostenibilidad del flujo de ingresos del operador.

La infraestructura de acceso del distrito de Yauri estaba basada en un esquema de transmisión inalámbrica mediante enlaces microondas punto a

punto de la marca Huawei, administrados a través del gestor de red NCE (Network Cloud Engine). Esta configuración había sido suficiente para satisfacer las necesidades de tecnologías móviles previas; sin embargo, la introducción de la tecnología 4G/LTE modificó de forma significativa las demandas de tráfico debido a su naturaleza orientada al transporte intensivo de datos IP.

Como consecuencia, los enlaces microondas existentes comenzaron a operar muy cerca de su límite de capacidad, generando un cuello de botella en la transmisión inalámbrica del Backhaul móvil que por consecuencia afectaba la calidad de la experiencia del usuario y el cumplimiento de los parámetros de calidad exigidos por el operador móvil.

Ante esta situación, se consideró fundamental realizar una evaluación técnica del comportamiento de la red de transporte mediante el protocolo de medición activa bidireccional (TWAMP) utilizado principalmente por el operador móvil para monitorear los 2 principales parámetros: pérdidas de paquetes y retardo de paquetes.

Para ejecutar las mediciones, se estableció una sesión TWAMP punto a punto entre el gestor NCE y las cuatro estaciones base celular del distrito de Yauri, asegurando así que la evaluación se realizara sobre el mismo trayecto empleado por el tráfico real cursado en la red LTE.

Esta metodología permitió obtener información confiable y representativa del estado de la infraestructura de transporte.

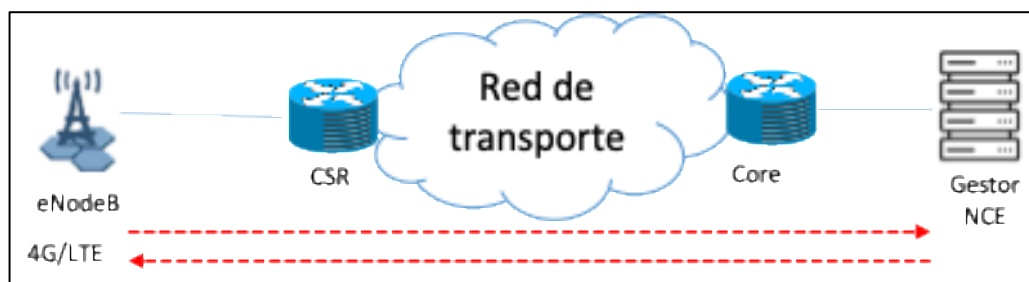


Figura 16 Sesión TWAMP. Fuente. Elaboración propia

Dando como resultado un alto porcentaje de pérdidas de paquetes con picos del 65% y retardos de paquetes con picos de 350ms en una de las 4 estaciones base celular en 4G/LTE de acuerdo con la Figura 22 y la Figura 23.

Por este motivo y la necesidad de expandir la red del operador móvil era imperativa, bajo este contexto se sustentó técnica y económicamente el proyecto de migración de transmisión de enlaces microondas a fibra óptica para las 4 estaciones principales del distrito de Yauri, Cusco.

3.5.2 Planificación del proyecto

Al inicio del proyecto, las 4 estaciones base celular contaban con transmisión inalámbrica, específicamente con enlaces microondas Huawei con capacidad de 646Mbps para las 4 estaciones base de acuerdo con la Figura 17.

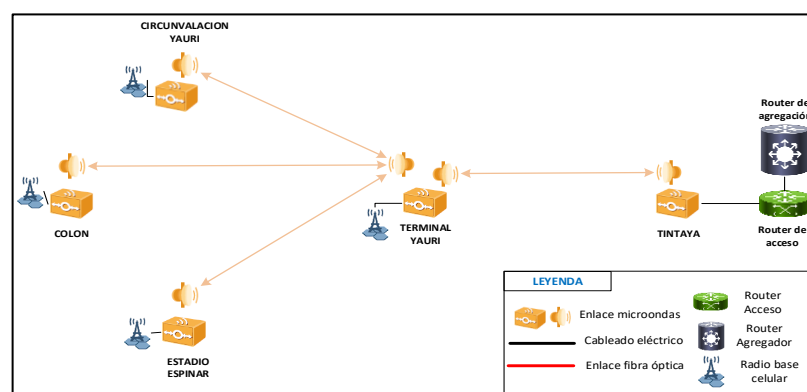


Figura 17 Topología de red inicial de las 4 estaciones base celular

Fuente. Elaboración propia.

A partir de la información recopilada, se procedió a desarrollar el diseño de la red de fibra óptica, así como la definición de la topología necesaria para viabilizar la migración de las cuatro estaciones base celulares hacia un sistema de transmisión mediante fibra óptica.

Como parte del proceso, se realizó un levantamiento detallado de datos de las estaciones base en coordinación con el área de implementación del operador móvil. Este trabajo permitió identificar con precisión la localización geográfica de cada estación, previamente desplegada con tecnología 4G/LTE, lo que sirvió como insumo fundamental para la elaboración del diseño de red y la planificación de la nueva infraestructura de transporte óptico.

Las ubicaciones de las estaciones son las siguientes:

Tabla 3 Ubicación de las estaciones del distrito de Yauri, Cusco

Estación base celular	Latitud	Longitud	Tipo de EBC inicial	Tipo de EBC final
Terminal Yauri	14°47'39.19"S	71°24'46.19"O	Acceso	Agregación
Circunvalación Yauri	14°47'49.34"S	71°25'5.74"O	Acceso	Acceso
Estadio Espinar	14°46'52.75"S	71°24'51.72"O	Acceso	Acceso
Colon	14°47'24.87"S	71°24'44.02"O	Acceso	Acceso

3.5.3 Implementación y puesta en servicio del proyecto

Tras culminar el levantamiento de información en campo, que fue realizado en coordinación con el personal técnico designado por el operador móvil, se procedió a revisar y definir la ingeniería de manera detallada para el despliegue del tendido de la planta externa.

Esta fase contempló con los siguientes aspectos: topográficos, ambientales y de infraestructura existentes a lo largo del tramo comprendido entre el sector de Kunturkanqui y el Terminal Yauri, ello con el fin de garantizar la viabilidad técnica y operativa del proyecto.

La solución propuesta consideró un enlace troncal de aproximadamente 42 km, diseñado bajo un esquema punto a punto para asegurar una transmisión óptica continua, estable y con capacidad suficiente para soportar los requerimientos actuales y futuros del operador móvil.

Este tramo principal fue planificado teniendo en cuenta factores como disponibilidad de postes, verificación del espacio útil, evaluación del estado físico de la red aérea existente, así como la identificación de zonas críticas que pudieran requerir obras complementarias, tales como refuerzos estructurales o instalación de nueva infraestructura.

Adicionalmente, el proyecto contempló la ejecución de tres ramales secundarios, cada uno con longitudes inferiores a 2 km, destinados a enlazar la ruta troncal con las estaciones base celulares (Nodo) existentes en la zona.

Estos tramos fueron diseñados con configuraciones de acceso óptico punto a punto que permiten garantizar la continuidad del servicio, minimizando atenuaciones y asegurando niveles adecuados de margen óptico conforme a los parámetros establecidos por las recomendaciones ITU-T para redes de acceso de fibra óptica en el desarrollo del proyecto.

Todo ello orientado a asegurar que el tendido cumpla con los estándares de confiabilidad y mantenibilidad requeridos para la operación de una red Backhaul móvil de tecnología 4G/LTE en el distrito de Yauri, provincia Espinar, Cusco.

Se muestra en la Figura 18, la ruta de fibra óptica desde la estación más cercana en fibra óptica del operador móvil que estuvo ubicada en el distrito de Kunturkanqui hacia la estación de acceso con transmisión de microondas que sería convertido en una estación de agregación (Terminal Yauri) en fibra óptica, además de contemplar la ruta de los ramales secundarios para llegar a las 3 estaciones de acceso que pasarían a fibra óptica.

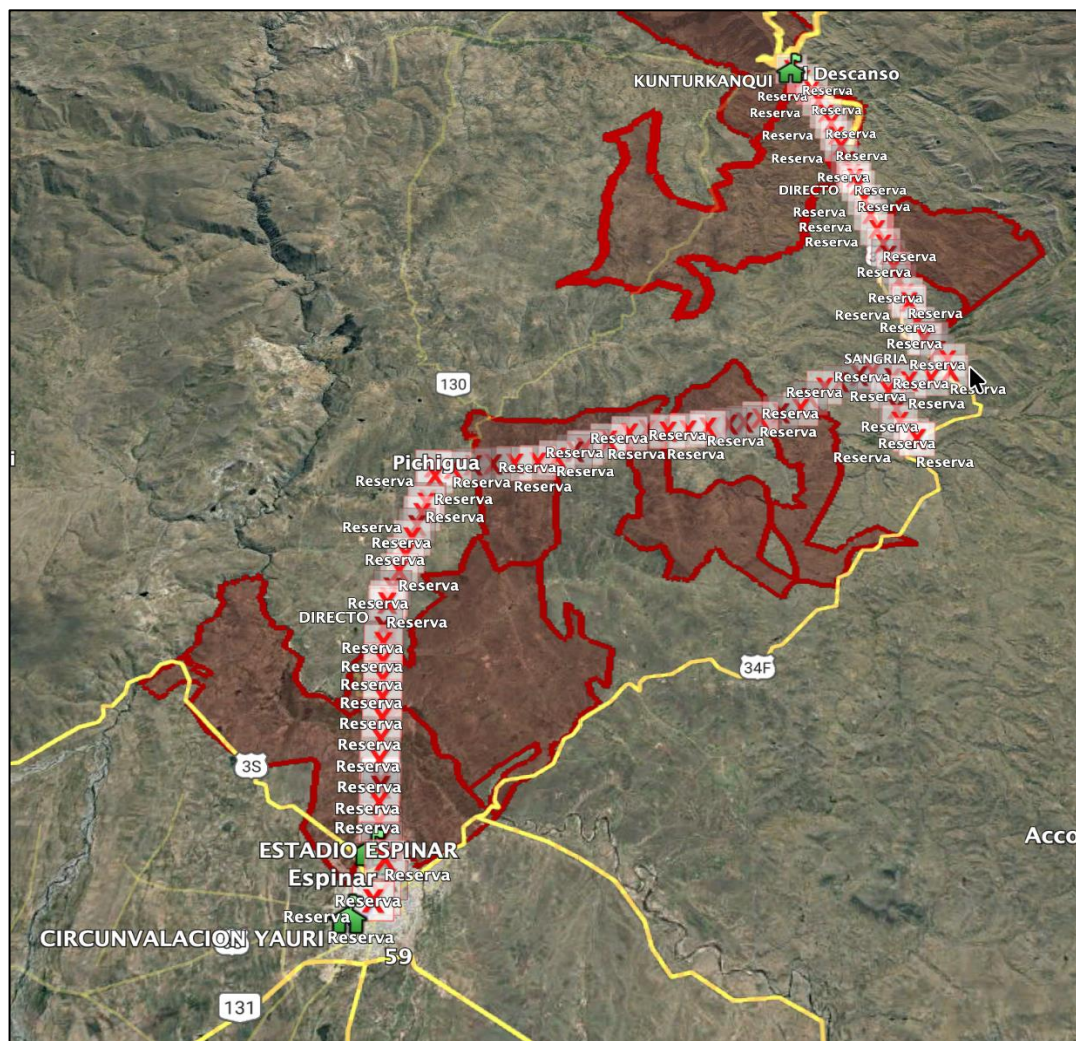


Figura 18 Ruta de fibra óptica desde Kunturkanqui hacia Terminal Yauri.

Fuente. Datos tomados de Google Earth

La ruta del tendido de fibra óptica desde Kurtunkanqui hacia Terminal Yauri fue realizado por la contratista y validado por el operador móvil.

Se contempló un tendido total de 46.9Km con posterío propio de acuerdo con la Tabla 4. El objetivo de esta implementación con posterío propio se debe a motivo y decisión final del operador móvil. Debido a que se tiene como estándar contar con un mantenimiento y manejo de la infraestructura propia para este tipo de proyectos de telecomunicaciones.

Tabla 4 Distancia de planta externa por estación base celular

Estación base celular inicial	Distancia de planta externa (Km)	Cantidad de postes	Estación base celular final
Terminal Yauri	42	296	Kunturkanqui
Circunvalación Yauri	1.8	13	Terminal Yauri
Estadio Espinar	2	14	Terminal Yauri
Colon	1.1	8	Terminal Yauri

En base a los requerimientos de diseño y capacidad del proyecto, se determinó la compra e incorporación de equipos de enrutamiento de la marca Huawei, seleccionándose el modelo ATN910C-B para las estaciones de acceso que interconectaría a las cuatro estaciones base celular del operador móvil. Asimismo, se definió la instalación de dos módulos ópticos de 10 Gb para 10 km en cada una de las estaciones base de acceso (Colón, Circunvalación Yauri, Estadio Espinar y Terminal Yauri), a fin de garantizar el soporte adecuado de la capacidad para el transporte de tráfico sobre la nueva infraestructura de fibra óptica.

Para la estación base que sería promovida a nodo o estación de agregación (Terminal Yauri), se consideró la implementación de dos módulos ópticos de 10 Gb para 80 km, también de la marca Huawei, debido a la mayor exigencia de alcance y capacidad requerida para el enlace troncal hacia Kunturkanqui. De esta forma, se estableció la topología de red final definida para el proyecto.

Adicionalmente, en el sitio Terminal Yauri se procedió a la instalación de un nuevo equipo de agregación, específicamente un router Huawei NE8000-M14, el cual asumiría las funciones de núcleo de agregación y concentraría el tráfico proveniente de los cuatro enrutadores de acceso desplegados en las estaciones base celulares.

Se muestra la Figura 19, la topología de red final de las 4 estaciones base celular que considera una “topología de estrella”.

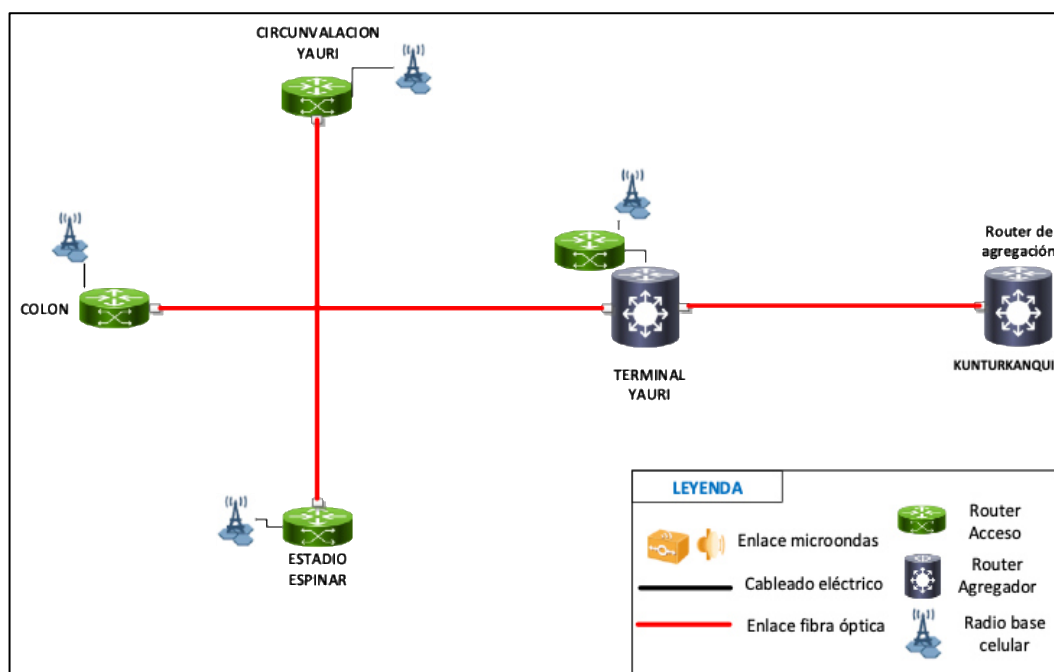


Figura 19 Topología de red final de las 4 estaciones base celular.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 5 Equipamiento utilizado en las estaciones del distrito de Yauri, Cusco

Estación base celular	Tipo de estación base celular	Modelo de Router	Módulos
Terminal Yauri	Agregación	NE8000-M14	2 SFP 10GB 80KM HUAWEI
Circunvalación Yauri	Acceso	ATN910C-B	2 SFP 10GB 10KM HUAWEI
Estadio Espinar	Acceso	ATN910C-B	2 SFP 10GB 10KM HUAWEI
Colon	Acceso	ATN910C-B	2 SFP 10GB 10KM HUAWEI
Kunturkanqui	Agregación	NE8000-M14	2 SFP 10GB 80KM HUAWEI

Con esta implementación, la red de acceso queda equipada con una infraestructura de transmisión óptica de 10 Gb, proporcionando la capacidad y estabilidad necesarias para soportar de manera eficiente los servicios móviles basados en tecnología 4G/LTE. Esta mejora no solo optimiza el desempeño de la red actual, sino que también establece una base tecnológica sólida y escalable para la integración de futuras generaciones de servicios móviles, tales como 5G y otras evoluciones orientadas a mayores anchos de banda, menor latencia y mayores volúmenes de tráfico.

3.6 Resultado de la actividad

Culminado el proyecto de migración a fibra óptica de las 4 estaciones base celular, se procedió a habilitar el TWAMP entre cada estación base celular para analizar el resultado de este proyecto que persigue el objetivo de optimizar los 2 parámetros principales como lo son las pérdidas de paquetes y el retardo de paquetes.

Se presentan las pruebas del monitoreo de cada EBC de las pérdidas de paquetes y el retardo de paquetes respectivamente tomadas desde el Gestor NCE Huawei:

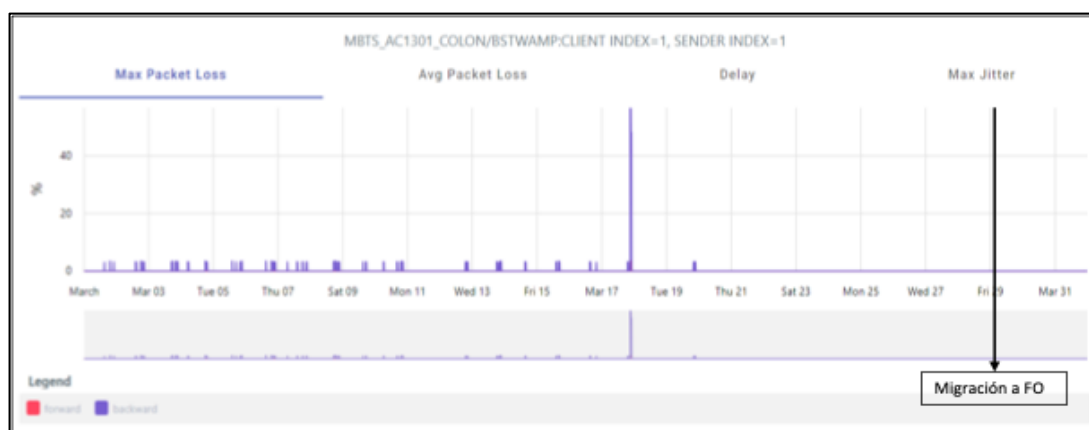


Figura 20 Medición de pérdida de paquetes de Colon. Fuente. Gestor NCE Huawei.

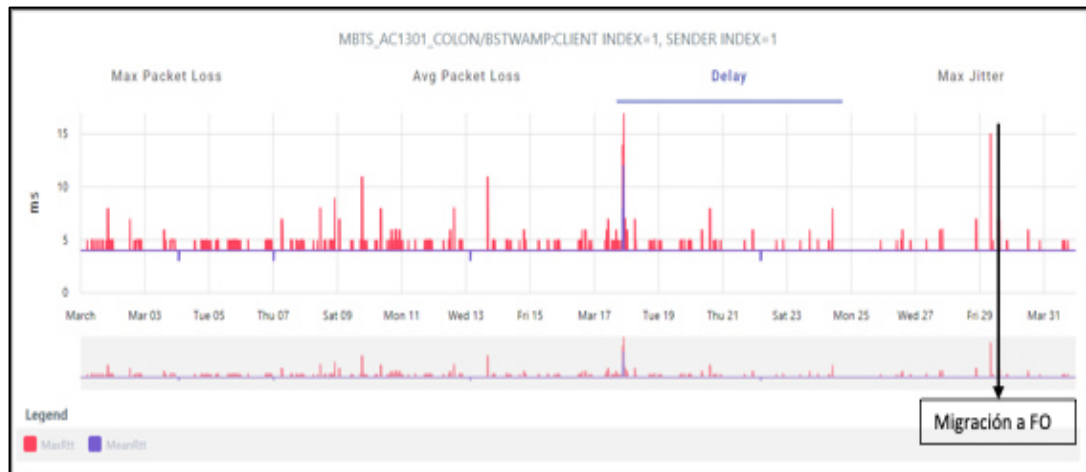


Figura 21 Medición de retardo de paquetes de Colon. Fuente. Gestor NCE Huawei.

Por lo que se puede apreciar de la Figura 20 y de la Figura 21, se redujo de manera importante las pérdidas de paquetes en la estación base celular de Colon pasando de 45% a 0%. Igualmente, el retardo de paquetes se redujo de picos de 15ms a 5ms.

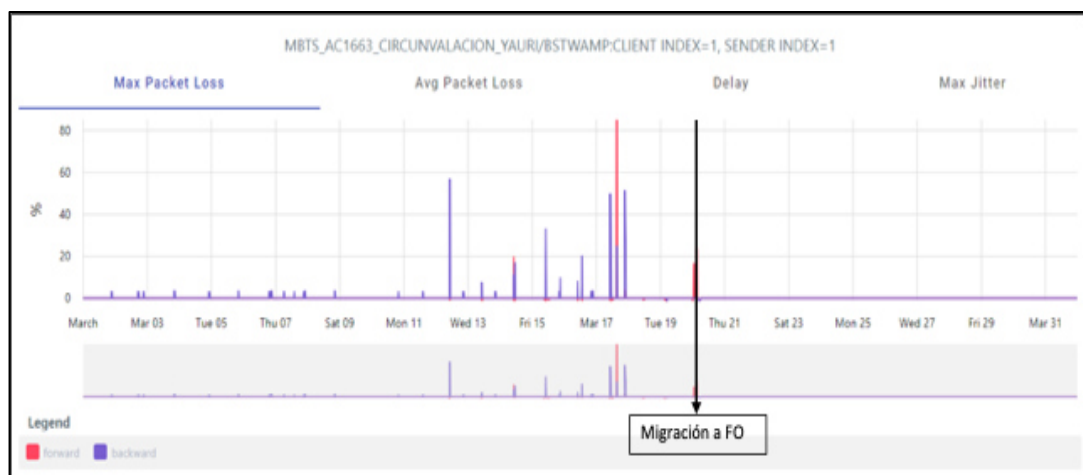


Figura 22 Medición de pérdida de paquetes de Circunvalación Yauri. Fuente. Gestor NCE Huawei



Figura 23 Medición de retardo de paquetes de Circunvalación Yauri.

Fuente. Gestor NCE Huawei.

De acuerdo con las Figura 22 y Figura 23, la estación base celular de Circunvalación Yauri tras la implementación de la red a fibra óptica. Las pérdidas de paquetes de picos del 80%, se redujo hasta el 0% y retardo de paquetes de picos de 320 ms a 5ms.

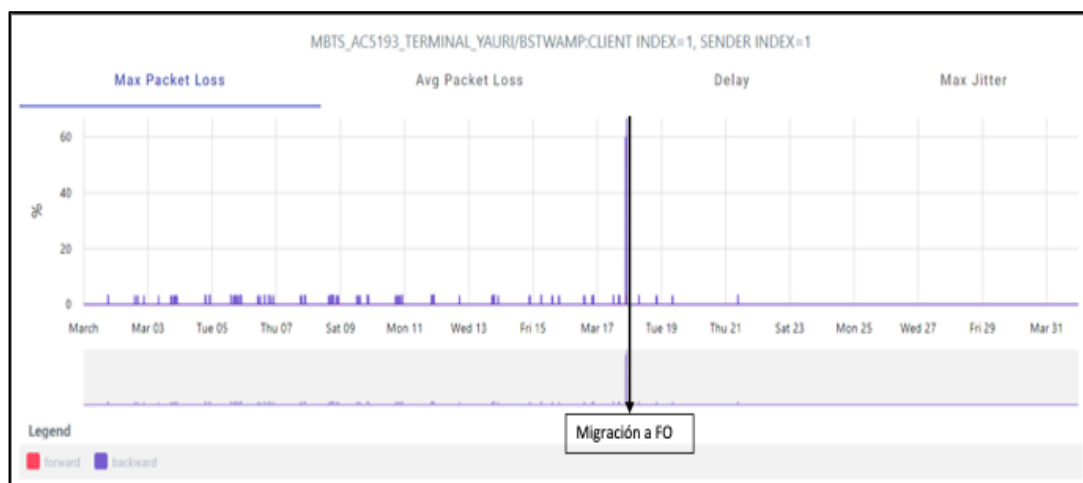


Figura 24 Medición de pérdida de paquetes de Terminal Yauri. Fuente.

Gestor NCE Huawei.

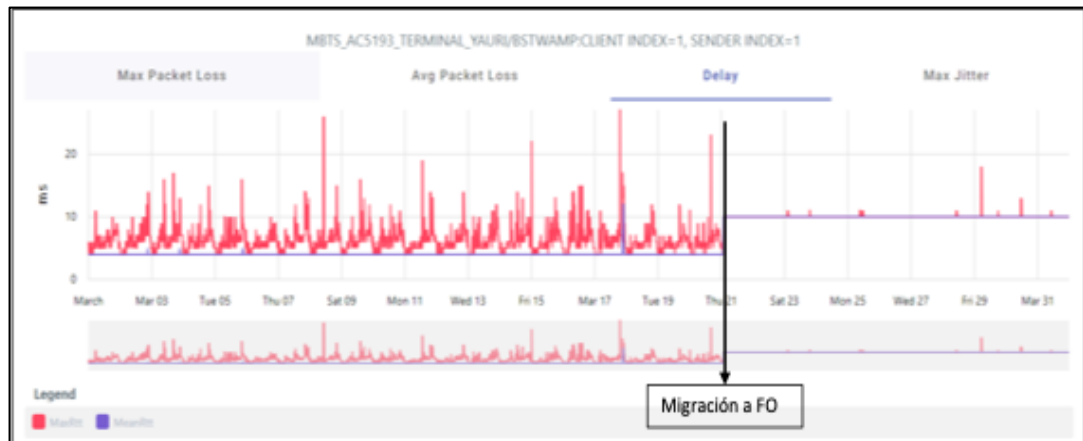


Figura 25 Medición de retardo de paquetes de Terminal Yauri. Fuente. Gestor NCE Huawei.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 24 y la Figura 25, se evidencia que la estación base celular Terminal Yauri tras la migración a fibra óptica, las pérdidas de paquetes, que anteriormente alcanzaban picos cercanos al 80%, se redujeron hasta 0%. De igual manera, el retardo de paquetes disminuyó significativamente, pasando de valores máximos del orden de 320 ms a aproximadamente 5 ms, reflejando una mejora sustancial en la estabilidad y calidad del enlace de transmisión.

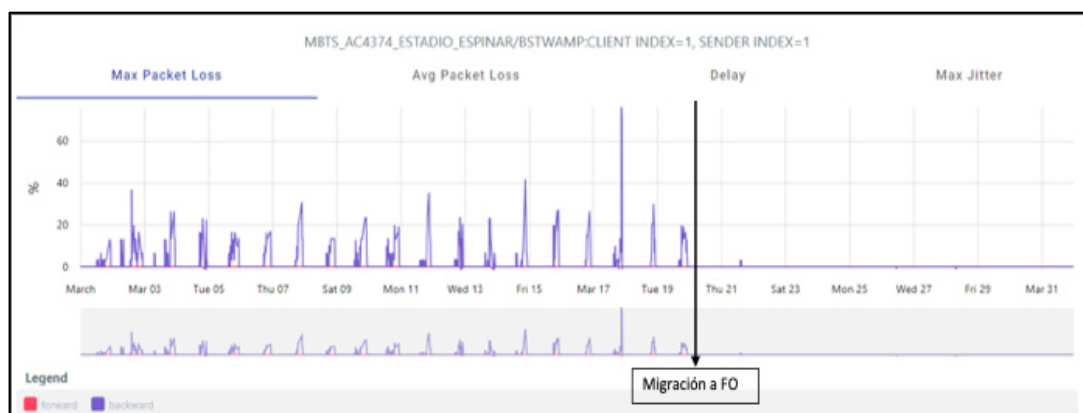


Figura 26 Medición de pérdida de paquetes de Estadio Espinar. Fuente. Gestor NCE Huawei.

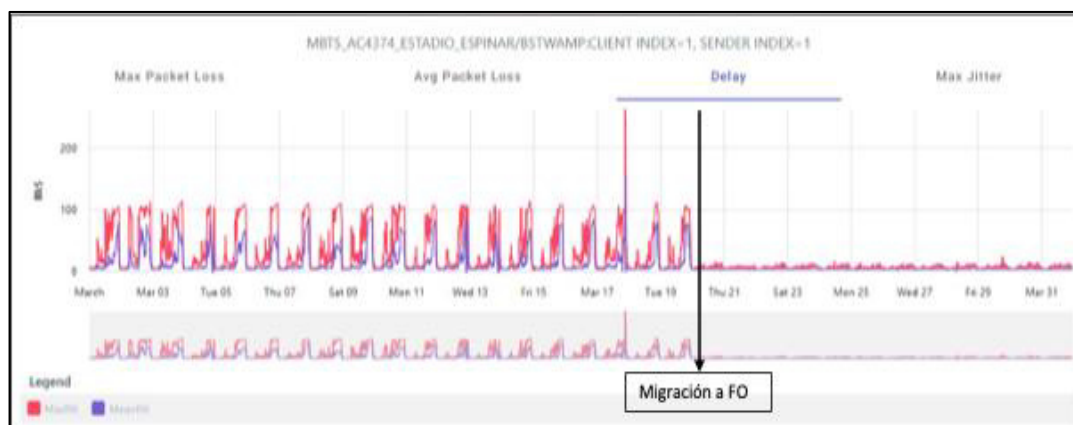


Figura 27 Medición de retardo de paquetes de Estadio Espinar. Fuente. Gestor NCE Huawei.

La Figura 26 y la Figura 27, nos muestra que la pérdida de paquetes y retardo de paquetes de la estación base celular Estadio Espinar tuvo un cambio drástico posteriormente al haber sido migrado a la transmisión por fibra óptica. Las pérdidas de paquetes bajaron del 40% hacia el 0% y el retardo de paquetes de estar en 110ms en promedio hacia 5 ms en promedio.

De los resultados de la Figura 20 a la Figura 27 respecto a la medición de las pérdidas de paquetes y retardo de paquetes, podemos deducir que la solución del proyecto de migración de transmisión microondas a fibra óptica permitió solucionar el problema de capacidad. Por consecuencia, solucionar los 2 parámetros principales de este proyecto (pérdidas de paquetes y retardo de paquetes).

El proyecto de telecomunicaciones de inversión privada por parte del operador móvil en el distrito de Yauri, de la provincia Espinar, ayudó a mejorar los parámetros (pérdidas de paquetes y retardo de paquetes) en el tiempo determinado de 1 año de acuerdo a la Tabla 6.

A continuación, se presenta la discusión de resultados del proyecto de migración de transmisión de microondas a fibra óptica por el operador móvil.

CAPITULO IV: DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Descripción de la implementación

El proyecto se desarrolló con el objeto de mejorar el desempeño del servicio móvil en el distrito de Yauri, debido al incremento sostenido de la demanda de datos y a la necesidad de asegurar niveles adecuados de calidad y disponibilidad en servicios basados en tecnología 4G/LTE. La infraestructura existente operaba mediante enlaces microondas punto a punto de la marca Huawei, administrados por el sistema NCE. Si bien esta solución había sido suficiente en etapas previas, la introducción de LTE generó un aumento significativo en el tráfico IP, llevando a los enlaces inalámbricos a operar cerca de su límite de capacidad y originando congestión en el Backhaul móvil.

Para evaluar objetivamente esta problemática, se ejecutaron mediciones de desempeño mediante el protocolo TWAMP, el cual permitió monitorear parámetros críticos como pérdidas de paquetes y retardo bidireccional. Las pruebas realizadas entre el gestor NCE y los eNodeB del distrito evidenciaron valores críticos, con pérdidas que alcanzaban picos del 65% y retardos superiores a los 350 ms en una de las estaciones base evaluadas. Este comportamiento confirmaba la necesidad inmediata de modernizar la red de transporte para garantizar la continuidad y calidad del servicio móvil.

Con estos resultados, se justificó técnica y económicamente la migración del sistema de transporte desde microondas hacia una infraestructura de fibra óptica para las cuatro estaciones base principales del distrito. Inicialmente, se realizó un levantamiento detallado de información en campo en coordinación con el área de implementación del operador móvil, lo que permitió identificar

con precisión la ubicación geográfica de cada estación y las condiciones del entorno para la instalación de la nueva red óptica.

De la misma manera, se presentó y se cumplió con el cronograma de actividades del proyecto propuesto inicialmente. (Ver Tabla 6)

Tabla 6 Cronograma de actividades del proyecto

N.º	Cronograma de actividades	Inicio	Fin
1	Sustentación y aprobación de proyecto	Marzo 2023	Abril 2023
2	Compra e importación de equipos router y de fibra óptica	Abril 2023	Julio 2023
3	Adecuación de sitios (Energía y espacio)	Abril 2023	Junio 2023
4	Permisos para la instalación de postes y fibra óptica	Abril 2023	Septiembre 2023
5	Implementación de fibra óptica	Septiembre 2023	Diciembre 2023
6	Energizado, gestión e integración de equipos router	Diciembre 2023	Enero 2024
7	Migración de servicios 4G/LTE hacia equipos router	Enero 2024	Febrero 2024
8	Desmontaje de radioenlaces microondas	Febrero 2024	Marzo 2024
9	Documentación del proyecto	Febrero 2024	Marzo 2024
10	Cierre de OC por culminación de proyecto	Marzo 2024	Marzo 2024

De acuerdo con la Tabla 6, el proyecto de red por fibra óptica se inició en marzo del 2023 y se culminó en marzo del 2024. Se pudo desplegar una cantidad considerable de nueva fibra óptica con una distancia total de 46.9Km mediante postes propios del operador móvil.

Por lo que, se pudo conseguir migrar el servicio móvil de las 4 estaciones base celular a fibra óptica y por consiguiente reducir las pérdidas y retardo de paquetes del distrito de Yauri a niveles aceptables para el correcto funcionamiento de la red Backhaul móvil del operador móvil para el soporte de la red 4G/LTE.

De la misma manera, la red de acceso del distrito de Yauri pasó a operar sobre una infraestructura óptica de capacidad de 10 Gb, proporcionando una plataforma robusta, estable y escalable. Esta nueva arquitectura no solo

optimiza el desempeño actual de la red LTE, sino que también habilita la capacidad necesaria para soportar futuras evoluciones tecnológicas, incluidas las redes 5G y servicios avanzados que demandan mayor capacidad, menor latencia y mayor confiabilidad.

4.2 Evaluación Económica

El proyecto nació bajo una necesidad de optimizar la red móvil con tecnología 4G/LTE. Previamente, se realizó un análisis económico respecto a rentabilidad muy relevante para tomar la decisión de continuar con un proyecto de modernización de radioenlaces microondas o ir adelante con el proyecto de fibra óptica hacia el distrito de Yauri, Cusco.

Dentro del alcance del proyecto, se presenta el presupuesto contemplado para el proveedor móvil respecto a la implementación y costos previstos para el proyecto de modernización de radioenlaces microondas en las Tablas 6 al 10:

Tabla 7 Presupuesto del gasto en capital por compra de equipos

N.º	Descripción	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Total (\$)
1	Equipo MW HUAWEI 1.2 diámetro 18Ghz	3	13,000	39,000
2	Equipo MW HUAWEI 2.4 diámetro 18Ghz	1	25,000	25,000
3	Soporte de antena 1.2 en torre	3	300	900
4	Soporte de antena 2.4 en torre	1	400	400
5	Router ATN910C-B	1	1,000	1,000
6	Módulo HUAWEI SFP 1GB eléctrico	8	50	400
7	Módulo HUAWEI SFP 10GB 10KM óptico	2	200	1,600
Total				68,300

La Tabla 7 nos muestra el gasto de capital que se invertiría para la compra de los equipos de transmisión inalámbrica de punto a punto entre los sitios involucrados del distrito de Yauri.

Tabla 8 Presupuesto anual de gastos operativos ante el MTC

N.º	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
1	Pago por solicitud de licencia de funcionamiento de enlaces MW ante el MTC	4	300	1,200
2	Pago del CANON anual por uso de espectro en 56Mhz	4	400	1,600
Total				2,800

De la Tabla 8, se evidencia el gasto operativo a tomar en cuenta por el uso del ancho de banda de 56MHz en la frecuencia de 18Ghz por los 4 enlaces inalámbricos hacia el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y el pago por derecho de solicitud de licencia de funcionamiento de cada enlace inalámbrico ante el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC).

Tabla 9 Presupuesto anual de gastos operativos ante la torrera

N.º	Concepto	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Total (\$)
1	Pago de uso de espacio (AEV) en torre	8	1,800	14,400
2	Pago de uso de espacio y energía en gabinete	4	2,400	9,600
Total				24,000

Los gastos operativos que se pagan de manera anual por el uso del espacio en torre, espacio en gabinete y energía de corriente alterna (AC) requerida para los 4 equipos enlaces inalámbricos se detalla en la Tabla 9. Esto debido

que las 4 estaciones base celular actualmente son sitios de la torrera Sites del Perú (SDP).

Tabla 10 Presupuesto de gasto de capital de contratista

N.º	Concepto	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Total (\$)
1	Implementación por radioenlace microondas de 1.2 diámetro	3	2,000	6,000
2	Implementación por radioenlace microondas de 2.4 diámetro	1	3,500	3,500
3	Desmontaje de radioenlaces microondas de acceso	4	400	1,600
4	Documentación del proyecto	1	150	150
Total				11,250

La Tabla 10 contempla dentro de la lista el presupuesto de contratista por la implementación de los radioenlaces, desmontaje de los radioenlaces y documentación del proyecto para el cierre de este.

Tabla 11 Presupuesto de gasto capital del proyecto de modernización de radioenlaces microondas Yauri - Tintaya

N.º	Actividad	Total (\$)
1	Presupuesto de gasto de capital por compra de equipos	68,300
2	Presupuesto de gasto de capital de Contratista	11,250
Total		79,550

De la Tabla 11, nos muestra el presupuesto de gasto capital previsto para poder realizar el proyecto de modernización con radioenlaces microondas.

Tabla 12 Presupuesto de gasto operativo anual del proyecto de modernización de radioenlaces microondas Yauri - Tintaya

N.º	Actividad	Total (\$)
-----	-----------	------------

1	Presupuesto de gasto operativo ante el MTC	2,800
2	Presupuesto de gasto operativo ante Torrera	24,000
Total		26,800

De la Tabla 12, nos brinda el presupuesto de gasto operativo anualizado para poder realizar el proyecto de modernización con radioenlaces microondas por un costo anual de 26,800\$.

El monto total del gasto de capital seria de 2 puntos (N. °1 y N. °2) de la Figura 11, gasto de capital por la compra de equipos con monto de 68,300\$ y el gasto de capital de contratista por un monto de 11,250\$ dando un total de 79,550\$. El cual es de único pago en el proyecto por el concepto de compra de equipos y trabajos de implementación por parte de la contratista.

El monto total del gasto operativo se deriva en de 2 puntos (N. °1 y N. °2) de la Figura 12, el presupuesto de gastos operativos ante el Ministerio de Transporte y Comunicaciones con monto de 2,800\$ y el presupuesto de gastos operativos ante Torrera Sites del Perú con monto de 24,000\$ dando un total de 26,800\$.

Estos gastos operativos se realizan de manera anual por los conceptos de arrenda por parte de la torrera y el pago del CANON por uso de espectro radioeléctrico de los radioenlaces microondas por un espacio espectral de 56MHz en la frecuencia a operar.

Se realizó el mismo ejercicio con el presupuesto para el proveedor móvil respecto al despliegue del proyecto de fibra óptica hacia la radio base móvil Terminal Yauri y las tres radios bases móvil celular (Colón, Circunvalación Yauri, y Estadio Espinar):

Tabla 13 Presupuesto de gasto de capital por compra de equipos

N.º	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
-----	-------------	----------	---------------------	------------

1	Equipo Router Huawei Acceso ATN910C-B	4	1,000	4,000
2	Equipo Router Huawei Agregación NE8000-M8	1	6,000	6,000
3	Módulos Huawei SFP 10GB 10Km	8	100	800
4	Módulos Huawei SFP 10GB 80Km	2	300	600
Total				11,400

Dentro del presupuesto final del proyecto de fibra óptica, la Tabla 13 muestran los precios aproximados considerados en la compra de equipos como router de acceso, agregación y módulos de la marca Huawei.

Tabla 14 Presupuesto de gasto de capital de contratista

N.º	Concepto	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Total (\$)
1	Permisos y proceso con el municipio y comunidades para la instalación de fibra óptica	4	200	800
2	Implementación de instalación de postes Yauri - Kunturkanqui	296	100	29,600
3	Implementación de instalación de postes Yauri a los 3 sitios de acceso	35	100	3,500
4	Implementación de instalación de fibra óptica Yauri a Kunturkanqui (Km) Zona Rural	42	4,500	189,000
5	Implementación de instalación de fibra óptica Yauri a los 3 sitios de acceso (Km) Zona Urbana	4.9	4,000	19,600
6	Adecuaciones de energía en sitio agregador en Terminal Yauri	1	1,200	1,200
7	Adecuaciones de energía en cada sitio de acceso	3	600	1,800
8	Implementación de equipos y accesorios de planta interna	5	200	1,000
9	Implementación de equipos router de agregación	1	1,400	1,400
10	Implementación de equipos router de acceso	4	800	3,200
11	Migraciones de servicios móviles hacia router de acceso	4	100	400
12	Documentación del proyecto	1	150	150
13	Desmontaje de radioenlaces microondas de acceso	3	400	1,200
Total				252,850

La Tabla 14 nos da a conocer los gastos aproximados acordados con la contratista el cual será la responsable de realizar los trabajos físicos considerados desde el punto 1 al 13 con un total de 252,850 dólares.

Tabla 15 Presupuesto del gasto de capital del proyecto de fibra óptica Yauri - Kunturkanqui

N.º	Actividad	Total (\$)
1	Presupuesto de gasto de capital por compra de equipos	11,400
2	Presupuesto de gasto de capital de contratista	252,850
Total		264,250

De la Tabla 15, resume el presupuesto previsto para poder realizar el proyecto de fibra óptica de Yauri hacia Kunturkanqui. Este presupuesto nos muestra un único gasto a realizar como gasto de capital. Este no contempla gastos operativos anualizados para este caso debido que la infraestructura es nueva (postes propios) por lo que la inversión final para el proyecto de fibra óptica solo será de único pago.

El monto final de gasto de capital será la suma de la compra de equipos y los trabajos realizados por la contratista por montos de 11,400\$ y 252,850\$ sucesivamente, sumando un monto total de 264,250\$.

Para poder contar con la definición y aprobación del proyecto se realizó un comparativo de los costos de inversión y de los costos operativos asociado a las dos alternativas para la nueva red de transmisión del proyecto: Con los radioenlaces microondas o la nueva fibra óptica a lo largo de 10 años para determinar la rentabilidad de la inversión.

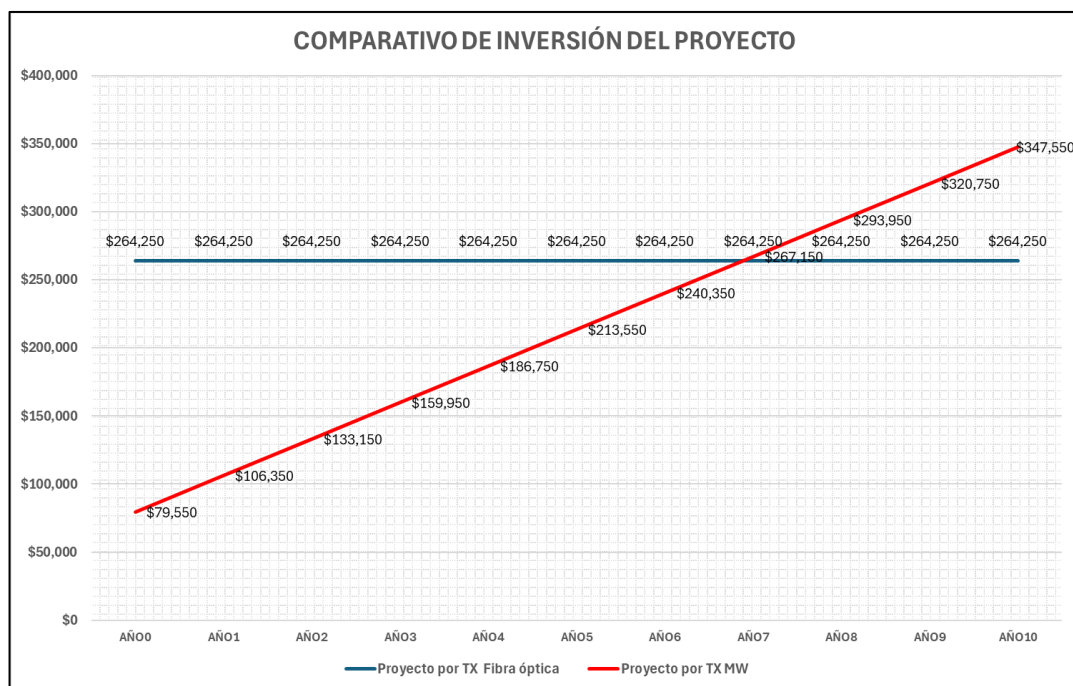


Figura 28. Comparativo de inversión del proyecto Terminal Yauri.

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con el comparativo de la Figura 28, nos permitió determinar y ayudar a identificar gráficamente que el proyecto de modernización de radioenlaces microondas termina siendo más costoso a mediano y largo plazo que la fibra óptica por el efecto acumulado del gasto operativo anualizado. Esta inversión estratégica por la fibra óptica termina siendo positiva financieramente a partir del año 7.

Por lo tanto, la fibra óptica es la alternativa económicamente más conveniente y técnicamente más sólida para garantizar la continuidad, calidad y escalabilidad del servicio móvil en el distrito de Yauri, Cusco.

Esto debido a que las capacidades de la fibra óptica nos permitieron crecer de 1500Mbps a 10Gbps en la red de acceso y en la red de agregación dentro del proyecto desplegado.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

- Se logra sustentar el proyecto de fibra óptica para el distrito de Yauri mediante una comparativa financiera que valida la inversión económica de mediano a largo plazo por parte del operador móvil.
- Se justifica la transición de la transmisión de radioenlaces microondas hacia una red en fibra óptica desde la perspectiva técnica y operativa, ya que permitió ampliar la capacidad de transporte de 646Mbps a 10Gbps, otorgando una disponibilidad mucho mayor de recursos para el adecuado soporte del servicio 4G/LTE.
- Se evidenció de acuerdo el análisis de desempeño realizado con el TWAMP para la tecnología 4G/LTE, la optimización de las pérdidas de paquetes desde picos del 65% hasta 0% y disminuyendo los retardos de paquetes de picos de valores máximos de 350ms hasta 5ms.
- El proyecto alcanza su principal objetivo: mejorar la calidad del servicio móvil 4G/LTE en el distrito de Yauri mediante la optimización de la red de transporte IP. Dando como resultado una mayor satisfacción de los clientes y asegurar la rentabilidad del proveedor móvil a mediano plazo.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar supervisando de manera constante los indicadores de retardo, pérdida de paquetes y capacidad mediante herramientas como TWAMP, con el fin de asegurar que la red conserve los niveles de rendimiento de la tecnología móvil obtenidos tras la migración a fibra.
- Se insta a optar por la fibra óptica como solución de transporte donde la geográfica nos ayude a decidir si es la alternativa más factible, ya que reduce significativamente el OPEX y se vuelve financieramente rentable, constituyendo la propuesta más económica y sostenible para el operador móvil.
- Se sugiere proyectar incrementos de capacidad y posibles extensiones de la red de fibra para atender el crecimiento del tráfico y preparar la infraestructura para tecnologías como 5G.
- Es conveniente fortalecer las rutinas de mantenimiento preventivo y gestión de incidencias para mantener la estabilidad del servicio 4G/LTE y asegurar la continuidad de los beneficios operativos y económicos del proyecto.

CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ETSI], E. T. (2008). *Guide Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet Access. Retrieved from.* Obtenido de https://www.etsi.org/deliver/etsi_eg/202000_202099/20205704/01.02.01_60/eg_20205704v010201p.pdf.

Cerna Rodas, R. (2021). Modelamiento de una red backhaul para estimar el maximo troughpout de un enlace de transporte basado en indicadores de una estación base de comunicación móvil. Perú.

ETSI. (2018). *LTE; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (3GPP TR 36.912 version 15.0.0 Release 15)*. Obtenido de https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=55983.

Gutiérrez Mondragón, M. B. (2025). *tesis.pucp.edu.pe/*. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f13d5184-aa0f-45af-8264-351047cd21b3/content>.

Huawei Technologies CO., LTD. (2025). *support.huawei.com*. Obtenido de [support.huawei.com](https://support.huawei.com/carrier/docview?nid=SE0000744065):
<https://support.huawei.com/carrier/docview?nid=SE0000744065>.

Lacalle Marcos, G. (2020). Evaluación e implementación de LTE-A/5G-NR para aplicaciones industriales Time-Critical. España.

Martel Silva, B. (2020). Impactos & Recomendaciones para el despliegue de las redes 5G en el mercado peruano. Lima, Perú.

Mostacero Agama, L. (2022). Análisis de la latencia del servicio de internet y su impacto en las aplicaciones de internet de las cosas (IoT). Perú.

OSIPTEL. (2020). *Estimación del número de estaciones base celular para atender la demanda de servicios móviles en el Perú al año 2025*. Lima.

Paz Perona, C. (2022). *openaccess.uoc.edu*. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/home>.

Quintana Ramírez, I. (2022). Técnica de optimización de parámetros de red para la mejora de la calidad de servicio en servicios IP. Zaragoza, España.

Sanchoyerto Martinez, A. (2021). Análisis del despliegue de Comunicaciones de Misión Crítica sobre redes 4G y 5G. Pais Vasco.

Sequiera Villareal, L. (2021). El impacto del buffer en la calidad del servicio. España.

CAPITULO VIII: APÉNDICE

Apéndice A Datasheet ATN910C-B



Figura A1. Equipo router ATN910C-B. Fuente. Datasheet Huawei

ATN 910C Specifications	
Interface capability	• ATN 910C-A: 4x10GE+8xFE/GE/10GE+16xFE/GE(O) • ATN 910C-B: 4x10GE+8xFE/GE/10GE+8xFE/GE(O)+ 8xFE/GE(E) • ATN 910C-D: 4x10GE+8xFE/GE/10GE+8xFE/GE(E)+16E1
Power consumption	• 87 W (maximum), 69 W (typical)
Voltage	• DC: -48 V to -60V, AC: 100 V to 240 V
Weight	• 4.9 kg (dual-AC power supply), 4.7 kg (dual-DC power supply)
L2 features	• IEEE802.1q、IEEE802.1p、IEEE 802.3ad、IEEE 802.1ab • STP/RSTP/MSTP
L3 features	• OSPFv2/V3、RIPv2、IS-IS/IS-ISv6、BGPv4/BGPV4+、IPv4 ACL/Telnet、6VPE, and static route protocol • Dynamic ARP,static ARP,VLANIF interface and VxLAN,EVPN function
MPLS features	• Segment Routing,LDP, RSVP-TE, L2VPN(VPLS, HVPLS, and VLL), L3VPN, and seamless MPLS
Multicast	• IGMP v1/v2/v3、IGMP Snooping、Static Multicast Routing、PIM-SM/SSM、MBGP
QoS	• WRED, three-level HQoS, and queues of eight priorities per interface
Clock	• Atom GPS + 1588v2(G.8275.1) , 1588ATR(G.8275.2), 1588 ACR(G.8265.1), and synchronous Ethernet clock
OAM	• IPFFPM、ETH OAM (EFM、CFM、Y.1731)、BFD、NQA、RFC 2544、Y.1564、TWAMP
OGM	• DHCP Plug & Play DCN Plug&Play
Temperature	• -40℃ to +65℃
Humidity	• 5% RH to 95% RH, non-condensing

Figura A2 Datasheet del router ATN910C-B. Fuente. Datasheet Huawei

Apéndice B Datasheet NetEngine 8000 M14



Figura B1 Equipo router NetEngine 8000 M14. Fuente. Datasheet Huawei

Item	Specification
Cabinet installation standards	ETSI 21-inch; IEC 19-inch
Dimensions without packaging (H x W x D) [mm(in.)]	222 mm x 442 mm x 220 mm (8.74 in. x 17.40 in. x 8.66 in.)
Dimensions with packaging (H x W x D) [mm(in.)]	505 mm x 590 mm x 390 mm (19.88 in. x 23.23 in. x 15.35 in.)
Chassis height [U]	5U
Weight without packaging [kg(lb)]	10.1 kg (22.27 lb)
Weight with packaging [kg(lb)]	21.1 kg (46.52 lb)
Weight without packaging (full configuration) [kg(lb)]	[IPU-2T/IPU-2T-B]DC:28.5 kg(62.84 lb) [IPU-1T2/IPU-1T2-B]DC:28.5 kg(62.84 lb) [IPU-1T2-A/IPU-1T2-BN]DC:25.6 kg(56.44 lb) NOTE The weight of a device can be estimated based on the board configuration using Info-Finder Hardware Configuration.
Weight with packaging (full configuration) [kg(lb)]	[IPU-2T/IPU-2T-B]DC:39.5 kg(87.08 lb) [IPU-1T2/IPU-1T2-B]DC:39.5 kg(87.08 lb) [IPU-1T2-A/IPU-1T2-BN]DC:36.6 kg(80.69 lb)
Typical power consumption (with configuration) [W]	[IPU-2T/IPU-2T-B]DC: 1*fan+2*DC power+2*IPU +2*CR5DE2NE4X14+1*CR5D00E8XM25 +3*CR5D00LAXF91+1*CR5D00EAGF95= 905.6 W [IPU-1T2/IPU-1T2-B]DC: 1*fan+2*DC power+2*IPU +2*CR5DE2NE4X14+3*CR5D00LAXF91+ 2*CR5D00EAGF95=875.15 W [IPU-1T2-A/IPU-1T2-BN]DC: 1*fan +2*DC power+2*IPU +2*CR5D0E5XMF94+2*CR5D00LAXF91 +2*CR5D00EAGF70=454.12 W NOTE The power consumption of a device can be estimated based on the board configuration using Info-Finder Hardware Configuration.
Typical heat dissipation (with configuration) [BTU/hour]	[IPU-2T/IPU-2T-B]DC: 1*fan+2*DC power+2*IPU +2*CR5DE2NE4X14+1*CR5D00E8XM25 +3*CR5D00LAXF91+1*CR5D00EAGF95= 2859.5 BTU/hour [IPU-1T2/IPU-1T2-B]DC: 1*fan+2*DC power+2*IPU +2*CR5DE2NE4X14+3*CR5D00LAXF91+ 2*CR5D00EAGF95=2761.75 BTU/hour [IPU-1T2-A/IPU-1T2-BN]DC: 1*fan +2*DC power+2*IPU +2*CR5D0E5XMF94+2*CR5D00LAXF91 +2*CR5D00EAGF70=933.94 BTU/hour
MTBF [year]	147.1 year
MTTR [hour]	0.5 hour
Availability	0.999999612
Power supply mode	DC
Rated input voltage [V]	-48 V/-60 V
Input voltage range [V]	-40 V to -72 V
Maximum input current [A]	60 A
Rated output power [W]	2400 W
Maximum input cable size [mm²]	16mm², 10mm² (0-14meters) recommended, 16mm² (15-23meters) recommended

Figura B2 Dataheet de router NetEngine 8000 M14. Fuente. Datasheet Huawei

Apéndice C Datasheet de equipos físicos del Gestor NCE

Hardware Device	Requirement	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Height (U)	Weight (kg)	Max Power Consumption (W)	Input Voltage (V)/Current (A)	External Power Supplies	Heat Emission (BTU/H)
2288X V5 (384 GB) NOTE: This model is used only in enterprise network scenarios.	- CPUs: 2 x Xeon Gold 5220R (2.2GHz, 24 Core) - Memories: 12 x 32 GB DDR4 - Hard disks: 12 x 1200 GB SAS HDD - RAID card: Avago3508 (2 GB cache)/MSCC SmartRAID 3152 (2 GB cache) - NICs: 2 x 4 GE electrical ports + 2 x 2 10GE/25GE	447	748	86.1	2	30.5	648.98	- AC: 900W platinum power supply: 100 V to 240 V, 11 A to 5.5A - DC: -48V to -60V, 32A	2	2170.11

Figura C1 Datasheet de 2288X V5 Rack Server. Fuente. Datasheet Huawei

Hardware Device	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Weight (kg)	Max Power Consumption (W)	Input Voltage (V)/Current (A)	External Power Supplies	Heat Emission (BTU/H)
E9000 chassis	442	840	530.2	70	676.47 (Fully configure fan modules.)	100 V to 130 V AC (50 Hz to 60 Hz), 10 A 200 V to 220 V AC (50 Hz to 60 Hz), 10 A 220 V to 240 V AC (50 Hz to 60 Hz), 10 A	6	2308.12
CH121 V5	210	537.2	60.46	6.5	379.86	- NOTE: No external power supply is required for computing nodes.	-	1296.08
OceanStor 5500 V5 (128 GB cache, 25 x 2.4 TB SAS)	447	448	86.1	40	782	100 V to 240 V, AC±10%, 10 A, single-phase, 50/60 Hz Supports dual-live line input (2 W+PE), 200 V to 240 V, AC±10% High-voltage DC (not supported in North America and Canada): 240 V, DC±20%, 10 A	2	2668.18
OceanStor 5500 V5 (disk enclosure, 24 x 10 TB NLSAS)	447	488	175	45	582	100 V to 240 V AC, AC±10%, 10 A, single-phase, 50/60 Hz High-voltage DC (not supported in North America and Canada): 240 V, DC±20%, 10 A	2	1437.13
S5320 switch	442	220	43.6	3.9	29.5	100 V to 240 V AC (50 Hz to 60 Hz), 2 A	1	100.9

Figura C2 Datasheet de E9000 Blade Server. Fuente: Datasheet Huawei