



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

Evaluación de la Red de Banda Ancha en Ica: Emulación y Estimación de Demanda de Localidades Rurales

Para optar el título profesional de
INGENIERIA ELECTRONICA

Elaborado **por:**

Bach. Ubaldo Miller Sacramento, Villegas Avellaneda

Bach. Jesus Angel, Olivos Ortiz

ASESOR

Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.

ORCID: 0000-0002-0103-7222

LAMBAYEQUE-PERÚ

2026

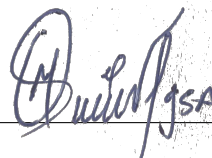
UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Evaluación de la Red de Banda Ancha en Ica: Emulación y
Estimación de Demanda de Localidades Rurales

Autores:

Bach. Ubaldo Miller Sacramento, Villegas

Avellaneda





Bach. Jesus Angel, Olivos Ortiz

Asesor:

Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.



LAMBAYEQUE - PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Evaluación de la Red de Banda Ancha en Ica: Emulación y

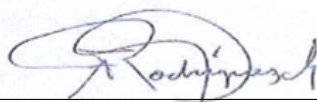
Estimación de Demanda de Localidades Rurales

Tesis Para optar el título profesional

INGENIERIA ELECTRONICA



M.Sc. Hugo Javier, Chiclayo Padilla
Presidente



Dr. Frank Richard Rodriguez Chirinos.
Secretario



Mg. Ing. Carlos Leonardo, Oblitsa Vera
Vocal

LAMBAYEQUE - PERÚ

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria – Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 88.-2025.-D/FACFyM

Siendo las 12:00 m del día 17 DE DICIEMBRE del 2025, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"EVALUACIÓN DE LA RED DE BANDA ANCHA EN ICA: EMULACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DEMANDA DE LOCALIDADES RURALES"

Designados por Resolución N° 141 - 2024 D/FACFyM de fecha 02 DE FEBRERO 2024

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

- M. SC. ING. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA Presidente
- M. SC. ING. FRANK RICHARD RODRÍGUEZ CHIRINOS Secretario
- MTRO. ING. CARLOS LEONARDO OBLITAS VERA Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M. SC. ING. SEGUNDO FRANCISCO SEGURA ALTAMIRANO, nombrado por Resolución N° 141 - 2024 D/FACFyM de fecha 02 DE FEBRERO 2024

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 1111 - 2025 D/FACFyM de fecha 24 DE NOVIEMBRE DE 2025

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): VILLEGAS AVELLANEDA UBALDO MILLER SACRAMENTO Y OLIVOS ORTIZ JESÚS ÁNGEL y tuvo una duración de 60 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de QUINCE (15) en la escala vigesimal, mención (REGULAR).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de INGENIERO ELECTRONICO, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 1:00 PM se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Msc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla
 Presidente

DR. ING. FRANK RICHARD RODRÍGUEZ CHIRINOS
 Secretario

Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
 Vocal

MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
 Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR

Yo, **SEGURA ALTAMIRANO SEGUNDO FRANCISCO**, Identificado con Documento de Identidad N° 09922587; usuario revisor del documento titulado “EVALUACIÓN DE LA RED DE BANDA ANCHA EN ICA: EMULACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DEMANDA DE LOCALIDADES RURALES”, Cuyos autores son: Bach. Villegas Avellaneda Ubaldo Miller Sacramento y Olivos Ortiz Jesus Angel, declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de 8 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 06 de enero de 2025

Segura Altamirano Segundo Francisco
DNI: 09922587





Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Ubaldo Miller/jesus Angel Villegas Avellaneda/olivos Ortiz
Assignment title: Quick Submit
Submission title: Tesis Final
File name: tesisEmulacionICA.pdf
File size: 4.1M
Page count: 93
Word count: 19,419
Character count: 104,307
Submission date: 10-Nov-2024 04:30PM (UTC-0500)
Submission ID: 2514738166

 UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA 

TESIS

**Evaluación de la Red de Banda Ancha en Ica: Emulación y
Estimación de Demanda de Localidades Rurales**

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

Presentado por:


Bach. Ubaldo Miller Sacramento, Villegas Avellaneda
Bach. Jesus Angel, Olivos Ortíz

Asesor:

Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.

LAMBAYEQUE-PERÚ

2023



Segura Altamirano Segundo Francisco
DNI: 09922587

Tesis Final

ORIGINALITY REPORT

8%

SIMILARITY INDEX

7%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

MATCH ALL SOURCES (ONLY SELECTED SOURCE PRINTED)

7%

★ hdl.handle.net

Internet Source

Exclude quotes Off

Exclude matches < 15 words

Exclude bibliography On



Segura Altamirano Segundo Francisco
DNI: 09922587

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a Dios por la vida, la fortaleza y las bendiciones que me han permitido llegar hasta aquí.

A mis padres, Francisca Ortiz Paz y Segundo Hilario Olivos Valle, por su amor incondicional, enseñanzas y sacrificios, que han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional.

A mis hermanos, René, Ely, Samuel, Yeny, Saúl, Vila, Eliú, Eny, Gilberto, Deybi, Kelly y Lelia, por su apoyo constante y por ser una fuente de motivación.

A mis profesores, quienes con sus enseñanzas y visión crítica me han ayudado a crecer como persona y profesional. En especial, al Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano, mi asesor de tesis, por su guía y compromiso en este trabajo.

Finalmente, agradezco al Bach. Miller Villegas Avellaneda, mi compañero de tesis, por su amistad, dedicación y optimismo, que fueron clave para superar los desafíos de este proyecto.

Gracias por todo.

Bach. Jesus Angel, Olivos Ortiz

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2024

Con este trabajo, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien me ha brindado la vida y la fortaleza necesarias para concluir esta etapa tan importante y significativa. Su guía y presencia constante han sido fundamentales a lo largo de mi camino.

Extiendo mi gratitud a todas las personas e instituciones que, de una u otra forma, han contribuido a este logro académico.

Agradezco profundamente a mis padres y a toda mi familia por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi inspiración en cada paso que he dado. Mi gratitud también se dirige a las instituciones educativas que formaron los cimientos de mi aprendizaje: la Institución Educativa Inicial y Primaria N.º 11114 - Picuy, la Institución Educativa Secundaria “San Agustín” - Catache, y, por supuesto, la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de mi querida Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, donde he tenido el privilegio de crecer profesional y personalmente.

Quiero expresar un especial agradecimiento al profesor Segundo Francisco Segura Altamirano, mi asesor de tesis, por su dedicación, guía y sabios consejos, que han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Finalmente, reconozco y agradezco a mi amigo y compañero de tesis, Jesus Angel Olivos Ortiz, por su amistad, compañerismo y valiosa contribución a este proyecto. Este logro también es suyo. A todos ustedes, mi eterno agradecimiento por haber formado parte de este recorrido.

Gracias por todo.
Bach. Ubaldo Miller Sacramento, Villegas Avellaneda
Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2024

Dedicatoria

Mi tesis la dedico a DIOS y a toda mi familia.

A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.

A mis padres Francisca Ortiz Paz y Segundo Hilario Olivos Valle, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí. Gracias porque me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento, porque me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado.

A cada uno de mis hermanos como son Rene Olivos Ortiz, Ely Olivos Ortiz, Samuel Olivos Ortiz, Yeny Olivos Ortiz, Saul Olivos Ortiz, Vila Olivos Ortiz, Eliu Olivos Ortiz, Eny Olivos Ortiz, Gilberto Olivos Ortiz, Deybi Olivos Ortiz, Kelly Olivos Ortiz y Lelia Olivos Ortiz, gracias por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis profesores por confiar en mí, su trato humano y su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida me ayudaron a formarme como profesional y como persona.

A mi asesor de tesis el Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano por hacer posible esta tesis.

Y, por último, pero no menos importante, estaré eternamente agradecido a mi compañero de trabajo, Bach. Miller Villegas Avellaneda. Para mí es el mejor compañero que se pueden tener. El ambiente de trabajo creado es simplemente perfecto, y su visión, motivación y optimismo me han ayudado en momentos muy críticos de la Tesis.

Para ellos,

muchas gracias por todo.

Bach. Jesus Angel, Olivos Ortiz
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2024

A Dios y a la vida, por haberme dado las bendiciones más valiosas y hermosas que me motivan a seguir día a día. En primer lugar, dedico este trabajo a mi familia, a quienes les debo todo lo que soy.

A mi madre, Rosa Avellaneda Callirgos, quien me inculcó valores que han sido la base de mi formación y mi vida.

A mi padre, Edwin Daniel Villegas Dávila quien me enseñó la importancia de la responsabilidad y el esfuerzo diario para alcanzar nuestros sueños y objetivos. Gracias por su apoyo incondicional durante toda mi etapa universitaria y por ser mi inspiración constante.

A mi hermana, Derly Mileny Villegas Avellaneda, ejemplo de madurez y fortaleza a su corta edad, y quien ha sido un motivo más para avanzar.

A mi tío, Ciro Avellaneda Callirgos, quien me brindó su apoyo y consejos a pesar de las dificultades que enfrentaba.

A mis profesores quienes han sido una guía compartiendo sus conocimientos y experiencias, a mis compañeros, quienes más que colegas fueron confidentes, amigos de gran apoyo en este camino, gracias por todos los momentos, por los trabajos en equipo y por cada ocurrencia, momentos que estoy seguro siempre se recordarán.

Y finalmente, a mi querido pueblo, que siempre llevo en el corazón, Picuy, el lugar que me vio crecer y al que siempre llevaré en mi corazón.

Bach. Ubaldo Miller Sacramento, Villegas Avellaneda
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2024

Resumen

Este estudio aborda el desafío de evaluar el desempeño de redes de banda ancha en localidades rurales de Ica, Perú, donde la brecha digital limita el desarrollo socioeconómico. El objetivo fue evaluar el rendimiento de una red de fibra óptica emulada considerando la demanda estimada en estas localidades. La metodología combinó análisis demográfico para estimar la demanda de conectividad, diseño de una red óptica con topología de anillo que integra infraestructura existente, y emulación mediante Mininet-optical para evaluar el desempeño bajo diferentes escenarios de tráfico. Los resultados revelaron que la red mantiene un rendimiento robusto en condiciones normales y de alta carga, con pérdidas de paquetes mínimas (0.25 % y 1.25 % respectivamente) y valores de jitter controlados (1.07ms y 3.41ms), aunque muestra degradación significativa en escenarios de congestión (3.47 % de pérdida) y degradación (7.56 %). Se concluye que la arquitectura propuesta satisface efectivamente la demanda estimada, manteniendo un rendimiento estable bajo diversas condiciones operativas, y establece una base sólida para el desarrollo de infraestructura digital rural, aunque requiere optimizaciones para escenarios de alta congestión.

Palabras clave: redes de banda ancha, red de acceso.

Abstract

This study addresses the challenge of assessing the performance of broadband networks in rural areas of Ica, Peru, where the digital divide limits socioeconomic development. The objective was to evaluate the performance of an emulated fiber optic network considering the estimated demand in these locations. The methodology combined demographic analysis to estimate connectivity demand, design of a ring topology optical network integrating existing infrastructure, and emulation using Mininet-optical to evaluate performance under different traffic scenarios. The results revealed that the network maintains robust performance under normal and high load conditions, with minimal packet loss (0.25 % and 1.25 % respectively) and controlled jitter values (1.07ms and 3.41ms), although it shows significant degradation in congestion (3.47 % loss) and degradation scenarios (7.56 %). It is concluded that the proposed architecture effectively meets the estimated demand, maintaining stable performance under various operating conditions, and establishes a solid foundation for the development of rural digital infrastructure, although it requires optimizations for high congestion scenarios.

Key words: broadband networks, access network.

Índice general

Reconocimientos	v
Dedicatoria	viii
Resumen	xii
Abstract	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de Tablas	xviii
Introducción	xix
1. Capítulo I	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema de investigación	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos de la investigación	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
2. Capítulo II: Marco Teórico	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales	6

2.2.	Bases Teóricas	7
2.2.1.	Redes de Banda Ancha de Fibra Óptica	7
2.2.2.	Componentes Ópticos	9
2.2.2.1.	Transmisores Ópticos	9
2.2.2.2.	Receptores Ópticos	11
2.2.2.3.	Consideraciones Adicionales	12
2.2.2.4.	Topologías de Anillo	13
2.3.	Región Ica - Estudio de Demanda	15
2.3.1.	Estimación de la Demanda	18
2.3.1.1.	Procedimiento de Estimación de Demanda	18
2.3.1.2.	Ancho de Banda y Simultaneidad	19
2.3.1.3.	Demanda de Conectividad para Instituciones Públicas	20
2.3.2.	Planificación de la Red y Estructura de Enlaces	20
2.4.	Bases Conceptuales	21
2.4.1.	Variables	21
2.4.1.1.	Variable independiente	21
2.4.1.2.	Variable dependiente	23
2.4.2.	Operacionalización de variables	23
3.	Capítulo III: Marco Metodológico	25
3.1.	Contraste de Hipótesis	25
3.2.	Población y Muestra	25
3.3.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	26

4. Capítulo IV: Resultados	28
4.1. Análisis Demográfico y Demanda Estimada	28
4.1.1. Estimación de Demanda	31
4.1.1.1. Análisis Estadístico de la Demanda por Provincia	32
4.1.1.2. Análisis Estadístico de la Demanda por Distrito	32
4.1.1.3. Análisis Estadístico de la Demanda por Localidad	33
4.2. Red de Banda Ancha Óptica	36
4.2.1. Diseño de Anillo de Banda Ancha	37
4.2.2. Presupuesto de Enlaces	40
4.3. Evaluación de Desempeño de Red Emulada	44
4.3.1. Emulación de Red de Banda Ancha de Ica	45
4.3.2. Desempeño de Red Emulada	46
4.3.2.1. Análisis Descriptivo	49
5. Capítulo V: Conclusiones	57
6. Recomendaciones, Limitaciones y Brechas para el futuro	59
APPENDICES	62
Código utilizado	63
.1. Código Red Emulada de Ica	63
.2. Generador de Tráfico	71

Índice de figuras

2.1. Infraestructura de Red - Región Ica	22
4.1. Distribución y Densidad de Población	29
4.2. Distribución y Densidad del Tiempo de Viaje	29
4.3. Relación entre Logaritmo de Población y Tiempo de Viaje con Densidad de Dis- persión y Línea de Tendencia	30
4.4. Distribución de Velocidades Totales por Provincia	33
4.5. Distribución de Velocidades Totales por Distrito	34
4.6. Distribución de Velocidades por Localidad	35
4.7. Demanda y Distancia entre Nodos Ópticos	38
4.8. Capacidad de Enlaces y Distancia	39
4.9. Capacidad de Enlaces y Distancia del Anillo Óptico	40
4.10. Capacidad de Enlaces y Distancia Red Total	41
4.11. Grafica del Red Emulada	47
4.12. Matriz de Correlación entre Métricas	53
4.13. Comparación de Ancho de Banda Esperado vs Logrado	56

Índice de Tablas

2.1. Características Relevantes para la Selección de Cable de Fibra Óptica en Aplicaciones de Banda Ancha	8
2.2. Comparación de Tipos de Fibra Óptica para Redes de Banda Ancha	9
2.3. Operacionalización de Variables	24
4.1. Resultados Parciales de Estimación de Demanda	31
4.2. Presupuesto de Enlace para Ramal Superior - ver Figura 4.10	43
4.3. Presupuesto de Enlace para Ramal Inferior - ver Figura 4.10	43
4.4. Presupuesto Enlace de Anillo - ver Figura 4.10	44
4.5. Resultados Parciales de Funcionamiento de Red Emulada	49
4.6. Promedios de Desempeño por Escenario	51
4.7. Análisis Descriptivo de Pérdida de Paquetes por Escenario	51

Introducción

La brecha digital en zonas rurales representa uno de los mayores obstáculos para el desarrollo socioeconómico en países en vías de desarrollo. En el Perú, esta realidad se manifiesta claramente en regiones como Ica, donde las localidades rurales enfrentan limitaciones significativas en su acceso a servicios de internet de alta velocidad, afectando directamente oportunidades educativas, económicas y de acceso a servicios básicos.

El gobierno peruano ha implementado la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO) como parte de una estrategia nacional para mejorar la conectividad. Sin embargo, el verdadero desafío radica en extender estos servicios desde las capitales regionales hasta las localidades rurales más remotas. Este "último tramo" de conectividad resulta crucial pero complejo, tanto por los retos técnicos como por la necesidad de garantizar la sostenibilidad económica de estas implementaciones.

La región Ica presenta un caso de estudio particularmente interesante. Con una población rural dispersa y una geografía variada, ofrece un escenario ideal para evaluar soluciones de conectividad rural. La región cuenta con infraestructura existente, como redes viales y líneas de media tensión, que podrían aprovecharse para el despliegue de fibra óptica, reduciendo costos y tiempos de implementación.

Un aspecto crítico y frecuentemente pasado por alto en el diseño de estas redes es la evaluación realista de su desempeño antes de la implementación física. Las simulaciones tradicionales suelen ser limitadas, ya que no consideran la interacción dinámica entre el tráfico de red y las características físicas de la fibra óptica. La emulación, por otro lado, permite una aproximación más cercana al

comportamiento real de la red, incluyendo aspectos como la latencia, pérdida de paquetes y variaciones en la calidad de la señal.

Esta investigación propone un enfoque innovador que combina la estimación precisa de la demanda con la emulación avanzada de redes ópticas. Utilizando datos demográficos y socioeconómicos actualizados, se desarrolla un modelo de demanda que considera no solo la población actual sino también el crecimiento potencial y las necesidades específicas de instituciones públicas como escuelas y centros de salud. Esta información se utiliza luego para diseñar una red de fibra óptica que aprovecha la infraestructura existente y se adapta a las características geográficas de la región.

La emulación de la red mediante herramientas como Mininet-optical permite evaluar su desempeño bajo diferentes escenarios de tráfico y condiciones de operación. Este enfoque proporciona insights valiosos sobre el comportamiento esperado de la red antes de su implementación física, permitiendo identificar y abordar potenciales cuellos de botella y optimizar el diseño para garantizar un servicio confiable y eficiente.

Los resultados de esta investigación no solo contribuyen al conocimiento académico en el campo de las redes rurales de banda ancha, sino que también ofrecen guías prácticas para la implementación de proyectos similares en otras regiones del Perú y países en desarrollo. La metodología propuesta puede adaptarse a diferentes contextos geográficos y socioeconómicos, proporcionando una herramienta valiosa para la planificación y evaluación de proyectos de conectividad rural.

Capítulo I

1.1. Situación problemática

En el Perú, se ha implementado una política nacional de banda ancha con el objetivo de proporcionar acceso a Internet de alta velocidad a las zonas rurales, buscando reducir la brecha digital y promover el desarrollo socioeconómico en estas áreas. Esta iniciativa se ha desarrollado en fases estratégicas para maximizar su impacto y eficiencia.

La primera fase de este ambicioso proyecto consistió en el despliegue de una Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO), que logró interconectar las capitales de las 24 regiones del país y la Provincia Constitucional del Callao. Este backbone nacional sienta las bases para una infraestructura de telecomunicaciones robusta y de alta capacidad.

Para la segunda fase, el plan contempla la construcción de Redes Regionales de Banda Ancha. Estas redes tienen como objetivo extender la conectividad desde las capitales regionales hasta las capitales de distrito mediante fibra óptica, y desde allí, alcanzar las localidades rurales más remotas. Este enfoque busca garantizar una cobertura más amplia y equitativa en todo el territorio nacional.

A pesar de la importancia de este proyecto y la existencia de numerosos estudios sobre la planificación de redes ópticas, se ha identificado una brecha significativa en la literatura: la falta de análisis detallados sobre el rendimiento real de estas redes una vez implementadas. Esta carencia se debe principalmente a las dificultades para acceder a datos operativos de los proveedores de servicios.

En respuesta a esta necesidad, la presente tesis propone un enfoque innovador. Primero, se plantea estimar la demanda de servicios de Internet en las localidades rurales de la región Ica, utilizando

modelos predictivos basados en datos socioeconómicos y demográficos. Luego, se procederá a analizar el rendimiento de la red de banda ancha de fibra óptica mediante simulaciones avanzadas.

Para este análisis, se emplearán herramientas de vanguardia como Mininet-óptica, un emulador de redes ópticas, y GNPY, una herramienta de planificación y diseño de redes ópticas. Estas simulaciones permitirán obtener métricas de desempeño cruciales, como latencia, throughput, pérdida de paquetes y calidad de señal óptica.

Los resultados de estas simulaciones se contrastarán con la demanda estimada, lo que proporcionará insights valiosos sobre la capacidad de la red para satisfacer las necesidades de las comunidades rurales. Basándose en este análisis, se formularán recomendaciones específicas sobre la selección de equipos y la capacidad requerida para los enlaces de la red.

Este enfoque no solo contribuirá al conocimiento académico en el campo de las redes de telecomunicaciones rurales, sino que también ofrecerá orientaciones prácticas para optimizar el despliegue y la operación de estas redes vitales. Ulteriormente, este estudio aspira a impulsar la eficacia de las políticas de conectividad rural en el Perú y servir como modelo para iniciativas similares en otros países en desarrollo.

1.2. Formulación del problema de investigación

¿Cómo evaluar el desempeño de una red de banda ancha de fibra óptica emulada que tome en cuenta la demanda estimada de las localidades rurales de la región Ica?

1.3. Hipótesis

Si se emula una red de banda ancha de fibra óptica para la región Ica utilizando mininet-optical, entonces será posible evaluar el desempeño de la red en relación con la demanda estimada en las localidades rurales, proporcionando una representación precisa de las necesidades y capacidades

de la red.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño de una red de banda ancha de fibra óptica emulada considerando la demanda estimada de las localidades rurales de la región Ica.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Estimar la demanda de banda ancha en las localidades rurales de la región Ica, mediante el análisis de información demográfica e indicadores socioeconómicos relevantes, utilizando modelos y técnicas de análisis de datos.
2. Diseñar una red de banda ancha óptica que satisfaga la demanda estimada, optimizando el uso de la infraestructura eléctrica existente y considerando las características geográficas y topológicas de la región Ica, para garantizar una cobertura eficiente y sostenible.
3. Evaluar el desempeño de la red de banda ancha óptica diseñada, mediante la emulación con Mininet-optical, analizando parámetros clave como latencia, throughput y pérdida de paquetes, y contrastando los resultados con la demanda estimada para validar la eficacia del diseño propuesto.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

El crecimiento exponencial del tráfico de Internet, impulsado por aplicaciones como la realidad virtual, videoconferencias y streaming de video en alta definición, ha puesto de manifiesto la necesidad de redes ópticas eficientes para manejar grandes volúmenes de datos en largas distancias. Este escenario plantea desafíos significativos para la planificación y optimización de redes, especialmente en áreas rurales donde la infraestructura de comunicaciones a menudo es limitada.

En este contexto, las Redes Definidas por Software (SDN) han emergido como una solución prometedora para mejorar la eficiencia, confiabilidad, flexibilidad y rendimiento de las redes ópticas. Lantz et al., 2020 demostraron el potencial de las SDN en redes ópticas de paquetes mediante la emulación con Mininet-Optical y controladores ONOS SDN. Esta aproximación permite una gestión más dinámica y adaptable de los recursos de red, crucial para satisfacer las demandas cambiantes en entornos rurales.

Para facilitar la investigación y desarrollo en este campo, se han desarrollado herramientas de emulación y visualización. Khalid et al., 2017 presentaron MiniNAM, una utilidad que ofrece animaciones en tiempo real de redes creadas con Mininet, permitiendo la visualización y modificación de flujos de red a través de una interfaz gráfica. Esta herramienta se ha vuelto esencial para la depuración de protocolos y la enseñanza de conceptos de redes, contribuyendo a una mejor comprensión y diseño de soluciones de red.

La planificación y optimización de redes ópticas para futuros escenarios de demanda, como

las redes 5G, requieren un enfoque integral. Moreno-Muro et al. (2019) abordaron este desafío, enfatizando la importancia del diseño optimizado, el control programable mediante SDN y la posible introducción de multiplexación por división espacial para aumentar la capacidad de manejo del tráfico IP. Estos avances son particularmente relevantes para mejorar la conectividad en áreas rurales, donde la infraestructura existente puede ser limitada.

En el ámbito de la emulación de redes ópticas, Lantz et al., 2020 utilizaron Mininet-Optical para emular una red óptica multicapa, validada con la herramienta de planificación de código abierto GNPY. Este enfoque permite examinar cómo los controladores SDN responden a patrones de tráfico diario, proporcionando insights valiosos para el diseño y la gestión de redes en entornos rurales.

En (Diaz-Montiel et al., 2021) indican que las métricas de calidad de transmisión se emplean para predecir y evaluar el desempeño de sistemas ópticos, adquiriendo relevancia actualmente debido al control en tiempo real proporcionado por las redes definidas por software (SDN). Esto garantiza que el plano de control dinámico mejora el rendimiento de las rutas al interactuar con los dispositivos de monitoreo óptico en la red. Debido a las dificultades de implementación en sistemas a gran escala, se desarrolla una simulación de una red óptica que incorpora el modelamiento de transmisión física usando el emulador Mininet, permitiendo así el desarrollo y evaluación del plano de control óptico que depende del rendimiento de la transmisión. Se ha logrado incluir 70 amplificadores de línea y 15 nodos ROADM, con mejoras en QoT en 3dB.

Ram y Chakraborty, 2024 realizaron un estudio comparativo del rendimiento de diferentes controladores SDN (POX y Ryu) en redes cableadas e inalámbricas, utilizando diversas topologías. Sus resultados, que mostraron un mejor rendimiento general del controlador Ryu, ofrecen información crucial para la selección e implementación de soluciones SDN en redes de banda ancha rurales.

Finalmente, Jurkiewicz, 2023 abordó la necesidad de topologías de red realistas para la inves-

tigación en networking, presentando TopoHub, un repositorio abierto de topologías de referencia basadas en el modelo de grafo Gabriel. Esta contribución es particularmente valiosa para la evaluación de redes de banda ancha en áreas rurales, ya que permite la comparación y reproducibilidad de experimentos en topologías de diferentes tamaños y características.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Según Lozada & Cenzano, (2021), desde el 2012 se esta desarrollando la Red Nacional de Banda Ancha del Perú con mas de 40 mil Km de fibra para redes de transporte y acceso en los proyectos regionales y desde un analisis prospectivo de diversos escenarios futuros plantea una combinación de estado operadores con tecnologías de vanguardia y servicios de valor agregado como la mejor alternativa para un mayor uso de la red, siendo importante llevar acciones ahora para incentivar el uso de las redes nacionales.

Tambien Cueva & Santamaria (2024) proponen una red de anillo óptico de transporte de 97.7Km con 4 nodos de distribución óptica y 5 nodos de acceso para cubrir la demanda de 146 centros poblados de Sánchez Carrión, La Libertad, pero solo muestran resultados de desempeño de las redes de acceso inalámbricas y no de las redes ópticas.

Mamani, (2023) indica que el acceso a internet en el Perú es escaso debdio al alto costo del servicio, ademdas de la baja cobertura de banda ancha, siendo este un servicio indispensable en el quehacer diario, por lo que analiza una muestra de 142 396 hogares desde la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH) estableciendo que los determinantes socio-económicos que influyen al acceso de internet son el ingreso del hogar, los años de educación del jefe de hogar y pobreza

Por esa razón consideramos importante la evaluación de la red de banda ancha en Ica y la estimación de la demanda en localidades rurales, estas investigaciones proporcionan un marco

sólido para abordar los desafíos específicos de la región. La combinación de técnicas de emulación avanzadas, herramientas de visualización, y modelos de topología realistas permite un análisis más preciso y una planificación más efectiva de la infraestructura de red necesaria para satisfacer las necesidades de conectividad en áreas rurales. Además, la integración de tecnologías SDN ofrece la flexibilidad necesaria para adaptar la red a las demandas cambiantes y maximizar la eficiencia de los recursos disponibles.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Redes de Banda Ancha de Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión que usa luz en lugar de señales eléctricas. Para esto se basa en la reflexión total interna. Como en todo medio de transmisión, existe atenuación que depende de la longitud de onda de la luz en nm o μm (en el caso de señales eléctricas, se usa como parámetro de atenuación la frecuencia en Hz, MHz o GHz). Esta atenuación depende del tipo de fibra, existiendo dos tipos, pero en este trabajo nos concentraremos en la fibra óptica monomodo que permite altas velocidades (Banda Ancha) en grandes distancias (de pocos kilómetros a cientos de kilómetros). También la atenuación depende del valor de la longitud de onda (conocidas como ventanas, y para la fibra monomodo se usan la segunda ventana de 1310nm y la tercera ventana de 1550nm).

Adicionalmente, se toma en cuenta la macroflexión, que es la deformación que puede sufrir el cable de fibra óptica durante su instalación, de tal manera que el estándar ITU-T G.657 establece los límites para distintas aplicaciones. Uno de los fenómenos que más limita la velocidad y alcance de las redes con fibra óptica es la dispersión, que es el ensanchamiento de los pulsos de luz a medida que viajan por la fibra. Por lo tanto, en un diseño determinado se deben tomar en cuenta también

los parámetros de dispersión.

El ITU-T, en los estándares G.652 a G.657, describe los diferentes tipos de fibra óptica junto con sus características relevantes para el diseño, como la dispersión cromática y la PMD (Dispersión por Modo de Polarización), muy importantes al momento de seleccionar el cable de fibra óptica para una solución particular.

Basado en esto podemos resumir en la Tabla 2.1 las características a tomar en cuenta a la hora de seleccionar el cable de fibra óptica para la solución de banda ancha

Tabla 2.1

Características Relevantes para la Selección de Cable de Fibra Óptica en Aplicaciones de Banda Ancha

Característica	Descripción	Importancia
Tipo de fibra	Monomodo (G.652, G.657) o multimodo (G.651.1)	Determina la capacidad de ancho de banda y la distancia de transmisión
Atenuación	Pérdida de señal óptica por kilómetro (dB/km)	Afecta la distancia máxima de transmisión y el espaciado de los amplificadores
Dispersión cromática	Ensanchamiento de los pulsos de luz	Limita el ancho de banda y la distancia de transmisión
PMD (Dispersión por Modo de Polarización)	Variación en la velocidad de propagación de las polarizaciones de la luz	Causa ensanchamiento de pulso y degradación de la señal a altas velocidades
Radio de curvatura mínimo	Radio mínimo permitido para doblar el cable sin causar pérdidas significativas	Importante para instalaciones con limitaciones de espacio
Pérdida por macroflexión	Pérdida de señal óptica debido a curvaturas del cable	Afecta el rendimiento en instalaciones con curvas cerradas
Resistencia a la tracción	Resistencia mecánica del cable a la tensión	Importante durante la instalación y para garantizar la fiabilidad a largo plazo
Compatibilidad con estándares	Cumplimiento de las normas ITU-T	relevantes para garantizar la interoperabilidad

En el desarrollo de esta industria se ha mejorado constantemente el proceso de fabricación del cable de fibra óptica, lo que ha permitido disminuir algunas no linealidades, mejorar su comportamiento ante las macroflexiones y microflexiones. Esto ha conllevado a mejorar su desempeño

a altas velocidades y grandes distancias. Así, en la Tabla 2.2 tenemos una comparación entre los distintos tipos de cables de fibra óptica monomodo que cumplen con las características relevantes de la Tabla 2.1, pero mejoran otros aspectos. Esto facilita la selección de un cable que no solo cumpla la demanda a mediano plazo sino también las mejoras a largo plazo.

Tabla 2.2

Comparación de Tipos de Fibra Óptica para Redes de Banda Ancha

Estándar	Dispersión Cromática	PMD	Atenuación	Pérdida por Macroflexión	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
G.652	Alta en 1550 nm	Baja	Baja en 1310 nm y 1550 nm	Moderada	Redes de larga distancia, sistemas WDM, redes metropolitanas, FTTH	Bajo costo, fácil instalación	Alta dispersión en 1550 nm, limita la distancia a altas velocidades
G.653	Desplazada en 1550 nm	Muy baja	Baja en 1550 nm	Moderada	Sistemas WDM de alta velocidad, redes submarinas	Baja dispersión en 1550 nm, permite largas distancias sin compensación	Alto costo, requiere equipos especiales
G.657	Similar a G.652, baja pérdida por flexión	Baja	Baja	Muy baja	FTTH, instalaciones con curvas cerradas, redes de alta densidad	Excelente resistencia a la flexión, radios de curvatura pequeños	Costo alto
G.654	Muy baja	Baja	Muy baja en 1550 nm	Modificada para mejorar OSNR	Sistemas de alta capacidad y larga distancia, especialmente submarinos	Muy baja atenuación, ideal para largas distancias	Costo alto, posible incompatibilidad con otros tipos de fibra
G.655	Baja en 1530-1565 nm	Muy baja en G.655.C, Baja	Baja	Variable	Sistemas DWDM de larga distancia y alta velocidad	Baja dispersión en 1530-1565 nm, ideal para DWDM	Requiere gestión de dispersión, puede ser costosa
G.656	No cero en 1460-1625 nm	Baja	Baja	No especificado	Sistemas WDM de banda ancha, especialmente en 1460-1625 nm	Buena atenuación, adecuada para WDM de banda ancha	Poca información disponible sobre sus características en comparación con otros tipos

2.2.2. Componentes Ópticos

Los componentes ópticos son elementos fundamentales en los sistemas de comunicación por fibra óptica. En esta sección, nos centraremos en dos componentes críticos: los transmisores y los receptores ópticos.

2.2.2.1. Transmisores Ópticos

Los transmisores ópticos son dispositivos que convierten señales eléctricas en señales ópticas para su transmisión a través de la fibra óptica. Dos parámetros clave de los transmisores ópticos son:

Potencia de Transmisión La potencia de transmisión es un factor crítico en el diseño de enlaces ópticos, ya que determina la distancia máxima que puede alcanzar la señal antes de requerir

amplificación, las potencias de salida típicas de los láseres para operación de larga distancia están entre 0 y +17 dBm

Varios factores influyen en la potencia de transmisión requerida:

- Atenuación de la fibra
- Pérdidas en conectores y empalmes
- Sensibilidad del receptor

Es importante notar que una potencia de transmisión demasiado alta puede generar efectos no lineales en la fibra, mientras que una potencia demasiado baja resultará en una señal débil en el receptor.

Ancho de Banda El ancho de banda de un transmisor óptico se refiere al rango de frecuencias o longitudes de onda que puede transmitir eficazmente. En sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), el ancho de banda del transmisor debe ser lo suficientemente amplio como para acomodar múltiples canales ópticos espaciados estrechamente.

El ancho de línea del láser utilizado en el transmisor es un factor determinante del ancho de banda. Los láseres DFB (Distributed Feedback) y DBR (Distributed Bragg Reflector) son preferidos en sistemas DWDM debido a su estrecho ancho de línea.

Esquemas de Modulación El esquema de modulación afecta significativamente el ancho de banda del transmisor y la capacidad de datos del sistema:

- NRZ (Non-Return-to-Zero) se utiliza en transceptores de menor velocidad (10G, 25G, 40G)
- PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4-level) se emplea en sistemas de 100G, permitiendo duplicar la capacidad sin aumentar la velocidad de señalización

2.2.2.2. Receptores Ópticos

Los receptores ópticos son dispositivos que convierten las señales ópticas recibidas en señales eléctricas. Los parámetros clave de los receptores ópticos incluyen:

Sensibilidad del Receptor La sensibilidad del receptor, denotada como R , se define como la potencia óptica mínima que el receptor puede detectar para lograr una tasa de error de bits (BER) específica. Una mayor sensibilidad permite distancias de transmisión más largas o un mayor presupuesto de pérdidas en el enlace.

La sensibilidad se ve afectada por varios tipos de ruido:

- Ruido térmico
- Ruido de disparo
- Ruido de corriente oscura en el fotodiodo

Rango Dinámico El rango dinámico de un receptor óptico se define como la diferencia entre la potencia óptica mínima y máxima que el receptor puede procesar sin degradación significativa del rendimiento. Un rango dinámico amplio es deseable para acomodar variaciones en la potencia de la señal recibida debido a la atenuación variable del enlace y otros factores.

Recuperación de Reloj Los receptores ópticos suelen incluir circuitos de recuperación de reloj (CDR, Clock and Data Recovery) para sincronizar la señal recibida con la velocidad de datos original. La capacidad del receptor para recuperar el reloj con precisión es crucial para minimizar los errores de bit, especialmente a altas velocidades de transmisión.

Tipos de Receptores Los dos tipos principales de fotodiodos utilizados en los receptores ópticos son:

- PIN (Positive-Intrinsic-Negative)
- APD (Avalanche Photodiode)

Los APDs ofrecen mayor sensibilidad que los PIN, pero también introducen más ruido.

2.2.2.3. Consideraciones Adicionales

Efectos de Ruido El ruido en los sistemas de comunicación óptica limita la sensibilidad del receptor y la distancia de transmisión. Las fuentes de ruido incluyen:

- Ruido térmico
- Ruido de disparo
- Ruido de corriente oscura en el fotodiodo
- Ruido de emisión espontánea amplificada (ASE) de los amplificadores ópticos

Interoperabilidad Al seleccionar transmisores y receptores ópticos, es esencial garantizar la compatibilidad con los estándares de la industria y la interoperabilidad con otros equipos de red. Por ejemplo, los transceptores QSFP-100G utilizan cuatro longitudes de onda específicas en cada dirección, espaciadas aproximadamente 4,5 nm, con una banda de guarda de 1291 nm.

Corrección de Errores y Monitoreo Los transceptores modernos, como los QSFP-100G-B20U4-I y QSFP-100G-B20D4-I, incluyen características avanzadas como:

- Corrección de errores RS-FEC (Reed-Solomon Forward Error Correction)
- Monitoreo óptico digital (DOM, Digital Optical Monitoring)

Estas características mejoran la integridad de los datos y permiten un monitoreo en tiempo real del rendimiento del enlace óptico.

2.2.2.4. Topologías de Anillo

La topología de anillo representa una estructura de red fundamental en el diseño de redes ópticas modernas. En esta configuración, cada nodo se conecta a otros dos nodos adyacentes, formando una ruta circular para la transmisión de datos. Esta disposición ofrece ventajas significativas en términos de redundancia, eficiencia y facilidad de gestión.

En una red de anillo, los datos viajan en una dirección predeterminada, pasando secuencialmente de un nodo a otro. Cada nodo actúa como un repetidor, recibiendo la señal, regenerándola o amplificándola, y transmitiéndola al siguiente nodo en la secuencia. Esta arquitectura permite una transmisión de datos eficiente y predecible. Una característica clave de la topología de anillo es su capacidad de autorecuperación. En caso de que un nodo o enlace falle, la red puede reconfigurarse rápidamente para redirigir el tráfico en la dirección opuesta, garantizando así la continuidad del servicio.

Las ventajas de la Topología de Anillo incluyen:

- **Alta disponibilidad:** La naturaleza redundante del anillo proporciona rutas alternativas para los datos, lo que aumenta significativamente la resiliencia de la red.
- **Facilidad de gestión:** En comparación con topologías más complejas como la malla, los anillos son más sencillos de configurar, mantener y administrar.
- **Determinismo:** La transmisión unidireccional en un anillo facilita la predicción de retrasos y la gestión eficiente del tráfico de red.

Tipos de Anillos

- **Anillo Unidireccional (UPSR):** En este tipo, los datos fluyen en una sola dirección. Se utiliza

un segundo anillo redundante como medida de protección contra fallos.

- **Anillo Bidireccional (BLSR):** Permite que los datos fluyan en ambas direcciones, optimizando el uso del ancho de banda disponible.
- **Anillo de Protección Compartida de Sección Multiplexada (MS-SPRing):** Utilizado en redes SDH, este tipo de anillo proporciona protección a múltiples secciones de línea de manera eficiente.

Consideraciones de Diseño Al implementar una topología de anillo en redes ópticas, es crucial tener en cuenta varios factores técnicos:

- **Pérdida por Atenuación:** La longitud total del anillo y los componentes pasivos como conectores y OADMs (Multiplexores Ópticos Add/Drop) contribuyen a la pérdida de señal, lo que debe calcularse cuidadosamente.
- **Dispersión:** Tanto la dispersión cromática como la dispersión por modo de polarización (PMD) pueden limitar la distancia de transmisión y la velocidad de datos alcanzable.
- **Escalabilidad:** La adición de nuevos nodos a un anillo puede afectar el rendimiento general debido al incremento en la atenuación y la dispersión.
- **Protección:** Es esencial implementar mecanismos de protección como UPSR, BLSR o SNCP para garantizar la alta disponibilidad del servicio en caso de fallos.

Aplicaciones La topología de anillo encuentra aplicación en diversos escenarios de redes ópticas:

- **Redes de Transporte:** Los anillos SDH y SONET son ampliamente utilizados en redes de transporte para proporcionar servicios de voz, datos y vídeo de alta calidad.

- Redes de Acceso Metropolitano: Los anillos de fibra óptica son ideales para ofrecer servicios de banda ancha a empresas y usuarios residenciales en áreas urbanas y suburbanas.
- Redes de Almacenamiento: La configuración en anillo puede emplearse para conectar dispositivos de almacenamiento, proporcionando una infraestructura de alta disponibilidad para centros de datos.

2.3. Región Ica - Estudio de Demanda

En el marco del proyecto de investigación sobre la Emulación de una Red de Banda Ancha en localidades rurales de la región de Ica, Perú, es necesario considerar el contexto histórico, geográfico y socioeconómico de la región, así como los factores específicos que afectan la adopción de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en las zonas rurales. La región de Ica, ubicada en la costa sur central del Perú y con una extensión de 21,328 km², posee un importante legado cultural que data de épocas preincaicas, y su historia ha sido moldeada por la influencia colonial y los desafíos que la región ha enfrentado, incluyendo desastres naturales y conflictos históricos. Estas experiencias han forjado la resiliencia de su población, que en la actualidad se distribuye principalmente en zonas urbanas, lo cual ha llevado a la disminución de la población rural y, en consecuencia, a cambios en las opciones laborales.

La situación socioeconómica actual de Ica presenta tanto desafíos como oportunidades que afectan la implementación de una red de banda ancha. A pesar del crecimiento económico impulsado por sectores como la agricultura, la manufactura y la extracción de recursos naturales, la región enfrenta limitaciones en cuanto a la conectividad digital, particularmente en áreas rurales. El acceso a internet en Ica es inferior al promedio nacional, un hecho que representa una barrera considerable para el desarrollo y que acentúa las desigualdades en términos de acceso a la información, educación

y oportunidades laborales. La alta informalidad laboral y el déficit de habilidades digitales también plantean retos adicionales, lo que sugiere una necesidad urgente de mejorar la capacitación de la fuerza laboral y la infraestructura digital para favorecer el crecimiento inclusivo.

La infraestructura vial en Ica ha sido objeto de importantes inversiones, mejorando su conexión con la capital del país. Sin embargo, en términos de infraestructura de conectividad digital, persisten limitaciones, especialmente en las zonas rurales, donde la falta de datos precisos sobre la disponibilidad y calidad de los servicios de banda ancha complica la toma de decisiones estratégicas y limita el atractivo para la inversión en infraestructura digital. La experiencia internacional destaca que la inversión en banda ancha rural puede ser efectiva si se implementa mediante estrategias regionales, lo cual es relevante para Ica, donde se podría adoptar un enfoque similar para maximizar los beneficios sociales y económicos de una red de banda ancha.

Implementar una red de banda ancha en las zonas rurales de Ica, basada en la fibra óptica, no solo podría mejorar la conectividad, sino que también contribuiría a elevar la calidad de vida de sus habitantes. Para asegurar el éxito del proyecto, es crucial adoptar un enfoque de planificación estratégica que integre los aspectos históricos y socioeconómicos de la región. Los estudios sobre la adopción de TIC en áreas rurales, como el modelo UTAUT (Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología), proporcionan un marco útil para entender los determinantes que influyen en el uso de tecnologías digitales. Factores como la expectativa de rendimiento, la facilidad de uso percibida, la influencia social y las condiciones facilitadoras son esenciales para promover la aceptación de las TIC en estas comunidades. La expectativa de rendimiento destaca cómo las TIC pueden mejorar la educación y las oportunidades laborales en las áreas rurales, mientras que la expectativa de esfuerzo refleja la necesidad de una interfaz accesible y amigable. A su vez, la influencia social y la disponibilidad de infraestructura adecuada, como centros de acceso público bien equipados, son

cruciales para fomentar la adopción de las TIC.

Sin embargo, también es necesario considerar desafíos adicionales, como la percepción de corrupción en la gestión de centros públicos de acceso, que puede reducir la participación y confianza de los usuarios. Asimismo, la falta de programas de capacitación en habilidades digitales y la exclusión comunitaria en la toma de decisiones sobre la planificación de banda ancha son factores que pueden limitar la aceptación de las TIC. Estos elementos subrayan la importancia de involucrar a la comunidad rural de Ica en todas las etapas del proyecto, desde la planificación hasta la implementación.

La brecha digital en Ica refleja las desigualdades en el acceso y uso de las TIC, especialmente en las zonas rurales. Esta brecha está influenciada por la falta de infraestructura, la baja capacidad económica de ciertos hogares y la falta de habilidades digitales. Superar esta barrera es fundamental para que el acceso a internet de alta velocidad promueva el desarrollo económico y social en las áreas rurales, brindando oportunidades de educación, empleo y comercio electrónico, y mejorando la calidad de vida mediante el acceso a servicios de salud y entretenimiento en línea.

A nivel global, diversos países han implementado políticas para promover la expansión de la banda ancha en áreas rurales. En Canadá y Estados Unidos, por ejemplo, existen objetivos ambiciosos para la conectividad rural y programas de financiamiento para la construcción de infraestructura. Sin embargo, estos programas no siempre logran el impacto deseado debido a limitaciones en la participación de proveedores o restricciones estatales que dificultan la disponibilidad de banda ancha municipal o cooperativa. Estas experiencias internacionales brindan lecciones valiosas para el proyecto en Ica, donde sería recomendable desarrollar políticas locales que promuevan la inversión público-privada y aseguren una conectividad inclusiva y de calidad.

La implementación de una red de banda ancha en las zonas rurales de Ica requiere una pla-

nificación adecuada que considere no solo los aspectos técnicos, sino también las necesidades y condiciones específicas de la región. Es imperativo realizar un diagnóstico preciso de la demanda de banda ancha, la infraestructura disponible y las brechas digitales existentes, evaluando la viabilidad técnica y económica de la tecnología de fibra óptica. Promover la colaboración público-privada, implementar programas de capacitación digital y establecer un sistema de monitoreo y evaluación serán acciones clave para garantizar la sostenibilidad del proyecto y su impacto positivo en las comunidades rurales de Ica.

2.3.1. Estimación de la Demanda

La región de Ica, con una población dispersa en sus áreas rurales y una conectividad limitada, representa un escenario ideal para investigar la implementación de una red de banda ancha. En este proyecto de investigación, se realiza una estimación de la demanda de conectividad en 82 localidades rurales seleccionadas por el Programa Nacional de Telecomunicaciones (Pronatel). Estas localidades cumplen criterios clave de selección, como tener una población superior a 200 habitantes y contar con una institución pública, como un colegio, una comisaría o un centro de salud, lo cual permite que una red de banda ancha beneficie no solo al centro poblado principal sino también a las localidades cercanas que dependen de estos servicios.

2.3.1.1. Procedimiento de Estimación de Demanda

La metodología empleada para la estimación de demanda comienza con el análisis de la información demográfica y de vivienda de la región. Se consideran principalmente tres servicios de telecomunicaciones: internet fijo, telefonía fija y telefonía móvil. Para calcular el número potencial de usuarios, se utiliza la tasa de penetración actual de cada servicio en la región de Ica, que, de acuerdo con los datos disponibles, es de 0.95% para internet fijo y 0.06% para telefonía fija en

hogares. En cuanto a la telefonía móvil, se estima que aproximadamente el 60% de los usuarios en estas áreas poseen un teléfono inteligente de gama media o alta, lo que les permite acceder a planes de datos móviles.

En el caso del internet fijo, la demanda se calcula en función de la cantidad de hogares en cada localidad. Aplicando el porcentaje de penetración de 0.95%, se obtiene una estimación del número de hogares que probablemente solicitarán servicios de internet fijo. Para la telefonía fija, se estima que el 0.06% de los hogares usarán esta tecnología, reflejando la menor demanda en áreas rurales debido a la preferencia por la telefonía móvil.

La estimación de la demanda en telefonía móvil se realiza considerando tanto el porcentaje de usuarios con acceso a teléfonos móviles como la disponibilidad de dispositivos adecuados para conectarse a una red de banda ancha. Se estima que el 60% de la población de cada localidad podría utilizar servicios de datos móviles, lo cual permite tener un cálculo aproximado de usuarios potenciales para este servicio.

2.3.1.2. Ancho de Banda y Simultaneidad

Para estimar el ancho de banda necesario para cubrir la demanda en cada localidad, se utiliza el modelo de tráfico de Erlang, que permite calcular el número de canales de comunicación necesarios para satisfacer la demanda de servicios de voz, tanto en telefonía móvil como fija. En este contexto, los canales de voz requieren un ancho de banda mínimo, ya que cada canal consume aproximadamente 87 kbps, un dato que se utiliza para calcular el número total de troncales de comunicación de voz necesarias.

Para el acceso a internet, tanto en servicios fijos como móviles, se considera un factor de simultaneidad para estimar cuántos usuarios estarán conectados simultáneamente en cada localidad.

Esta simultaneidad se basa en los niveles de uso promedio de internet en zonas rurales. Una vez obtenido el número de usuarios simultáneos, se puede calcular la demanda de ancho de banda de cada localidad.

Según el último decreto ministerial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), la velocidad de descarga mínima para estas localidades debe ser de 20 Mbps y la velocidad de subida, de 7 Mbps. Esto garantiza que la red de banda ancha cumpla con los requisitos de calidad establecidos para las áreas rurales de Ica.

2.3.1.3. Demanda de Conectividad para Instituciones Públicas

Además de la demanda de los hogares y usuarios individuales, se considera la demanda específica de instituciones públicas en cada localidad. Este proyecto se enfoca en colegios, centros médicos y otras instituciones, y asegura una velocidad mínima para cada tipo de instalación. Los colegios requieren un mínimo de 30 Mbps, los centros médicos 24 Mbps y otras instituciones, como comisarías, 20 Mbps. Estos servicios para instituciones se ofrecen de manera simétrica, lo que significa que la velocidad de subida y descarga es igual, asegurando así un servicio de calidad para las funciones administrativas y operativas de cada institución.

2.3.2. Planificación de la Red y Estructura de Enlaces

El diseño de la red de banda ancha se basa en la infraestructura (Ver Fig. 2.1) existente y la demanda estimada. Se propone un anillo central de fibra óptica que conecta 16 de los 44 nodos principales, lo cual permite establecer una red troncal robusta para el tráfico de datos en la región. Los 28 nodos restantes se conectarán mediante ramales secundarios, optimizando la extensión de la red y asegurando la conectividad de acuerdo con los patrones de demanda. Este anillo central cubrirá tanto la parte superior como la inferior de la región, permitiendo que todas las localidades

seleccionadas tengan acceso a la red de banda ancha.

Para completar la red, se estima un total de 938 km de fibra óptica, distribuidos estratégicamente para cubrir cada localidad en función de la demanda de conectividad y de la infraestructura disponible. La capacidad de cada enlace óptico se determina según la demanda total de cada nodo, lo que garantiza que el ancho de banda se distribuya adecuadamente entre las diferentes localidades.

El proceso de estimación de demanda en Ica refleja una planificación cuidadosa y basada en los datos demográficos y de infraestructura de la región. La implementación de la red de banda ancha se adapta a la realidad de estas localidades rurales, considerando tanto la demanda de los usuarios individuales como de las instituciones públicas, y utilizando un enfoque de red que maximiza la eficiencia y cobertura en la región. La configuración final garantiza que cada localidad seleccionada tenga acceso a servicios de internet de alta calidad, facilitando el desarrollo socioeconómico en áreas rurales.

2.4. Bases Conceptuales

2.4.1. Variables

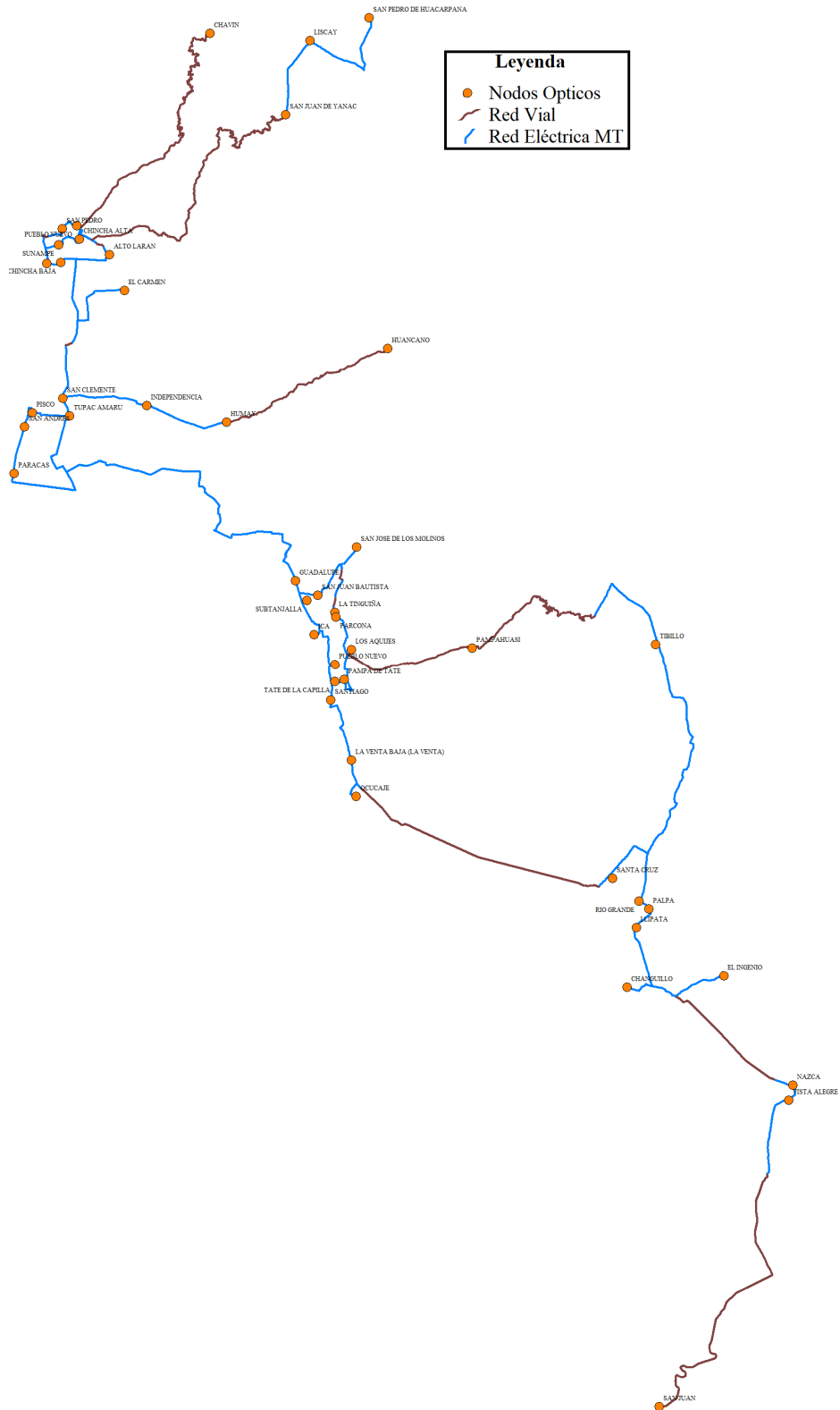
2.4.1.1. Variable independiente

Redes Ópticas Regionales Emuladas de Banda Ancha

Definición Conceptual: Las Redes Ópticas Regionales emuladas de banda ancha son sistemas de telecomunicaciones que utilizan la tecnología de fibra óptica para transmitir datos a alta velocidad en grandes distancias. Estas redes están diseñadas para proporcionar conectividad eficiente y sostenible en áreas rurales, optimizando el uso de infraestructura existente y adaptándose a la topografía de la región.

Figura 2.1

Infraestructura de Red - Región Ica



Definición Operacional: La variable se operacionaliza a través de la emulación de redes de banda ancha óptica en la región de Ica, simulando su arquitectura, tecnología y rendimiento mediante herramientas de software como Mininet-Optical y GNPY para evaluar su capacidad de satisfacer la demanda en localidades rurales.

2.4.1.2. Variable dependiente

Demanda Estimada de Servicios

Definición Conceptual: La demanda estimada de servicios se refiere al volumen proyectado de necesidades de conectividad en las localidades rurales, incluyendo internet, telefonía fija y móvil, calculado en función de datos demográficos y socioeconómicos.

Definición Operacional: Esta variable se define como la demanda proyectada de servicios de conectividad en las localidades rurales de Ica, basada en análisis demográficos y de vivienda. Incluye estimaciones de usuarios potenciales de cada servicio y sus requisitos de ancho de banda.

2.4.2. Operacionalización de variables

Ver Tabla 2.3.

Tabla 2.3*Operacionalización de Variables*

Variable	Dimensión	Indicador	Tipo
Redes Ópticas Regionales emuladas de Banda Ancha	Arquitectura de la Red	Tipo Topología	categórica
	Tecnologías	Tipo de fibra Tipo de equipamiento	categórica categórica
Demanda estimada de servicios	Datos Demográficos	Centros poblados	Numerica discreta
		Poblacion	Numerica discreta
		Vivienda	Numerica discreta
		Instituciones públicas	Numerica discreta
	Servicios proyectados	Upload	Numerica intervalo
		Download	Numerica intervalo
		Telefonica fija	Numerica intervalo
		Telefonia móvil	Numerica intervalo

Capítulo III: Marco Metodológico

3.1. Contraste de Hipótesis

La contrastación de la hipótesis seguirá los siguientes pasos:

- 1. Revisión Bibliográfica:** Se investigará y analizará la literatura existente sobre la emulación de redes ópticas, la demanda de banda ancha y técnicas relacionadas para establecer una base teórica sólida. Esto asegurará que la hipótesis esté alineada con la comprensión actual de la materia.
- 2. Caracterización de la Demanda:** Se recogerán y analizarán datos sobre la demanda estimada en las localidades rurales de la región Ica, utilizando indicadores específicos. Este análisis ayudará a confirmar o refutar la correlación entre la demanda y el diseño de la red.
- 3. Demanda con la Red Diseñada:** Los datos de demanda se combinarán con el diseño de la red de banda ancha óptica para validar que la red esté optimizada para satisfacer la demanda y comprobar si la integración respalda o desafía la hipótesis planteada.
- 4. Evaluación Mediante Emulación:** Consiste en emular la red planificada usando *mininet-optical* y evaluar su desempeño en comparación con la demanda estimada, permitiendo una contrastación final de la hipótesis y determinando si la red emulada refleja la demanda estimada en las condiciones deseadas.

3.2. Población y Muestra

- **Población:** La población incluye todas las localidades rurales de la región Ica, un conjunto completo de áreas que enfrentan desafíos particulares en términos de acceso y demanda de

banda ancha de fibra óptica.

- **Muestra:** La muestra comprende las localidades rurales seleccionadas de la región Ica, elegidas según los criterios de ruralidad establecidos por Pronatel.

3.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

■ Técnicas de Recolección de Datos

En la evaluación del desempeño de la red de banda ancha de fibra óptica emulada, se emplearán técnicas de recolección de datos cuantitativos. Para la recolección de datos de la red, se utilizarán la emulación y desempeño. Simultáneamente, la información demográfica y de demanda de las localidades rurales se obtendrá mediante la revisión de censos, encuestas y estudios de mercado. La combinación de estas técnicas permitirá una visión integral de la red y su correspondencia con la demanda estimada.

■ Instrumentos de Recolección

Los instrumentos utilizados en esta investigación incluyen el software *mininet-optical* para la emulación de la red, junto formatos de registro para capturar la velocidad de subida y bajada y otros indicadores de demanda. Además, se realizará una revisión documental de registros oficiales y bases de datos como instrumento crucial para recopilar datos demográficos y de vivienda en las localidades rurales.

■ Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos en esta investigación será meticuloso y detallado. Los datos recopilados se someterán a métodos estadísticos como análisis descriptivo, análisis de regresión, análisis de varianza y correlación. Estos métodos transformarán los datos en información significativa, revelando patrones y relaciones entre la demanda estimada y el desempeño de

la red. El uso de software estadístico será fundamental en este proceso para una manipulación precisa y eficiente de grandes conjuntos de datos.

Capítulo IV: Resultados

4.1. Análisis Demográfico y Demanda Estimada

El análisis de la distribución poblacional y tiempos de viaje en la región Ica, basado en datos del censo 2017, destaca patrones clave que caracterizan su realidad territorial. Con un enfoque en localidades rurales, se excluyeron poblaciones mayores a 2,000 y menores a 30 habitantes para evitar distorsiones. Este enfoque muestra una alta concentración de centros poblados con menos de 250 habitantes (Ver Fig. 4.1), revelando una distribución marcadamente asimétrica hacia valores bajos de población. Aproximadamente 240 centros se ubican en este rango, mientras que las frecuencias caen drásticamente en poblaciones mayores a 500 habitantes.

La curva de densidad en el histograma confirma esta tendencia, con un pico pronunciado en los valores más bajos y un descenso gradual hacia los altos. Esta estructura poblacional refleja una disposición en núcleos rurales pequeños, lo que conlleva desafíos en la provisión de servicios y el desarrollo de infraestructuras. Al excluir localidades grandes y aquellas con poblaciones cuestionablemente bajas, la metodología asegura una visión precisa de los centros rurales, objetivo prioritario de los proyectos de desarrollo.

En cuanto a los tiempos de viaje (Ver Fig. 4.2), se observa una distribución similarmente asimétrica. La mayoría de las localidades reportan tiempos de viaje al distrito capital inferiores a 50 minutos, con una concentración de 200 localidades en este rango y una rápida disminución en frecuencias conforme el tiempo de viaje aumenta. Esto sugiere que, aunque dispersas, muchas localidades mantienen accesibilidad razonable a los centros administrativos.

La gráfica de dispersión entre el logaritmo de la población y tiempo de viaje (Ver Fig. 4.3), con una

Figura 4.1

Distribución y Densidad de Población

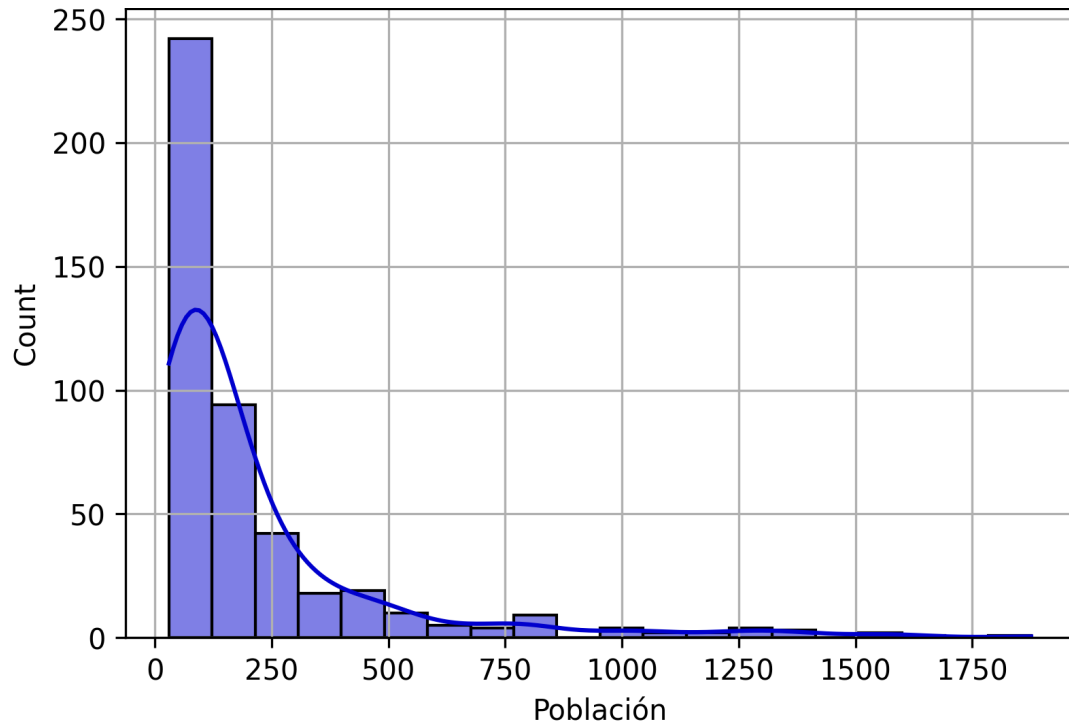


Figura 4.2

Distribución y Densidad del Tiempo de Viaje

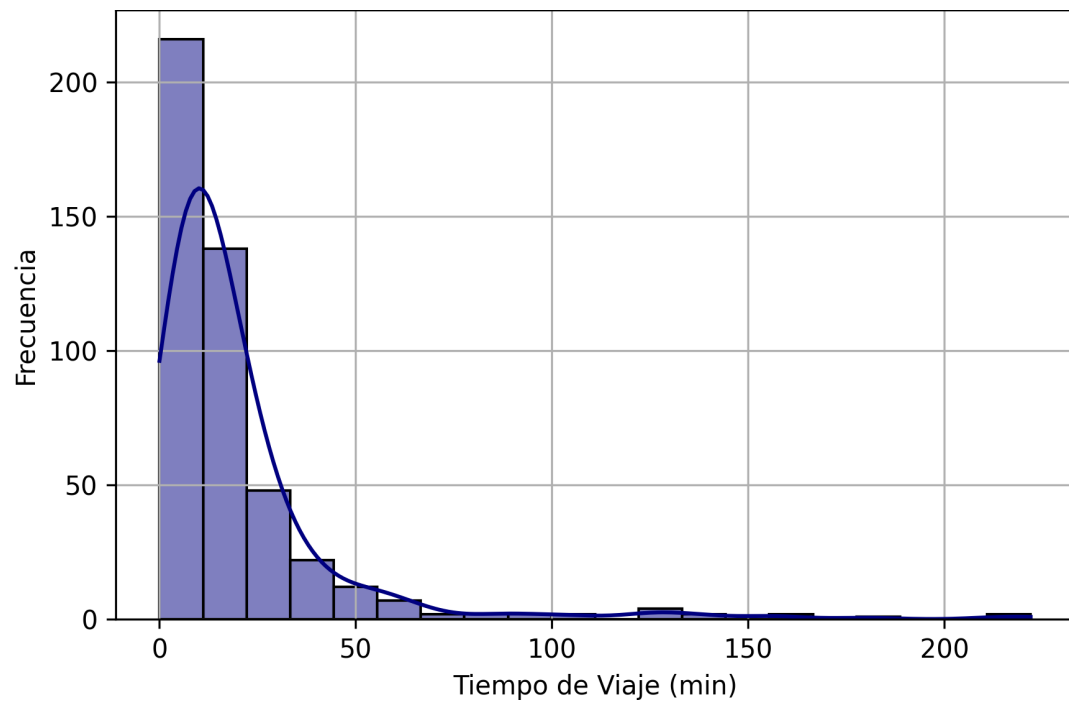
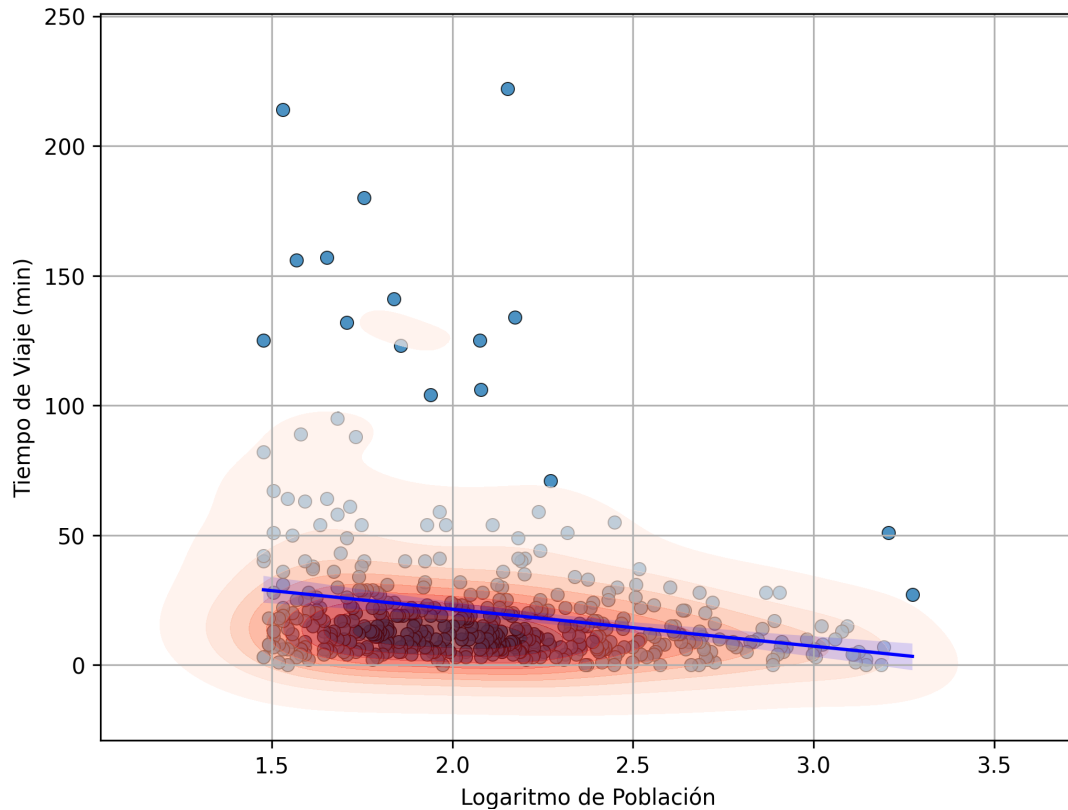


Figura 4.3

Relación entre Logaritmo de Población y Tiempo de Viaje con Densidad de Dispersión y Línea de Tendencia



escala logarítmica para revelar patrones ocultos, muestra una concentración de puntos en tiempos de viaje cortos y valores logarítmicos de población entre 1.5 y 3.0. La línea de tendencia azul refleja una ligera correlación negativa, indicando que las localidades más pobladas tienden a estar más próximas a los centros administrativos. Sin embargo, varios valores atípicos —comunidades con tiempos de viaje superiores a 150 minutos— subrayan la existencia de localidades más aisladas que enfrentan desafíos de accesibilidad. La densidad de dispersión visualizada en tonos rojizos resalta la concentración de observaciones en tiempos de viaje entre 0 y 30 minutos para poblaciones de entre 100 y 316 habitantes (logarítmico de 2.0 a 2.5). Esta representación visual no solo refuerza el análisis de los histogramas, sino que también facilita la identificación de patrones territoriales y la detección de casos con tiempos de viaje particularmente altos. Estos datos sugieren que, si bien una

mayor población tiende a correlacionarse con mejor accesibilidad, esta relación no es determinante; factores como la geografía, la infraestructura y la historia de asentamiento también influyen en los tiempos de viaje.

4.1.1. Estimación de Demanda

Los resultados obtenidos ofrecen un panorama completo de la velocidad de descarga y subida requerida para satisfacer la demanda de cada localidad, y se presentan en la Tabla 4.1 de demanda parcial. Esta tabla incluye también el número de instituciones públicas por localidad, las cuales requieren un ancho de banda mínimo para garantizar el funcionamiento adecuado de sus servicios. Adicionalmente, la Figura 2.1 proporciona una vista de la infraestructura óptica propuesta para la región, ubicando los nodos ópticos en función de la red vial existente (409 km) y las líneas de media tensión disponibles (529 km). Esta infraestructura de soporte permite planificar la red de manera estratégica para optimizar la cobertura y atender las demandas estimadas en cada localidad.

Tabla 4.1

Resultados Parciales de Estimación de Demanda

PROVINCIA	DISTRITO	LOCALIDAD	POBLACIÓN	VIVIENDA	INSTITUCIONES	DOWN(Mbps)	UP(Mbps)
ICA	SANTIAGO	AGUADA DE PALOS	532	185	1	471.1	145.4
CHINCHA	ALTO LARAN	ALTO LARAN	5728	2428	3	4520.9	1222.8
PISCO	HUMAY	BERNALES	2218	979	1	1753.3	476.0
PISCO	INDEPENDENCIA	CABEZA DE TORO LATERAL CINCO	531	144	1	451.1	138.3
NAZCA	CHANGUILLO	CABILDO	315	120	1	290.9	98.0
NAZCA	NAZCA	CAJUCA	2434	1040	1	1933.4	523.3
ICA	TATE	CALDERONES	1306	422	1	1052.1	293.6
ICA	PUEBLO NUEVO	CALLEJON DE LOS ESPINOS	502	173	1	451.1	140.4
PALPA	LLIPATA	CARLOS TIJERO	771	362	2	675.5	216.9
ICA	SANTIAGO	CASA BLANCA	3927	961	1	2994.9	788.2
CHINCHA	EL CARMEN	CHAMORRO	317	66	2	314.9	122.1
ICA	LA TINGUIÑA	CHANCHAJALLA	491	147	1	411.1	128.3
NAZCA	CHANGUILLO	CHANGUILLO	247	119	1	230.8	82.9
CHINCHA	CHAVIN	CHAVIN	502	106	1	431.1	133.3
NAZCA	CHANGUILLO	CHIQUERILLO	212	76	1	210.7	77.8
ICA	YAUCA DEL ROSARIO	COCHARCAS	74	71	1	110.5	52.5
CHINCHA	CHINCHA BAJA	COLLAZOS	403	114	1	351.0	113.1
NAZCA	VISTA ALEGRE	COPARA	208	163	2	230.7	97.9
ICA	OCUCAJE	CORDOVA	210	65	1	210.7	77.8
PISCO	HUMAY	CUCHILLA VIEJA	117	30	1	150.5	62.5
ICA	LOS AQUIJES	EL ARENAL	4536	1375	1	3495.5	920.0

4.1.1.1. Análisis Estadístico de la Demanda por Provincia

A nivel provincial, los datos muestran una distribución bimodal, lo que sugiere la existencia de dos grupos distintos de provincias en términos de velocidad total de demanda. En promedio, la demanda de ancho de banda a nivel provincial es alta, con una media de 12,637.60 Mbps. Sin embargo, la mediana es notablemente más baja, ubicada en 6,781.25 Mbps, lo que indica una distribución asimétrica hacia la derecha, donde algunas provincias acumulan velocidades significativamente superiores, generando una “cola larga” hacia los valores altos.

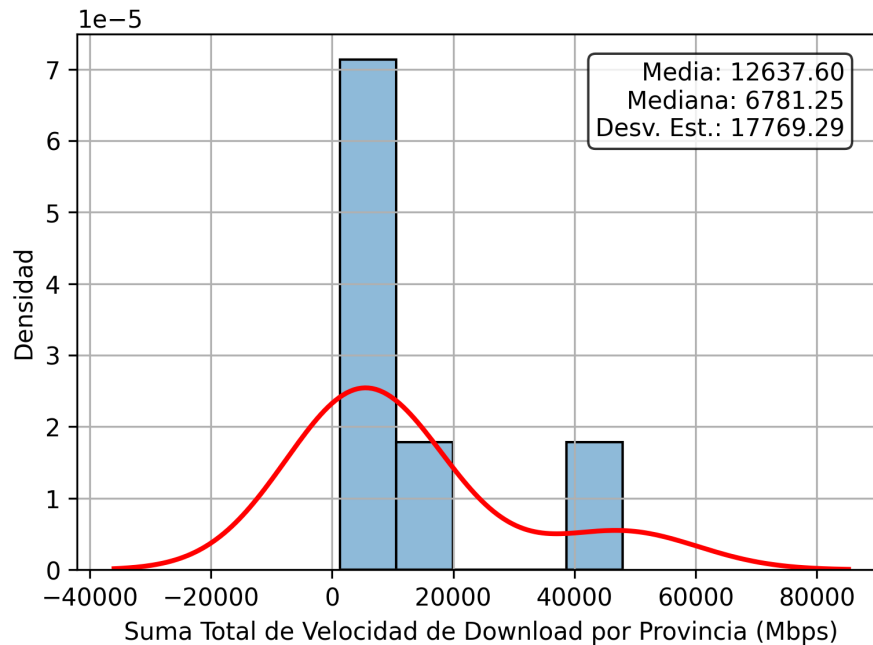
Esta distribución presenta una alta desviación estándar (17,769.29 Mbps), evidenciando una gran variabilidad entre las provincias. Mientras que algunas de ellas requieren velocidades totales muy elevadas (alrededor de 60,000 Mbps), otras demandan niveles mucho menores, cercanos a 0 Mbps. Estos resultados indican una disparidad considerable en términos de infraestructura de conectividad, sugiriendo que ciertas provincias concentran la mayor parte de la demanda, posiblemente debido a la densidad poblacional o la cantidad de instituciones públicas que requieren servicios de banda ancha. La Figura 4.4 ilustra esta distribución, destacando las provincias con mayor y menor demanda.

4.1.1.2. Análisis Estadístico de la Demanda por Distrito

En el nivel distrital, la distribución de la demanda presenta una asimetría positiva, es decir, una mayor concentración en valores bajos con una “cola larga” hacia la derecha. La media de la demanda por distrito es de 2,445.99 Mbps, casi el doble de la mediana, que se sitúa en 1,233.60 Mbps, lo cual refuerza el sesgo positivo. Este patrón sugiere que la mayoría de los distritos se concentran en un rango de demanda de ancho de banda bajo a medio (entre 0 y 5,000 Mbps), mientras que solo unos pocos distritos muestran una demanda significativamente alta, que supera los 10,000 Mbps y se presentan como casos atípicos.

Figura 4.4

Distribución de Velocidades Totales por Provincia



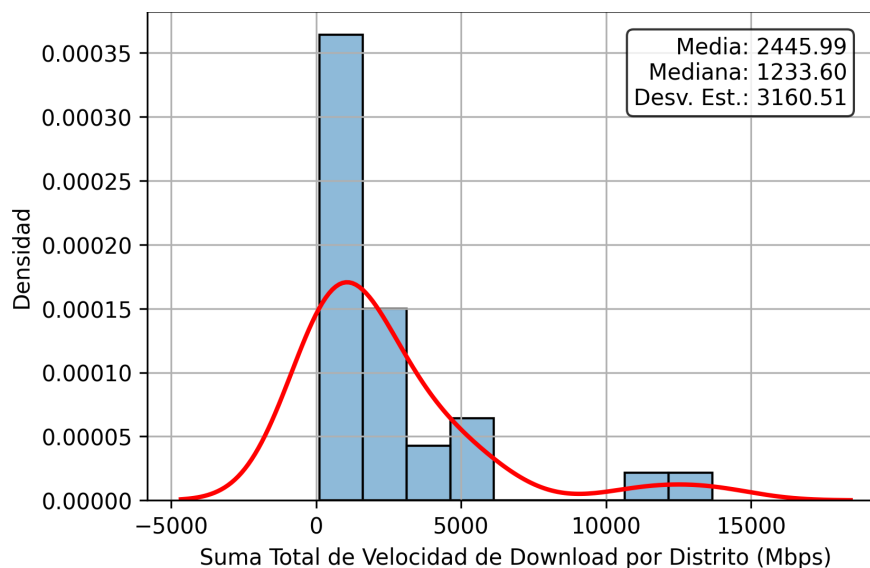
La desviación estándar de 3,160.51 Mbps indica una dispersión significativa entre los distritos en cuanto a su demanda de conectividad, mostrando que aquellos con mayores infraestructuras de internet y mayor densidad poblacional concentran la demanda de forma desigual en comparación con otros distritos con menor infraestructura y población. La Figura 4.5 permite visualizar esta distribución, resaltando los distritos que necesitan una infraestructura de red más robusta frente a aquellos con menores requerimientos de conectividad.

4.1.1.3. Análisis Estadístico de la Demanda por Localidad

A nivel de localidad, la demanda de ancho de banda presenta una distribución marcadamente asimétrica, con la mayoría de localidades concentradas en velocidades totales bajas. La media de la demanda es de 924.70 Mbps, más del doble de la mediana (413.10 Mbps), lo cual indica que existen localidades con demandas muy altas que elevan el promedio general. La mayoría de las localidades demandan un ancho de banda entre 0 y 2,000 Mbps, mientras que solo unas pocas

Figura 4.5

Distribución de Velocidades Totales por Distrito



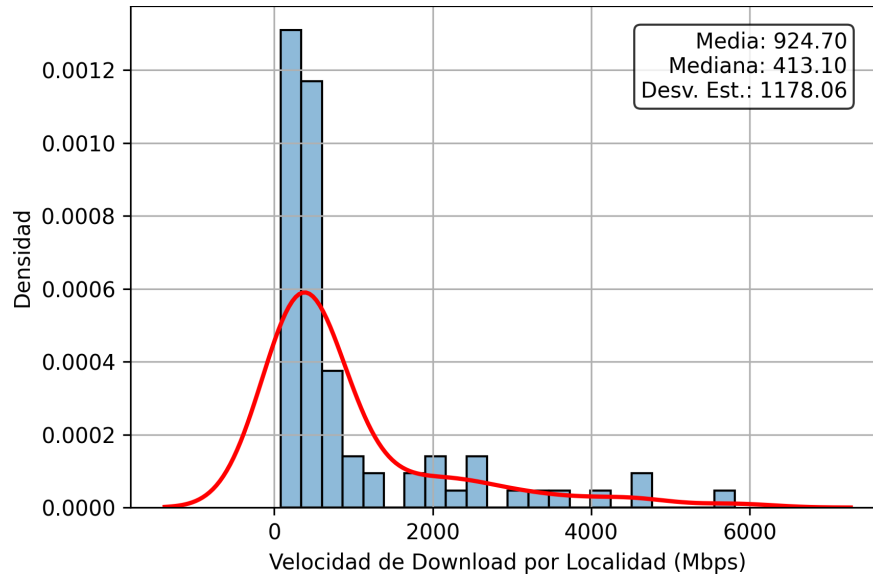
superan los 4,000 Mbps, considerándose estas últimas como casos atípicos.

La desviación estándar (1,178.06 Mbps) es elevada en relación con la media, lo cual sugiere una considerable variabilidad en la demanda de ancho de banda entre localidades. Este patrón puede deberse a la función que cumplen algunas localidades como centros poblacionales o comerciales, lo que incrementa su necesidad de conectividad, mientras que otras tienen requerimientos considerablemente menores. La Figura 4.6 ilustra esta distribución, mostrando la concentración de localidades con baja demanda y los pocos casos que requieren una infraestructura de conectividad robusta.

El análisis estadístico de la demanda de ancho de banda en la región de Ica revela una alta dispersión en todos los niveles (provincia, distrito y localidad), lo cual refleja la estructura demográfica dispersa y variada de las áreas rurales. Las provincias y distritos con mayores concentraciones de población y presencia de instituciones públicas tienden a concentrar la mayor parte de la demanda de ancho de banda, mientras que una mayoría de localidades presenta una demanda baja. Esta

Figura 4.6

Distribución de Velocidades por Localidad



distribución desigual subraya la necesidad de un enfoque de planificación de red flexible, que se centre en puntos de alta demanda pero que también proporcione conectividad básica para las zonas menos pobladas.

La disparidad en la demanda de ancho de banda entre provincias, distritos y localidades indica que se deben emplear estrategias de diseño de red adaptativas para garantizar una cobertura eficiente y equitativa en toda la región. Esto implica la implementación de un anillo de fibra óptica central que conecte los nodos principales en áreas de alta demanda, así como ramales secundarios para atender localidades con menores requerimientos de conectividad. Con esta configuración, es posible satisfacer tanto las necesidades de las áreas más pobladas como de aquellas con menor densidad, logrando así un proyecto de red de banda ancha que responda a la diversidad y variabilidad demográfica de la región de Ica.

4.2. Red de Banda Ancha Óptica

Para iniciar el diseño de la red de banda ancha óptica en la región de Ica, comenzamos evaluando la infraestructura existente y la demanda estimada. Esta demanda estimada (Ver Tabla 4.1) nos ayuda a determinar la capacidad de cada nodo de distribución óptico puesto que algunos de estos nodos abarcan varias localidades y consolidan la demanda total de cada área, mientras que la infraestructura existente (Ver Figura 2.1) nos facilita la ubicación de los nodos de distribución ópticos, además del medio de conexión físico ya sea mediante red vial o red eléctrica. En la Figura 4.7, se muestra cómo se ha consolidado la demanda de los nodos, en términos de velocidad de subida (U) como de bajada (D).

La infraestructura existente, representada en la Figura 2.1, nos proporciona información sobre las distancias en kilómetros entre los distintos nodos. Esta información es crucial para el diseño de la red, ya que permite calcular la longitud de los enlaces necesarios para conectar cada nodo con la capital de la región, Ica, que actúa como el punto de acceso a la red dorsal nacional.

Para facilitar la comprensión del diseño de la red, se presenta un gráfico en la Figura 4.8 que incluye la capacidad de los enlaces entre los diferentes nodos ópticos. Esta capacidad se obtiene acumulando la demanda estimada en cada nodo correspondiente.

El diseño de la red óptica de banda ancha se divide en dos etapas principales:

1. **Capacidad y distancia de los ramales:** El primer paso consiste en calcular la capacidad y la distancia de los distintos ramales que se conectan al anillo óptico. En la parte superior de la Figura 4.8, se muestra un ramal que conecta un total de 14 nodos ópticos, con una capacidad acumulada de 21 Gb, gestionada a través del nodo de Subtanjalla. En la parte inferior, hay un ramal que conecta 8 nodos con una capacidad de casi 7 Gb. El diseño de estos ramales puede

realizarse mediante inspección directa de la figura.

2. Diseño del anillo óptico: El diseño del anillo óptico es algo más complejo que el de los ramales y se explicará en el siguiente apartado.

4.2.1. Diseño de Anillo de Banda Ancha

Para iniciar el diseño del anillo de fibra óptica de la red de banda ancha en la región Ica, nos basamos en la Figura 4.8, donde se muestra el anillo aprovechando la infraestructura eléctrica y vial existente. En esta figura se detallan las distancias en kilómetros entre los diferentes nodos, así como la demanda estimada consolidada en Mbps para cada uno de ellos. El diseño del anillo contempla dos escenarios de flujo de datos:

1. Flujo en sentido horario:

- Se considera la capacidad estimada para el tráfico de descarga y subida
- Se calculan las capacidades de enlaces según la demanda de cada nodo

2. Flujo en sentido antihorario:

- Se realiza un cálculo similar al anterior
- Se estima la capacidad de cada enlace para cubrir la demanda completa de los nodos

Para garantizar que los nodos puedan manejar el tráfico incluso en caso de una ruptura del anillo en cualquier punto, se acumulan las capacidades estimadas considerando ambas direcciones. Este proceso nos permite:

- Determinar la capacidad final estimada de cada enlace

Figura 4.7

Demanda y Distancia entre Nodos Ópticos

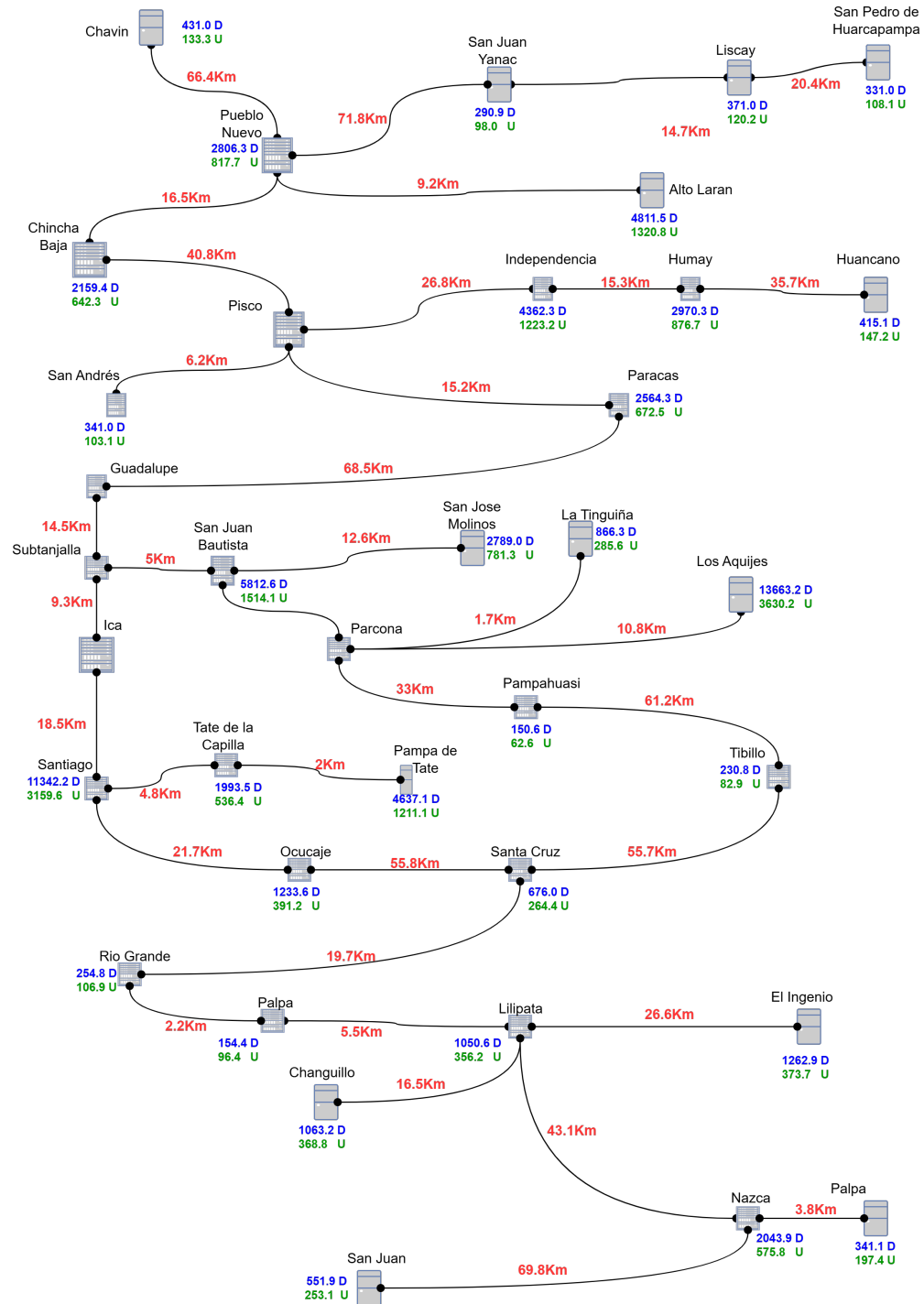


Figura 4.8

Capacidad de Enlaces y Distancia

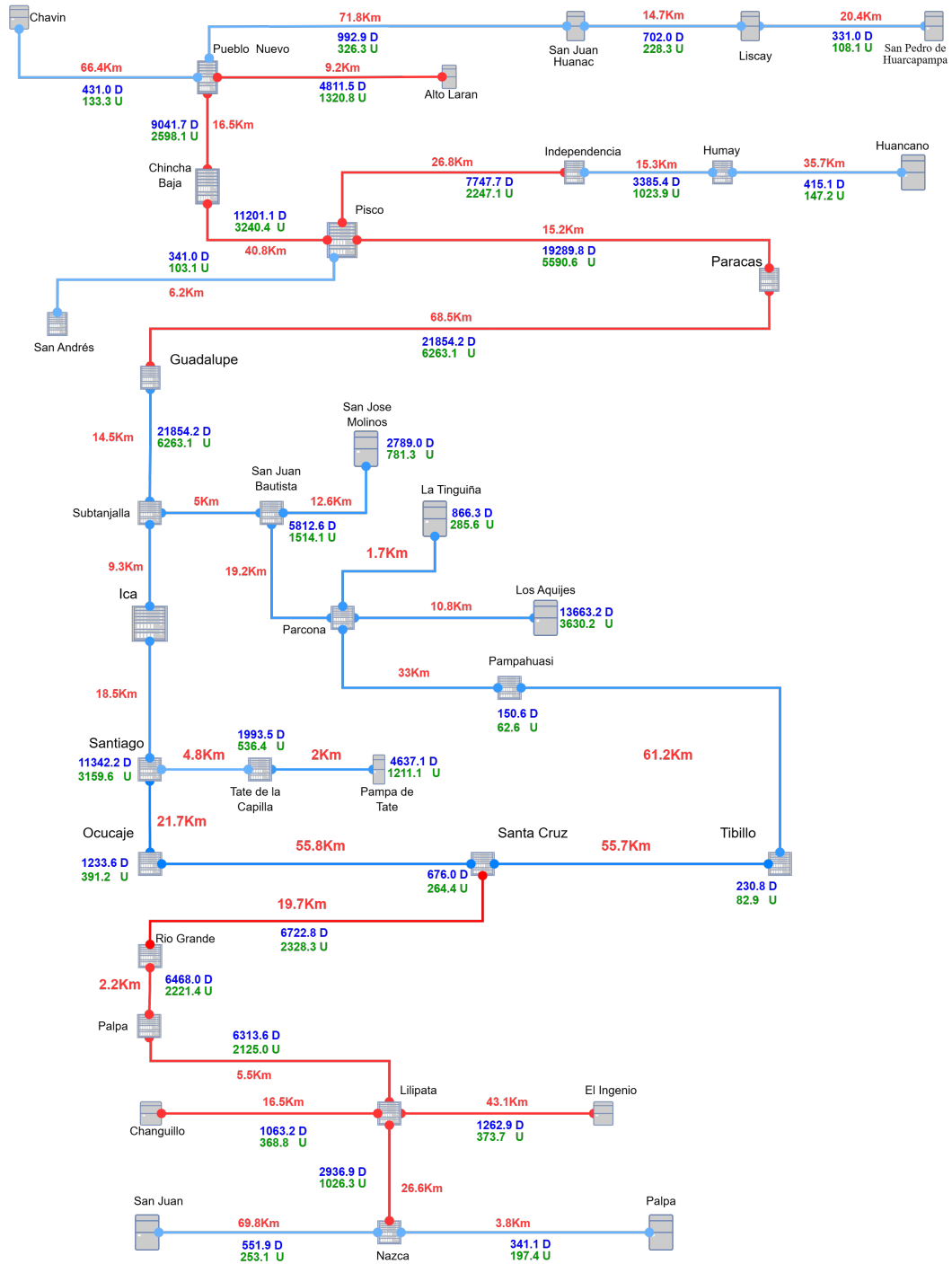
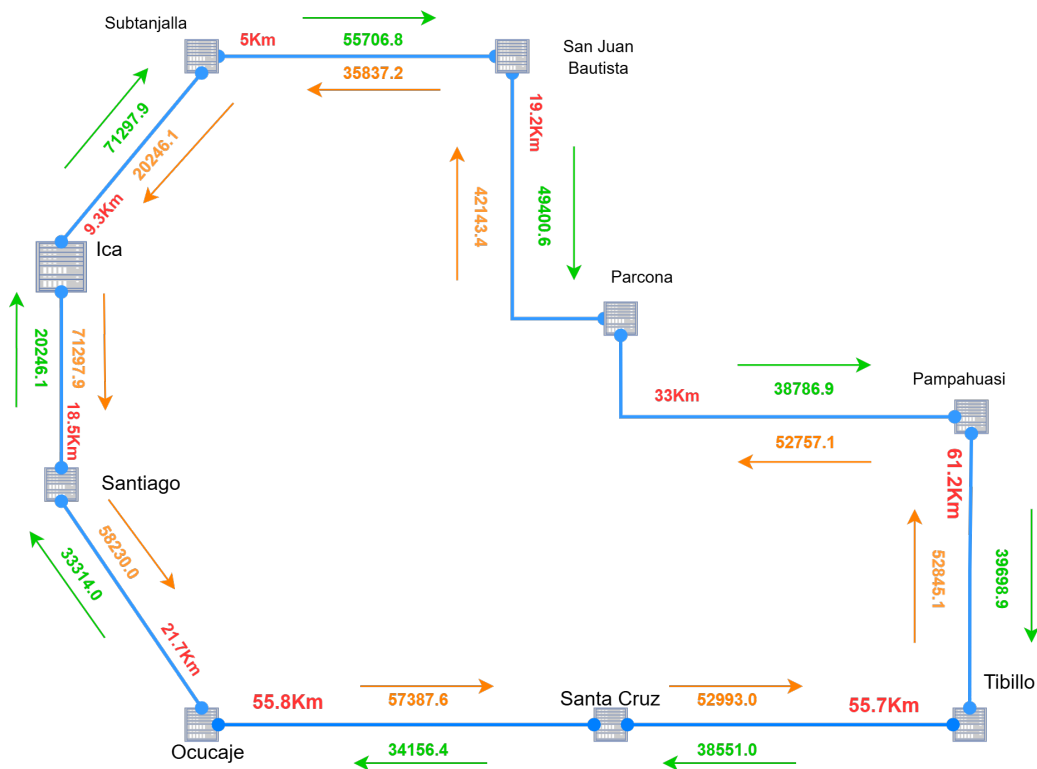


Figura 4.9

Capacidad de Enlaces y Distancia del Anillo Óptico



- Asegurar la redundancia del sistema
- Mantener el flujo de información ante posibles cortes en el anillo

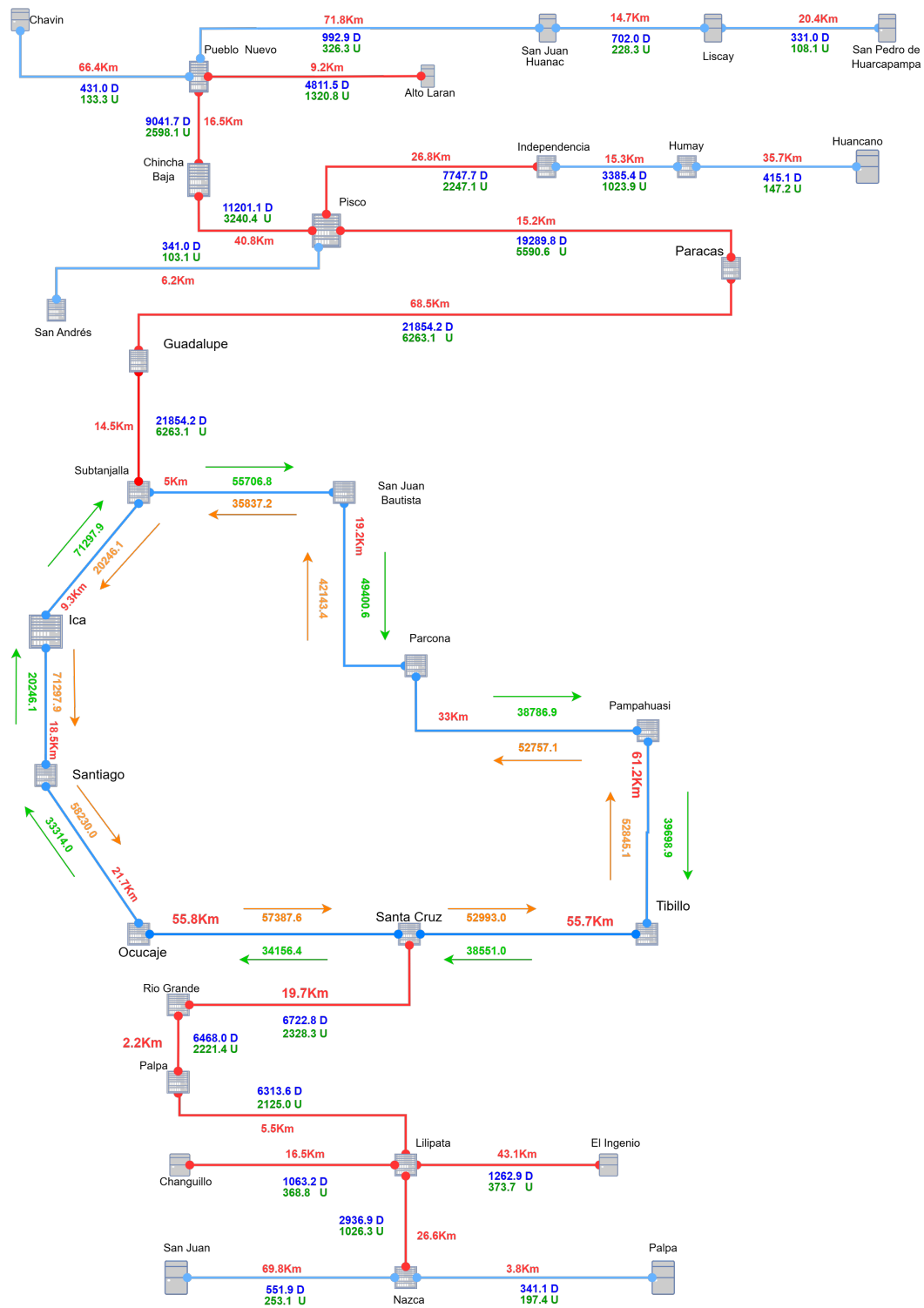
En la Figura 4.9 se presenta la capacidad consolidada de cada enlace siguiendo este procedimiento. Posteriormente, en la Figura 4.10 se integran los ramales al anillo principal, mostrando una vista global de las capacidades estimadas para todos los enlaces que conforman la red de banda ancha de la región Ica.

4.2.2. Presupuesto de Enlaces

El cálculo del presupuesto de enlaces es un aspecto fundamental en el diseño de redes de fibra óptica, pues permite determinar la viabilidad técnica de cada conexión. Este proceso inicia con la

Figura 4.10

Capacidad de Enlaces y Distancia Red Total



medición de la distancia lineal entre los puntos de conexión, a la cual se debe añadir una reserva del 10%. Esta reserva no es arbitraria; responde a necesidades prácticas de la instalación, como las curvaturas naturales que forma el cable en instalaciones aéreas (conocidas como flechas) y la necesidad de contar con cable adicional en puntos estratégicos para futuras reparaciones.

Una vez establecida la distancia total, procedemos a calcular las diferentes fuentes de atenuación que afectarán la señal óptica. La primera de ellas es la atenuación por longitud, que varía según la longitud de onda utilizada. Para transmisiones a 1310 nm, consideramos una pérdida de 0.35 *dB/Km*, mientras que para 1550 nm, esta se reduce a 0.22 *dB/Km*. Esta diferencia en la atenuación es una característica intrínseca de la fibra óptica y debe considerarse cuidadosamente en el diseño.

Los empalmes constituyen otro factor crucial en nuestro presupuesto. Considerando que típicamente se utilizan bobinas de fibra de 4 Km, podemos calcular el número necesario de empalmes dividiendo la distancia total entre cuatro y redondeando al número entero superior, añadiendo dos empalmes adicionales para las terminaciones. Cada empalme introduce una pérdida de 0.05 dB, por lo que el número total de empalmes impacta directamente en la atenuación final del enlace.

En los extremos del enlace, encontramos los conectores ópticos, que introducen una atenuación de 0.35 dB cada uno. Al necesitar dos conectores por enlace (uno en cada extremo), debemos considerar una pérdida total de 0.7 dB por este concepto. Adicionalmente, es práctica común incluir un margen de seguridad de 3 dB en el presupuesto total.

Este margen nos protege contra degradaciones futuras del sistema y variaciones ambientales que pudieran afectar el rendimiento del enlace.

Tabla 4.2*Presupuesto de Enlace para Ramal Superior - ver Figura 4.10*

Enlace	Distancia (Km)	Atenuación (dB)		Capacidad (Mbps)	
		1310nm	1550nm	Download	Upload
Chavin-Pueblo Nuevo	66.4	30.2	20.7	431.0	133.3
Pueblo Nuevo-San Juan Huanac	71.8	32.3	22.1	992.9	326.3
San Juan Huanac-Liscay	14.7	9.7	7.6	702.0	228.3
Liscay-San Pedro Huarcapampa	20.4	12.0	9.0	331.0	108.1
Pueblo Nuevo-Alto Laran	9.2	7.5	6.2	4811.5	1320.8
Chincha Baja-Pueblo Nuevo	16.5	10.4	8.0	3041.7	2598.1
Pisco-Chincha Baja	40.8	20.1	14.2	11201.1	3240.4
Pisco-San Andrés	6.2	6.3	5.4	341.0	103.1
Pisco-Independencia	26.8	14.5	10.6	7747.7	2247.1
Independencia-Humay	15.3	9.9	7.7	3385.4	1023.9
Humay-Huancano	35.7	18.0	12.9	415.1	147.2
Pisco-Paracas	15.2	9.9	7.7	19289.8	5590.6
Paracas-Guadalupe	68.5	31.1	21.3	21854.2	6263.1
Guadalupe-Subtanjalla	14.5	9.6	7.5	21854.2	6263.1

Tabla 4.3*Presupuesto de Enlace para Ramal Inferior - ver Figura 4.10*

Enlace	Distancia (Km)	Atenuación (dB)		Capacidad (Mbps)	
		1310nm	1550nm	Download	Upload
Palpa-Rio Grande	2.2	4.7	4.38	6468	2221.4
Rio Grande-Santa Cruz	19.7	11.63	8.82	6722.8	2328.3
Palpa-Lilipata	5.5	6.02	5.23	6313.6	2125
Lilipata-Changuillo	16.5	10.4	8.04	1063.2	368.8
Lilipata-Nazca	26.6	14.39	10.59	2936.9	1026.3
Nazca-San Juan	69.8	31.57	21.59	551.9	253.1
Nazca-Palpa	3.8	5.31	4.77	341.1	197.4
Lilipata-El Ingenio	43.1	20.95	14.78	1262.9	373.7

Tabla 4.4*Presupuesto Enlace de Anillo - ver Figura 4.10*

Enlace	Distancia (Km)	Atenuación (dB)		Capacidad (Mbps)	
		1310nm	1550nm	Download	Upload
Ica-Subtanjalla	9.3	7.5	6.2	71297.9	20246.1
Ica-Santiago	18.5	11.2	8.5	20246.1	71297.9
Santiago-Ocucaje	21.7	12.5	9.4	3331.4	3520.0
Subtanjalla-San Juan Bautista	5.0	5.8	5.1	55706.8	35837.2
San Juan Bautista-Parcona	19.2	11.4	8.7	49400.6	42143.4
Parcona-Pampahuasi	33.0	17.0	12.2	38786.9	52757.1
Pampahuasi-Tibillo	61.2	28.2	19.4	39688.9	52845.1
Ocucaje-Santa Cruz	55.8	26.0	18.0	57387.6	34156.4
Santa Cruz-Tibillo	55.7	26.0	18.0	52993.0	38551.0

4.3. Evaluación de Desempeño de Red Emulada

La implementación de una red de fibra óptica como la de Ica requiere herramientas avanzadas de prueba y validación antes de su despliegue físico. En este contexto, es importante distinguir entre simulación y emulación, dos enfoques complementarios pero distintos:

Simulación:

- Opera en un entorno totalmente virtual donde se configuran previamente la topología y los dispositivos
- Permite pruebas rápidas de características específicas y resultados del modelo de transmisión
- Es útil para validar parámetros físicos como OSNR, ganancia de EDFA, y efectos no lineales
- No permite interacción en tiempo real con el plano de control

Emulación con Mininet-Optical:

- Permite la interacción dinámica entre el plano de control y los nodos de la red

- Integra nodos ópticos con nodos electrónicos tradicionales de Mininet
- Facilita pruebas de escenarios reales de operación y gestión de la red
- Soporta la implementación de controladores SDN como ONOS

4.3.1. Emulación de Red de Banda Ancha de Ica

Ventajas de Mininet-Optical para la Red de Ica:

1. Pruebas de Escalabilidad

- Permite probar la red completa de Ica incluyendo todos sus nodos y enlaces
- Facilita la validación de protocolos y políticas de enrutamiento
- Posibilita la experimentación con diferentes configuraciones sin riesgo operativo

2. Monitoreo de Rendimiento

- Emula dispositivos de monitoreo de rendimiento óptico (OPM)
- Permite medir OSNR, potencia y otros parámetros críticos
- Facilita la validación de estrategias de mantenimiento predictivo

3. Optimización de Recursos

- Permite experimentar con diferentes asignaciones de longitud de onda
- Facilita la prueba de algoritmos de enrutamiento óptico
- Ayuda a optimizar los márgenes de operación de los equipos

4. Integración con Sistemas Existentes

- Permite probar la interoperabilidad con equipos de diferentes fabricantes
- Facilita la validación de APIs y protocolos de gestión
- Posibilita la integración con sistemas de gestión existentes

El apéndice incluye el código que usamos para simular la red de banda ancha de Ica, basándonos en la Figura 4.9. Este código nos permite generar tráfico para diferentes situaciones: normal, alto, degradado y con congestión.

Además, creamos un gráfico de la red simulada (Figura 4.11) que facilita la configuración de los puertos. En esta red, los dispositivos en los nodos tienen puertos de cobre (Ethernet, FastEthernet o GigaEthernet) y la parte óptica incluye enlaces WDM con sus canales.

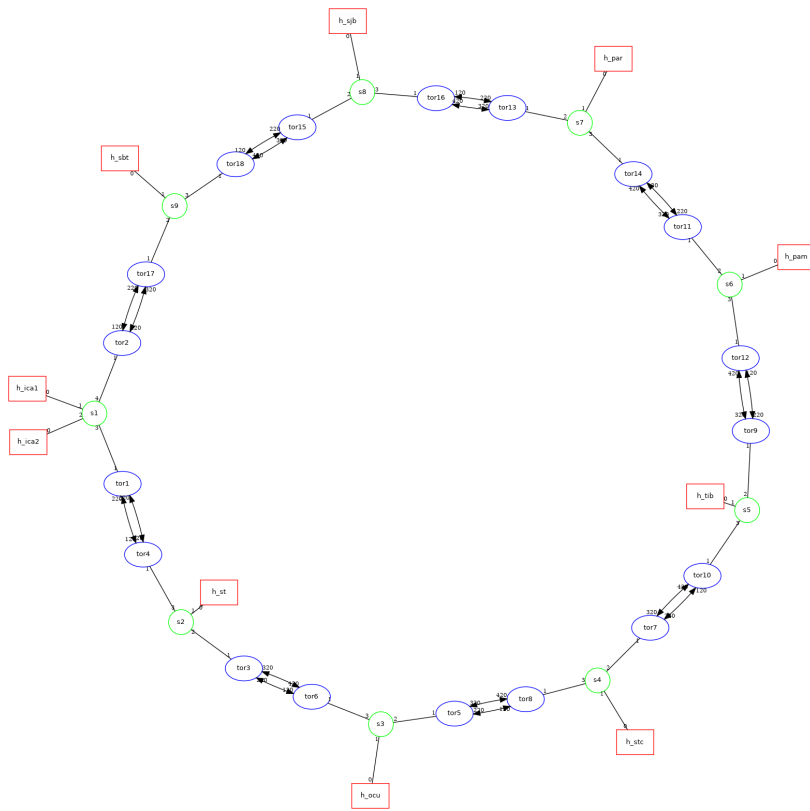
4.3.2. Desempeño de Red Emulada

La Tabla 4.5 muestra los resultados parciales de desempeño de una red de banda ancha emulada bajo diferentes escenarios de tráfico (normal, alto, degradado y con congestión). Se evaluaron diferentes pares de nodos (fuente-destino) y se midieron las siguientes variables:

- Ancho de banda: Se compara el ancho de banda estimado con el logrado en la prueba. En general, se observa que el ancho de banda logrado es cercano al estimado en la mayoría de los casos, excepto en algunos escenarios de degradación o congestión donde se reduce significativamente.
- Utilización: Indica el porcentaje de uso del ancho de banda disponible. En general, la utilización es alta en la mayoría de los escenarios, lo que sugiere una buena eficiencia en el uso de los recursos de red.

Figura 4.11

Grafica del Red Emulada



- Paquetes perdidos: Representa el porcentaje de paquetes de datos que se pierden durante la transmisión. En la mayoría de los casos, la pérdida de paquetes es baja, excepto en escenarios de degradación o congestión donde aumenta considerablemente.
- Jitter: Mide la variación en el tiempo de llegada de los paquetes de datos. Un jitter alto puede afectar la calidad de las aplicaciones en tiempo real como la voz y el video. Los valores de jitter son generalmente bajos, excepto en algunos casos de congestión donde se observan valores más altos.
- Latencia: Representa el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde la fuente hasta el destino. En general, la latencia es baja, lo que indica una buena capacidad de respuesta de la red. Sin embargo, en escenarios de degradación o congestión, la latencia aumenta.
- Escenarios de degradación y congestión: Como era de esperar, los escenarios de degradación y congestión presentan un impacto negativo en el rendimiento de la red, con una reducción del ancho de banda logrado, un aumento en la pérdida de paquetes y un aumento en el jitter y la latencia.
- Pares de nodos: Algunos pares de nodos, como SanPedroHu-Santa Cruz y AltoLaran-Palpa2, muestran un rendimiento más bajo en comparación con otros, incluso en escenarios normales. Esto podría indicar posibles cuellos de botella o limitaciones en la capacidad de esos enlaces.
- Alto tráfico: En general, la red parece manejar bien el alto tráfico (high_load), manteniendo una buena utilización y un bajo porcentaje de pérdida de paquetes.

Tabla 4.5*Resultados Parciales de Funcionamiento de Red Emulada*

Fuente	Destino	Escenario	Capacidad (Gbps)		Duracion Prueba (ms)	Utilizacion (%)	Paquetes perdidos	Jitter (ms)	Latencia (ms)
			Estimada	Lograda					
SanJuanBautista	Liscay	normal	41.4	40.5	16	97.87	0.35	1.06	19.87
Subtanjalla	Huancano	normal	5.3	4.9	21	91.67	0.14	0.38	30.97
Paracas	AltoLaran	degraded	37.6	24.9	21	66.22	9.89	18.55	19.90
Independencia	RioGrande	normal	19.1	18.5	23	97.20	0.48	1.88	17.84
Ocucaje	Parcona	high_load	5.1	5.2	24	101.87	1.41	3.03	15.16
Llipata	SanAndres	normal	24.5	20.9	14	85.32	0.21	1.12	23.28
Ocucaje	Pisco	normal	30.1	25.9	14	86.21	0.30	0.79	16.97
ChinchaBaja	SanJuanBautista	normal	22.6	19.3	15	85.17	0.47	0.69	19.14
Nazca	Guadalupe	normal	27.8	23.8	22	85.66	0.42	0.56	22.78
SanJuanBautista	AltoLaran	congestion	15.1	12.1	19	80.38	4.71	8.94	25.02
SanJuanHuanac	Ocucaje	normal	1.0	1.0	19	94.62	0.38	0.78	23.25
Guadalupe	AltoLaran	normal	3.8	3.4	20	90.90	0.40	1.46	13.39
SanPedroHuacarpana	SantaCruz	congestion	47.6	34.8	27	73.12	3.97	6.37	19.75
Guadalupe	Santiago	normal	7.1	6.2	11	88.50	0.46	0.23	22.25
Guadalupe	SanAndres	congestion	22.0	16.2	23	73.51	4.82	9.84	21.24
SanJuanHuanac	Pisco	high_load	13.6	14.2	15	104.34	0.77	4.81	19.49
Independencia	Parcona	normal	40.2	38.0	26	94.69	0.02	0.84	21.94
ElIngenio	Subtanjalla	normal	2.5	2.4	22	97.87	0.13	0.36	10.78
Chavin	Subtanjalla	normal	13.0	11.7	10	89.57	0.50	0.51	15.34
AltoLaran	Palpa	degraded	14.7	8.7	29	59.07	6.55	17.78	15.58
Parcona	ChinchaBaja	normal	30.2	27.8	10	92.19	0.09	1.54	17.79

4.3.2.1. Análisis Descriptivo

La evaluación del desempeño de la red óptica emulada de banda ancha se realizó mediante una serie de pruebas exhaustivas bajo diferentes escenarios operativos. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 4.6 y 4.7, donde se detallan los promedios de desempeño y un análisis descriptivo profundo de la pérdida de paquetes por escenario. A continuación, se presenta un análisis detallado de los principales parámetros de red:

1. Análisis de Pérdida de Paquetes

La pérdida de paquetes muestra variaciones significativas según el escenario:

- Escenario Normal: Presenta una pérdida mínima de apenas 0.25 %, evidenciando un funcionamiento óptimo bajo condiciones estándar. La baja variabilidad en este escenario confirma la estabilidad de la red en operación normal.

- Escenario de Alta Carga: Mantiene un excelente desempeño con solo 1.25 % de pérdida promedio y una desviación estándar de 0.44 %. Estos resultados demuestran la robustez de la red para manejar volúmenes elevados de tráfico.
- Escenario de Congestión: Registra una pérdida promedio de 3.47 % con una desviación estándar de 0.85 %. El rango de pérdidas oscila entre 2.01 % y 4.98 %, indicando un desempeño aceptable aunque con limitaciones evidentes bajo estas condiciones.
- Escenario Degradado: Presenta el mayor impacto en el rendimiento, con una pérdida promedio de 7.56 % y una desviación estándar de 1.42 %. El rango de pérdidas, que va del 5.11 % al 10 %, confirma que este es el escenario más desafiante para la red.

2. Comportamiento del Jitter

La variación en la latencia (jitter) muestra patrones distintivos:

- El escenario normal mantiene un jitter mínimo de 1.07 ms
- Bajo alta carga, el jitter se mantiene controlado en 3.41 ms
- En congestión, aumenta a 7.51 ms, indicando fluctuaciones moderadas
- El escenario degradado presenta el mayor jitter con 15.04 ms, evidenciando inestabilidad significativa

3. Características de Latencia

Un hallazgo notable es la consistencia en la latencia, que se mantiene cercana a los 20 ms en todos los escenarios. Esta estabilidad sugiere una infraestructura de red robusta, capaz de mantener tiempos de transmisión constantes incluso bajo condiciones adversas.

Podemos decir que la red demuestra:

- **Desempeño Óptimo:** La red demuestra excelente rendimiento en condiciones normales y de alta carga, caracterizado por pérdidas mínimas de paquetes y jitter controlado.
- **Resistencia a la Congestión:** Bajo congestión, la red mantiene un desempeño aceptable, aunque con degradación notable en comparación con la operación normal.
- **Puntos de Mejora:** Los escenarios de congestión y degradación revelan oportunidades de optimización, particularmente en la gestión del jitter y la pérdida de paquetes.
- **Estabilidad del Sistema:** La consistencia en la latencia a través de todos los escenarios sugiere una arquitectura de red fundamentalmente sólida, aunque susceptible a variaciones en otros parámetros bajo condiciones adversas.

Tabla 4.6

Promedios de Desempeño por Escenario

Promedios Escenario	Paquetes perdidos (ms)	Jitter (ms)	Retardo (ms)
congestion	3.47	7.51	19.94
degraded	7.56	15.04	20.31
high load	1.25	3.41	19.63
normal	0.25	1.07	19.95

Tabla 4.7

Análisis Descriptivo de Pérdida de Paquetes por Escenario

Escenario	Flujos	mean	std	min	25 %	50 %	75 %	max
congestion	281	3.47	0.85	2.01	2.66	3.49	4.19	4.98
degraded	169	7.56	1.42	5.11	6.28	7.71	8.68	10
high load	307	1.25	0.44	0.5	0.86	1.31	1.6	2
normal	1243	0.25	0.14	0	0.13	0.24	0.38	0.5

El análisis detallado de la matriz de correlación ilustrada en la Figura 4.12 nos permite entender las interacciones entre las métricas fundamentales de nuestra red de banda ancha con fibra óptica.

Esta matriz revela patrones significativos que ayudan a comprender el comportamiento integral del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

Un hallazgo particularmente notable es la fuerte relación positiva entre la pérdida de paquetes y la variación de latencia, con una correlación de 0.93. Este vínculo estrecho indica que cuando la red experimenta un aumento en la pérdida de paquetes, también tiende a mostrar mayor inestabilidad en los tiempos de entrega. Tal comportamiento es característico de situaciones donde la red enfrenta condiciones desafiantes que afectan múltiples aspectos de su rendimiento simultáneamente.

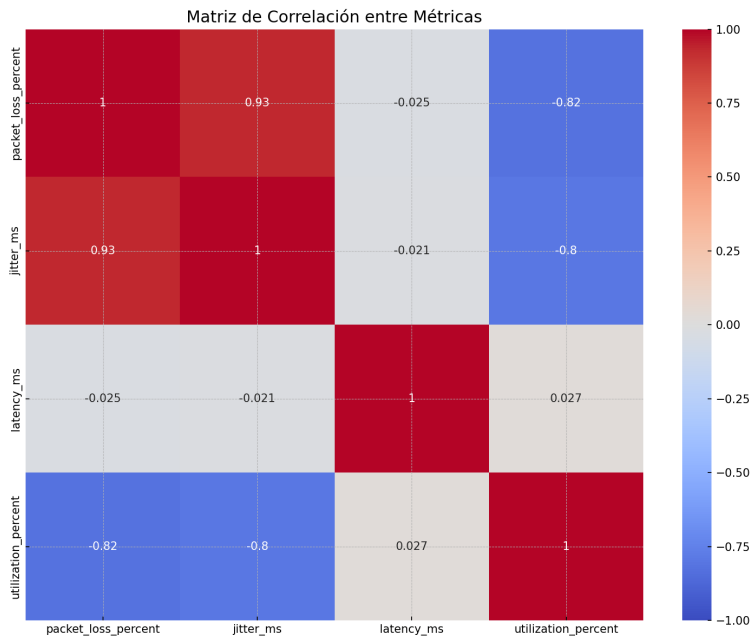
Por otro lado, la utilización de la red muestra una relación interesante con otras métricas de desempeño. Se observa una fuerte correlación negativa tanto con la pérdida de paquetes (-0.82) como con la variación de latencia (-0.80). Estos valores sugieren que la red opera de manera más eficiente cuando maneja volúmenes significativos de tráfico, lo cual podría indicar una infraestructura bien optimizada para cargas de trabajo elevadas. Este comportamiento contradice la intuición inicial que podría sugerir que una mayor utilización resultaría en un deterioro del rendimiento.

Un aspecto particularmente destacable es el comportamiento de la latencia en relación con las demás métricas. Los valores de correlación extremadamente bajos (0.016 con pérdida de paquetes, 0.014 con variación de latencia y -0.024 con utilización) indican que la latencia se mantiene notablemente estable e independiente de las otras condiciones de la red. Esta estabilidad en los tiempos de transmisión, independientemente de la carga o estado del sistema, sugiere una infraestructura de backbone robusta y bien diseñada.

El análisis de estas correlaciones revela una red con características de rendimiento bien definidas. La fuerte relación entre pérdida de paquetes y variación de latencia señala puntos comunes donde el rendimiento puede degradarse, mientras que las correlaciones negativas con la utilización indican una infraestructura bien dimensionada para manejar cargas elevadas. La independencia de la latencia

Figura 4.12

Matriz de Correlación entre Métricas



frente a otras métricas sugiere un diseño robusto del sistema de transmisión.

Estas observaciones tienen implicaciones prácticas significativas para la gestión y optimización de la red. La capacidad del sistema para mantener un rendimiento estable bajo cargas elevadas es una fortaleza notable, aunque la estrecha relación entre pérdida de paquetes y variación de latencia identifica áreas donde podrían implementarse mejoras para situaciones de congestión o degradación del servicio. La estabilidad de la latencia, independientemente de otras condiciones, representa una ventaja significativa para aplicaciones sensibles al tiempo de respuesta.

Los patrones observados en la matriz de correlación revelan una infraestructura de red bien diseñada, capaz de mantener un rendimiento consistente bajo diversas condiciones de operación. No obstante, la estrecha relación entre ciertas métricas sugiere áreas específicas donde podrían implementarse optimizaciones para mejorar aún más el servicio, especialmente en condiciones adversas de operación.

El análisis de la Figura 4.13 revela una dinámica interesante entre el ancho de banda esperado y el efectivamente logrado en nuestra red de banda ancha. La visualización presenta un contraste notable entre una línea de referencia estable, que representa nuestras expectativas de rendimiento, y una serie de puntos dispersos que reflejan el rendimiento real medido en Mbps a lo largo del tiempo.

La característica más llamativa del gráfico es la marcada fluctuación en los valores de ancho de banda alcanzados. Estos datos, representados por puntos azules, muestran una dispersión significativa que sugiere un comportamiento inestable en el rendimiento de la red. Mientras algunos puntos logran alcanzar e incluso superar ocasionalmente el umbral esperado, una cantidad considerable se sitúa por debajo de la línea de referencia, evidenciando desafíos en el mantenimiento de un rendimiento constante.

El comportamiento del ancho de banda esperado, representado por una línea continua y estable, establece un punto de referencia constante que contrasta marcadamente con la volatilidad observada en los valores reales. Esta estabilidad en el valor objetivo sugiere que la red fue diseñada y configurada para mantener un nivel específico de rendimiento, independientemente de las condiciones operativas.

La presencia frecuente de mediciones por debajo del umbral esperado señala posibles limitaciones en la infraestructura o la existencia de factores externos que afectan el rendimiento. Este comportamiento podría impactar significativamente en la experiencia del usuario, especialmente en aplicaciones que demandan un ancho de banda consistente y predecible.

Un aspecto interesante son los picos ocasionales donde el ancho de banda logrado supera el valor esperado. Estos momentos excepcionales sugieren que la red tiene el potencial de ofrecer un rendimiento superior bajo ciertas condiciones, posiblemente durante períodos de baja demanda o

cuando las condiciones de operación son óptimas. La ausencia de patrones temporales claros en las fluctuaciones del ancho de banda logrado indica que las variaciones podrían estar influenciadas por factores aleatorios o no contemplados en el diseño original de la red. Esta característica complica la predicción del rendimiento y sugiere la necesidad de un análisis más profundo de los factores que influyen en estas variaciones.

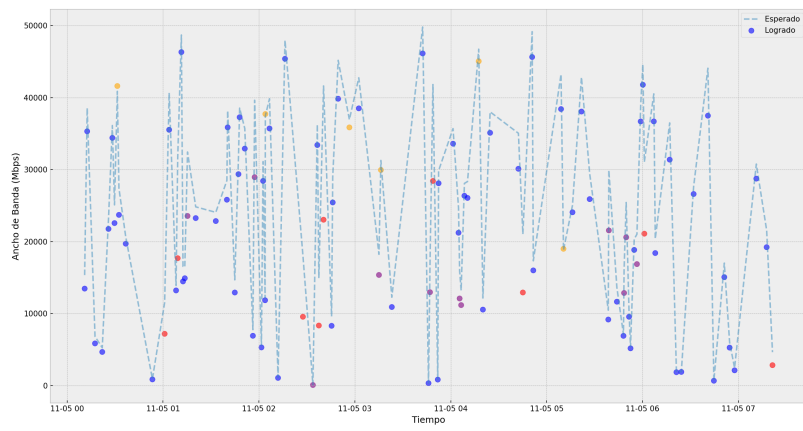
Esta disparidad entre el rendimiento esperado y el alcanzado plantea interrogantes importantes sobre la capacidad de la red para mantener niveles consistentes de servicio. Los datos sugieren que podrían existir oportunidades significativas de optimización, particularmente en la gestión de recursos y en la adaptación a diferentes niveles de demanda.

La implementación de estrategias de optimización más sofisticadas y una gestión dinámica de los recursos de red podrían ayudar a reducir la brecha entre el rendimiento esperado y el logrado. Estas mejoras serían especialmente valiosas para garantizar un servicio más consistente y confiable, particularmente en aplicaciones que requieren un ancho de banda estable.

El análisis de estos datos resalta la importancia de comprender y abordar los factores que contribuyen a la variabilidad en el rendimiento de la red. La identificación y mitigación de estas causas podría llevar a mejoras significativas en la calidad del servicio, acercando el rendimiento real de la red a los niveles esperados de manera más consistente.

Figura 4.13

Comparación de Ancho de Banda Esperado vs Logrado



Capítulo V: Conclusiones

El análisis demográfico y socioeconómico de las localidades rurales de Ica revela una distribución poblacional altamente asimétrica, con una concentración significativa en centros poblados de menos de 250 habitantes. Los tiempos de viaje al distrito capital muestran que la mayoría de las localidades mantienen una accesibilidad razonable, con tiempos inferiores a 50 minutos. La correlación negativa entre población y tiempo de viaje indica que las localidades más pobladas tienden a estar más próximas a los centros administrativos, aunque existen importantes excepciones que requieren atención especial en la planificación de infraestructura.

La demanda estimada muestra una marcada variabilidad entre provincias, distritos y localidades. A nivel provincial, se observa una distribución bimodal con una media de 12,637.60 Mbps y una mediana de 6,781.25 Mbps, reflejando disparidades significativas en las necesidades de conectividad. Esta variación se mantiene a nivel distrital y de localidad, donde la mayoría de los puntos demandan entre 0 y 2,000 Mbps, mientras que algunos casos excepcionales requieren más de 4,000 Mbps.

El diseño de la red optimiza la infraestructura existente mediante un anillo principal que conecta 16 nodos estratégicos y ramales secundarios que alcanzan 28 nodos adicionales. La red total requiere 938 km de fibra óptica, aprovechando eficientemente 409 km de red vial y 529 km de líneas de media tensión existentes. Los cálculos de presupuesto de enlaces demuestran la viabilidad técnica del diseño, considerando atenuaciones, empalmes y márgenes de seguridad apropiados para garantizar la calidad del servicio.

La configuración en anillo proporciona redundancia y resistencia a fallos, mientras que los

ramales secundarios permiten una cobertura eficiente de las localidades más alejadas. El diseño considera tanto las demandas actuales como el potencial de crecimiento futuro, estableciendo capacidades de enlace que varían desde algunos Gbps hasta más de 70 Gbps en los tramos más exigentes.

La emulación de la red mediante Mininet-optical revela un rendimiento robusto bajo condiciones normales y de alta carga, con pérdidas de paquetes mínimas (0.25 % y 1.25 % respectivamente) y valores de jitter controlados (1.07 ms y 3.41 ms). En escenarios de congestión, la red mantiene un desempeño aceptable con 3.47 % de pérdida de paquetes, mientras que en condiciones degradadas este valor aumenta a 7.56 %.

La matriz de correlación muestra una fuerte relación positiva (0.93) entre la pérdida de paquetes y el jitter, mientras que la latencia se mantiene notablemente estable e independiente de otras métricas. La utilización de la red presenta correlaciones negativas significativas con la pérdida de paquetes (-0.82) y el jitter (-0.80), sugiriendo una infraestructura bien optimizada para manejar cargas elevadas.

La evaluación integral de la red de banda ancha emulada para la región Ica demuestra que el diseño propuesto satisface efectivamente la demanda estimada en las localidades rurales. La arquitectura en anillo con ramales secundarios proporciona una solución técnicamente viable y resiliente, capaz de mantener un rendimiento estable bajo diversas condiciones de operación. La emulación confirma la capacidad de la red para manejar las demandas proyectadas, manteniendo niveles aceptables de pérdida de paquetes, jitter y latencia, incluso en escenarios desafiantes. Este diseño no solo atiende las necesidades actuales de conectividad sino que también establece una base sólida para el crecimiento futuro de la infraestructura digital en la región.

Recomendaciones, Limitaciones y Brechas para el futuro

La red que hemos diseñado funciona bien en nuestras pruebas, pero hay varios aspectos que podrían mejorarse. Por ejemplo, sería muy útil implementar un sistema de control SDN (Software Defined Networking) más avanzado. Imagina que tienes un panel de control centralizado desde donde puedes ver y ajustar toda la red en tiempo real - eso es básicamente lo que SDN te permite hacer. También sería bueno añadir amplificadores EDFA en los tramos más largos de la red, especialmente donde vemos que la señal se atenúa más de 15 dB. Esto es como poner un repetidor que fortalece la señal óptica cuando se debilita después de viajar largas distancias.

Un aspecto importante que no pudimos abordar completamente es el comportamiento de la fibra óptica bajo diferentes condiciones ambientales. En Ica, las temperaturas pueden variar bastante, y esto afecta a la fibra óptica más de lo que podrías pensar. Nuestro modelo de emulación no toma en cuenta estos cambios de temperatura ni otros efectos no lineales que ocurren en la fibra, como la dispersión por modo de polarización (PMD) o los efectos de mezcla de cuatro ondas (FWM). Si has cursado la materia de comunicaciones ópticas, probablemente hayas escuchado sobre estos fenómenos.

Otra limitación importante de nuestro estudio es que la demanda de tráfico que estimamos es bastante estática. En la vida real, el tráfico de internet fluctúa mucho durante el día y la noche, y también hay picos durante eventos especiales o en ciertas épocas del año. Sería muy útil tener un modelo que pueda predecir estos cambios y ajustar la red automáticamente.

Hay varios aspectos que quedaron pendientes y que serían interesantes de investigar. Por ejemplo, no profundizamos en cómo proteger físicamente la infraestructura de la red. Piensa en todas las

formas en que una fibra óptica puede dañarse: desde accidentes durante obras civiles hasta el vandalismo. También sería importante desarrollar un plan detallado de qué hacer cuando algo falla - porque las fallas van a ocurrir, es solo cuestión de tiempo.

La seguridad de la red es otro tema que merece más atención. No solo necesitamos proteger los cables y equipos físicos, sino también asegurarnos de que nadie pueda acceder al sistema de control de la red sin autorización. Esto es especialmente importante ahora que cada vez más servicios críticos dependen de internet. Para futuros estudios, sería valioso analizar cómo la red podría crecer con el tiempo. La demanda de internet siempre aumenta - solo piensa en cómo han cambiado tus propios hábitos de uso de internet en los últimos años. Necesitamos asegurarnos de que la red pueda manejar más tráfico en el futuro sin necesidad de cambios drásticos en la infraestructura.

También sería útil investigar tecnologías emergentes como la multiplexación por división espacial (SDM). Esta técnica permite transmitir más datos usando diferentes modos espaciales en la misma fibra - es como tener varios canales de comunicación en un solo cable. Aunque actualmente podría ser demasiado costoso para una red rural, podría volverse más accesible en el futuro. Estas recomendaciones y limitaciones no disminuyen el valor del trabajo realizado, sino que señalan el camino hacia mejoras futuras. Como sabes, en ingeniería siempre hay espacio para optimizar y mejorar los sistemas que diseñamos. La red que hemos propuesto es un buen punto de partida, pero con más investigación y desarrollo, podría ser aún mejor.

Bibliografía

- Cueva Mayta, N., & Santamaría Morales, J. A. (2024). Análisis de Red de Banda Ancha para Demostrar la Mejora del Acceso a Servicios de Telecomunicaciones en Centros Poblados de la Provincia Sánchez Carrión [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Consultado el 7 de octubre de 2024, desde <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13426>
- Diaz-Montiel, A., Lantz, B., Yu, J., Kilper, D., & Ruffini, M. (2021). Real-Time QoT Estimation through SDN Control Plane Monitoring Evaluated in Mininet-Optical. *IEEE Photonics Technology Letters*, 33(18), 1050-1053. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3075277>
6 citations (Semantic Scholar/DOI) [2024-07-16].
- Jurkiewicz, P. (2023). TopoHub: A Repository of Reference Gabriel Graph and Real-World Topologies for Networking Research. *SoftwareX*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101540>
- Khalid, A., Quinlan, J. J., & Sreenan, C. J. (2017). MiniNAM: A Network Animator for Visualizing Real-Time Packet Flows in Mininet. 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN), 229-231. <https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899417>
- Lantz, B., Diaz-Montiel, A., Yu, J., Rios, C., Ruffini, M., & Kilper, D. (2020). Demonstration of Software-Defined Packet-Optical Network Emulation with Mininet-Optical and ONOS.
- Lozada, H. A. R., & Cenzano, C. G. H. (2021). Redes Nacionales de Banda Ancha en el Perú: Escenarios al 2030 [Tesis de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Mamani, H. E. H. (2023). Acceso a Internet y los determinantes socioeconómicos en el Perú, período 2016-2019 [Number: 1]. *Semestre Económico*, 12(1), 39-49. <https://doi.org/10.26867/se.2023.v12i1.143>

Ram, A., & Chakraborty, S. K. (2024). Analysis of Software-Defined Networking (SDN) Performance in Wired and Wireless Networks Across Various Topologies, Including Single, Linear, and Tree Structures. *Indian Journal of Information Sources and Services*, *14*(1), 39-50. <https://doi.org/10.51983/ijiss-2024.14.1.3926>
1 citations (Semantic Scholar/DOI) [2024-07-16].

Código utilizado

.1. Código Red Emulada de Ica

```

1  # Importaciones originales de mininet-optical
2  from mnoptical.dataplane import (
3      OpticalLink, UnidirectionalOpticalLink as ULink,
4      ROADM, Terminal, OpticalNet as Mininet, km, m, dB, dBm
5  )
6  from mnoptical.rest import RestServer
7  from mnoptical.ofcdemo.demolib import OpticalCLI as CLI
8  from mininet.node import Host, OVSBridge, Controller, RemoteController
9  from mininet.topo import Topo
10 from mininet.log import setLogLevel, info
11 from mininet.clean import cleanup
12
13
14 from mininet.node import Controller, OVSKernelSwitch
15
16 import sys
17
18
19 # Otras importaciones necesarias
20 from os.path import dirname, realpath, join
21 from subprocess import run, Popen
22 import time
23
24
25 def plotNet(net, outfile="singleroadm.png", directed=True, layout='neato',
26             colorMap=None, linksPerPair=None):
27     """Plot network graph to outfile with improved formatting"""
28     try:
29         import pygraphviz as pgv
30     except:
31         warning('*** Please install python3-pygraphviz for plotting\n')
32         return
33
34     # Configuración de colores por tipo de nodo
35     color = {
36         ROADM: 'red',
37         Terminal: '#0000FF', # Azul para ToRs
38         OVSBridge: '#00FF00', # Verde para switches
39         Host: 'red'
40     }
41     if colorMap:
42         color.update(colorMap)
43
44     colors = {node: color.get(type(node), 'green')
45               for node in net.values()}
46
47     # Configuración del grafo
48     g = pgv.AGraph(strict=False, directed=directed, splines='spline', overlap='scale')
49     g.graph_attr.update({
50         'layout': layout,
51         'overlap': 'scale',
52         'splines': 'spline',
53         'sep': '+5,5',
54         'rankdir': 'TB'
55     })
56
57     # Configuración de nodos
58     nfont = {
59         'fontname': 'helvetica',
60         'fontsize': '10',
61         'penwidth': '1.0'
62     }
63
64     # Clasificar nodos
65     roadms = [node for node in net.switches if isinstance(node, ROADM)]
66     terms = [node for node in net.switches if isinstance(node, Terminal)]
67     other = [node for node in net.switches if node not in set(roadms+terms)]
68
69     # Añadir nodos con estilos específicos
70     # ToRs (Terminals)
71     for node in terms:
72         g.add_node(node.name,

```

```

73         shape='oval',
74         color=colors[node],
75         style='filled',
76         fillcolor='white',
77         **nfont)
78
79 # Switches regulares
80 for node in other:
81     g.add_node(node.name,
82               shape='circle',
83               color=colors[node],
84               style='filled',
85               fillcolor='white',
86               **nfont)
87
88 # Hosts
89 for node in net.hosts:
90     g.add_node(node.name,
91               shape='box',
92               color=colors[node],
93               style='filled',
94               fillcolor='white',
95               **nfont)
96
97 # Añadir enlaces con formato mejorado
98 linkcount = {}
99 for link in net.links:
100     intf1, intf2 = link.intf1, link.intf2
101     node1, node2 = intf1.node, intf2.node
102     port1, port2 = node1.ports[intf1], node2.ports[intf2]
103
104     # Incrementar contador de enlaces
105     linkcount[node1,node2] = linkcount.get((node1, node2), 0) + 1
106     if linksPerPair is not None and linkcount[node1,node2] > linksPerPair:
107         continue
108
109     # Detectar si es un enlace WDM basado en los puertos
110     is_wdm = (port1 in [120, 220, 320, 420] or port2 in [120, 220, 320, 420])
111
112     if is_wdm:
113         # Formato para enlaces WDM
114         edge_attr = {
115             'headlabel': f'{port2}',
116             'taillabel': f'{port1}',
117             'labelfontsize': '8',
118             'fontsize': '8',
119             'penwidth': '1.0',
120             'color': 'black',
121             'dir': 'both',
122             'arrowhead': 'normal',
123             'arrowtail': 'normal',
124             'weight': '1'
125         }
126     else:
127         # Formato para enlaces regulares
128         edge_attr = {
129             'headlabel': f'{port2}',
130             'taillabel': f'{port1}',
131             'labelfontsize': '8',
132             'fontsize': '8',
133             'penwidth': '1.0',
134             'color': 'black',
135             'dir': 'none',
136             'weight': '2'
137         }
138
139     g.add_edge(node1.name, node2.name, **edge_attr)
140
141 print("*** Plotting network topology to", outfile)
142 g.layout(prog=layout)
143 g.draw(outfile)
144

```

```

145
146 class OpticalRingTopo(Topo):
147     """Optical Ring Network Topology with dual ToRs per node"""
148
149     def build(self):
150         # Hosts
151         h_ica1 = self.addHost('h_ica1')
152         h_ica2 = self.addHost('h_ica2')
153         h_sbt = self.addHost('h_sbt')         # Subtanjalla
154         h_sjb = self.addHost('h_sjb')         # San Juan Bautista
155         h_par = self.addHost('h_par')         # Parcona
156         h_pam = self.addHost('h_pam')         # Pampahuasi
157         h_tib = self.addHost('h_tib')         # Tibillo
158         h_st = self.addHost('h_st')           # Santiago
159         h_ocu = self.addHost('h_ocu')         # Ocucaje
160         h_stc = self.addHost('h_stc')         # Santa Cruz
161
162         # Switches - usando nombres canónicos que empiezan con 's'
163         s1 = self.addSwitch('s1')             # Ica
164         s2 = self.addSwitch('s2')             # Santiago
165         s3 = self.addSwitch('s3')             # Ocucaje
166         s4 = self.addSwitch('s4')             # Santa Cruz
167         s5 = self.addSwitch('s5')             # Tibillo
168         s6 = self.addSwitch('s6')             # Pampahuasi
169         s7 = self.addSwitch('s7')             # Parcona
170         s8 = self.addSwitch('s8')             # San Juan Bautista
171         s9 = self.addSwitch('s9')             # Subtanjalla
172
173
174
175
176
177
178
179
180         # ToR switches con sus transceivers
181         tparams = dict(cls=Terminal, monitor_mode='in')
182
183         # Creación de ToRs (dos por cada nodo)
184         # ICA
185         tor1 = self.addSwitch('tor1', transceivers=[('32', 3*dBm)], **tparams)
186         tor2 = self.addSwitch('tor2', transceivers=[('29', 3*dBm)], **tparams)
187
188         # Santiago
189
190         tor3 = self.addSwitch('tor3', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
191         tor4 = self.addSwitch('tor4', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
192
193         # Ocucaje
194
195         tor5 = self.addSwitch('tor5', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
196         tor6 = self.addSwitch('tor6', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
197
198         # Santa Cruz
199
200         tor7 = self.addSwitch('tor7', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
201         tor8 = self.addSwitch('tor8', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
202
203         # Tibillo
204
205         tor9 = self.addSwitch('tor9', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
206         tor10 = self.addSwitch('tor10', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
207
208         # Pampahuasi
209
210         tor11 = self.addSwitch('tor11', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
211         tor12 = self.addSwitch('tor12', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
212
213         # Parcona
214
215         tor13 = self.addSwitch('tor13', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
216

```

```

217     tor14 = self.addSwitch('tor14', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
218
219     # San Juan Bautista
220
221     tor15 = self.addSwitch('tor15', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
222     tor16 = self.addSwitch('tor16', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
223
224     # Subtanjalla
225
226     tor17 = self.addSwitch('tor17', transceivers=[('32', 2*dBm)], **tparams)
227     tor18 = self.addSwitch('tor18', transceivers=[('29', 2*dBm)], **tparams)
228
229
230
231
232     # Enlaces Ethernet
233     # ICA
234     self.addLink(h_ical, s1)
235     self.addLink(h_ica2, s1)
236     self.addLink(s1, tor1, port2=1)
237     self.addLink(s1, tor2, port2=1)
238
239     # Santiago
240     self.addLink(h_st, s2)
241     self.addLink(s2, tor3, port2=1)
242     self.addLink(s2, tor4, port2=1)
243
244     # Ocucaje
245     self.addLink(h_ocu, s3)
246     self.addLink(s3, tor5, port2=1)
247     self.addLink(s3, tor6, port2=1)
248
249     # Santa Cruz
250     self.addLink(h_stc, s4)
251     self.addLink(s4, tor7, port2=1)
252     self.addLink(s4, tor8, port2=1)
253
254     # Tibillo
255     self.addLink(h_tib, s5)
256     self.addLink(s5, tor9, port2=1)
257     self.addLink(s5, tor10, port2=1)
258
259     # Pampahuasi
260     self.addLink(h_pam, s6)
261     self.addLink(s6, tor11, port2=1)
262     self.addLink(s6, tor12, port2=1)
263
264     # Parcona
265     self.addLink(h_par, s7)
266     self.addLink(s7, tor13, port2=1)
267     self.addLink(s7, tor14, port2=1)
268
269
270     # San Juan Bautista
271     self.addLink(h_sjb, s8)
272     self.addLink(s8, tor15, port2=1)
273     self.addLink(s8, tor16, port2=1)
274
275
276     # Subtanjalla
277     self.addLink(h_sbt, s9)
278     self.addLink(s9, tor17, port2=1)
279     self.addLink(s9, tor18, port2=1)
280
281
282
283     # Enlaces WDM del anillo principal
284     # ICA -> Santiago (71.9 Gbps / 20.2 Gbps)
285     self.addLink(tor1, tor4, cls=ULink, port1=320, port2=420,
286                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
287                 spans=[18.5*km], delay='62us')
288     self.addLink(tor4, tor1, cls=ULink, port1=120, port2=220,

```

```

289         boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
290         spans=[18.5*km], delay='62us')
291
292
293     # Santiago -> Ocucaje
294     self.addLink(tor3, tor6, cls=ULink, port1=320, port2=420,
295                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
296                 spans=[21.7*km], delay='72us')
297     self.addLink(tor6, tor3, cls=ULink, port1=120, port2=220,
298                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
299                 spans=[21.7*km], delay='72us')
300
301     # Ocucaje -> Santa Cruz
302     self.addLink(tor5, tor8, cls=ULink, port1=320, port2=420,
303                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
304                 spans=[55.8*km], delay='186us')
305     self.addLink(tor8, tor5, cls=ULink, port1=120, port2=220,
306                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
307                 spans=[55.8*km], delay='186us')
308
309     # Santa Cruz -> Tibillo
310     self.addLink(tor7, tor10, cls=ULink, port1=320, port2=420,
311                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
312                 spans=[55.7*km], delay='183us')
313     self.addLink(tor10, tor7, cls=ULink, port1=120, port2=220,
314                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
315                 spans=[55.7*km], delay='183us')
316
317     # Tibillo -> Pampahuasi
318     self.addLink(tor9, tor12, cls=ULink, port1=320, port2=420,
319                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
320                 spans=[61.2*km], delay='217us')
321     self.addLink(tor12, tor9, cls=ULink, port1=120, port2=220,
322                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
323                 spans=[61.2*km], delay='217us')
324
325     # Pampahuasi -> Parcona
326     self.addLink(tor11, tor14, cls=ULink, port1=320, port2=420,
327                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
328                 spans=[19.2*km], delay='58us')
329     self.addLink(tor14, tor11, cls=ULink, port1=120, port2=220,
330                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
331                 spans=[19.2*km], delay='58us')
332
333     # Parcona -> San Juan Bautista
334     self.addLink(tor13, tor16, cls=ULink, port1=320, port2=420,
335                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
336                 spans=[19.25*km], delay='47us')
337     self.addLink(tor16, tor13, cls=ULink, port1=120, port2=220,
338                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
339                 spans=[19.25*km], delay='47us')
340
341     # San Juan Bautista -> Subtanjalla
342     self.addLink(tor15, tor18, cls=ULink, port1=320, port2=420,
343                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
344                 spans=[5*km], delay='17us')
345     self.addLink(tor18, tor15, cls=ULink, port1=120, port2=220,
346                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
347                 spans=[5*km], delay='17us')
348
349     # Subtanjalla -> ICA (71.36 Gbps / 20.2 Gbps)
350     self.addLink(tor17, tor2, cls=ULink, port1=320, port2=420,
351                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
352                 spans=[9.25*km], delay='31us')
353     self.addLink(tor2, tor17, cls=ULink, port1=120, port2=220,
354                 boost=('boost', {'target_gain':0*dB}),
355                 spans=[9.25*km], delay='31us')
356
357 def config(net):
358     # Configurar ToRs como antes
359     tors = [net.get(f'tor{i}') for i in range(1, 19)]
360

```

```

361 # Configuración de puertos WDM
362 for i in range(0, len(tors), 2):
363     # ToR impar
364     tors[i].connect(ethPort=1, wdmPort=320, channel=34)
365     tors[i].connect(ethPort=1, wdmPort=220, channel=34)
366     # ToR par
367     if i+1 < len(tors):
368         tors[i+1].connect(ethPort=1, wdmPort=420, channel=34)
369         tors[i+1].connect(ethPort=1, wdmPort=120, channel=34)
370
371 # Encender ToRs
372 for tor in tors:
373     tor.turn_on()
374
375 # Configurar switches
376 switches = [net.get(f's{i}') for i in range(1, 10)]
377 for s in switches:
378     # Configurar el switch para comportarse como un switch L2 normal
379     s.cmd('ovs-vsctl set bridge', s, 'protocols=OpenFlow10')
380     s.cmd('ovs-vsctl set-fail-mode', s, 'standalone')
381     # Habilitar STP para evitar bucles
382     s.cmd('ovs-vsctl set bridge', s, 'stp_enable=true')
383     # Configurar el switch para aprender direcciones MAC
384     s.cmd('ovs-ofctl add-flow', s, 'priority=0,actions=NORMAL')
385
386 # Configurar hosts con IPs estáticas
387 for i, host in enumerate(net.hosts, 1):
388     host.cmd(f'ifconfig {host.defaultIntf()} 192.168.10.{i}/24')
389     # Configurar ruta por defecto
390     host.cmd(f'ip route add default via 192.168.10.1')
391
392 def arp(net):
393     """Update ARP tables más agresivamente"""
394     for host in net.hosts:
395         host.cmd('arping -c 2 -U -I', host.defaultIntf(), host.IP())
396         # Añadir rutas estáticas a todos los otros hosts
397         for other_host in net.hosts:
398             if other_host != host:
399                 host.cmd(f'route add -host {other_host.IP()} dev {host.defaultIntf()}')
400
401
402 def test(net):
403     """Test network connectivity"""
404     config(net)
405     info('*** Configurando IPs y rutas...\n')
406     arp(net)
407     info('*** Probando conectividad básica\n')
408     net.pingAll(timeout=1)
409     info('*** Probando rutas específicas\n')
410     for host in net.hosts:
411         for other_host in net.hosts:
412             if host != other_host:
413                 info(f'*** {host.name} -> {other_host.name}: ')
414                 info(host.cmd(f'ping -c1 -w1 {other_host.IP()}'))
415
416
417 if __name__ == '__main__':
418     cleanup()
419     setLogLevel('info')
420
421     # Crear y configurar la red
422     topo = OpticalRingTopo()
423     net = Mininet(topo=topo, controller=Controller, switch=OVSKernelSwitch)
424     net.start()
425
426     # Configurar la red
427     config(net)
428
429     # Esperar a que STP converja
430     info('*** Esperando que STP converja\n')
431     time.sleep(15)

```

```
432
433     # Probar conectividad
434     info('*** Probando conectividad\n')
435     net.pingAll()
436
437     CLI(net)
438     net.stop()
```

.2. Generador de Tráfico

```

1  from scapy.all import IP, TCP, UDP, Raw, RandString, send
2  import random
3  import csv
4  import time
5  import threading
6  from datetime import datetime
7  from mininet.log import info
8
9  # Otras importaciones necesarias
10 from os.path import dirname, realpath, join
11 from subprocess import run, Popen
12 import time
13
14 class DirectTrafficGenerator:
15     def __init__(self, net):
16         """
17         Inicializa el generador de tráfico usando paquetes directos
18         net: objeto Mininet con la red óptica
19         """
20         self.net = net
21         self.stop_traffic = False
22         self.results = []
23         self.lock = threading.Lock()
24
25     def generate_traffic_pattern(self, num_sessions):
26         """Genera patrón de tráfico para una aplicación"""
27         pattern = []
28         for _ in range(num_sessions):
29             duration = random.uniform(0.5, 2.5)
30             interval = random.uniform(2, 3.5)
31             traffic_type = random.choice(['TCP', 'UDP'])
32             # Ajustar velocidades según las capacidades de tu red óptica
33             velocity = random.choice([400, 650, 800, 2000]) # Velocidad en Mbps
34             pattern.append((duration, interval, traffic_type, velocity))
35         return pattern
36
37     def generate_response_pattern(self, num_sessions):
38         """Genera patrón de tráfico para respuestas"""
39         pattern = []
40         for _ in range(num_sessions):
41             duration = random.uniform(0.5, 2.8)
42             interval = random.uniform(1.5, 3)
43             traffic_type = random.choice(['TCP', 'UDP'])
44             velocity = random.uniform(450, 1200) # Velocidad en Mbps
45             pattern.append((duration, interval, traffic_type, velocity))
46         return pattern
47
48     def send_traffic(self, src, dst, pattern, start_time, flow_id, is_response=False):
49         """
50         Envía tráfico entre dos hosts según el patrón especificado
51         """
52         simulation_start_time = time.time()
53         current_time = 0
54
55         for i, (duration, interval, traffic_type, velocity) in enumerate(pattern):
56             if self.stop_traffic:
57                 break
58
59             if is_response:
60                 time.sleep(1)
61                 current_time += 1
62             else:
63                 sleep_time = start_time if i == 0 else interval
64                 time.sleep(sleep_time)
65                 current_time += sleep_time
66
67             start = time.time() - simulation_start_time
68             end_time = start + duration
69             total_bytes = int(velocity * 1000000 * duration / 8) # Convertir Mbps a
70             bytes_sent = 0
71             packet_size = 1500 # MTU estándar

```

```

72
73     packets_sent = 0
74     start_sending = time.time()
75
76     while time.time() - simulation_start_time < end_time and not self.
stop_traffic:
77         try:
78             if traffic_type == 'TCP':
79                 packet = IP(src=src.IP(), dst=dst.IP())/TCP()/Raw(RandString(
size=packet_size))
80             else: # UDP
81                 packet = IP(src=src.IP(), dst=dst.IP())/UDP()/Raw(RandString(
size=packet_size))
82
83                 send(packet, verbose=False)
84                 bytes_sent += packet_size
85                 packets_sent += 1
86
87                 time_elapsed = time.time() - simulation_start_time - start
88                 expected_bytes = int(velocity * 1000000 * time_elapsed / 8)
89                 if bytes_sent > expected_bytes:
90                     time.sleep(0.001)
91
92         except Exception as e:
93             info(f"Error enviando paquete: {e}\n")
94             continue
95
96     end = time.time() - simulation_start_time
97     actual_duration = time.time() - start_sending
98     actual_throughput = (bytes_sent * 8) / (actual_duration * 1000000) # Mbps
99
100     with self.lock:
101         self.results.append({
102             'timestamp': datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'),
103             'flow_id': flow_id,
104             'source': src.name,
105             'destination': dst.name,
106             'start_time': f"{start:.2f}",
107             'end_time': f"{end:.2f}",
108             'traffic_type': traffic_type,
109             'target_rate': velocity,
110             'achieved_rate': round(actual_throughput, 2),
111             'packets_sent': packets_sent,
112             'bytes_sent': bytes_sent,
113             'is_response': is_response
114         })
115
116     def start_traffic(self, repetition):
117         """
118         Inicia la generación de tráfico en la red
119         """
120         hosts = self.net.hosts
121         flow_id = 1
122
123         # Definir grupos de hosts según su rol
124         ica_hosts = [h for h in hosts if h.name.startswith('h_ica')]
125         district_hosts = [h for h in hosts if h.name.startswith('h_') and not h.name.
startswith('h_ica')]
126
127         # Generar tráfico entre Ica y distritos
128         for _ in range(250): # 50 aplicaciones
129             num_sessions = random.randint(15, 30)
130
131             # 60% del tráfico desde/hacia Ica
132             if random.random() < 0.6:
133                 src = random.choice(ica_hosts)
134                 dst = random.choice(district_hosts)
135             else:
136                 src = random.choice(district_hosts)
137                 dst = random.choice([h for h in district_hosts if h != src])
138
139             pattern = self.generate_traffic_pattern(num_sessions)

```

```

140         response_pattern = self.generate_response_pattern(num_sessions)
141
142         # Iniciar threads para tráfico bidireccional
143         t1 = threading.Thread(target=self.send_traffic,
144                               args=(src, dst, pattern, 0, flow_id, False))
145         t2 = threading.Thread(target=self.send_traffic,
146                               args=(dst, src, response_pattern, 1, flow_id, True))
147
148         t1.start()
149         t2.start()
150
151         flow_id += 1
152
153     return self.results
154
155 def save_results(self, results, repetition):
156     """Guarda los resultados en un archivo CSV"""
157     filename = f'traffic_optical_rep_N_{repetition}.csv'
158     fieldnames = ['timestamp', 'flow_id', 'source', 'destination',
159                  'start_time', 'end_time', 'traffic_type', 'target_rate',
160                  'achieved_rate', 'packets_sent', 'bytes_sent', 'is_response']
161
162     with open(filename, 'w', newline='') as file:
163         writer = csv.DictWriter(file, fieldnames=fieldnames)
164         writer.writeheader()
165         for result in results:
166             writer.writerow(result)
167
168     return filename
169
170 def run_traffic_experiment(net, repetitions=1):
171     """
172     Ejecuta el experimento de tráfico completo
173     """
174     for repetition in range(repetitions):
175         info(f'\n*** Iniciando repetición {repetition + 1} de {repetitions}\n')
176
177         generator = DirectTrafficGenerator(net)
178
179         try:
180             results = generator.start_traffic(repetition)
181             filename = generator.save_results(results, repetition)
182             info(f'\n*** Resultados guardados en {filename}\n')
183
184         except KeyboardInterrupt:
185             info('\n*** Experimento interrumpido por el usuario\n')
186             generator.stop_traffic = True
187             break
188
189         except Exception as e:
190             info(f'\n*** Error en el experimento: {e}\n')
191             continue

```