



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE UNA RED LAN ÓPTICA PASIVA
(POLAN) UTILIZANDO EL ESTÁNDAR IEEE802.3CA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero en Telecomunicaciones

**AUTOR: CHRISTIAN DANIEL PALACIOS JARAMILLO
LUIS FERNANDO GALLARDO GALLARDO**

TUTOR: ING. JUAN PAÚL INGA ORTEGA , MgT.

Cuenca – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Christian Daniel Palacios Jaramillo con documento de identificación N° 0105194385 y Luis Fernando Gallardo Gallardo con documento de identificación N° 0705040921; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y autorizamos a que, sin fines de lucro, la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 10 de febrero de 2025

Atentamente,



Christian Daniel Palacios Jaramillo

0105194385



Luis Fernando Gallardo Gallardo

0705040921

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Christian Daniel Palacios Jaramillo con documento de identificación N° 0105194385 y Luis Fernando Gallardo Gallardo con documento de identificación N° 0705040921, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Análisis de la factibilidad técnica de una red LAN óptica pasiva (POLAN) utilizando el estándar IEEE802.3ca” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de febrero de 2025

Atentamente,



Christian Daniel Palacios Jaramillo

0105194385



Luis Fernando Gallardo Gallardo

0705040921

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Paúl Inga Ortega con documento de identificación N° 0000-0003-2580-9677, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE UNA RED LAN ÓPTICA PASIVA (POLAN) UTILIZANDO EL ESTÁNDAR IEEE802.3CA, realizado por Christian Daniel Palacios Jaramillo con documento de identificación N° 0105194385 y Luis Fernando Gallardo Gallardo con documento de identificación N° 0705040921, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de febrero de 2025

Atentamente,

Ing. Juan Paúl Inga Ortega, MgT.

0104166491

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, María y Christian, cuyo apoyo incondicional me ha dado la fuerza e inspiración para no rendirme en esta etapa de mi vida y alcanzar este momento crucial en la realización de este proyecto.

Agradezco profundamente a mi director de tesis, Juan Inga Ortega, por su guía, sus valiosos consejos y por compartir su vasto conocimiento conmigo. De igual manera, agradezco a mi compañero de tesis, Luis Fernando Gallardo, por su apoyo y orientación a lo largo de este trabajo. Su dedicación y respaldo han sido fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo, y estoy profundamente agradecido por cada aportación.

Christian Daniel Palacios Jaramillo

Quisiera dedicar unas palabras de profundo agradecimiento a mis padres, Sandra Gallardo y Wilson Gallardo, por ser mi pilar inquebrantable en esta travesía. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su confianza en mí fueron la luz que me guió incluso en los momentos más difíciles. Gracias a ustedes, logré superar los obstáculos y culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A nuestro director de tesis, Juan Inga Ortega, le extiendo mi gratitud por su paciencia, orientación y por compartir su conocimiento, el cual ha sido clave en el desarrollo de este trabajo. También quiero agradecer a mi compañero de tesis, Christian Daniel Palacios, por su compromiso y esfuerzo a lo largo de este proceso. Su apoyo ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

Luis Fernando Gallardo Gallardo

DEDICATORIAS

Dedicatoria de Christian Daniel Palacios Jaramillo

Dedicado con amor y gratitud a mis queridas abuelas, Ruth y Piedad, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para la culminación de mis estudios. Ustedes han sido mi fortaleza y mi fuente de inspiración para no rendirme, permitiéndome llegar a este momento en la culminación de mi trabajo de titulación. En palabras de Winston Churchill, “El éxito es la capacidad de ir de fracaso en fracaso sin perder el entusiasmo”. A ustedes les debo cada paso dado, cada obstáculo superado y cada logro alcanzado. Este logro también es suyo.

Con amor, Daniel.

Dedicatoria de Luis Fernando Gallardo Gallardo

A ti, madre, Sandra, y a ti, padre, Wilson, quienes con amor infinito y sacrificios silenciosos han sido la luz que ha guiado cada uno de mis pasos. Este logro no es solo mío, es también tuyo, pues en cada momento de incertidumbre, tus palabras de aliento fueron mi ancla, y en cada dificultad, tu fuerza me sostuvo. A través de las largas noches y los días de agotamiento, tu presencia, ya sea en la distancia o en un simple gesto de apoyo, me recordó siempre por qué debía continuar.

Con todo mi amor y gratitud, Fernando

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	III
Índice General	V
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XII
Resumen	XIII
Abstract	XIV
Antecedentes o Problema de Estudio	1
Justificación	3
Objetivos	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
Introducción	6
1. Marco Teórico	8
1.1. Redes PON	8
1.2. Redes LAN	11
1.3. Redes LAN Óptico Pasivas (POLAN)	13

1.3.1.	Aplicaciones de POLAN	13
1.3.2.	Ventajas y Desventajas de POLAN	14
1.4.	Tecnologías a Considerar para POLAN	16
1.4.1.	Estándar GEPON	16
1.4.2.	Estándar XGS-PON	17
1.4.3.	Estándar NG-PON2	18
1.4.4.	Estándar IEEE 802.3ca	19
1.5.	Fibra Óptica G.652D	20
1.5.1.	Características de la Fibra G.652D	20
1.5.2.	Uso de la Fibra G.652D en Estándares PON e IEEE	20
2.	Diseño y Simulación de la Red POLAN	26
2.1.	Establecimiento del Escenario	27
2.1.1.	Cálculo de Rutas Óptimas	28
2.1.2.	Rutas Óptimas Obtenidas	30
2.2.	Requerimientos de las Tecnologías a Evaluar	32
2.2.1.	Requerimientos Generales	32
2.2.2.	Requerimientos Específicos	33
2.3.	Simulación del Escenario	34
2.3.1.	Simulación de POLAN en OptiSystem	35
2.3.2.	Librerías del Simulador de Redes ópticas	36
2.3.3.	Simulación de las Distintas Tecnologías	40
3.	Análisis y Resultados	69
3.1.	Tecnología GEPON Rutas 1 y 2	69
3.1.1.	Enlace Downlink	70
3.1.2.	Enlace Uplink	71
3.2.	Tecnología XGS-PON Rutas 1 y 2	72
3.2.1.	Enlace Downlink	72
3.2.2.	Enlace Uplink	73
3.3.	Tecnología NG-PON2 Rutas 1 y 2	75
3.3.1.	Enlace Downlink	75

3.3.2. Enlace Uplink	76
3.4. Tecnología IEEE 802.3ca Rutas 1 y 2	78
3.4.1. Enlace Downlink	78
3.4.2. Enlace Uplink	79
3.5. Ruta alternativa entre el nodo 1 y 3	81
3.5.1. Tecnología GEPON	81
3.5.2. Tecnología XGS-PON	83
3.5.3. Tecnología NG-PON2	85
3.5.4. Tecnología IEEE 802.3ca	88
3.6. Análisis Comparativo de las Tecnologías Evaluadas	90
4. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros	92
4.1. Conclusiones Generales	92
4.2. Recomendaciones	93
4.3. Trabajos Futuros	94
Glosario	96
Referencias	100

Índice de figuras

1.1. Perspectiva de la ODN y la operación de una red GPON.	9
1.2. Longitudes de onda en IEEE 802.3.ca	19
2.1. Ruta 1 y Ruta 2 Principal.	31
2.2. Ruta 1 y Ruta Alternativa.	32
2.3. Interfaz de usuario de OptiSystem.	36
2.4. Fuente Óptica en OptiSystem.	37
2.5. Multiplexor en OptiSystem	37
2.6. Fibra Óptica en OptiSystem	38
2.7. Power Meter en OptiSystem	38
2.8. Atenuador Óptico	38
2.9. Demultiplexor	39
2.10. Receptor	39
2.11. Diagrama de Ojo.	39
2.12. Parámetros generales de la Simulación GEPON.	40
2.13. Parámetros de la Fuente (Main) GEPON.	41
2.14. Parámetros de la Fibra (Main) GEPON.	41
2.15. Parámetros de la Fibra (Dispersión) GEPON.	42
2.16. Parámetros del Atenuador GEPON.	42
2.17. Parámetros del Receptor Óptico GEPON.	43
2.18. Parámetros Generales de la Simulación GEPON.	43
2.19. Parámetros de la Fuente (Main) GEPON.	44
2.20. Parámetros de la Fibra (Main) GEPON.	44
2.21. Parámetros de la Fibra (Dispersión) GEPON.	45

2.22. Parametros del Atenuador GEPON.	45
2.23. Parámetros del Receptor Óptico GEPON.	46
2.24. Estructura de la red de distribución óptica GEPON.	46
2.25. Parámetros Generales de la Simulación XGS-PON.	47
2.26. Parámetros de la Fuente (Main) XGS-PON	47
2.27. Parámetros de la Fibra (Main) XGS-PON.	48
2.28. Parámetros de la Fibra (Dispersión) XGS-PON.	48
2.29. Parámetros del Atenuador XGS-PON.	49
2.30. Parámetros del Receptor Óptico XGS-PON.	49
2.31. Parámetros Generales de la Simulación XGS-PON.	50
2.32. Parámetros de la Fuente (Main) XGS-PON.	50
2.33. Parámetros de la Fibra (Main) XGS-PON.	51
2.34. Parámetros de la Fibra (Dispersión) XGS-PON.	51
2.35. Parámetros del Atenuador XGS-PON.	52
2.36. Parámetros del Receptor Óptico XGS-PON.	52
2.37. Estructura de la red de distribución óptica XGS-PON	52
2.38. Parámetros Generales de la Simulación NG-PON2.	53
2.39. Parámetros de la Fuente (Main) NG-PON2.	53
2.40. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) NG-PON2.	54
2.41. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) NG-PON2.	54
2.42. Parámetros de la Fibra (Main) NG-PON2.	55
2.43. Parámetros de la Fibra (Dispersión) NG-PON2.	55
2.44. Parámetros del Atenuador NG-PON2.	56
2.45. Parámetros del Receptor Óptico NG-PON2.	56
2.46. Parámetros Generales de la Simulación NG-PON2.	57
2.47. Parámetros de la Fuente (Main) NG-PON2.	57
2.48. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) NG-PON2.	58
2.49. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) NG-PON2.	58
2.50. Parámetros de la Fibra (Main) NG-PON2.	59
2.51. Parámetros de la Fibra (Dispersión) NG-PON2..	59
2.52. Parámetros del Atenuador NG-PON2.	60

2.53. Parámetros del Receptor Óptico NG-PON2.	60
2.54. Estructura de la red de distribución óptica NG-PON2	60
2.55. Parámetros General de la Simulación IEEE 802.3ca.	61
2.56. Parámetros de la Fuente (Main) IEEE 802.3ca.	61
2.57. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) IEEE 802.3ca.	62
2.58. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) IEEE 802.3ca.	62
2.59. Parámetros de la Fibra (Main) IEEE 802.3ca.	63
2.60. Parámetros de la Fibra (Dispersión) IEEE 802.3ca.	63
2.61. Parámetros del Atenuador IEEE 802.3ca.	64
2.62. Parámetros del Receptor Óptico IEEE 802.3ca..	64
2.63. Parámetros Generales de la Simulación IEEE 802.3ca.	65
2.64. Parámetros de la Fuente (Main) IEEE 802.3ca.	65
2.65. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) IEEE 802.3ca.	66
2.66. Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) IEEE 802.3ca.	66
2.67. Parámetros de la Fibra (Main) IEEE 802.3ca.	67
2.68. Parámetros de la Fibra (Dispersión) IEEE 802.3ca.	67
2.69. Parámetros del Atenuador IEEE 802.3ca.	68
2.70. Parámetros del Receptor Óptico IEEE 802.3ca.	68
2.71. Estructura de la red de distribución Óptico IEEE 802.3ca.	68
3.1. Diagrama de ojo (Downlink) GEPON.	70
3.2. Diagrama de ojo (Uplink) GEPON.	71
3.3. Diagrama de ojo (Downlink) XGS-PON	73
3.4. Diagrama de ojo (Uplink) XGS-PON	74
3.5. Diagrama de ojo (Downlink) NG-PON2.	75
3.6. Diagrama de ojo (Uplink) NG-PON2	77
3.7. Diagrama de ojo (Downlink) IEEE 802.3ca	78
3.8. Diagrama de ojo (Uplink) IEEE 802.3ca	80
3.9. Diagrama de ojo (Downlink) GEPON ruta Alternativa.	81
3.10. Diagrama de ojo (Uplink) GEPON Alternativa.	82
3.11. Diagrama de ojo (Downlink) XGS-PON Alternativa	83
3.12. Diagrama de ojo (Uplink) XGS-PON Alternativa.	84

3.13. Diagrama de ojo (Downlink) NG-PON2 Alternativa.	85
3.14. Diagrama de ojo (Uplink) NG-PON2 Alternativa.	87
3.15. Diagrama de ojo (Downlink) IEEE 802.3ca Alternativa.	88
3.16. Diagrama de ojo (Uplink) IEEE 802.3ca Alternativa.	89

Índice de tablas

1.2. Matriz Resumen del Estado del Arte	25
2.1. Comparativa de parámetros de las rutas calculadas.	31
2.2. Parámetros de la simulación	36
3.1. Resultados KPIs GEPON - Ruta 1 y 2 (DL)	71
3.2. Resultados KPIs GEPON - Ruta 1 y 2 (UL)	72
3.3. Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 1 y 2 (DL)	73
3.4. Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 1 y 2 (UL)	74
3.5. Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 1 y 2 (DL)	76
3.6. Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 1 y 2 (UL)	77
3.7. Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 1 y 2 (DL)	79
3.8. Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 1 y 2 (UL)	80
3.9. Resultados KPIs GEPON - Ruta 3 (DL)	82
3.10. Resultados KPIs GEPON - Ruta 3 (UL)	83
3.11. Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 3 (DL)	84
3.12. Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 3 (UL)	85
3.13. Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 3 (DL)	86
3.14. Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 3 (UL)	87
3.15. Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 3 (DL)	88
3.16. Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 3 (UL)	89
3.17. Comparación de resultados por tecnología y rutas.	90

Resumen

La presente propuesta de proyecto de titulación plantea el análisis de la factibilidad técnica del uso de una red LAN Óptica Pasiva (POLAN) para la interconexión de oficinas remotas en un entorno urbano, tomando como caso de estudio la conexión de la sede principal de la Universidad Politécnica Salesiana con 2 sitios remotos dentro de la ciudad de Cuenca. Con el objetivo de analizar el uso de una red de nueva generación, se propone una conexión de 50 Gb/s utilizando la tecnología especificada por el estándar IEEE 802.3.ca. El análisis de desempeño se basará en la simulación de la red mediante el software OptiSystem y la medición de variables clave de rendimiento (KPI) como la Tasa de Error de Bit (BER), el factor de calidad Q y la apertura del diagrama de ojo. Además, se incluirá un análisis comparativo del rendimiento con otros estándares actuales en el mercado, como EPON, XGS-PON y NG-PON2. Se espera que los resultados demuestren la factibilidad técnica de interconectar oficinas remotas a 25 o 50 Gb/s en un entorno urbano, donde las mayores distancias no excedan los 20 km, sin penalizaciones significativas en comparación con las transmisiones a 2.5 o 10 Gb/s que operan los estándares actuales en uso.

Palabras clave: EPON; IEEE 802.3ca; NG-PON2; POLAN; XGS-PON

Abstract

This proposed thesis project presents the analysis of the technical feasibility of using a Passive Optical LAN (POLAN) for the interconnection of remote offices in an urban environment, using as a case study the connection of the main campus of the Universidad Politécnica Salesiana with two remote sites within the city of Cuenca. With the aim of analyzing the use of a next-generation network, a 50 Gb/s connection is proposed using the technology specified by the IEEE 802.3.ca standard. The performance analysis will be based on simulating the network using OptiSystem software and measuring key performance indicators (KPIs) such as Bit Error Rate (BER), the Q factor, and the eye diagram opening. Additionally, a comparative analysis of the performance with other current market standards, such as EPON, XGS-PON, and NG-PON2, will be included. The results are expected to demonstrate the technical feasibility of interconnecting remote offices at 25 or 50 Gb/s in an urban environment, where the longest distances do not exceed 20 km, without significant penalties compared to transmissions at 2.5 or 10 Gb/s, which are supported by current standards in use.

Keywords: EPON; IEEE 802.3ca; NG-PON2; POLAN; XGS-PON

Antecedentes

El incremento en la demanda de ancho de banda, impulsado por aplicaciones modernas como la telepresencia en ultra alta definición, realidad virtual y aumentada, el Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), streaming empresarial y redes sociales corporativas, exige que las intranets empresariales adopten tecnologías y soluciones de transmisión de datos con capacidad de ultra ancho de banda [1]. Estas aplicaciones requieren una infraestructura de red robusta, con alta velocidad y conectividad estable. Por ello, la búsqueda de redes de comunicación eficientes y de alta velocidad ha crecido en diversos entornos como hospitales, residencias, centros corporativos, empresas y universidades [1]. Además, las limitaciones de las redes de área local (LAN, del inglés *Local Area Network*) tradicionales de cobre, en cuanto a ancho de banda, distancia y rendimiento, impiden satisfacer las crecientes necesidades de conectividad y transmisión de datos en un entorno privado cada vez más digitalizado y demandante [2], [3].

Así, a pesar de los esfuerzos por optimizar las redes LAN mediante mejoras experimentales en las tecnologías de cobre, se ha demostrado que estas no son suficientes para cubrir las necesidades tecnológicas actuales. A pesar de las tecnologías de cobre mejoradas, estas tienen deficiencias en la distancia de transmisión, que sigue siendo una barrera, ya que deben invertir en repetidores y amplificadores que hacen que el proyecto sea mucho más costoso en la implementación y despliegue para cubrir lo planificado [4].

Por lo tanto, las redes LAN Óptico Pasivas (POLAN, del inglés *Passive Optical LAN*) surgieron como una solución prometedora para afrontar las limitaciones que conllevan las redes de cobre. Las redes POLAN parten de las redes pasivas ópticas (PON, del inglés *Passive Optical Networks*), tienen una mayor capacidad en

la transmisión de datos y tienden a cubrir mayores distancias sin la necesidad de equipos repetidores o amplificadores [5]. La investigación desarrollada sobre la implementación de redes POLAN es poca en escenarios corporativos y educativos donde los requerimientos de conectividad son de gran importancia.

La reciente agregación del estándar IEEE 802.3ca ha propulsado la transmisión de datos a altas velocidades hasta 50 Gb/s utilizando varias longitudes de onda, garantizando un cambio en la implementación de las redes ópticas en estos entornos [6].

El desconocimiento sobre la viabilidad técnica de anexar este tipo de redes POLAN con estándares en entornos reales, junto con el gasto de implementación y la incompatibilidad con otras tecnologías, representa desafíos relevantes.

Justificación

Las redes **POLAN** ofrecen beneficios al permitir transmitir datos con altas velocidades y grandes distancias de hasta 20 km sin necesidad del uso de amplificadores intermedios. Esta arquitectura basada en fibra óptica simplifica el diseño de la red al eliminar equipos activos intermedios; sino que también reduce los costos operativos y de mantenimiento al reemplazar el costoso y complejo cableado de cobre con fibra óptica [7].

El estándar IEEE 802.3ca, al integrarse con **POLAN**, amplía las capacidades de las redes ópticas y permite soluciones escalables y eficientes en el uso de energía. En este ámbito, las redes **POLAN** dan una solución factible a los estándares actuales al incorporarse con el estándar IEEE 802.3ca, mejorando las capacidades del transmisor de la fibra al adherir múltiples longitudes de onda sobre un hilo, incrementando el ancho de banda, dando como resultado una solución posible a las demandas actuales. Además, su compatibilidad con estándares anteriores facilita una migración gradual sin reemplazo total de equipos, lo cual es una ventaja para las empresas.

En resultado, el imperativo de analizar y evaluar la factibilidad técnica de las redes **POLAN** con el estándar IEEE 802.3ca y los pocos estudios encontrados que aborden las barreras técnicas, podrían influir en la acogida de la tecnología, resulta de gran importancia para el desarrollo de las redes de comunicación óptica. Este estudio busca responder las dudas al proporcionar una valoración minuciosa que permita determinar si la asociación de estas tecnologías es capaz de retribuir las demandas actuales de conectividad.

Por ende, este proyecto diseña y caracteriza de manera técnica una red **POLAN** operante a 50 Gb/s bajo las especificaciones del estándar de comunicaciones IEEE 802.3ca. El objetivo principal es evaluar la factibilidad técnica de este tipo de medidas

para la implementación de las redes de oficinas o empresas ubicadas en un mismo entorno. Con esto se pretende abonar al diseño de arquitecturas de comunicación más eficientes y adaptables a las exigencias modernas.

Objetivos

Objetivo General

- Analizar la factibilidad técnica de una red LAN óptica pasiva (POLAN) utilizando el estándar IEEE 802.3ca.

Objetivos específicos:

1. Evaluar las características de una red POLAN operante a 50 Gb/s con los estándares GEPON, XGS-PON, NG-PON2 mediante indicadores clave de rendimiento (KPI).
2. Establecer un escenario de prueba que sirva como caso de estudio para el análisis de desempeño de una red POLAN operante a 50 Gb/s.
3. Simular la implementación de una red POLAN que interconecte sitios remotos de una red corporativa, en un entorno urbano.

Introducción

El crecimiento de la demanda de ancho de banda y la necesidad de mejores infraestructuras de telecomunicaciones han generado una investigación en tecnologías ópticas avanzadas. En ese sentido, las redes LAN ópticas pasivas abreviado **POLAN** son una opción viable para conectar las oficinas remotas en una red corporativa, además de facilitar una mayor transmisión, menor latencia, así como la optimización de los recursos [2], [3].

En el trabajo se analiza la factibilidad técnica de la red **POLAN** para la conexión de las sucursales remotas dentro de la misma red educativa en un entorno urbano. Para ello se ha utilizado el estándar IEEE 802.3ca, que permite velocidades de 50 Gb/s.

En consecuencia, se evalúan diferentes tecnologías de acceso óptico, como **EPON**, **XGS-PON** y **NG-PON2**, mediante indicadores clave de rendimiento (KPIs, del inglés *Key Performance Indicators*) como es el caso de la tasa de error de bit (BER, del inglés *Bit error rate*). También se propone un escenario de prueba para analizar el desempeño de la red y se desarrolla una simulación que permite evaluar el desarrollo de la red. Dicho escenario propuesto toma como caso la ciudad de Cuenca - Ecuador, considerando la comunicación entre un nodo principal y dos adicionales, generando la ruta óptima para la interconexión de los nodos. Para lograr el objetivo, se emplea el software de simulación de redes ópticas OptiSystem, que se caracteriza por un conjunto variado de **KPIs** utilizados en la simulación de redes de comunicación.

El análisis busca adecuar una visión general de las capacidades y limitaciones de una red **POLAN** en aplicaciones empresariales, identificando los beneficios en términos de ancho de banda, distancia y **KPIs** de la implementación.

Es claro que, en el Ecuador, solamente una empresa con permisos de operación de servicios de datos podría desplegar una red **POLAN** a través de una ciudad.

Además, el costo representa un desafío importante; por esto, una empresa como un banco o una institución educativa deberá arrendar el servicio a un proveedor del servicio. No obstante, evaluar las tecnologías que pueden ser usadas para este servicio, toma relevancia desde la perspectiva de la ingeniería en Telecomunicaciones

Capítulo 1

Marco Teórico

En el siguiente capítulo se da un resumen de las principales características de las redes ópticas pasivas (PON, del inglés *Passive Optical Network*), donde se incluye la arquitectura de red, ventajas y desventajas.

Además, se mencionan los aspectos teóricos a considerar que son necesarios para comprender las tecnologías relacionadas con las redes ópticas pasivas y su evolución hacia las Redes de Área Local Óptico Pasivas (POLAN, del inglés *Passive Optical Local Area Network*). Asimismo, con la revisión de conceptos, se detallan las bases a considerar para la implementación de las distintas tecnologías, explorando las ventajas de los estándares frente a las redes tradicionales. También se investiga la importancia que tiene el estándar IEEE 802.3ca en la mejora de las redes de fibra óptica.

1.1. Redes PON

Las redes PON constan de dos equipos activos, la terminal de línea óptica (OLT, del inglés *Optical Line Terminal*) ubicada en la oficina central del proveedor y las unidades de red ópticas (ONU, del inglés *Optical Network Unit*) que corresponden a los equipos de los usuarios finales. Los equipos intermedios de la red son pasivos, no hay equipos activos como amplificadores o repetidores entre las OLT y las ONU. Una de las principales partes de las redes PON es la red de distribución óptica (ODN, del inglés *Optical Distribution Network*) y consta de los mencionados equipos pasivos,

además de los dos activos mencionados antes [2].

Entre los equipos intermedios están los divisores ópticos, también conocidos en inglés como *splitters*, encargados de dividir la potencia de las señales transmitidas en varias ramas para aprovechar una única señal PON para varios usuarios (64 máximo). También, consta de las cajas de distribución óptica (ODF, del inglés *Optical Distribution Frame*) que están ubicadas en el cuarto de equipos, las cajas que sirven como puntos de agregación de red (NAP, del inglés *Data Aggregation Point*) en donde se distribuye la potencia óptica de un puerto PON para varios usuarios [2], [8]. La arquitectura de una red PON se muestra en la siguiente figura 1.1.

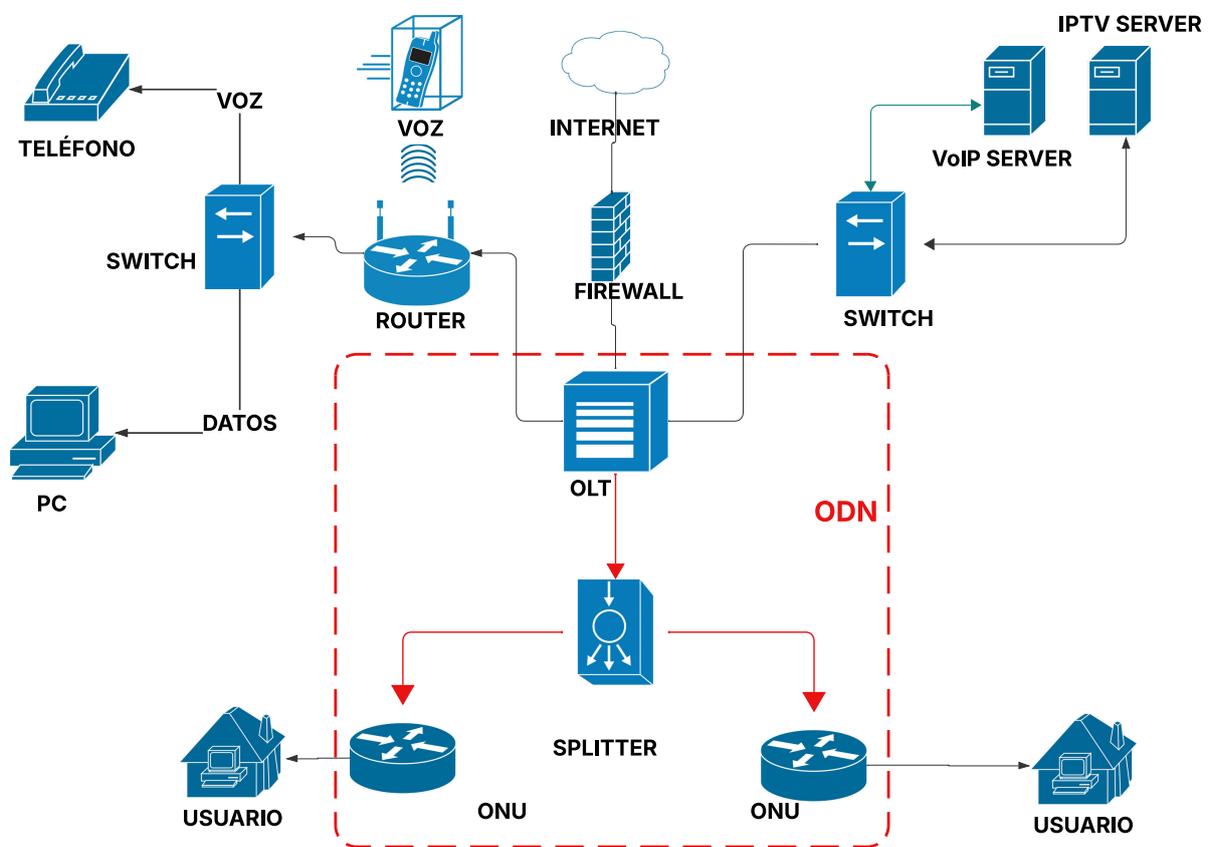


Figura 1.1: Perspectiva de la ODN y la operación de una red GPON.
Fuente: [Los Autores]

Las redes PON usan una arquitectura de fibra óptica compartida, lo que permite que múltiples usuarios tengan conexión al flujo de datos desde un mismo puerto a través del uso de divisores ópticos (*splitters*). De este modo, el ancho de banda se comparte entre los usuarios conectados al mismo puerto. En el enlace descendente

(*downlink*), los usuarios reciben la misma trama de datos a través de la multiplexación por división en el tiempo (TDM, del inglés *Time Division Multiplexing*), de manera que el ancho de banda se divide para el total de usuarios conectados a la vez [2], [8]. Es decir, los usuarios finales de la red PON acceden a una configuración de red punto a multipunto [9] en donde la información de cada usuario se transporta en tramas de datos divididas en distintas ranuras de tiempo, denominadas recursos de canal. De la misma forma, estos recursos se asignan de manera dinámica en función de la demanda de tráfico para cada uno de los usuarios que realizan una petición para acceso al canal [2]. A pesar de que los equipos terminales de los usuarios reciben los datos a través de un esquema por difusión, cada equipo ONU extrae sus propios datos basándose en un encabezado único que identifica la información asignada para cada usuario [10], [11].

En cambio, para la transmisión de datos en el enlace ascendente (*uplink*), cada ONU compite por el acceso al medio a través de la multiplexación por división de tiempo TDMA (*Time Division Multiple Access*), a través de la asignación de ventanas de tiempo a ser transmitidas en instantes óptimos para evitar la colisión de paquetes. La transmisión se realiza solo en el caso de que sea necesario, optimizando el uso de los recursos de ancho de banda [10], [11]. Además, se puede realizar la transmisión y recepción de datos a través del mismo medio usando un esquema de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, del inglés *Wavelength Division Multiplexing*), asignando una longitud de onda para *downlink* y otra para *uplink*. Este esquema se le conoce como multiplexación por división de longitud de onda gruesa (CWDM, del inglés *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y nos permite mejorar la eficiencia de la red [9].

El caso de WDM-PON también comparte la misma arquitectura de fibra punto a multipunto que las redes TDM-PON, pero se considera una configuración punto a punto, ya que a cada ONU se le asigna una longitud de onda dedicada. Lo que permite una asignación de ancho de banda única para cada usuario [10].

Lo que se busca es resaltar cómo estas tecnologías permiten una mejor asignación de los recursos, mejorando el rendimiento de la red y ofreciendo soluciones escalables según la demanda del ancho de banda [9].

1.2. Redes LAN

Las redes de Área Local (LAN, del inglés *Local Area Network*) están diseñadas para la transmisión de datos en zonas geográficas limitadas, es decir, donde los dispositivos de usuario (*hosts*) están interconectados dentro de un mismo espacio, como una oficina o una habitación del hogar. De este modo, a partir de enrutadores se da la conexión de un usuario desde la red del hogar hasta miles de dispositivos conectados a una red empresarial o corporativa.

Las redes LAN se dividen en diversas áreas de aplicación, como la informática distribuida, sistemas de oficina, redes terminales y sistemas industriales. Son redes privadas de alta velocidad que permiten la transmisión de grandes volúmenes de datos en un corto periodo de tiempo, superando a muchos sistemas tradicionales de comunicación óptica [4].

De la misma forma, la planificación y creación de una red LAN depende de las necesidades de la organización o empresa y se deberá tener en cuenta ciertos factores como la topología de red, el hardware a usar, el software y el método de transmisión de la red, dependiendo de los servicios y actividades internas que se gestionarán mediante la red [12].

Por consiguiente, se describen los factores esenciales para el diseño y la implementación de redes LAN [13]:

- **Software de red**

La calidad del software de red repercute en la funcionalidad, las fallas, la instalación correcta y modificación del mismo, elementos inherentes a la seguridad de los servicios que presta, de ahí la imperiosa necesidad de elegir el software según los requerimientos de la organización

- **Hardware de red**

Otro elemento de suma importancia, si de seguridad de la red se trata, es la calidad del hardware de red, este repercute en la compatibilidad, falla del equipo de red, confiabilidad y respaldo de información de este. En la selección del hardware se ha de tener en consideración la compatibilidad con el estándar LAN y la planta de cable seleccionado. Para lograr un buen servicio de seguridad

de la LAN se deben considerar tres aspectos: control de acceso, confiabilidad o privacidad y conexiones externas.

- **Control de acceso**

El control de acceso se realiza mediante un grupo de tecnologías que, implementa una infraestructura de red para cumplir con las políticas de seguridad, para así solucionar los problemas ocurridos en las empresas y proteger a todos los dispositivos conectados a dicha red que, pueden ser afectados, de esta forma se evita o limita el posible daño causado por las amenazas contra la seguridad de la misma [5].

- **Confidencialidad o privacidad**

Para garantizar la confidencialidad o privacidad en una red se debe implementar una tecnología de red que permita una conexión segura de una red LAN sobre una red pública, mediante una red privada virtual [5].

- **Conexiones externas**

Las conexiones externas se realizan a través de una red de área amplia (WAN, del inglés *Wide Area Network*) que comunica dos o más redes LAN mediante una conexión remota que utilice protocolos como TELNET o SSH, lo que acarrea un menor rendimiento en la transmisión de datos por las largas distancias entre el servidor y el punto de sesión [5]. De todos estos elementos dependerá en gran medida la integridad de los datos.

- **Integridad de datos**

Como ya hemos mencionado los servicios de seguridad de una red incluyen la protección de la información ante los posibles accesos no autorizados. Este servicio es conocido como integridad de datos, o sea asegurar que los valores correspondientes a cada dato no sean modificados de manera errónea; para lo cual el sistema debe proteger el acceso y gestión de los mismos por parte de individuos no autorizados, evitando que modifiquen o eliminen los valores de manera malintencionada [5].

1.3. Redes LAN Óptico Pasivas (POLAN)

Redes **POLAN** son una transformación de las redes **PON**, adaptadas para trabajar en entornos locales, como oficinas, campus universitarios o instalaciones industriales. **POLAN** aprovecha las ventajas de las **PON**, por ejemplo, la infraestructura de fibra óptica y la eliminación de equipos intermedios, la terminal central **OLT** y los usuarios finales **ONU**. El objetivo de estas redes es reemplazar las redes **LAN** tradicionales basadas en cobre, ofreciendo mejores anchos de banda y velocidades de transmisión, dando como resultado mayor eficiencia de datos [2].

Las ventajas de **POLAN** respecto a las redes **LAN** tradicionales es su capacidad de cubrir mayores distancias (hasta 20 km) sin el uso de amplificadores o repetidores, mejorando el límite de 100 m que tienen las redes de cobre. También, **POLAN** reduce el cableado necesario al permitir varias longitudes de onda sobre una única fibra óptica con múltiples usuarios mediante el uso de divisores ópticos. Esta arquitectura reduce significativamente los costos de instalación y mantenimiento [14]. Otra propiedad de las redes **POLAN** es el bajo consumo de energía. Al eliminar equipos intermedios, se reduce el consumo energético al volverlo más rentable a largo plazo. **POLAN** también genera mayor seguridad, ya que las longitudes de onda son mucho más complejas de interceptar que las señales eléctricas utilizadas en redes tradicionales [1].

1.3.1. Aplicaciones de POLAN

Redes **POLAN** son muy útiles en entornos empresariales y escolares, donde la capacidad de usuarios y dispositivos conectados es muy densa, y se requiere una capacidad elevada y confiable de transmisión. Por ejemplo, en un campus universitario, una red **POLAN** puede gestionar el tráfico de múltiples edificios y usuarios sin necesidad de complejas infraestructuras como switches y routers, lo que simplifica la gestión y reduce los costos operativos [14].

En entornos corporativos, **POLAN** es perfecto para manejar servicios críticos como compartir datos en la nube local, sistemas de telefonía IP y aplicaciones empresariales que demandan muchos recursos. Al ofrecer una infraestructura mejorable, **POLAN** puede crecer junto con las necesidades requeridas por la

institución, adaptándose al aumento de densidad de dispositivos y servicios sin realizar grandes cambios en la estructura [1].

1.3.2. Ventajas y Desventajas de POLAN

Entre las principales ventajas de POLAN identificadas, se tiene:

- **Escalabilidad y reducción de equipos:** POLAN fácil expansión de la red según la capacidad requerida en la red [1]. También permiten reducir el número de equipos activos en el segmento de red en comparación con las redes tradicionales basadas en cables de cobre ya que las POLAN usan divisores ópticos pasivos para compartir la señal óptica en lugar de requerir múltiples switches de capa 2 [12].
- **Ahorro en costos de infraestructura:** La utilización de una infraestructura previa permite la reutilización de la red óptica ya existente reduciendo el costo respecto a las redes LAN tradicionales [1]. Esto permite reducir costos de operación (conocido como OPEX) y los costos de capital (conocido como CAPEX). También, se reduce la necesidad de gestión de temperatura y otros requisitos asociados con los equipos activos.
- **Eficiencia energética:** POLAN consume menos energía que las soluciones basadas en cobre, al eliminar la necesidad de equipos activos intermedios [15].
- **Mayor seguridad:** Las redes ópticas son más seguras que las redes basadas en cobre, ya que las señales ópticas son más difíciles de interceptar [16].
- **Mayor alcance:** Con una distancia máxima de hasta 20 km sin repetidores, POLAN supera las limitaciones de las redes de cobre, que están restringidas a unos 100 metros [1].
- **Reducción de la congestión de los conductos de red:** Requieren menos cables en comparación con las redes de cobre tradicionales para lograr el mismo rendimiento, lo que reduce la congestión en los conductos de red [12].

- **Alto rendimiento y baja latencia:** Las redes POLAN basadas en las versiones mejoradas de EPON o GPON ofrecen un alto rendimiento, incluso superando los 10 Gb/s simétricos con baja latencia haciendo de estas redes adecuadas para aplicaciones sensibles al tiempo con casos de aplicaciones como en campus, hospitales y oficinas [12].
- **Modularidad y flexibilidad:** Que va de la mano con la escalabilidad de las redes. El uso de OLTs virtuales (vOLT) y SFP+/OLT permite una mayor modularidad y flexibilidad en la implementación de redes POL, lo que facilita su adaptación a diferentes entornos, como campus o edificios de oficinas.

Desventajas del uso de redes POLAN:

- **Costo inicial elevado:** La red POLAN tiene costos operativos menores, pero la inversión inicial es mayor por el uso de la fibra y equipos especializados como divisores ópticos y terminales de línea óptica, OLT [16].
- **Mantenimiento especializado:** El mantenimiento de POLAN requiere personal capacitado y herramientas especializadas ya que difieren a las redes tradicionales, lo que puede aumentar los costos a largo plazo [1].
- **Limitaciones en la capacidad de usuarios:** Al aumentar el número de usuarios o dispositivos conectados, puede degradar la calidad del servicio o la velocidad [15].
- **Dependencia de equipos pasivos y activos centrales:** Un fallo en el terminal de fibra óptica OLT o en algún divisor óptico crítico puede generar pérdidas o interrupciones importantes en toda la red, afectando la conectividad de los usuarios [16].
- **Dificultad de actualización o ampliación parcial:** Realizar modificaciones o expansiones en la red POLAN existente puede ser muy complicado, ya que requiere ajustes en la infraestructura óptica y técnicos capacitados [12].
- **Vulnerabilidad a problemas físicos:** Dado que POLAN utiliza fibra óptica en el sistema este puede ser susceptible a daños físicos en el cableado (como cortes

accidentales) en comparación con las redes de cobre, requiriendo reparaciones mucho más complejas y difíciles de realizar [12], [16].

- **Interoperabilidad limitada:** Debido a algunos componentes de diferentes fabricantes no pueden ser compatibles entre sí, dificultando la interconexión entre sistemas [15].

1.4. Tecnologías a Considerar para POLAN

En esta sección se presentan las tecnologías clave para la implementación de una POLAN, subrayando sus características, beneficios y la compatibilidad con métodos avanzados como la multiplexación por división de longitud de onda gruesa (CWDM, del inglés *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y multiplexación por división de tiempo y longitud de onda (TWDM, del inglés *Time and Wavelength Division Multiplexing*). Estas tecnologías brindan soluciones eficientes para atender las crecientes necesidades de ancho de banda en entornos empresariales y residenciales.

1.4.1. Estándar GEPON

El estándar Red Óptica Pasiva Ethernet de Gigabit (GEPON, del inglés *Gigabit Ethernet Passive Optical Network*) es una tecnología que utiliza Ethernet para transmitir datos a velocidades de hasta 1,25 Gbps, tanto en direcciones descendentes como ascendentes. Gracias a TWDM, permite compartir el ancho de banda entre los usuarios finales, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones residenciales y empresas pequeñas [17].

Principales características de GEPON:

- **Velocidad de transmisión:** permite velocidades simétricas de 1,25 Gbps para transmisión descendente y ascendente, ofreciendo una solución eficiente para redes de menor demanda. Además, soporta velocidades asimétricas de 1,25 Gbps para transmisión ascendente y 2,5 Gbps para transmisión descendente [18].
- **Compatibilidad con estándares Ethernet:** La tecnología de GEPON se basa

en Ethernet, lo que facilita su integración en infraestructuras previamente existentes.

- **Distancia de operación:** Soporta distancias de 20 km entre OLT y ONT, lo que lo hace perfecto para despliegues en zonas urbanas.
- **Longitudes de onda utilizadas:** Utiliza longitudes 1490 nm para downstream y 1310 nm para upstream, usando longitudes usadas en casos reales [18].
- **Relación de división:** permite divisiones de 1:32, optimizando el uso de la infraestructura.

En contexto POLAN, GEPON se adaptó como una solución inicial para redes pero se unieron posteriormente más tecnologías por el requerimiento de velocidades ultra altas.

1.4.2. Estándar XGS-PON

El estándar Red Óptica Pasiva Simétrica de 10 Gigabits (XGS-PON, del inglés *10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network*) representa una actualización de las redes PON, proporcionando velocidades simétricas de 10 Gbps tanto de subida como de bajada. XGS-PON utiliza WDM, permitiendo interactuar con tecnologías anteriores como GEPON, facilitando las actualizaciones sin la necesidad de reemplazar estructuras como la fibra [19].

Las características de esta tecnología se presentan a continuación [19]:

- **Velocidades simétricas:** Ofrece 10 Gbps para transmisión descendente y ascendente, satisfaciendo las demandas de aplicaciones de alta capacidad como streaming 4K, servicios en la nube y IoT.
- **Compatibilidad con GEPON:** Coexistencia con tecnologías anteriores como GEPON, asegurando una migración gradual en redes ya existentes.
- **Distancia de operación:** Soporta distancias de hasta 20 km dando una conectividad confiable en redes urbanas y suburbanas.

- **Longitudes de onda utilizadas:** 1490 nm para downstream y 1310 nm para upstream y para servicios adicionales que son aplicaciones adicionales, 1550 nm.
- **Relación de división:** Soporta relaciones de división de hasta 1:128 dando como resultado una gran cantidad de usuarios finales.

XGS-PON es ideal para implementaciones residenciales ya que permite gran densidad de usuarios finales.

1.4.3. Estándar NG-PON2

El estándar Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 2 (NG-PON2, del inglés, *Next-Generation Passive Optical Network 2*) es una de las tecnologías más avanzadas en redes **PON** que ofrece capacidades de 40 Gbps mediante el uso de **TWDM**. Este estándar permite el uso de varias longitudes de onda, cuatro en uplink y cuatro en downlink, permitiendo asignaciones dinámicas de recursos a los usuarios [20].

Características de **NG-PON2**:

- **Altas velocidades:** Soporta una capacidad de 40 Gbps al combinar varias longitudes de onda.
- **Asignación dinámica:** Se utiliza **TWDM** para asignar el ancho de banda de forma dinámica entre los equipos finales.
- **Compatibilidad con tecnologías anteriores:** Coexiste con red óptica pasiva gigabit (GPON, del inglés *Gigabit Passive Optical Network*), **XGS-PON** y **GEAPON**, lo que facilita la integración en redes existentes.
- **Longitudes de onda utilizadas:** **NG-PON2** emplea longitudes de onda previamente analizadas según las especificaciones de la fibra (1524 nm y 1544 nm) para downstream y entre (1596 nm y 1603 nm) para upstream.
- **Relación de división:** Permite relaciones de división de hasta (1:256), lo que la hace adecuada para redes de alta densidad de usuarios.

NG-PON2 es la solución preferida para entornos con altas exigencias de ancho de banda, como redes empresariales grandes y operadores de telecomunicaciones.

1.4.4. Estándar IEEE 802.3ca

El estándar IEEE 802.3ca marca un hito importante en el desarrollo de las Redes Ópticas Pasivas Ethernet (EPON, del inglés *Ethernet Passive Optical Network*) al ampliar la operación de las mismas para soportar velocidades de 25 Gb/s y 50 Gb/s. Este avance ofrece mejoras significativas en las redes de acceso para satisfacer las demandas crecientes de ancho de banda, impulsadas por aplicaciones avanzadas como video en 4K/8K, servicios en la nube y el Internet de las Cosas (IoT) [6].

Las características principales de IEEE 802.3ca son [6]:

- **Velocidades de operación:** Permite tanto la operación simétrica como asimétrica para las siguientes combinaciones de tasas de datos (descendente/ascendente): 25/10 Gb/s, 25/25 Gb/s, 50/10 Gb/s, 50/25 Gb/s, y 50/50 Gb/s.
- **Compatibilidad hacia atrás:** Mantiene compatibilidad con equipos 10G-EPON ya desplegados, así como con versiones anteriores como 1G-EPON y GPON. Esto permite que las implementaciones existentes puedan evolucionar sin necesidad de reemplazar toda la infraestructura.
- **Operación a larga distancia:** Soporta distancias de hasta 20 km y ofrece una relación de división de hasta (1:32), lo que incrementa la eficiencia en ODN.
- **Corrección de errores avanzada (FEC):** Se ha mejorado el sistema de corrección de errores para asegurar una transmisión más fiable a altas velocidades.

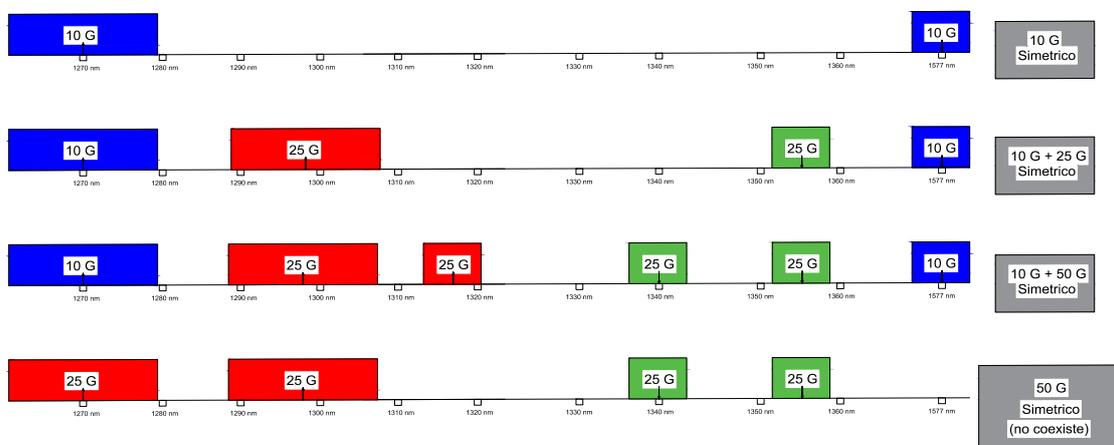


Figura 1.2: Longitudes de onda en IEEE 802.3ca

Fuente: [21]

También, este estándar utiliza **CWDM** para la asignación de longitudes de onda, asegurando compatibilidad con tecnologías avanzadas como **NG-PON2** que emplea **TWDM** [6]. Esto permite la compatibilidad con otras tecnologías, así como el uso de varias longitudes de onda tal como se muestra en la figura 1.2.

1.5. Fibra Óptica G.652D

Ya que algunos de los estándares de transmisión de datos se pueden usar para el despliegue de **POLAN** requieren **DWDM** o **CWDM**, a continuación se presentan las características principales de la fibra óptica G.652D y la factibilidad de su uso en los estándares para transmisión de datos, que antes se analizaron para ser implementados con **POLAN** [22].

1.5.1. Características de la Fibra G.652D

La fibra G.652D está diseñada para operar de manera óptima en las ventanas de baja atenuación (1310 nm y 1550 nm). Sus propiedades técnicas son ideales para aplicaciones que requieren largas distancias y alta capacidad de transmisión. A continuación, se presenta una tabla con sus principales especificaciones [22]:

Parámetro	Especificación
Longitud de referencia (nm)	1310, 1550
Atenuación (dB/km)	0.4 (1310 nm), 0.3 (1550 nm)
Dispersión (ps/nm/km)	3.5 (1310 nm), 17 (1550 nm)
Pendiente de dispersión (ps/nm/km)	0.085

Estas propiedades hacen que la G.652D sea adecuada para sistemas que operan tanto en la banda O (1260-1360 nm) como en las bandas C y L (1530-1625 nm), cubriendo así un amplio espectro de aplicaciones de telecomunicaciones [22].

1.5.2. Uso de la Fibra G.652D en Estándares PON e IEEE

A continuación se presenta un breve análisis del uso de la fibra G.652D en los estándares **GEPON**, **XGS-PON**, **NG-PON2**, IEEE 802.3ca.

GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network)

La tecnología **GEPON** opera en las longitudes de onda de 1310 nm para *upstream* (subida) y 1490 nm para *downstream* (bajada). La fibra G.652D es ideal para **GEPON** debido a [22]:

- Ofrece baja atenuación en estas longitudes de onda.
- Minimiza la dispersión cromática, mejorando la calidad de la señal en sistemas Gigabit.
- Su disponibilidad y estandarización global reducen costos de implementación.

XGS-PON (10 Gigabit Symmetrical PON)

XGS-PON utiliza longitudes de onda similares a las de **GEPON**, pero con capacidades de transmisión de 10 Gbps simétricos. La fibra G.652D permite [22]:

- La transmisión eficiente de datos a alta velocidad gracias a su baja dispersión en 1310 nm y 1490 nm.
- Un rendimiento confiable incluso en despliegues de larga distancia.

IEEE 802.3ca (25G-EPON)

El estándar IEEE 802.3ca utiliza multiplexación por longitudes de onda **CWDM** en un rango de 1270 nm a 1360 nm. Las ventajas de este rango incluyen [6]:

- **Baja atenuación:** La fibra G.652D tiene excelentes características de atenuación en esta región, lo que permite enlaces más largos sin necesidad de amplificadores.
- **Separación espectral eficiente:** El **CWDM** permite múltiples canales en un solo hilo de fibra, maximizando la capacidad de transmisión.
- **Compatibilidad con tecnologías existentes:** La coexistencia con estándares previos (como **GEPON**) es sencilla gracias a la amplia cobertura espectral de la G.652D.

NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2)

NG-PON2 emplea TWDM en las bandas C y L (1524-1625 nm) con longitudes de onda separadas por 200 GHz. La fibra G.652D es ventajosa porque [23]:

- **Rango ampliado:** Opera de manera eficiente en las bandas C y L, permitiendo el uso de hasta 8 longitudes de onda.
- **Baja dispersión cromática:** La dispersión de 17 ps/nm/km en 1550 nm es manejable mediante compensación en redes avanzadas.
- **Evolución futura:** Su compatibilidad con amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFAs) en la banda C facilita la ampliación de la capacidad de la red.

Resumen del Estado del Arte

La tecnología IEEE 802.3ca tiende a tener más capacidades que la tecnología GEPON; por ende, soporta múltiples longitudes de onda, dando como resultado 25 Gb/s y generando velocidades simétricas o asimétricas para tasas de transmisión de 50 Gb/s. Esto nos permite mantener compatibilidad con tecnologías anteriores como EPON de 10 Gb/s. Esta tecnología soluciona limitaciones como podría ser ancho de banda y compatibilidad con tecnologías con capacidades similares, mejorando la capacidad de transmisión en entornos corporativos y urbanos [6].

Este documento presenta un análisis de una red LAN basada en POLAN. La arquitectura basada en redes de fibra óptica ofrece una mejora significativa en la transmisión de datos, voz y video en entornos educativos y corporativos. De igual importancia destacan los bajos costos operativos; además, se ahorra en espacio al no usar equipos intermedios. Por consiguiente, se deben identificar los desafíos de compatibilidad y mantenimiento [15].

Además, se comparan los costos de adquisición en las tecnologías GPON, NG-PON2 y IEEE 802.3ca. Igualmente, se comparan simulaciones y el algoritmo de búsqueda de topología óptima (OTS) para optimizar la topología de red. De igual forma, se evidencia la viabilidad económica de las tecnologías en función del ancho de

banda. Se determinó que NG-PON2 y IEEE 802.3ca son más escalables a la demanda, GPON sigue siendo una opción confiable en contextos de menores requerimientos.

A la vez se aumentó el ancho de banda en redes de acceso resaltando la necesidad del aumento de ancho de banda utilizando métodos más avanzados para mejorar la capacidad y eficiencia [24].

En la presente revisión de redes PON se destaca la evolución a través de tres generaciones. Además, examina los desafíos de la segunda generación NG-PON2, el alcance, consumo, y propone soluciones para mejorar el rendimiento. Sin embargo, NG-PON2 enfrenta limitaciones significativas que requieren más investigación [23].

González Carmona nos habla acerca de un simulador de enlaces SCM-WDM para redes PON; asimismo, nos muestra una herramienta para evaluar y diseñar infraestructuras ópticas. De la misma forma se aborda el problema de alto costo y la implementación, que ofrece una solución de optimización al despliegue de redes ópticas mediante simulaciones. De manera que facilita decisiones informadas sobre la arquitectura óptima para proveedores de servicios [9].

El artículo analiza desafíos y soluciones de implementación de la tecnología NG-PON2 (determinada en la serie ITU-T G.989). Además, examina la compatibilidad con estándares previos como los siguientes: G-PON, XG-PON. También, el acceso a configuraciones optimizadas como backhaul y fronthaul. Además, propone soluciones para mitigar la interferencia en la capa física [20].

El documento detalla una descripción de las redes PON, destacando su arquitectura y funcionalidad tales como TDMA y DBA. Este análisis proporciona de manera detallada el funcionamiento interno y las limitaciones físicas de la estructura, como las pérdidas ópticas y las máximas distancias. Sin embargo, no aborda directamente nuevos desafíos o soluciones innovadoras para superar estos límites [17].

En otro estudio, se presenta el estándar ITU-T G.9807.1, que define XGS-PON como una red óptica pasiva simétrica de 10 Gbps para aplicaciones residenciales, empresariales y de backhaul móvil. Se destaca la compatibilidad con G-PON, XG-PON y NG-PON2, lo que permite la coexistencia de estas tecnologías en una misma red de distribución óptica. Un aporte importante de este trabajo es la inclusión de

especificaciones para la reducción del ruido fuera de banda en la ONU, lo que mejora la convivencia con otros sistemas en la red [19].

De igual importancia, se analiza la evolución de las redes de comunicaciones a través de la tecnología GPON, destacando su capacidad para ofrecer servicios de alta velocidad y su papel en la transformación digital. En este contexto, el autor identifica la creciente demanda de ancho de banda como un problema crítico, demostrando cómo GPON soluciona este desafío al permitir conexiones más eficientes y escalables. Así, este estudio contribuye al entendimiento de la importancia de la fibra óptica en el futuro de las telecomunicaciones [25]. También, el artículo aborda la evolución de las redes de acceso hacia un enfoque de Fibra hasta el Hogar (FTTH), utilizando redes ópticas pasivas (PON), para enfrentar la creciente demanda de servicios de alta definición. Este estudio propone técnicas de acceso múltiple como TDM y WDM, como soluciones viables para este desafío. En consecuencia, se concluye que la tecnología WDM-PON podría convertirse en la opción preferida para redes de acceso de fibra altamente eficientes y sostenibles en el futuro [3].

Lam en [7], se presenta un análisis integral de las redes PON, destacando su arquitectura, funcionamiento y evolución a través de diversos estándares como BPON, EPON y GPON, así como su transición hacia WDM-PON y redes de nueva generación. Este trabajo propone estrategias de protección y recuperación ante fallos, optimizando la disponibilidad y confiabilidad de estas redes.

En primer lugar, el trabajo de Argüello Lozano describe el diseño e implementación de una red óptica POLAN para interconectar los campus de la Universidad Politécnica Salesiana, abordando el problema de la limitación en la capacidad de transmisión de datos a largas distancias. Este estudio optimiza la transmisión utilizando la modulación NRZ y el estándar XGS-PON, demostrando experimentalmente la viabilidad de la red para satisfacer las crecientes necesidades de ancho de banda. Así, este trabajo proporciona una base sólida para el desarrollo de sistemas de comunicación óptica más eficientes en entornos académicos [1].

A través de una propuesta innovadora, Ciceri. Presenta un nuevo mecanismo de DBA para EPON, con el fin de mejorar la utilización del ancho de banda entre múltiples ONU. Este enfoque optimiza el rendimiento de la red al redistribuir el ancho

Capítulo 2

Diseño y Simulación de la Red POLAN

Para el análisis técnico de la implementación de POLAN, se toma como caso de estudio un entorno urbano en la ciudad de Cuenca, Ecuador. El estudio inicia con el diseño de las rutas de la red, las cuales deben conectar la sede principal de la Universidad Politécnica Salesiana en Cuenca con dos sucursales remotas: el campus María Auxiliadora y el Colegio Técnico Salesiano, ambas pertenecientes a la comunidad salesiana de la misma ciudad.

En el diseño de estas rutas, se busca optimizar la distancia recorrida considerando factores restrictivos, como la normativa local para el despliegue de redes de fibra óptica en Cuenca, la misma que limita las opciones de tendido. En este contexto, se propone una red de fibra óptica con tendido aéreo, una solución común en la ciudad debido a la ausencia generalizada de infraestructura subterránea para redes. Además, el costo de arrendamiento de ductos no está disponible públicamente, lo que refuerza la viabilidad de esta opción.

Tras definir las rutas y calcular su distancia total, se describen los métodos y herramientas empleados en el simulador OptiSystem. Estos permiten garantizar un diseño eficiente y viable que cumpla con los requisitos de transmisión de datos a alta velocidad, en concordancia con los estándares analizados, especialmente el estándar principal de este estudio: IEEE 802.3ca.

2.1. Establecimiento del Escenario

Como antes se indicó, este proyecto se centra en conectar tres nodos siendo esto: el primer nodo identificado como H_1 es el campus El Vecino de la Universidad Politécnica Salesiana en Cuenca, el segundo nodo se identifica como H_2 y que corresponde al Campus María Auxiliadora y el tercer nodo identificado como H_3 en el Colegio Técnico Salesiano. Se elige al Campus El Vecino como punto de partida debido a su ubicación central y a su importancia en la infraestructura universitaria, permitiendo optimizar la interconexión entre las sedes.

Para que el estudio se apegue a la realidad del escenario, en la determinación de las rutas se analizan factores clave como las distancias físicas entre las ubicaciones, la disponibilidad de postes de servicio ya que es un tendido aéreo y la necesidad del uso de ductos por el soterramiento obligatorio de algunas zonas de la ciudad. Así, a través de información georeferenciada de la ubicación de postes y zonas soterradas se aplicó el algoritmo de Dijkstra.

Por otra parte, de acuerdo con la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), en el Ecuador se ha optado por implementar redes de telecomunicaciones aéreas en lugar de subterráneas [28]. Esto ocurre a pesar de que, según el artículo 4 del acuerdo ministerial No. 017-2017, el techo tarifario por uso de postes es mayor al de ductos [29]. Además, la falta de infraestructura adecuada para el soterramiento es limitada, por lo que el tendido aéreo sigue siendo la opción más viable mientras no concluya el plan de soterramiento aprobado en 2024 por el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL), según el acuerdo 2024-0020 [28]. También, ya que el despliegue de redes soterradas puede llegar a duplicar el presupuesto, debido a que las obras civiles necesarias requieren una inversión significativa, promueve el uso de tendido aéreo para expandir los servicios de telecomunicaciones.

Entonces, ya que la posibilidad de encontrar infraestructura para el despliegue de una red de fibra óptica soterrada es baja y que las características de la ciudad donde se aplica este trabajo como caso de estudio cuenta, en su mayoría, con infraestructura para un tendido aéreo, el diseño de las rutas se basan en el uso de postes.

2.1.1. Cálculo de Rutas Óptimas

Las rutas a calcular son dos, la ruta H_1-H_2 y la ruta H_1-H_3 . Este cálculo es un caso de aplicación del problema general de enrutamiento en el que es necesario definir la ruta o camino más óptimo entre un nodo origen (n_s) y un nodo destino (n_t). En este contexto, el concepto de ruta óptima se enmarca en una función de optimización de mínimo costo, siendo la distancia el costo a minimizar en el problema de optimización que permite obtener la ruta más corta. En este caso, se consideró un solo nodo de origen $n_s = H_1$ y dos nodos de destino que corresponden al conjunto $n_t = \{H_2, H_3\}$.

Representación del Problema con Grafos y uso de Dijkstra

El problema general de enrutamiento considera un grafo dirigido aplicado para definir las rutas más óptimas y el algoritmo de uso común para este problema es el de Dijkstra modelando el escenario a través de un grafo dirigido definido como $G = (V, E)$ [30], [31], donde:

- Vértices (V): Representan todos los elementos por los cuales puede pasar un camino y que en este caso es la unión del conjunto de los $N = 3$ nodos a conectar $H = \{H_1, H_2, H_3\}$ y el conjunto de postes $P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$. Es decir que el número total de vértices en el escenario es $K = N + M$, siendo por supuesto M la cantidad de postes disponibles en la zona. De esta manera, $V = H \cup P$
- Enlaces (E): Representan los enlaces posibles, siendo e_i como en el i -ésimo enlace y $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{N+M-1}\}$ el conjunto ponderados por su costo, distancia o atenuación (representadas con líneas).

Cada vértice del escenario posee coordenadas georeferenciadas tales que v_{x_i} y v_{y_i} corresponden a las coordenadas en x e y del vértice i respectivamente. A partir de estas coordenadas se obtiene la matriz de distancias $dist \in \mathbb{R}^{K \times K}$, de la cual, es claro que se trata de una matriz cuadrada que se obtiene al calcular la distancia de cada vértice contra todos los otros vértices del escenario usando la fórmula de *Haversine* que aplica para coordenadas georeferenciadas. La matriz $dist$ en su diagonal principal tendrá valores en 0 ya que corresponde a la distancia de un vértice i hacia el mismo

vértice; por lo tanto, los valores de dicha diagonal deben cambiarse a infinito ya que el cálculo de las rutas debe evitar lazos.

A partir de la matriz de distancias $dist$ se obtiene la matriz de adyacencias A donde cada elemento $a_{i,j}$ podrá ser 1 o 0 dependiendo de si la distancia entre el nodo i y el nodo j cumple con la distancia de restricción $d_{restric}$; es decir, si cumple con $dist_{i,j} \leq d_{restric}$. La distancia de restricción que es la distancia promedio entre postes definida como 47 metros. Esta matriz A permite la implementación del grafo como tal, de manera que si $a_{i,j} = 1$ significa que puede conectarse el vértice i con el vértice j y por tanto es un enlace factible a considerarse en el cálculo de las rutas.

Sin embargo, en algunas zonas, la distancia entre postes puede ser mayor que la distancia de restricción. Por ello, es posible cambiar el estado de algún elemento de la matriz A de 0 a 1, de modo que el algoritmo de Dijkstra pueda considerar el enlace modificado en el cálculo de las rutas. Esto puede tomar tiempo si en la misma plataforma del sistema de información geográfica (GIS, del inglés *Geographical Information System*) no se limitan en forma correcta los postes que serán parte del análisis. Además, en el caso del nodo principal H_1 , se identificó que el poste más cercano a la zona donde se estima ubicar los equipos de red (el laboratorio de telecomunicaciones de la sede) está fuera de la distancia de restricción. Dado que este vértice debe ser fijo y utilizado en el cálculo de rutas, se automatiza el proceso verificando en la matriz $dist$ cuáles son los postes más cercanos para que los elementos correspondientes de la matriz A tomen el valor de 1.

El algoritmo de Dijkstra fue seleccionado por su eficacia para encontrar rutas óptimas en grafos ponderados y su bajo consumo de recursos computacionales. En este caso, se trabajó con $M = 18200$, por lo cual, para gestionar el cálculo de rutas sin crear un desgaste computacional, se dividió el cálculo de forma que se obtenga una matriz de distancias en 16 partes para luego unir los resultados en una sola matriz antes de realizar el procedimiento de cálculo.

La versión de Dijkstra usada es la de Joseph Kirk para MATLAB, en donde se carga la matriz de distancias usada como los pesos de los enlaces factibles, la matriz de adyacencias, el vector de nodos de origen y el vector de nodos de destino.

2.1.2. Rutas Óptimas Obtenidas

La primera ruta obtenida es identificada como **Ruta 1: Conexión entre H_1 y H_2** . Se identificó que es la ruta más corta y se obtuvo de forma directa con la información cargada al algoritmo de Dijkstra. Tiene una longitud de 2.46 km y utiliza un total de 64 postes para el tendido de fibra óptica.

La segunda ruta obtenida es identificada como **Ruta 2: Conexión entre H_1 y H_3** . Tiene una longitud de 6.376 km, empleando 147 postes. Sin embargo, en su recorrido incluye un tramo soterrado con una longitud estimada de 85 metros; esto debido a que atraviesa la ruta del tranvía de la ciudad de Cuenca.

Dado que este tramo soterrado implica el uso de ductos, es relevante considerar los costos asociados. Según el Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (RLOT) del Ecuador, en el artículo 99 se indica que los costos por arrendamiento y compartición de infraestructura para el uso de telecomunicaciones dependen de lo que puedan pactar las empresas que usen dichos recursos mientras los valores se enmarquen en las regulaciones ARCOTEL. Así, de acuerdo con el artículo 4 del acuerdo ministerial No. 017-2017, el techo tarifario para uso de ductos es de \$3,71 USD por ducto por año por metro [29].

Este valor, aunque puede no ser significativo como un costo adicional, los ductos en la ciudad de Cuenca tienden a saturarse por el uso de la empresa de telecomunicaciones pública local, lo que hace poco factible el uso de esta infraestructura. Por esto, hasta la fecha de cierre de redacción de este documento, se identifica que los operadores de servicios de Internet privados prefieren no usar rutas donde sea necesario pasar fibra óptica por los ductos de la ciudad, por lo cual, se decidió analizar una tercera ruta. Se trata de la **Ruta 3: alternativa a la conexión entre H_1 y H_3** .

Esta opción evita por completo la zona soterrada de la ciudad de Cuenca, no obstante, representa un incremento importante en la distancia total a 10.451 km y requiriendo 286 postes para el despliegue. Aunque implica un recorrido más largo, la Ruta 3 no considera los costos asociados a la infraestructura subterránea y se enmarca en los recorridos de las redes de los proveedores de Internet que operan en la ciudad.

La tabla 2.1 resume estos aspectos de las tres rutas calculadas.

Tabla 2.1: Comparativa de parámetros de las rutas calculadas.

	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Número de Postes	64	147	286
Distancia Total	2.46 km	6.376 km	10.451 km

La figura 2.1 muestra la Ruta 1 en azul y la Ruta 2 en rojo sobre el mapa de la ciudad de Cuenca, así como las ubicaciones de los nodos a conectar.

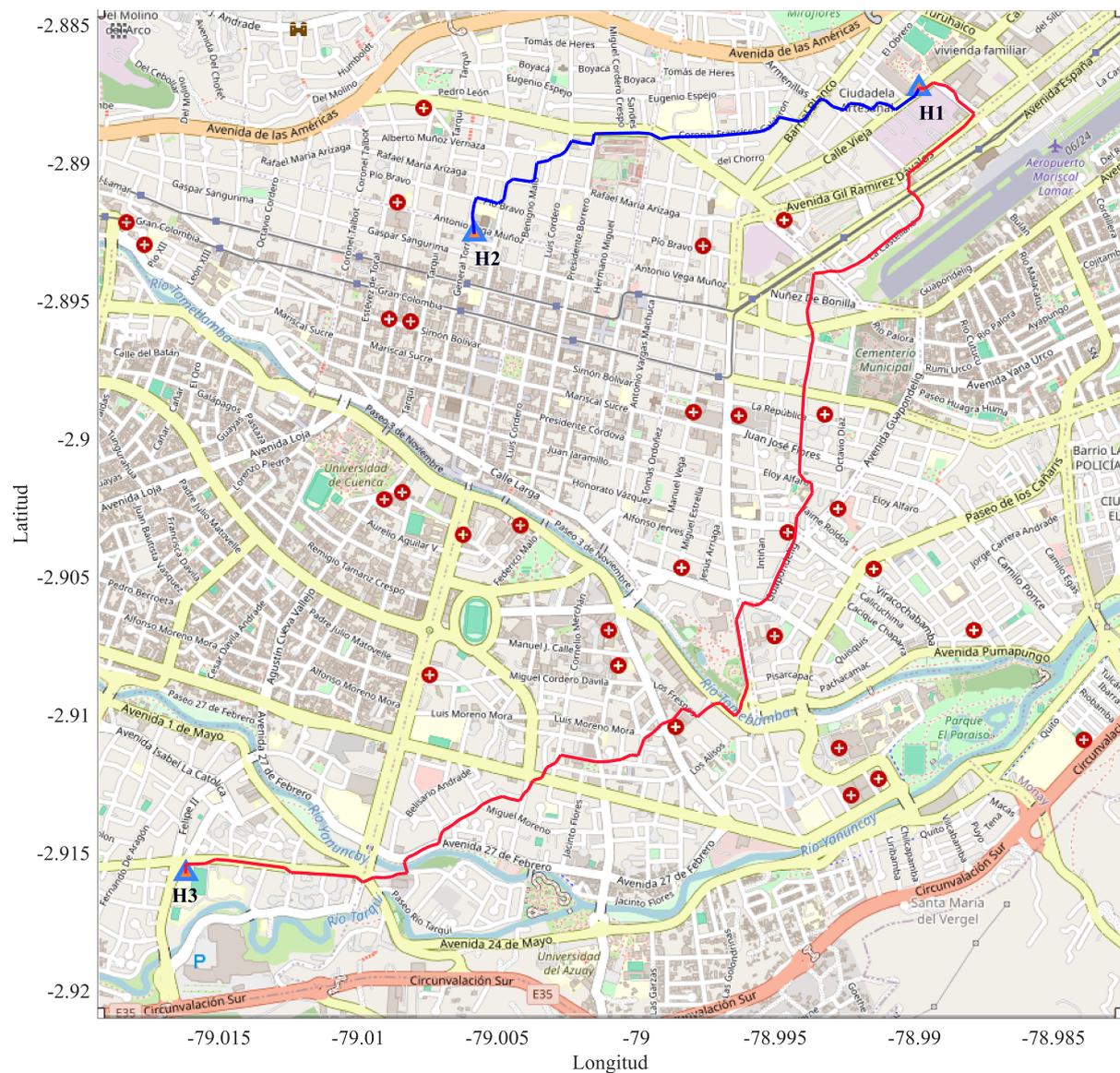


Figura 2.1: Ruta 1 y Ruta 2 Principal.
Fuente: [Los Autores]

La figura 2.2 muestra la Ruta 1 en azul y la Ruta 3 en rojo sobre el mapa de la

- Curva de Dispersión de la Fibra óptica: Con las características de la fibra G.652.D ya que es la fibra más común en el mercado y puede trabajar con cada una de las tecnologías a analizar.
- OLT (Optical Line Terminal): Compatible con todos los estándares del análisis y capaz de gestionar múltiples longitudes de onda.
- ONT (Optical Network Terminal): Dispositivos adaptados para recibir hasta 50 Gbps.
- Divisores ópticos (splitters): Relación de división 1:64, optimizada para escenarios urbanos.

2.2.2. Requerimientos Específicos

Los campos y/o requerimientos que se deben modificar según cada tecnología son:

- Fibra óptica: Se debe especificar los parámetros de atenuación y dispersión de la fibra usada según la longitud de onda que requiera cada tecnología analizada.
- Parámetros de simulación: Ajustes en la potencia de transmisión y sensibilidad de los receptores según los requerimientos de cada tecnología evaluada.
- Topología de red: Diseño jerárquico con configuraciones punto a multipunto.
- Presupuesto óptico: Optimización para garantizar que las pérdidas por atenuación y división sean aceptables.
- Longitud de onda del Transmisor: Para cada caso se deberá configurar la longitud de onda que corresponda.

Las especificaciones que deben ser configuradas para cada tecnología se detallan seguidamente.

2.3. Simulación del Escenario

Para la simulación de [POLAN](#), se identificó el software OptiSystem como una herramienta clave, dado que es un simulador de alto nivel utilizado en el ámbito de las comunicaciones ópticas. De igual importancia, se destaca por su capacidad para modelar y simular sistemas de fibra óptica con un enfoque detallado y realista. Estas características hacen de OptiSystem la herramienta adecuada para evaluar tecnologías avanzadas como IEEE 802.3ca, y otras tecnologías alternativas como [GEPON](#), [XGS-PON](#) y [NG-PON2](#).

Una de las principales fortalezas de OptiSystem es su precisión técnica, que permite reflejar con exactitud los principios fundamentales de las redes ópticas. Esta capacidad es esencial para analizar el comportamiento de parámetros críticos, como la eficiencia en la transmisión y la adaptabilidad en entornos urbanos. Además, el software ofrece opciones avanzadas de personalización que posibilitan configurar simulaciones ajustadas a las necesidades específicas del proyecto, tales como el diseño detallado de subsistemas y la evaluación de escenarios personalizados.

Por otro lado, otra ventaja significativa de OptiSystem es su enfoque integral para evaluar el rendimiento de tecnologías ópticas. De hecho, permite predecir el comportamiento del sistema mediante el cálculo de parámetros clave como el [BER](#) y el Q-Factor, utilizando técnicas numéricas y semianalíticas. Estas herramientas son útiles especialmente en sistemas afectados por ruido e interferencias entre símbolos. Entre las herramientas de análisis disponibles se incluyen:

- Q-Factor
- Diagrama de ojo
- BER
- Potencia de señal
- Decisión instantánea, entre otras.

Estas funcionalidades permiten la obtención de una visión clara y profunda del desempeño de las tecnologías, facilitando unas comparaciones precisas entre distintas

tecnologías. De esta manera, se logra una comprensión más detallada de las ventajas y desventajas de cada opción.

A pesar de las distintas existencias y otras soluciones en el mercado, se usó OptiSystem porque sobresale por su capacidad para manejar simulaciones complejas y su flexibilidad en la creación de escenarios. En cambio, otros programas pueden presentar limitaciones al intentar modelar tecnologías emergentes como IEEE 802.3ca. Sin embargo, este software permite explorar diferentes configuraciones de red, optimizando recursos y, por lo tanto, reduciendo la necesidad de pruebas físicas costosas.

Así, OptiSystem se posiciona como una opción más avanzada y eficiente, capaz de ofrecer soluciones precisas y adaptadas a las demandas actuales del campo de las comunicaciones ópticas.

2.3.1. Simulación de POLAN en OptiSystem

En la sección se describen los componentes utilizados en las tecnologías de red implementadas para el desarrollo de la actividad realizada en la Universidad Politécnica Salesiana, como el desarrollo detallado de la simulación.

En la figura de interfaz de usuario 2.3 se visualizan los campos principales. El recuadro rojo está la opción de edición de OptiSystem donde encuentran opciones de diseño, en el recuadro azul que agrupa las configuraciones de diseño generales como el tamaño de hoja, los parámetros generales de la simulación y las propiedades del autor. Después, el recuadro negro indica la biblioteca de componentes disponibles utilizados en la simulación, y por último, el recuadro verde muestra dónde se establece la estructura de tecnologías.

De igual importancia, la tabla 2.2 presenta los parámetros configurados para cada una de las distintas tecnologías. En ella se puede visualizar cada tecnología con su respectiva tasa de bits, longitud de onda y potencia óptica.

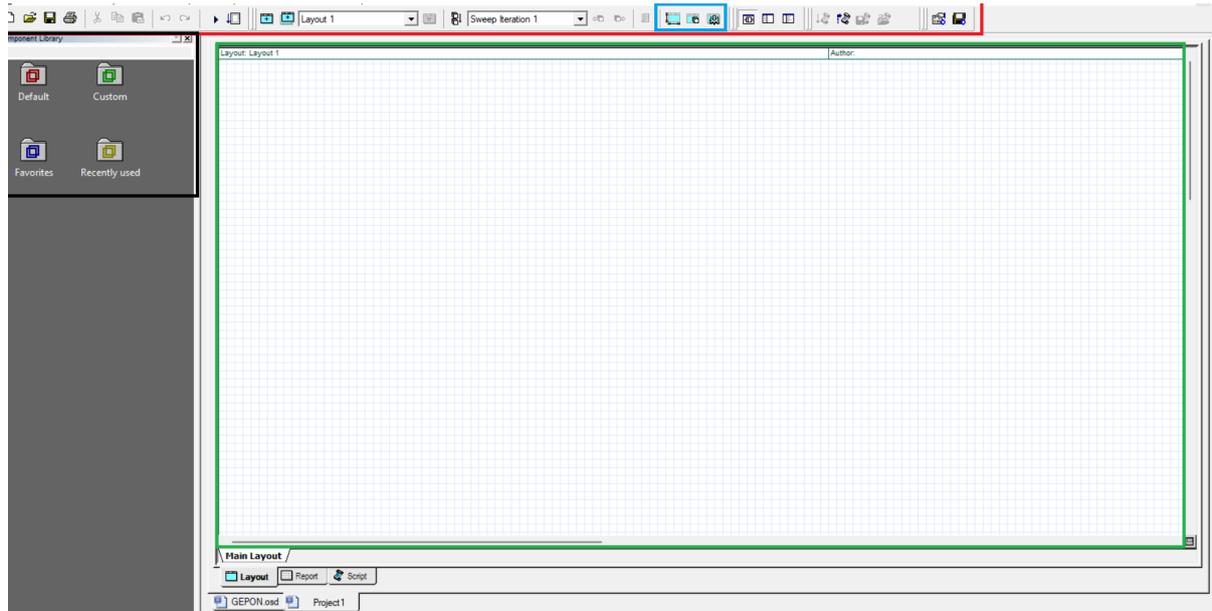


Figura 2.3: Interfaz de usuario de OptiSystem.
Fuente: [Los Autores]

Tabla 2.2: Parámetros de la simulación

Estandar	Tasa de bit(UP)	Tasa de bit(DOWN)	Landa (UP)	Landa (DOWN)	Fuente (PO)
GEPON	1.25Gb/s	2.5Gb/s	1310 nm	1490 nm	6 dB
XGS-PON	10Gb/s	10Gb/s	1310 nm	1490 nm	6 dB
NG-PON2	10Gb/s	10Gb/s	1524 nm	1596 nm	6 dB
			1526 nm	1598 nm	
			1528 nm	1600 nm	
			1530 nm	1602 nm	
IEEE802.3ca	25Gb/s	25Gb/s	1270 nm	1335 nm	6 dB
			1290 nm	1355 nm	

2.3.2. Librerías del Simulador de Redes ópticas

Eventualmente se detallan los elementos que fueron necesarios para la construcción de redes ópticas al usar OptiSystem.

1. Fuente Óptica (Optical Transmitter)

En cada escenario se partió de una fuente óptica (Optical Transmitter) que genera los pulsos ópticos y la modulación NRZ (No Return to Zero). Esta fuente es esencial ya que de esta se parte para simular la transmisión de señales ópticas.

La modulación NRZ fue seleccionada por su fácil comprensión y facilidad de uso.

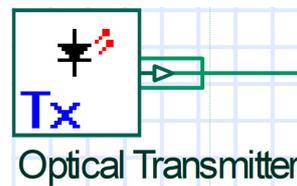


Figura 2.4: Fuente Óptica en OptiSystem.
Fuente: [Los Autores]

2. Multiplexor

Fue usado en las tecnologías NG-PON2 e IEEE 802.3ca, se incorporó un multiplexor óptico que permite combinar distintas longitudes de onda sobre una misma fibra. Por otra parte, es un componente crucial para estas tecnologías que llevan mas de una longitud de onda, esto les permite alcanzar mayores capacidades de transmisión y aprovechar la infraestructura.

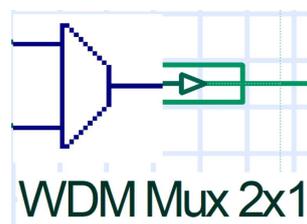


Figura 2.5: Multiplexor en OptiSystem
Fuente: [Los Autores]

3. Fibra Óptica (G.652D)

En cada caso se uso la fibra monomodo tipo G.652D debido a sus bajas pérdidas y dispersión, siendo una gran ventaja para el desarrollo, de tal manera que la hace ideal para largas distancias y altas velocidades de transmisión. Esta fibra cumple con los requisitos de las tecnologías estudiadas en entornos urbanos.

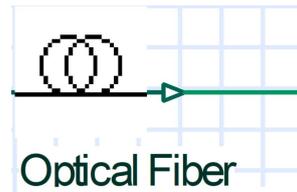


Figura 2.6: Fibra Óptica en OptiSystem
Fuente: [Los Autores]

4. Medición de Potencia Óptica

Se colocó un Optical Power Meter después de recorrer la fibra óptica y el atenuador óptico. Este dispositivo permitió visualizar y registrar la potencia óptica en tiempo real luego del recorrido.

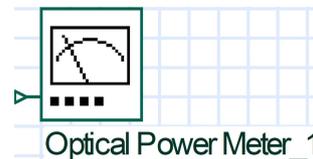


Figura 2.7: Power Meter en OptiSystem
Fuente: [Los Autores]

5. Atenuador Óptico

Se añadió un atenuador óptico para representar las pérdidas por fusiones y conectores en la red. Esto asegura que la simulación sea lo más realista posible.

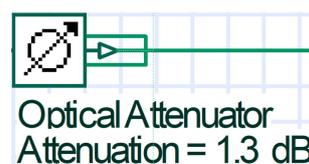


Figura 2.8: Atenuador Óptico
Fuente: [Los Autores]

6. Demultiplexor

En las tecnologías [NG-PON2](#) e [IEEE 802.3ca](#), se utilizó un demultiplexor óptico para separar las longitudes de onda. Esto permite que cada longitud de onda se dirija a su receptor correspondiente, garantizando su funcionamiento.

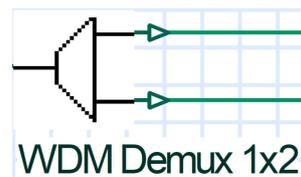


Figura 2.9: Demultiplexor
Fuente: [Los Autores]

7. Receptor Óptico

Este es el elemento final, el receptor óptico incluye un filtro y convierte la señal óptica en eléctrica. Es fundamental para visualizar y comprender el rendimiento del sistema al procesar la señal recibida para su posterior evaluación.

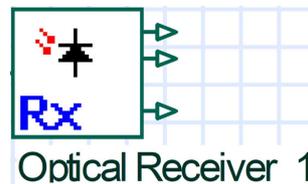


Figura 2.10: Receptor
Fuente: [Los Autores]

8. Visualizadores y Análisis

Se implementaron visualizadores como el EYE Analyzer, herramienta que permite evaluar parámetros clave de calidad. Este componente genera diagramas de ojo que muestran la apertura del mismo como un indicador de la integridad de la señal. Además, proporciona datos sobre el Factor Q y el BER mínimo. Estos análisis son fundamentales para determinar la fiabilidad y eficiencia de cada una de las tecnologías simuladas.

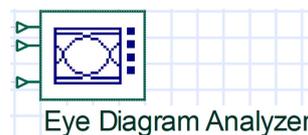


Figura 2.11: Diagrama de Ojo.
Fuente: [Los Autores]

2.3.3. Simulación de las Distintas Tecnologías

En resumen, para el desarrollo y análisis de las tecnologías GEPON, XGS-PON, IEEE 802.3ca y NG-PON2 en OptiSystem, diseñamos escenarios de simulación que describen la arquitectura de cada una de estas redes. De esta forma, podemos evaluar la caracterización de estas y el rendimiento en términos del BER, el diagrama de ojo y el Factor Q. De acuerdo con el resumen hecho anteriormente, describiremos el procedimiento para configurar los parámetros.

GEPON

Downsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.12 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 2.5 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

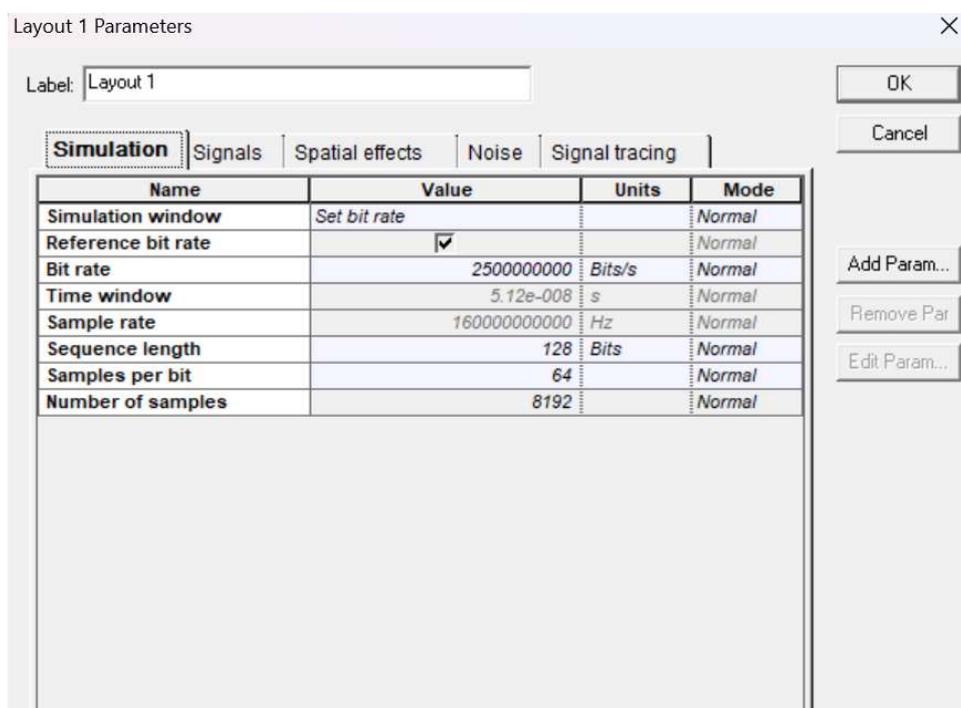


Figura 2.12: Parámetros generales de la Simulación GEPON.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en

la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.13, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda a 1490 nm, potencia de 6 dBm y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.13: Parámetros de la Fuente (Main) GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.14, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1550 nm, atenuación por kilómetro 0.3 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.14: Parámetros de la Fibra (Main) GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.15, donde se muestran los valores configurados como dispersión 17 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

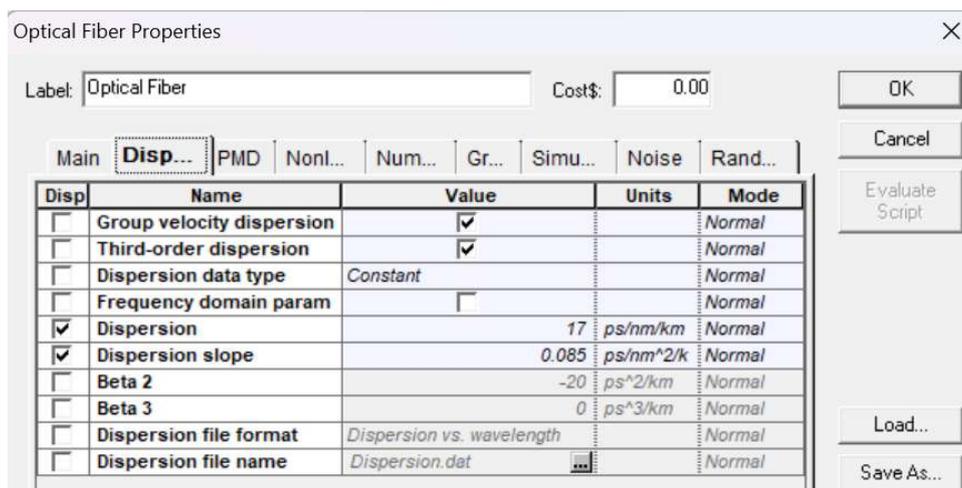


Figura 2.15: Parámetros de la Fibra (Dispersión) GEPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.16, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.16: Parámetros del Atenuador GEPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los Parámetros del Receptor Óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.17, donde se muestran los valores por defecto.

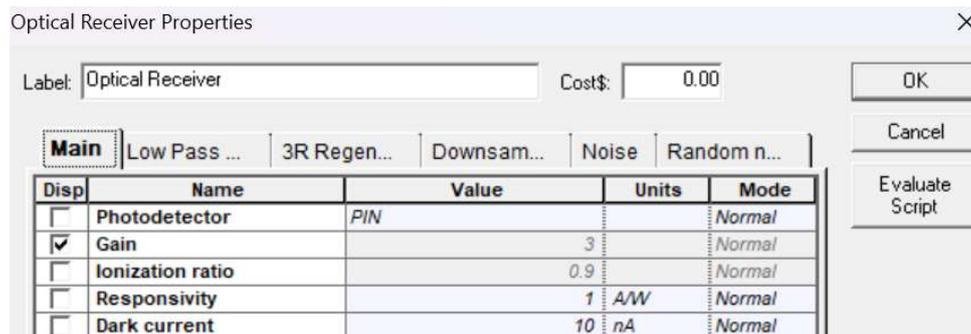


Figura 2.17: Parámetros del Receptor Óptico GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Upsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.18 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 1.2 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

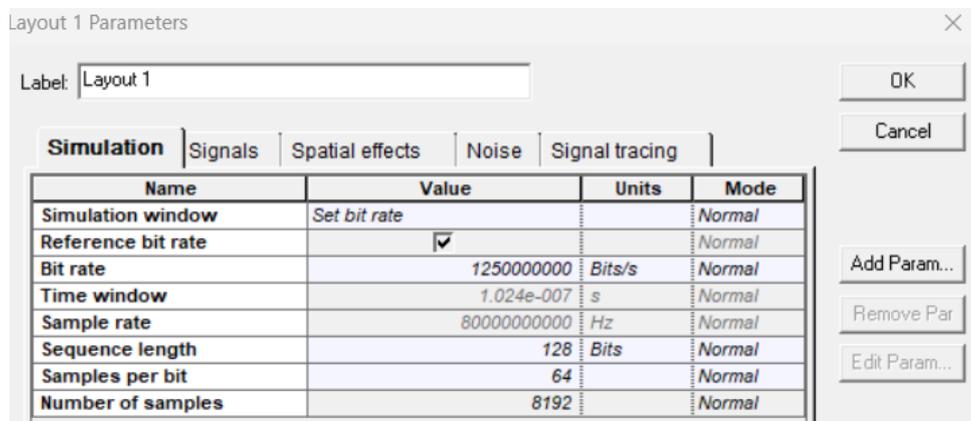


Figura 2.18: Parámetros Generales de la Simulación GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.18, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda a 1310 nm, potencia de 6 dBm y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.19: Parámetros de la Fuente (Main) GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.20, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1310 nm, atenuación por kilómetro 0.4 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

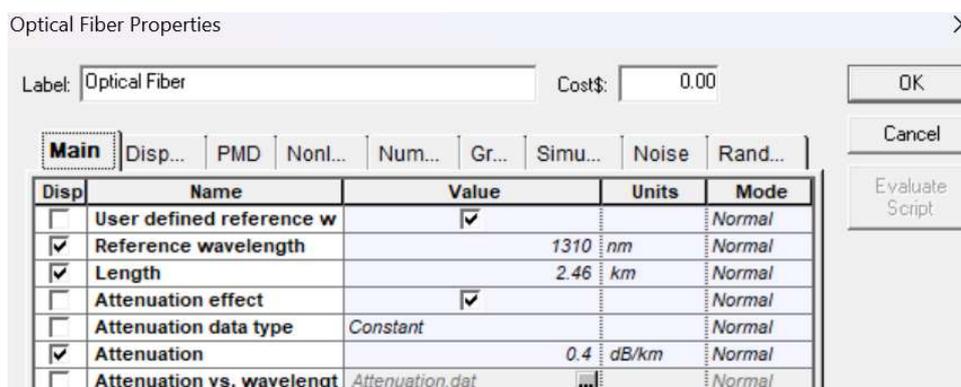


Figura 2.20: Parámetros de la Fibra (Main) GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.15, donde se muestran los valores configurados como dispersión 3.5 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

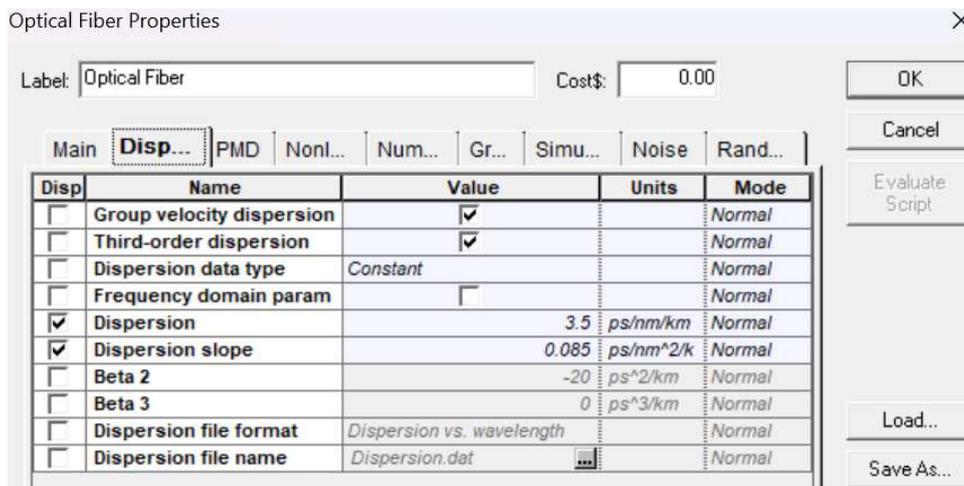


Figura 2.21: Parámetros de la Fibra (Dispersión) GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del atenuador , se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.22, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.22: Parametros del Atenuador GEAPON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.23, donde se muestran los valores por defecto.

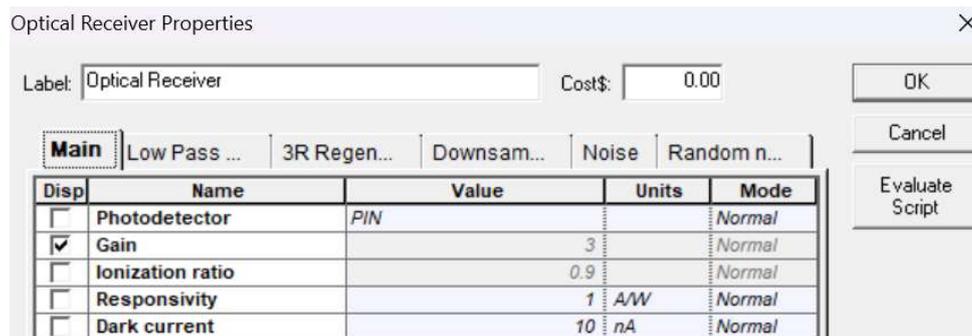


Figura 2.23: Parámetros del Receptor Óptico GEPON.
Fuente: [Los Autores]

La figura 2.24 muestra la estructura de la simulación de GEPON.

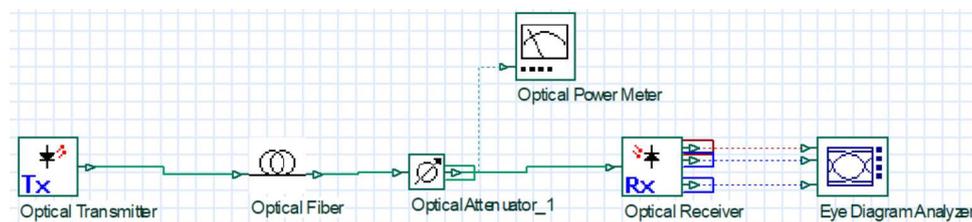


Figura 2.24: Estructura de la red de distribución óptica GEPON.
Fuente: [Los Autores]

XGS-PON

Downsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.25 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 10 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

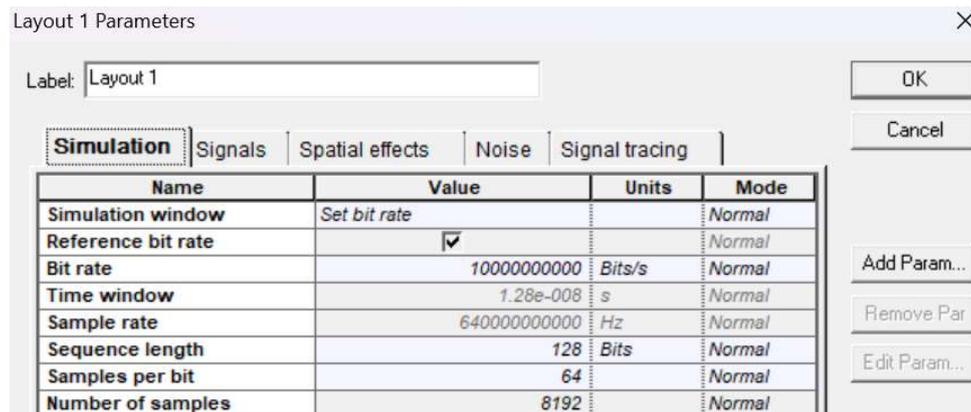


Figura 2.25: Parámetros Generales de la Simulación XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.26, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda a 1490 nm, potencia de 6 dBm y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.26: Parámetros de la Fuente (Main) XGS-PON .
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.27, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1550 nm, atenuación por kilómetro 0.3 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

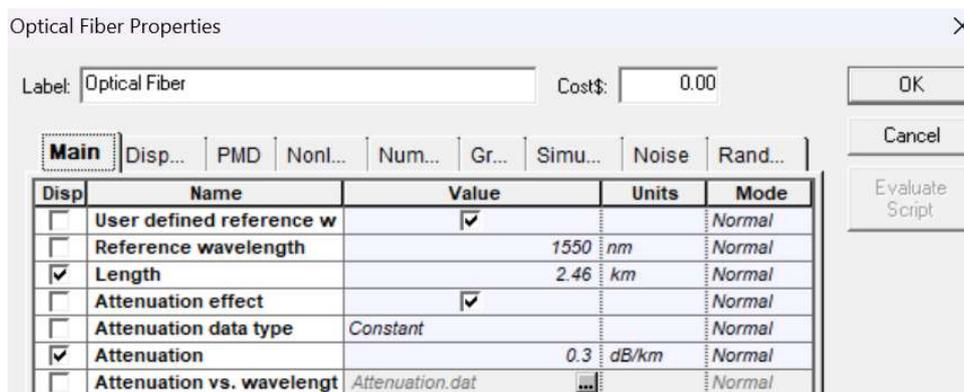


Figura 2.27: Parámetros de la Fibra (Main) XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.28, donde se muestran los valores configurados como dispersión 17 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

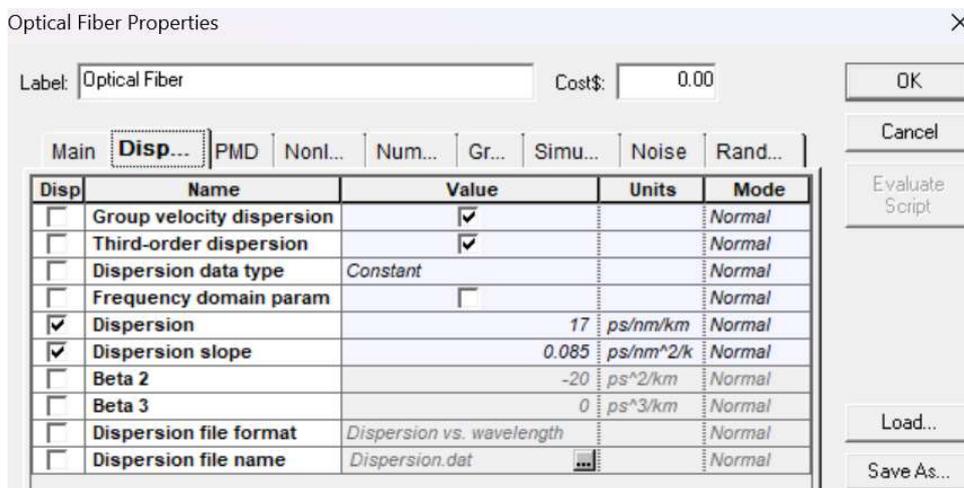


Figura 2.28: Parámetros de la Fibra (Dispersión) XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del atenuador, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.29, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.29: Parámetros del Atenuador XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.30, donde se muestran los valores por defecto.

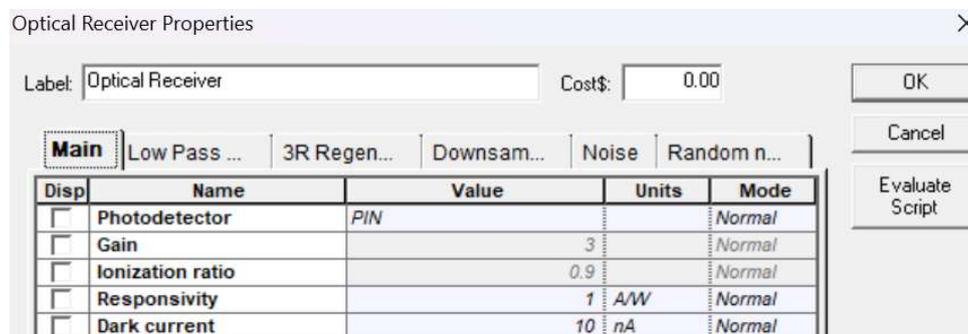


Figura 2.30: Parámetros del Receptor Óptico XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Upsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.31 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 10 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

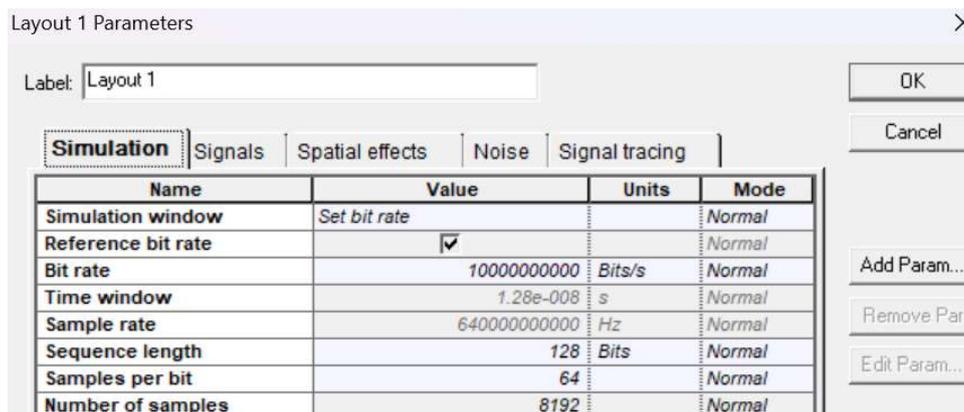


Figura 2.31: Parámetros Generales de la Simulación XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.32, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda a 1310 nm, potencia de 6 dBm y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.32: Parámetros de la Fuente (Main) XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.33, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1310 nm, atenuación por kilómetro 0.4 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

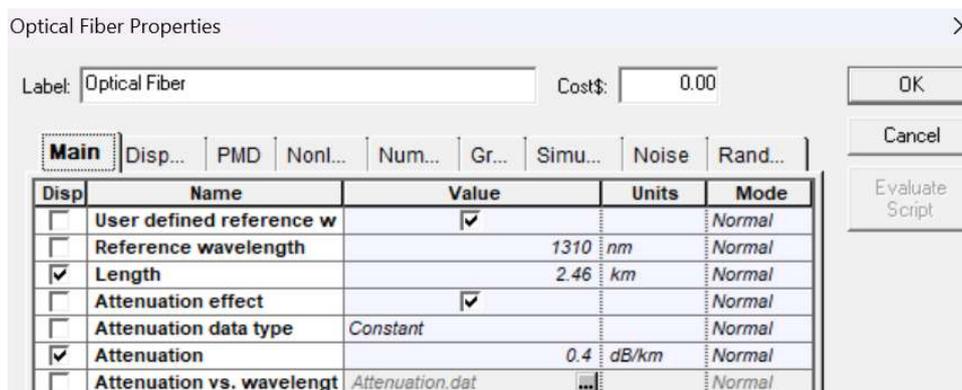


Figura 2.33: Parámetros de la Fibra (Main) XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra , se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.34, donde se muestran los valores configurados como dispersión 3.5 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

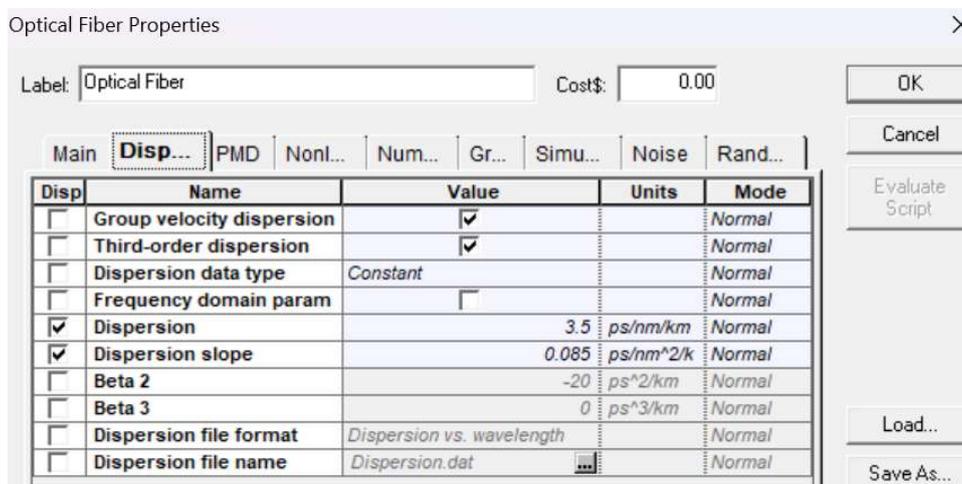


Figura 2.34: Parámetros de la Fibra (Dispersión) XGS-PON.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.35, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.

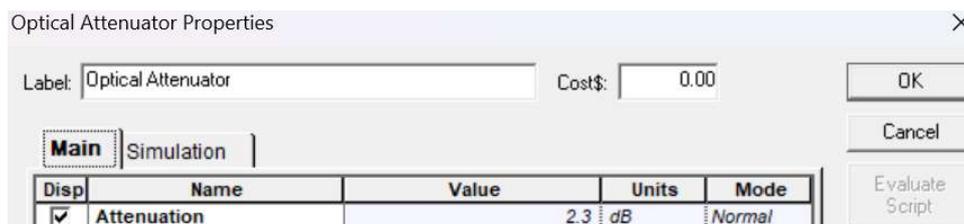


Figura 2.35: Parámetros del Atenuador XGS-PON.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.36, donde se muestran los valores por defecto.

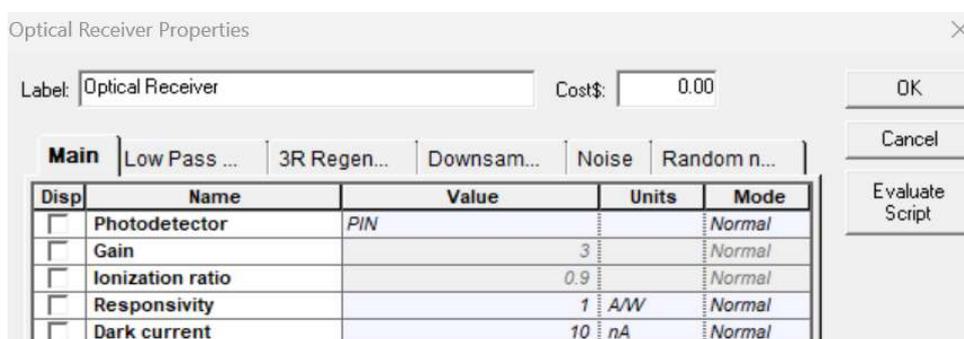


Figura 2.36: Parámetros del Receptor Óptico XGS-PON.

Fuente: [Los Autores]

La figura 2.37 muestra la estructura de la simulación de XGS-PON.

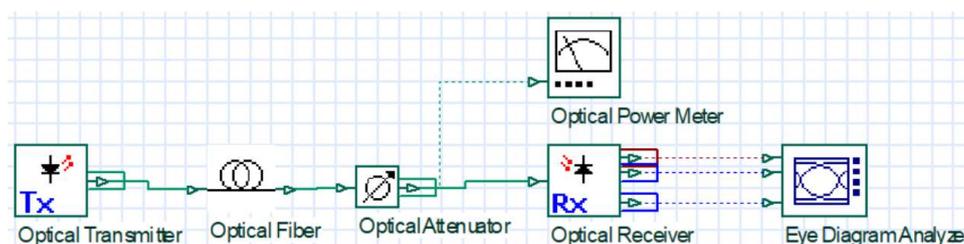


Figura 2.37: Estructura de la red de distribución óptica XGS-PON

Fuente: [Los Autores]

NG-PON2

Downsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado

azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.38 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 10 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

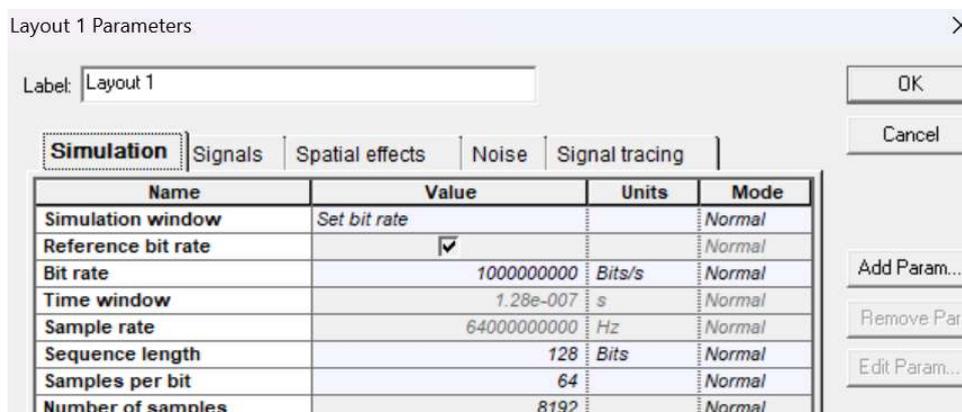


Figura 2.38: Parámetros Generales de la Simulación NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.39, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda (1596 nm, 1598 nm, 1600 nm, 1602 nm), la potencia 6 dBm y el resto de valores por defecto.



Figura 2.39: Parámetros de la Fuente (Main) NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.40, donde se muestran los valores configurados, como el ancho de banda de 10 GHz, pérdidas por inserción de 1 dB, filtro gaussiano con una orden de filtro de 8 y el resto de valores por defecto.

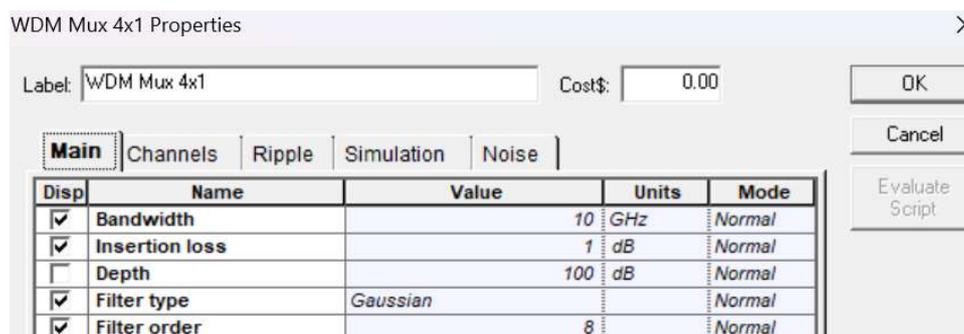


Figura 2.40: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. A continuación, se selecciona la opción Channels con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.41, donde se muestran los valores configurados como las frecuencias (1596 nm, 1598 nm, 1600 nm, 1602 nm).

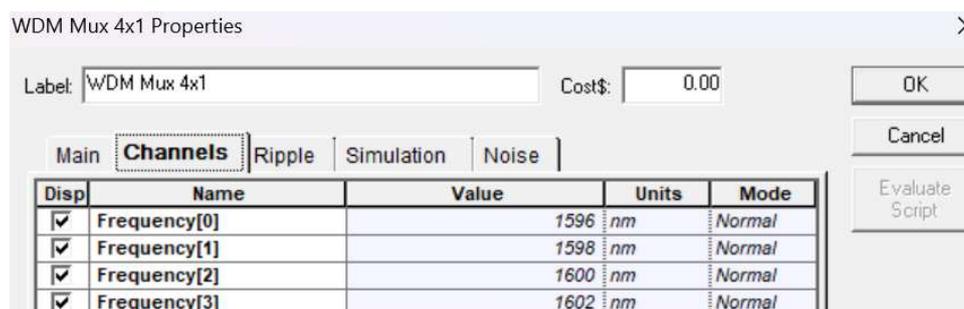


Figura 2.41: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.42, donde se muestran los valores configurados, como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1550 nm, atenuación por kilómetro 0.3 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

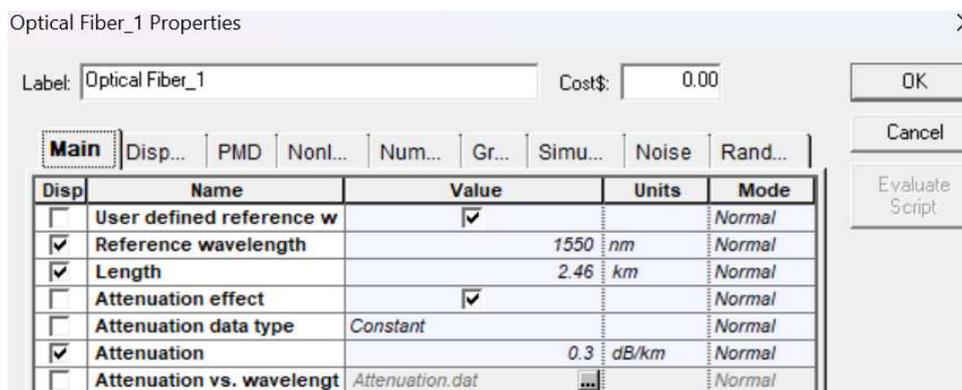


Figura 2.42: Parámetros de la Fibra (Main) NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.43, donde se muestran los valores configurados como dispersión 17 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

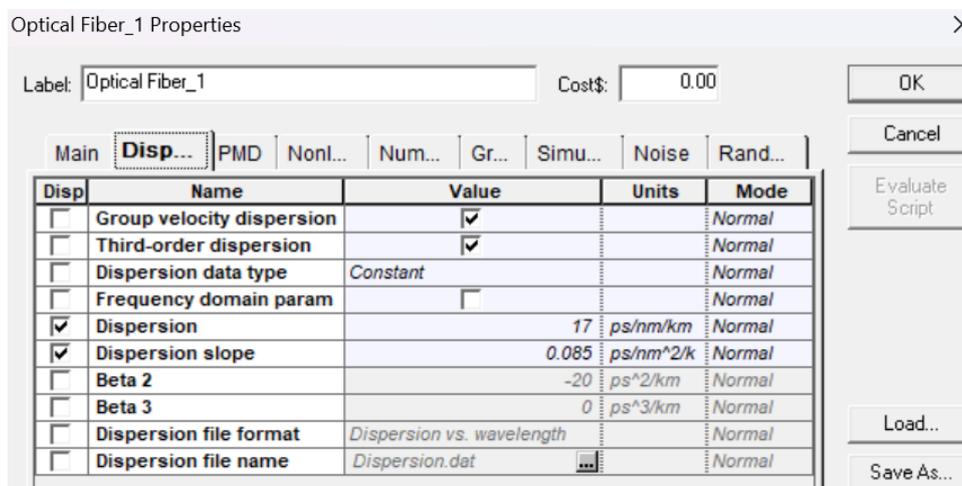


Figura 2.43: Parámetros de la Fibra (Dispersión) NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.44, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.44: Parámetros del Atenuador NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.45, donde se muestran los valores por defecto.

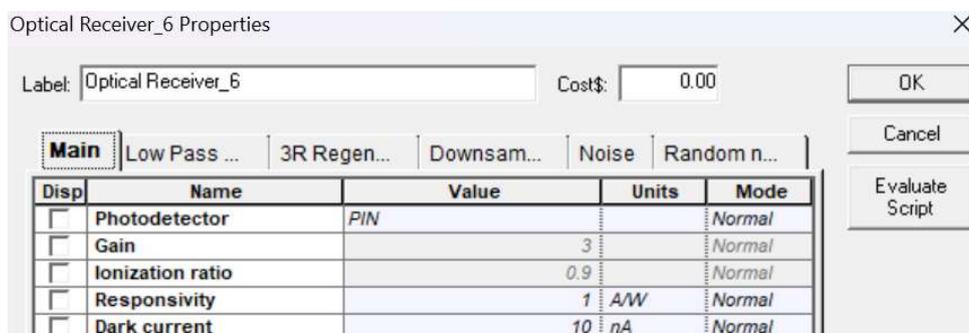


Figura 2.45: Parámetros del Receptor Óptico NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Upsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.46 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 10 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

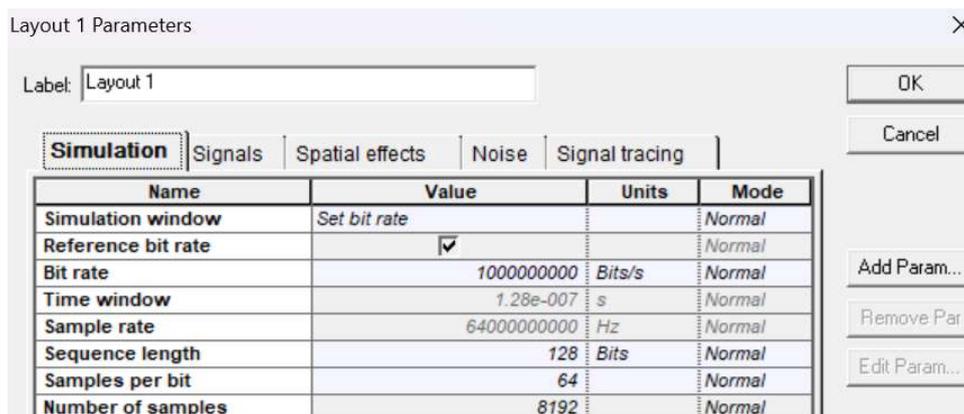


Figura 2.46: Parámetros Generales de la Simulación NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.39, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda (1524 nm, 1526 nm, 1528 nm, 1530 nm), la potencia 6 dBm y el resto de valores por defecto.



Figura 2.47: Parámetros de la Fuente (Main) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.48, donde se muestran los valores configurados, como el ancho de banda de 10 GHz, pérdidas por inserción de 1 dB, filtro gaussiano con una orden de filtro de 8 y el resto de valores por defecto.

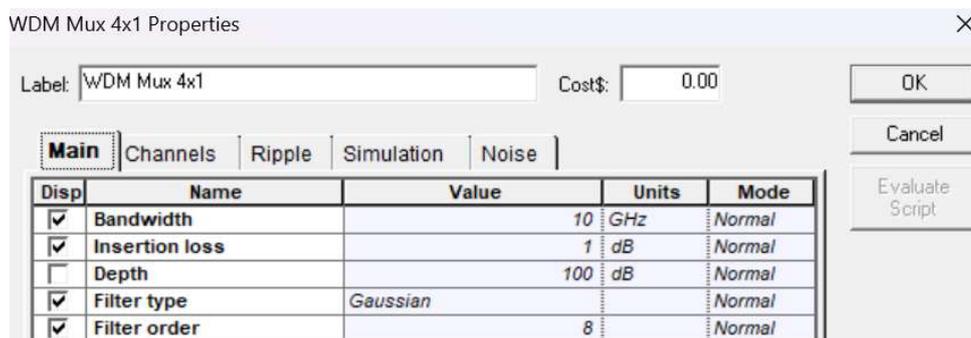


Figura 2.48: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. A continuación, se selecciona la opción Channels con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.49, donde se muestran los valores configurados como las frecuencias (1524 nm, 1526 nm, 1528 nm, 1530 nm).

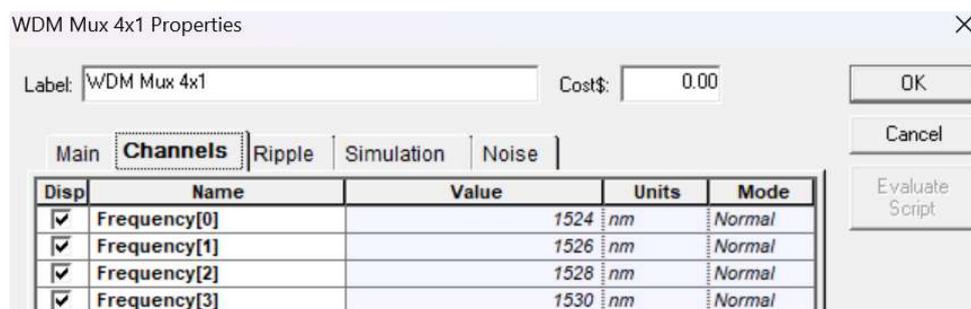


Figura 2.49: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.50, donde se muestran los valores configurados, como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1550 nm, atenuación por kilómetro 0.3 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

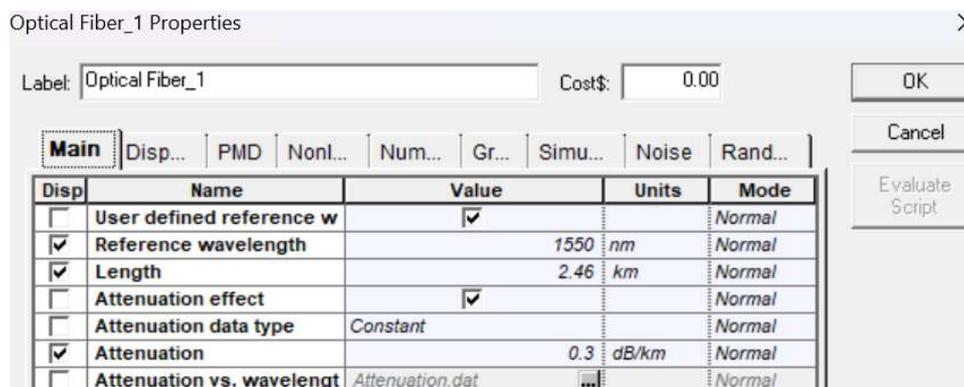


Figura 2.50: Parámetros de la Fibra (Main) NG-PON2.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.51, donde se muestran los valores configurados como dispersión 17 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

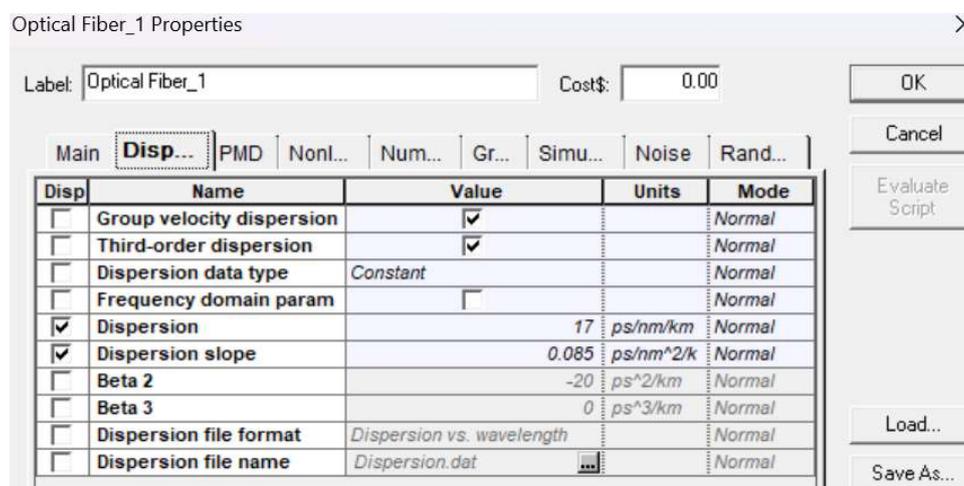


Figura 2.51: Parámetros de la Fibra (Dispersión) NG-PON2..

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.52, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.52: Parámetros del Atenuador NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.53, donde se muestran los valores por defecto.

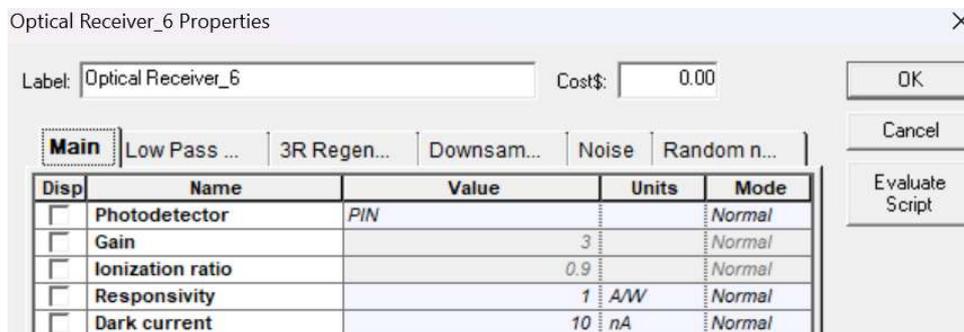


Figura 2.53: Parámetros del Receptor Óptico NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Se dio clic sobre el icono del Receptor Óptico y se configuro los parámetros - Parámetros: Por defecto

La figura 2.54 muestra la estructura de la simulación de NG-PON2.

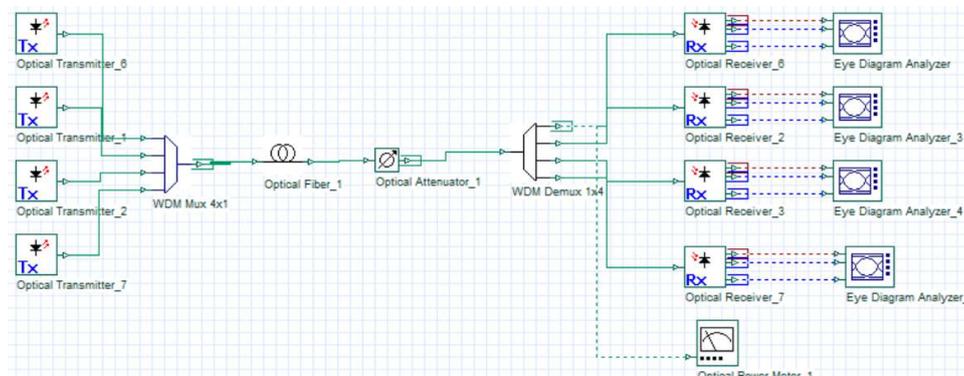


Figura 2.54: Estructura de la red de distribución óptica NG-PON2
Fuente: [Los Autores]

IEEE 802.3ca

Downsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.55 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 25 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

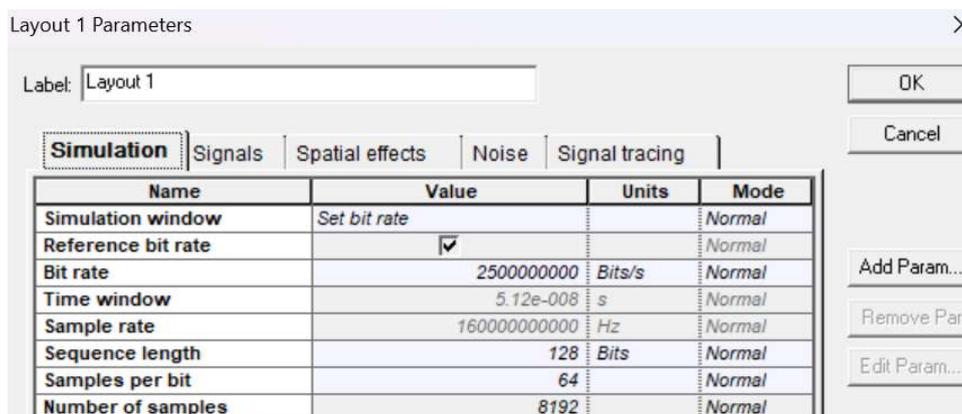


Figura 2.55: Parámetros General de la Simulación IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.39, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda (1330 nm, 1350 nm), la potencia 6 dBm y el resto de valores por defecto.



Figura 2.56: Parámetros de la Fuente (Main) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura

2.57, donde se muestran los valores configurados como el ancho de banda de 25 GHz, pérdidas por inserción de 1 dB, filtro Bessel con una orden de filtro de 8 y el resto de valores por defecto.

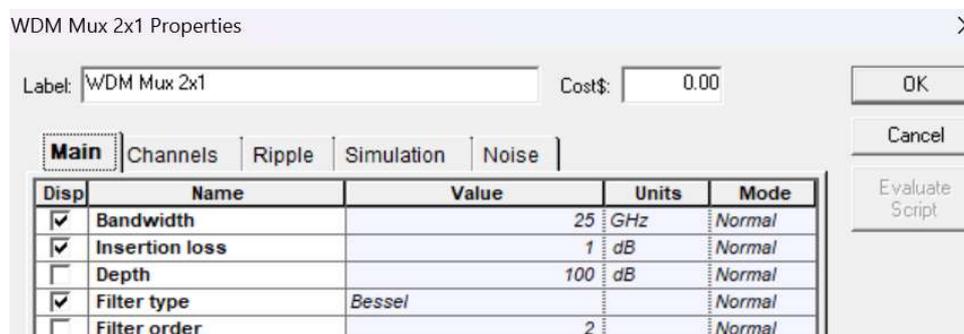


Figura 2.57: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. A continuación, se selecciona la opción Channels con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.41, donde se muestran los valores configurados como las frecuencias (1330 nm, 1350 nm).

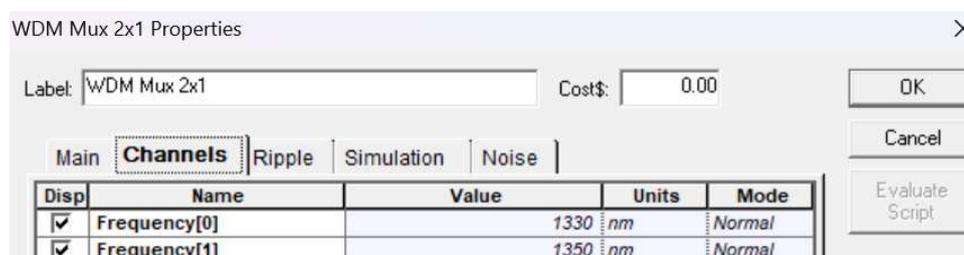


Figura 2.58: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.59, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1310 nm, atenuación por kilómetro 0.4 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

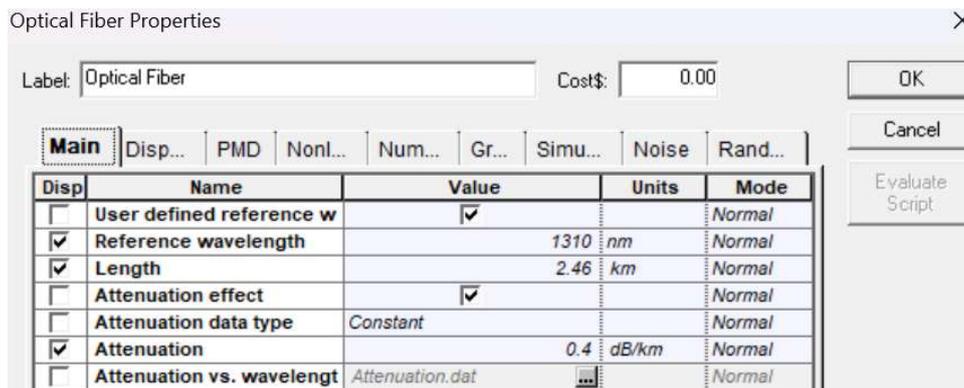


Figura 2.59: Parámetros de la Fibra (Main) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.60, donde se muestran los valores configurados como dispersión 3.5 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

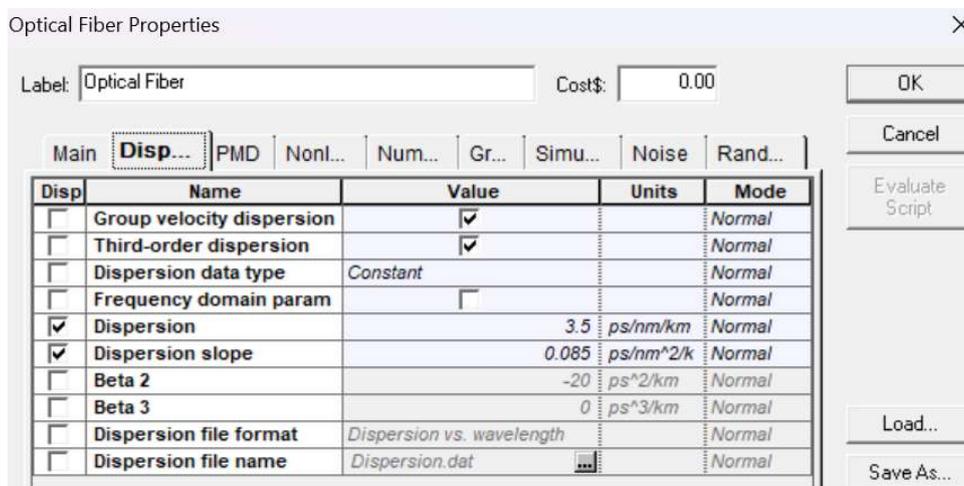


Figura 2.60: Parámetros de la Fibra (Dispersión) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.61, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.61: Parámetros del Atenuador IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.62, donde se muestran los valores por defecto.

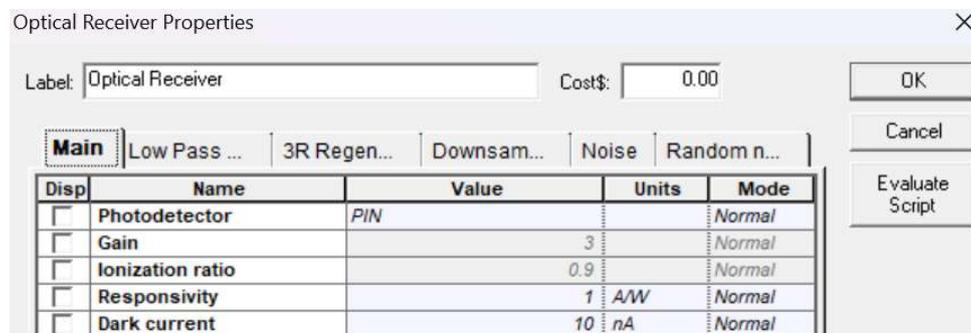


Figura 2.62: Parámetros del Receptor Óptico IEEE 802.3ca..
Fuente: [Los Autores]

Upsampling

Para obtener las configuraciones de los parámetros generales de la simulación, se da clic en el icono **layout Parametros** que se puede ver en el centro del cuadrado azul de la figura 2.3. Luego, se abre la ventana de la figura 2.63 que muestra los valores configurados, estableciendo la tasa de bit en 25 Gbps y los otros parámetros se dejan por defecto.

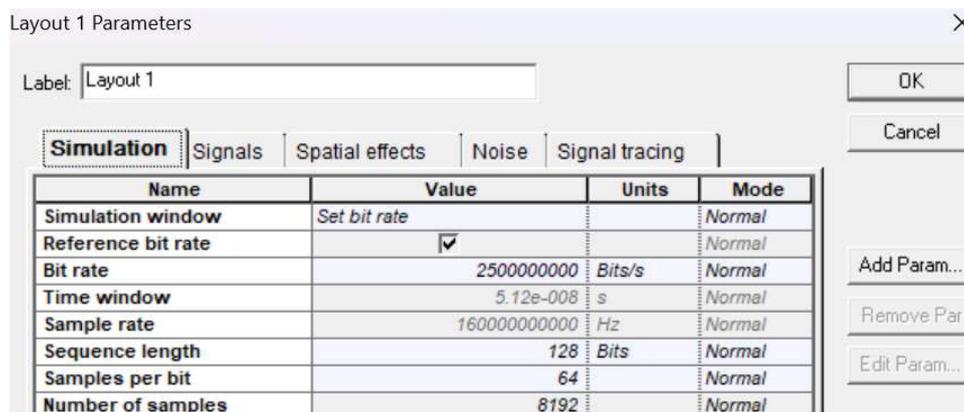


Figura 2.63: Parámetros Generales de la Simulación IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar la fuente de transmisión, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.4. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.64, donde se muestran los valores configurados como la longitud de onda (1270 nm, 1290 nm), la potencia 6 dBm y el resto de valores por defecto.



Figura 2.64: Parámetros de la Fuente (Main) IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.57, donde se muestran los valores configurados, como el ancho de banda de 25 GHz, pérdidas por inserción de 1 dB, filtro Bessel con una orden de filtro de 8 y el resto de valores por defecto.

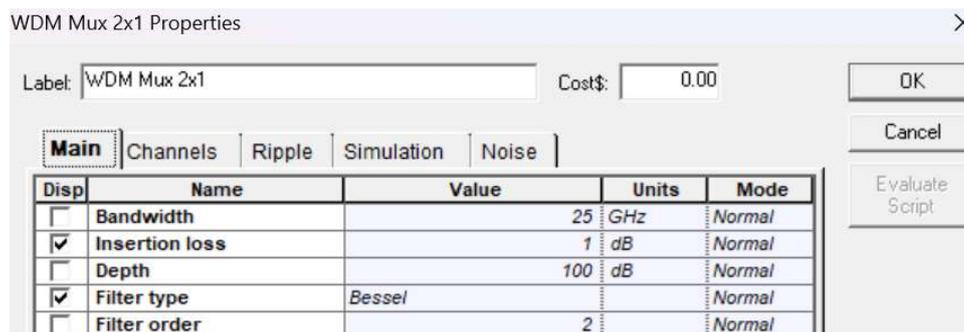


Figura 2.65: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Main) IEEE 802.3ca.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar el multiplexor y demultiplexor, se realiza un doble clic izquierdo en las figuras 2.5, 2.9. A continuación, se selecciona la opción Channels con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.66, donde se muestran los valores configurados como las frecuencias (1270 nm, 1290 nm).

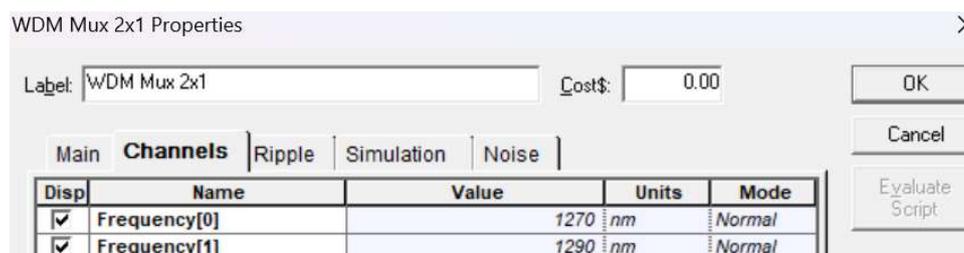


Figura 2.66: Parámetros del Multiplexor-Demultiplexor (Channels) IEEE 802.3ca.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.67, donde se muestran los valores configurados como la distancia de la fibra (2.46 km, 6.376 km, 10.451 km), longitud de referencia 1310 nm, atenuación por kilómetro 0.4 dB/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

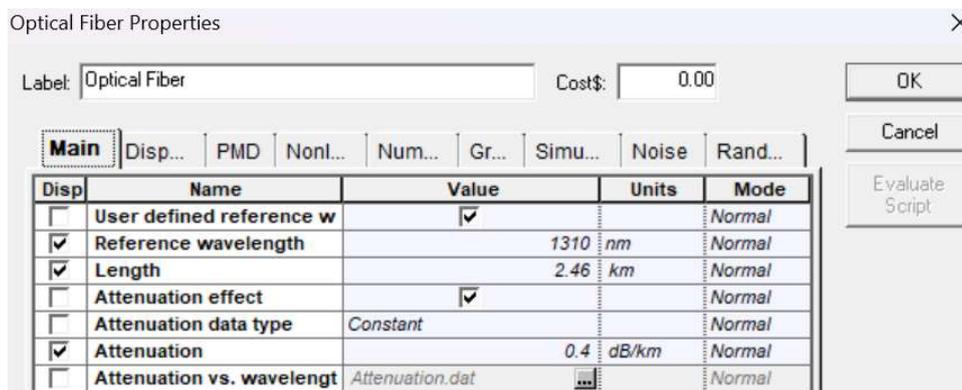


Figura 2.67: Parámetros de la Fibra (Main) IEEE 802.3ca.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.6. A continuación, se selecciona la opción dispersión con un clic izquierdo. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.60, donde se muestran los valores configurados como dispersión 3.5 ps/nm/km, pendiente de dispersión de 0.085 ps/nm²/km y los otros parámetros se dejan por defecto.

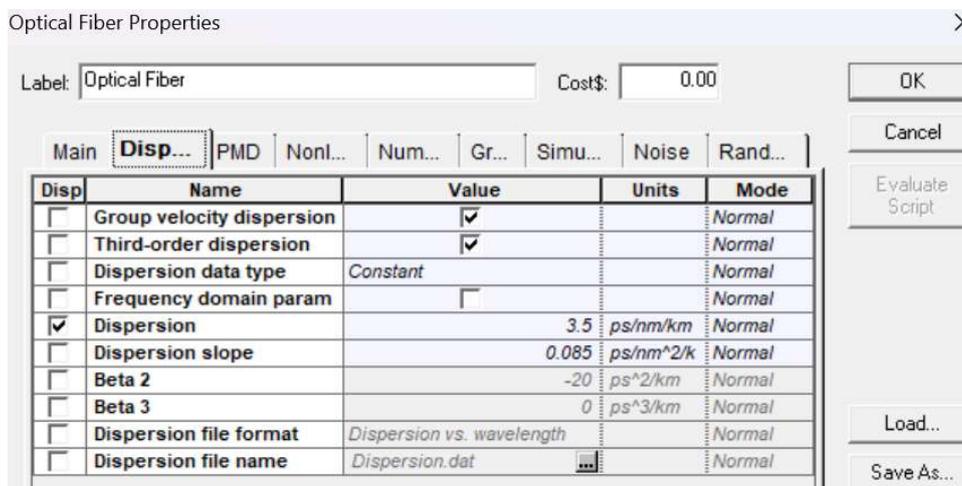


Figura 2.68: Parámetros de la Fibra (Dispersión) IEEE 802.3ca.

Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros de la fibra, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.8. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.69, donde se muestran los valores configurados como atenuaciones (2.3 dB, 2.5 dB, 2.7 dB) y los otros parámetros se dejan por defecto.



Figura 2.69: Parámetros del Atenuador IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Para configurar los parámetros del receptor óptico, se realiza un doble clic izquierdo en la figura 2.10. Al hacer esto, se abre la ventana mostrada en la figura 2.70, donde se muestran los valores por defecto.

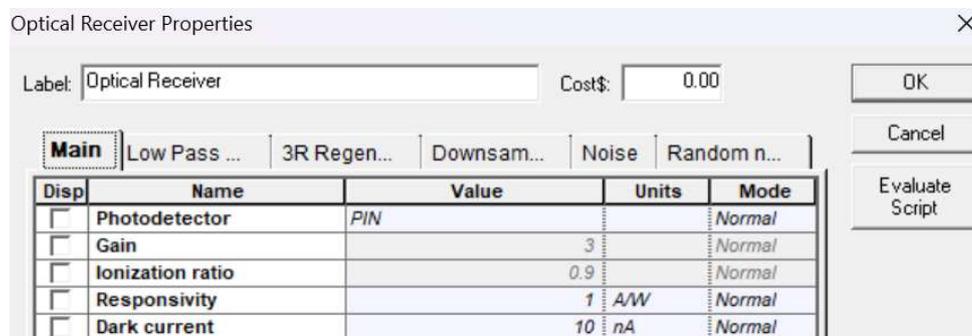


Figura 2.70: Parámetros del Receptor Óptico IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

La figura 2.71 muestra la estructura de la simulación de IEEE 802.3ca.

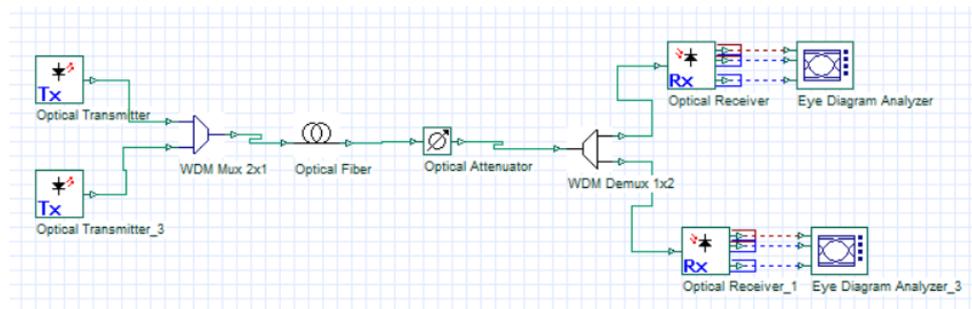


Figura 2.71: Estructura de la red de distribución Óptico IEEE 802.3ca.
Fuente: [Los Autores]

Capítulo 3

Análisis y Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación realizada en OptiSystem para las tecnologías de red analizadas: [GEPON](#), [XGS-PON](#), [NG-PON2](#) y [IEEE 802.3ca](#). El análisis se centra en factores de calidad evaluados mediante el diagrama de ojo, como el máximo factor Q , el valor de [BER](#), la altura del ojo, el umbral de decisión y la instancia de decisión. El capítulo presenta los resultados individuales de cada una de las tecnologías evaluadas especificando para cada caso los valores de los [KPIs](#) evaluados para la ruta 1 (Conexión entre el nodo 1 y el nodo 2) y la ruta 2 considerando que es la ruta más corta entre el nodo 1 y el nodo 3. En la sección 3.5 se analizan los resultados del uso de las tecnologías antes descritas para un enlace con la ruta 3 que corresponde al trayecto alternativo entre el nodo 1 y el nodo 3 y que evita los soterramientos en el caso de estudio dentro de la ciudad de Cuenca - Ecuador. La sección final presenta una comparación de los resultados.

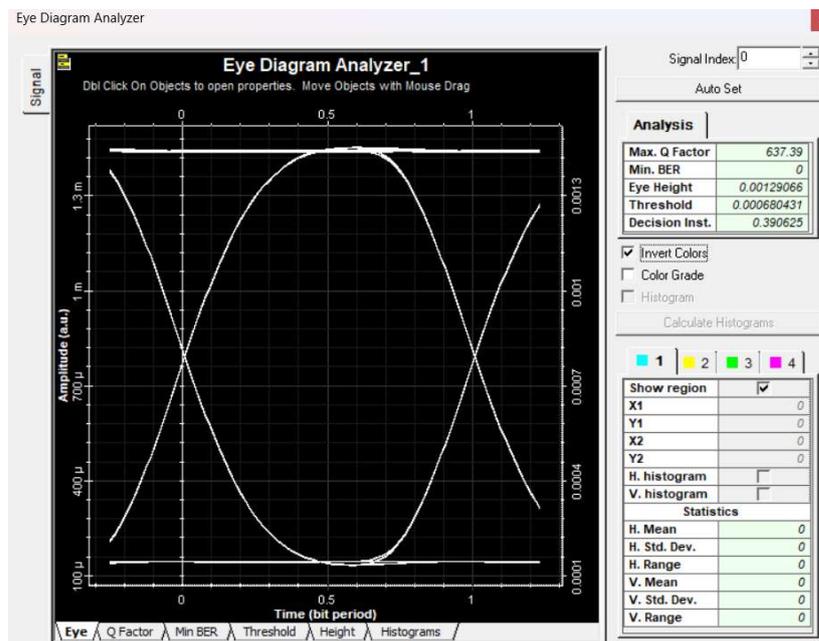
3.1. Tecnología GEPON Rutas 1 y 2

En la siguiente sección se describen los datos obtenidos en la simulación de [GEPON](#). El análisis de rendimiento de los sistemas se realiza en relación con la calidad de la señal, la tasa de error de bits, la altura del ojo, umbrales y la instancia de decisión. Se presenta el conjunto de tablas e imágenes del diagrama de ojo. Además, se calcula la potencia total del enlace, que ofrece una visión general del rendimiento del sistema.

3.1.1. Enlace Downlink

En el enlace ascendente, el diagrama de ojo de GEPON se caracteriza por una apertura bien definida, lo que indica una estabilidad de transmisión e interferencia de símbolo distante. Valores cuantitativos de integridad de señal: factor Q 633,171 y 637,39 para las rutas probadas, BER 0.

La Figura 3.1 presenta el diagrama de ojo del enlace descendente para la tecnología GEPON.



Fuente: [Los Autores]

Figura 3.1: Diagrama de ojo (Downlink) GEPON.

Fuente: [Los Autores]

La siguiente Tabla 3.1 resume los resultados obtenidos para el enlace descendente como la altura del ojo, el umbral de decisión y la instancia de decisión.

Tabla 3.1: Resultados KPIs GEPON - Ruta 1 y 2 (DL)

Análisis	Ruta 1	Ruta 2
	$\lambda_{DL} = 1490 \text{ nm}$	
Max. Factor Q	633.171	637.39
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.00177381	0.00129066
Límite	0.000998532	0.000680431
Decisión Inst.	0.390625	0.390625
Potencia Total	0.310 dBm	-1.064 dBm

3.1.2. Enlace Uplink

Para este enlace, el diagrama de ojo muestra una apertura clara; asimismo, un factor Q que supera los 1000. Este resultado resalta la capacidad del enlace ascendente de GEPON para manejar tráfico con alta eficiencia sin distinciones y manteniendo una BER de cero. La siguiente Figura 3.2 representa el diagrama de ojo obtenido en el enlace ascendente para la tecnología GEPON.

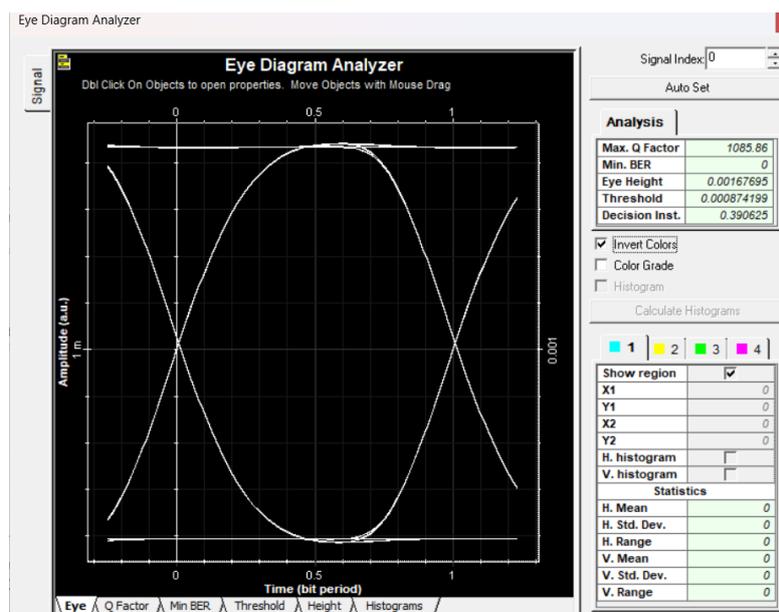


Figura 3.2: Diagrama de ojo (Uplink) GEPON.

Fuente: [Los Autores]

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados cuantitativos para el enlace ascendente, incluyendo los mismos indicadores clave evaluados en el enlace descendente.

Tabla 3.2: Resultados KPIs GEPON - Ruta 1 y 2 (UL)

Análisis	Ruta 1	Ruta 2
	$\lambda_{UL} = 1310 \text{ nm}$	
Max. Factor Q	1085.86	872.436
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.00167695	0.00111562
Límite	0.000874199	0.000583087
Decisión Inst.	0.390625	0.390625
Potencia Total	0.064 dBm	-1.703 dBm

3.2. Tecnología XGS-PON Rutas 1 y 2

En la siguiente sección, se describe la simulación de XGS-PON y los datos obtenidos. Esto, por medio de las tablas y los diagramas de ojo que reflejan la calidad de transmisión y modulación de la señal. De igual forma, se analizan sus datos, como la tasa de error de bit, altura de ojo, umbral de decisión, la potencia total enlace, que permite determinar su rendimiento y la posibilidad de soportar anchos de banda más amplios.

3.2.1. Enlace Downlink

En la tecnología XGS-PON el diagrama de ojo del enlace ascendente muestra un margen adecuado entre los niveles lógicos, con factores Q que varían entre 168.083 y 309.59. Estos valores son menores comparados con GEPON, siendo suficientes para garantizar una transmisión confiable con un valor de BER de cero.

En la siguiente figura 3.3 se observan los valores a analizar de XGS-PON.

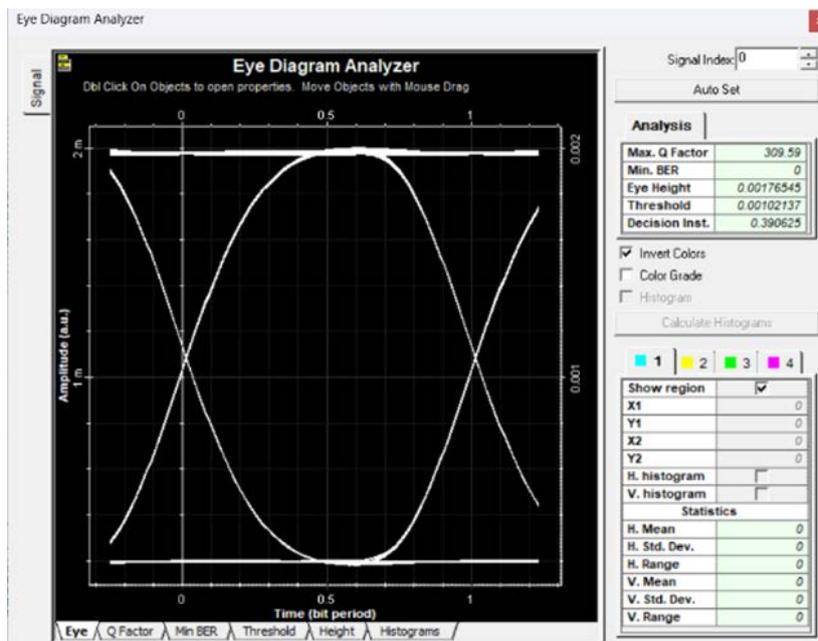


Figura 3.3: Diagrama de ojo (Downlink) XGS-PON
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.3 detalla los valores obtenidos para este enlace, con información sobre la altura del ojo y otros parámetros relevantes.

Tabla 3.3: Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 1 y 2 (DL)

Análisis	Ruta 1	Ruta 2
	$\lambda_{DL} = 1490 \text{ nm}$	
Max. Factor Q	309.59	168.083
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.00176545	0.00127698
Límite	0.00102137	0.00075803
Decisión Inst.	0.390625	0.390625
Potencia Total	0.310 dBm	-1.064 dBm

3.2.2. Enlace Uplink

El enlace XGS-PON muestra factores Q que varían entre 308.764 y 419.492; esto nos dice que es un factor correcto. El diagrama de ojo presenta una apertura clara,

pero un poco menor que en el enlace descendente, lo que nos dice que la longitud de onda se comporta de manera diferente. La Figura 3.4 presenta el diagrama de ojo del enlace ascendente para la tecnología XGS-PON.

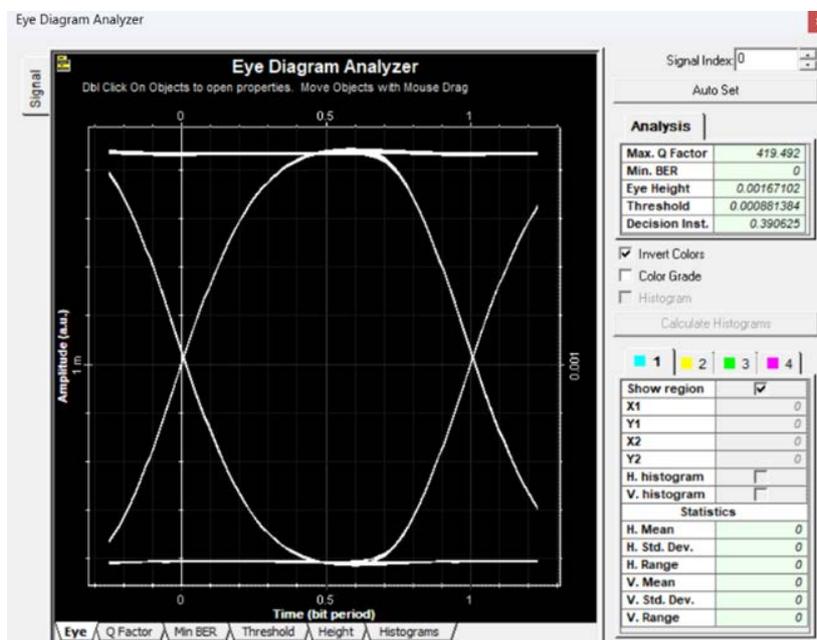


Figura 3.4: Diagrama de ojo (Uplink) XGS-PON
Fuente: [Los Autores]

Esta tabla 3.4 se incluye los valores obtenidos en la simulación y visualizados en la imagen BER.

Tabla 3.4: Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 1 y 2 (UL)

Análisis	Ruta 1	Ruta 2
	$\lambda_{UL} = 1310 \text{ nm}$	
Max. Factor Q	419.492	308.764
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.00167102	0.00110992
Límite Decisión Inst.	0.000881384	0.000593953
Potencia Total	0.064 dBm	-1.703 dBm

3.3. Tecnología NG-PON2 Rutas 1 y 2

En la siguiente sección, se exponen los resultados de la simulación del sistema NG-PON2. Se incluyen tablas con parámetros clave y diagramas de ojo que facilitan el análisis de la integridad de la señal, la interferencia entre símbolos y la precisión en la detección de bits. Asimismo, se evalúan aspectos como la altura del ojo, el umbral y la instancia de decisión, junto con la potencia total del enlace. Todo esto brinda una visión detallada del rendimiento de esta tecnología en escenarios con alta demanda de tráfico de datos.

3.3.1. Enlace Downlink

El diagrama de ojo del enlace descendente para NG-PON2 muestra una transmisión eficiente en diversas longitudes de onda, con factores Q que oscilan entre (232.743 y 253.072). Aunque la altura del ojo es inferior a la observada en XGS-PON, se encuentra dentro de los márgenes aceptables para asegurar decisiones lógicas precisas. La Figura 3.5 ilustra el diagrama de ojo correspondiente a esta tecnología.

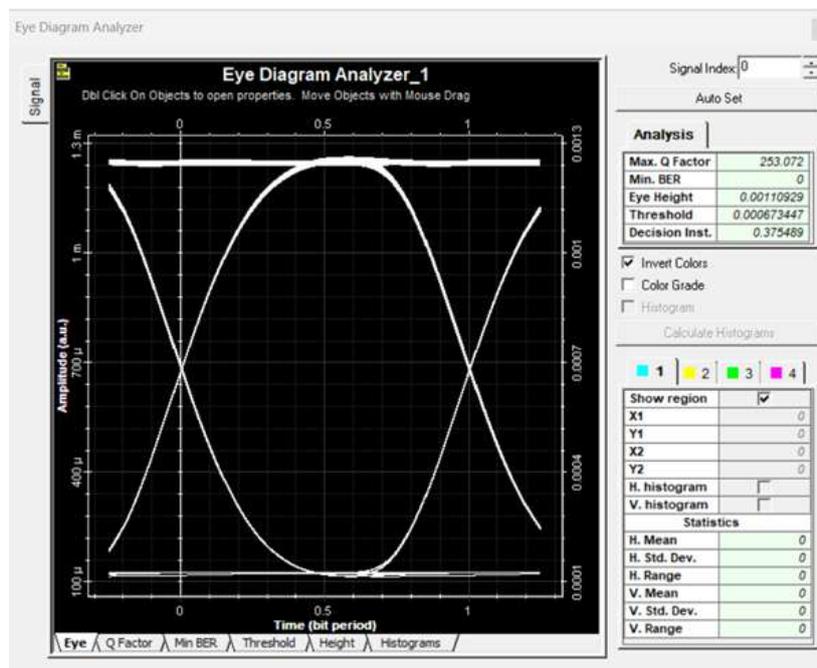


Figura 3.5: Diagrama de ojo (Downlink) NG-PON2.
Fuente: [Los Autores]

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 1 y 2 (DL)

Análisis	Ruta 1		Ruta 2	
	$\lambda_1\text{DL} = 1596 \text{ nm}$	$\lambda_2\text{DL} = 1598 \text{ nm}$	$\lambda_1\text{DL} = 1596 \text{ nm}$	$\lambda_2\text{DL} = 1598 \text{ nm}$
Max. Factor Q	253.072	232.743	243.217	235.918
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00110929	0.00110871	0.000807865	0.000807609
Límite	0.000673447	0.000639467	0.00047323	0.000481993
Decisión Inst.	0.375489	0.3794	0.377445	0.375489
Análisis	$\lambda_3\text{DL} = 1600 \text{ nm}$	$\lambda_4\text{DL} = 1602 \text{ nm}$	$\lambda_3\text{DL} = 1600 \text{ nm}$	$\lambda_4\text{DL} = 1602 \text{ nm}$
Max. Factor Q	235.22	236.051	237.448	223.449
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00110936	0.00110757	0.00080771	0.000807252
Límite	0.000640408	0.000669735	0.000475465	0.000478628
Decisión Inst.	0.377445	0.375489	0.377445	0.377445
Potencia Total	-1.700 dBm		-4.457 dBm	

3.3.2. Enlace Uplink

Los resultados del factor Q son más variables en un rango de 228.936 y 992.181. Lo que demuestra este comportamiento es la flexibilidad de NG-PON2 para adaptarse a las distintas demandas de tráfico. La Figura 3.6 presenta resultados de NG-PON2.

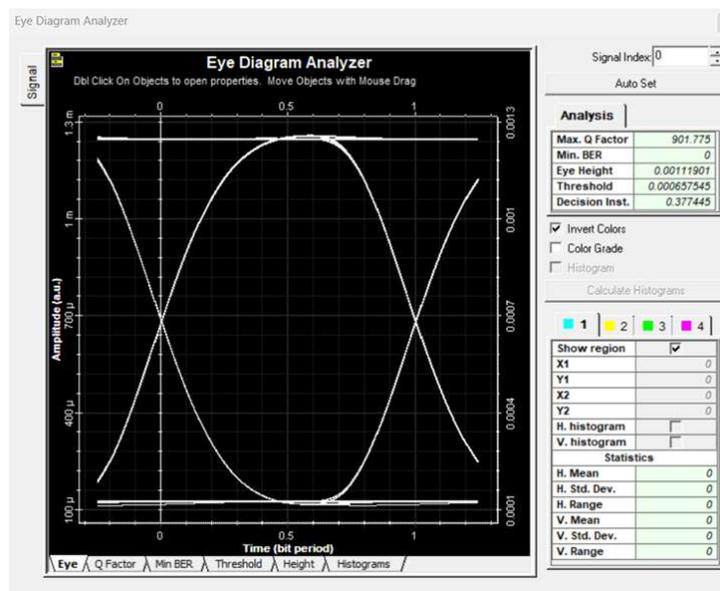


Figura 3.6: Diagrama de ojo (Uplink) NG-PON2
Fuente: [Los Autores]

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 1 y 2 (UL)

Análisis	Ruta 1		Ruta 2	
	λ_1 UL = 1524 nm	λ_2 UL = 1526 nm	λ_1 UL = 1524 nm	λ_2 UL = 1526 nm
Max. Factor Q	901.775	829.569	269.32	228.936
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00111901	0.00111855	0.000808938	0.000807357
Límite	0.000657545	0.000670868	0.0004847	0.000491409
Decisión Inst.	0.377445	0.375489	0.375489	0.375489
Análisis	λ_3 UL = 1528 nm	λ_4 UL = 1530 nm	λ_3 UL = 1528 nm	λ_4 UL = 1530 nm
Max. Factor Q	992.181	807.654	225.669	262.432
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00111915	0.00111844	0.000806914	0.000808565
Límite	0.000667796	0.000670403	0.000469367	0.000482434
Decisión Inst.	0.375489	0.375489	0.377445	0.375489
Potencia Total	-1.699 dBm		-3.074 dBm	

3.4. Tecnología IEEE 802.3ca Rutas 1 y 2

En esta sección se visualizan los resultados obtenidos tanto de bajada como de subida del estándar IEEE 802.3ca (50G-PON). En donde cada tabla y figura representan la calidad de la transmisión y la eficiencia del estándar según los indicadores clave de rendimiento (tasa de error de bit, altura del ojo, umbral de decisión). También se analiza la potencia total del enlace para evaluar su rendimiento y soporte en redes ópticas de nueva generación.

3.4.1. Enlace Downlink

En el enlace de bajada, el factor Q se mantiene entre 386.299 y 540.466, lo que demuestra la estabilidad de esta tecnología en escenarios de alta demanda. El diagrama de ojo cuenta con una apertura clara, que demuestra la viabilidad del enlace. La Figura 3.7 presenta el diagrama de ojo del enlace descendente para la tecnología IEEE 802.3ca.

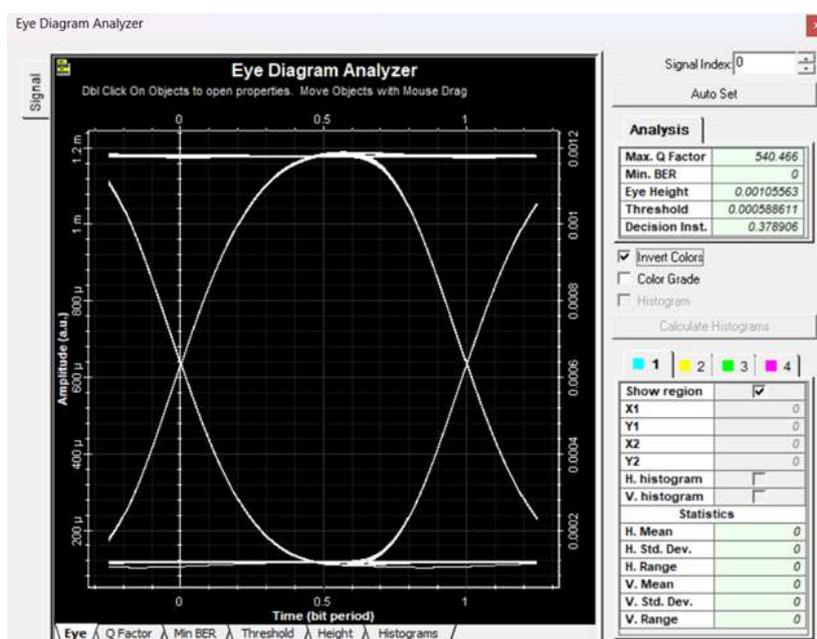


Figura 3.7: Diagrama de ojo (Downlink) IEEE 802.3ca
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.7 muestra los resultados obtenidos:

Tabla 3.7: Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 1 y 2 (DL)

Análisis	Ruta 1		Ruta 2	
	λ_{UL} 1310 nm	= $\lambda_{UL} = 1524$ nm	λ_{UL} 1524 nm	= $\lambda_{UL} = 1524$ nm
Max. Factor Q	540.466	508.936	386.299	396.58
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00105563	0.00105538	0.000701481	0.000701433
Límite	0.000588611	0.000582679	0.00039046	0.000388362
Decisión Inst.	0.378906	0.378906	0.378906	0.378906
Potencia Total	-1.962 dBm		-3.728 dBm	

3.4.2. Enlace Uplink

En el enlace de subida, el factor Q se mantiene entre 362.265 y 550.386, lo que demuestra la estabilidad de esta tecnología en escenarios de alta demanda. El diagrama de ojo cuenta con una apertura clara, que demuestra la viabilidad del enlace. La Figura 3.8 presenta el diagrama de ojo del enlace ascendente para la tecnología IEEE 802.3ca.

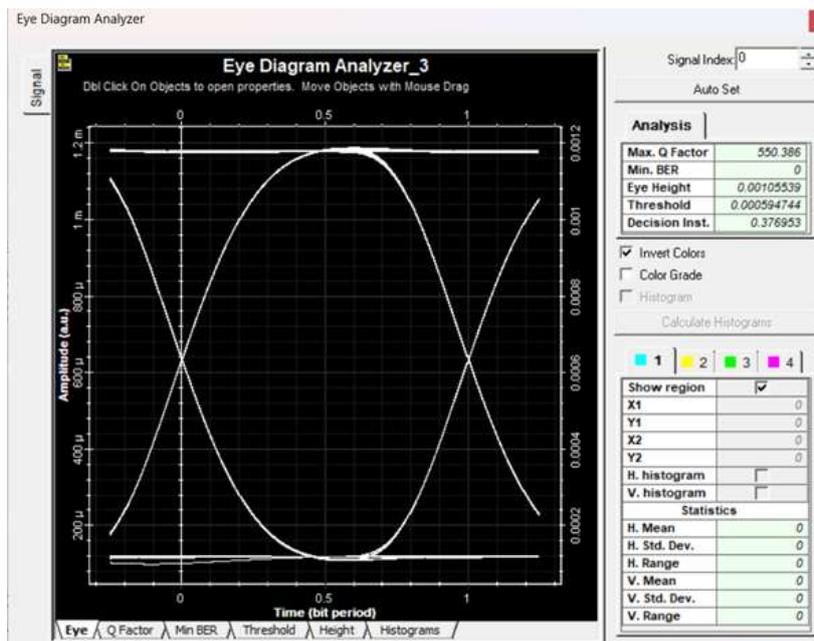


Figura 3.8: Diagrama de ojo (Uplink) IEEE 802.3ca
Fuente: [Los Autores]

En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 3.8: Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 1 y 2 (UL)

Análisis	Ruta 1		Ruta 2	
	λ_{UL} 1330 nm	$= \lambda_{UL} = 1350 \text{ nm}$	λ_{UL} 1330 nm	$= \lambda_{UL} = 1350 \text{ nm}$
Max. Factor Q	509.481	550.386	412.918	362.265
Min. BER	0	0	0	0
Altura del Ojo	0.00105514	0.00105539	0.000701257	0.000700702
Límite	0.000588318	0.000594744	0.000392117	0.000393886
Decisión Inst.	0.378906	0.376953	0.376953	0.376953
Potencia Total	-1.962 dBm		-3.729 dBm	

3.5. Ruta alternativa entre el nodo 1 y 3

Se propone el diseño de una ruta alternativa que considera el uso de fibra óptica soterrada. Este caso de estudio incluye una distancia de 10,451 km. En este caso solo se uso infraestructura para tendido aéreo y se analizaron las mismas características de las tecnologías evaluadas.

3.5.1. Tecnología GEPON

Enlace Downlink

El diagrama de ojo para el enlace descendente en GEPON muestra un buen margen entre los niveles lógicos alto y bajo, lo que asegura una transmisión confiable. Los resultados reflejan un factor Q de 538.444 y una BER igual a cero, lo que evidencia una alta calidad de señal en la Figura 3.9.

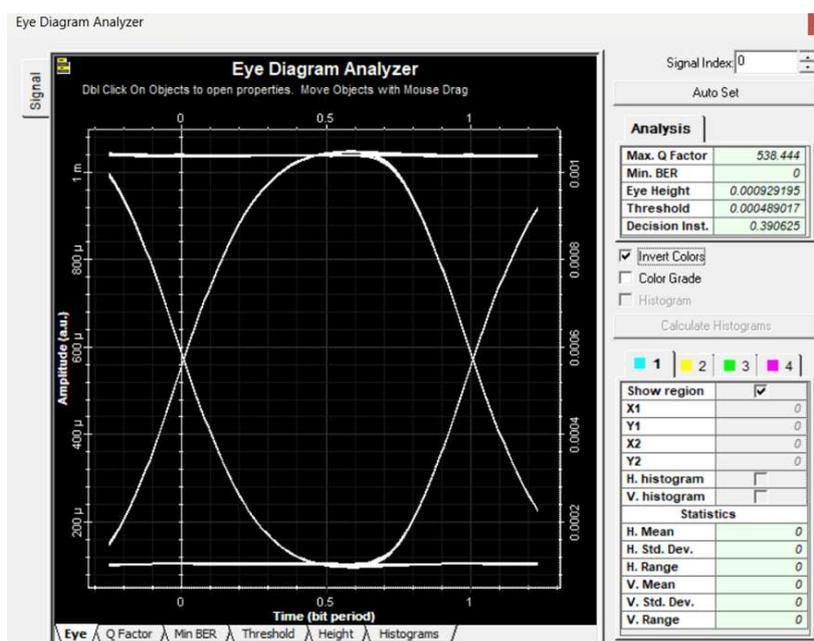


Figura 3.9: Diagrama de ojo (Downlink) GEPON ruta Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.9 resume los parámetros cuantitativos del enlace descendente, como la altura del ojo, el umbral de decisión y la potencia total.

Tabla 3.9: Resultados KPIs GEAPON - Ruta 3 (DL)

Análisis	Ruta 3
Max. Factor Q	538.444
Min. BER	0
Altura del Ojo	0.000929195
Límite	0.000489017
Decisión Inst.	0.390625
Potencia Total	-2.488 dBm

Enlace Uplink

En el enlace ascendente, el diagrama de ojo también presenta una apertura clara, con un factor Q de 599.689 y una BER de cero. La altura del ojo y el umbral de decisión indican un sistema robusto para manejar el tráfico ascendente, como se muestra en la Figura 3.10.

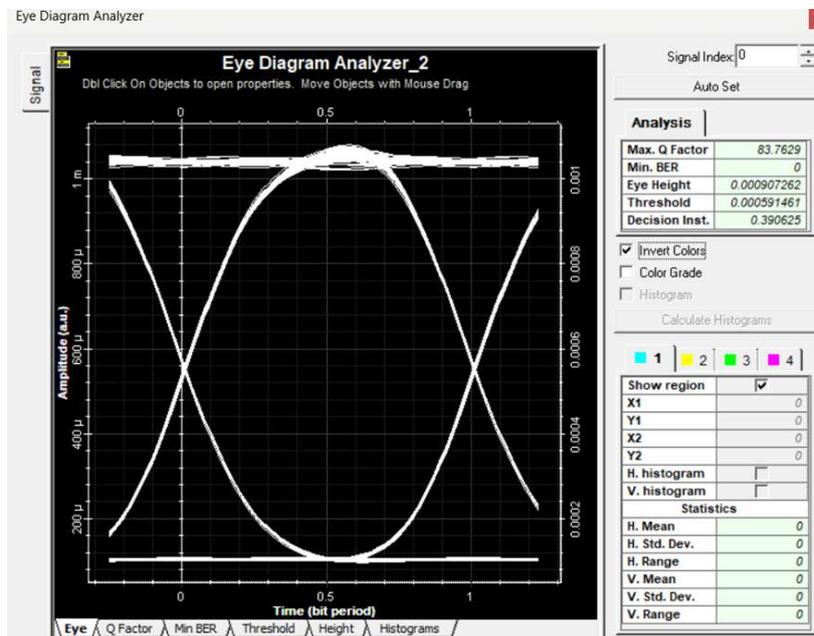


Figura 3.10: Diagrama de ojo (Uplink) GEAPON Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.10 presenta los resultados obtenidos para el enlace ascendente, destacando todos los parámetros relevantes.

Tabla 3.10: Resultados KPIs GEPON - Ruta 3 (UL)

Análisis	Ruta 3
Max. Factor Q	599.689
Min. BER	0
Altura del Ojo	0.000730729
Límite	0.000382517
Decisión Inst.	0.390625
Potencia Total	-3.532 dBm

3.5.2. Tecnología XGS-PON

Enlace Downlink

En XGS-PON, el enlace descendente muestra factores Q menores en comparación con GEPON, alcanzando 83.7629. Sin embargo, el valor de BER se mantiene en cero, y la altura del ojo garantiza una transmisión confiable, como se muestra en la Figura 3.11.

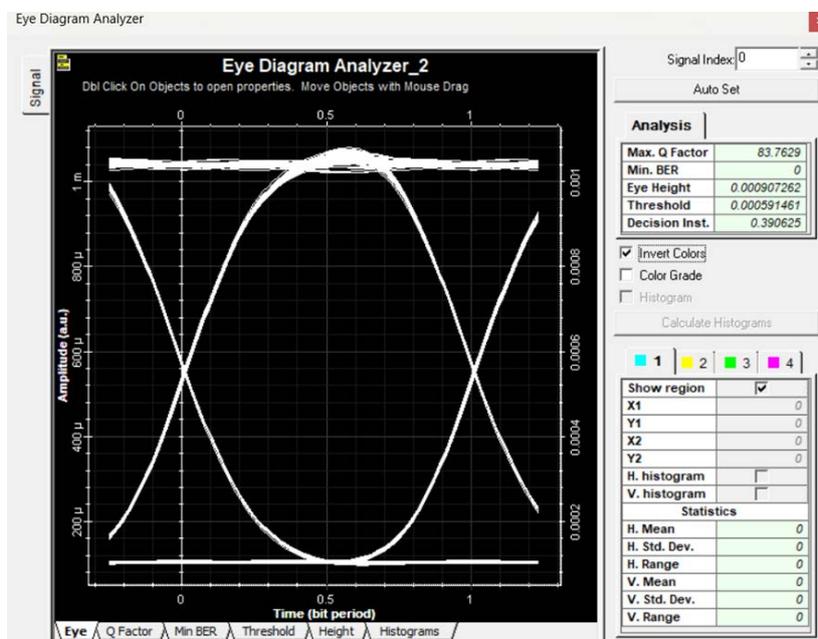


Figura 3.11: Diagrama de ojo (Downlink) XGS-PON Alternativa
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.11 detalla los parámetros analizados, como la potencia total y el umbral de decisión.

Tabla 3.11: Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 3 (DL)

Análisis	Ruta 3
Max. Factor Q	83.7629
Min. BER	0
Altura del Ojo	0.000907262
Límite	0.000591461
Decisión Inst.	0.390625
Potencia Total	-2.488 dBm

Enlace Uplink

Para el enlace ascendente, los factores Q mejoran las condiciones, llegando a 192.238. El diagrama de ojo mantiene una buena apertura, con una altura del ojo suficiente para decisiones precisas, como se muestra en la Figura 3.12.

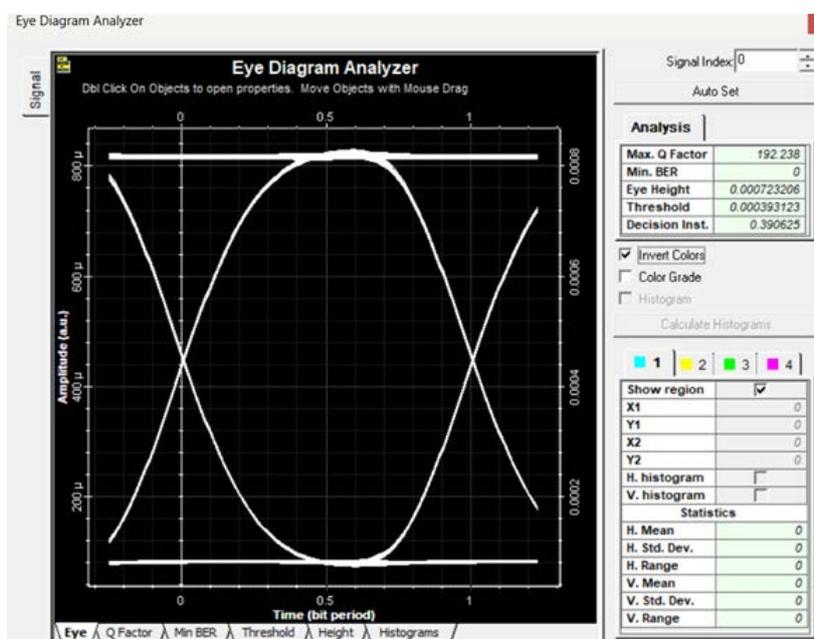


Figura 3.12: Diagrama de ojo (Uplink) XGS-PON Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.12 presenta los resultados obtenidos para el enlace ascendente.

Tabla 3.12: Resultados KPIs XGS-PON - Ruta 3 (UL)

Análisis	Ruta 3
Max. Factor Q	192.238
Min. BER	0
Altura del Ojo	0.000723206
Límite	0.000393123
Decisión Inst.	0.390625
Potencia Total	-3.632 dBm

3.5.3. Tecnología NG-PON2

Enlace Downlink

En el enlace descendente, NG-PON2 se destaca por su flexibilidad, operando en múltiples longitudes de onda. Los factores Q varían entre 224.262 y 249.801, con una BER de cero. La altura del ojo es consistente entre las diferentes longitudes evaluadas, como se muestra en la Figura 3.13.

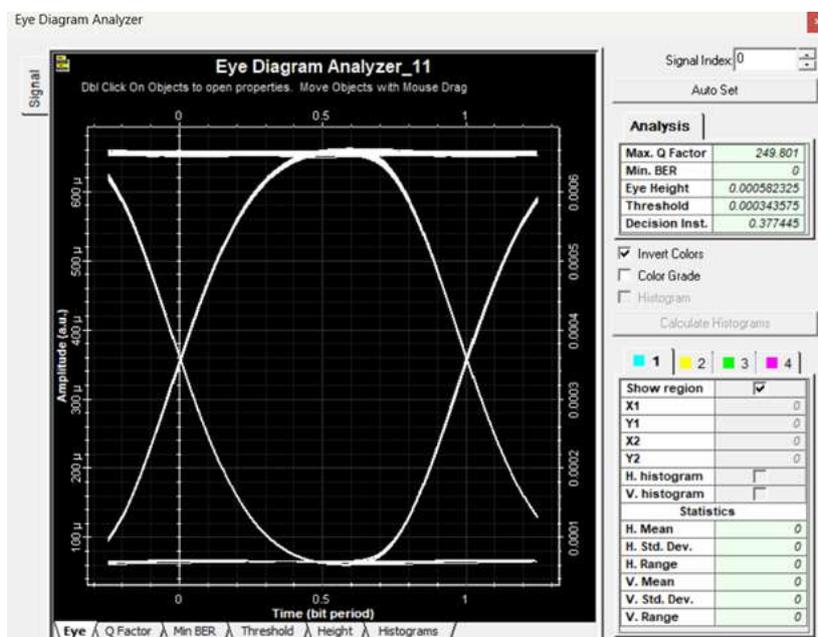


Figura 3.13: Diagrama de ojo (Downlink) NG-PON2 Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.13 desglosa los resultados por longitud de onda, mostrando la estabilidad de esta tecnología.

Tabla 3.13: Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 3 (DL)

Análisis	Ruta 3	
	$\lambda_{1DL} = 1596 \text{ nm}$	$\lambda_{2DL} = 1598 \text{ nm}$
Max. Factor Q	224.262	221.569
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000582297	0.000581367
Límite	0.000343521	0.000350472
Decisión Inst.	0.377445	0.375489
Análisis	$\lambda_{3DL} = 1600 \text{ nm}$	$\lambda_{4DL} = 1602 \text{ nm}$
Max. Factor Q	227.923	249.801
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000582167	0.000582325
Límite	0.000338714	0.000343575
Decisión Inst.	0.377445	0.377445
Potencia Total	-4.497 dBm	

Enlace Uplink

Muestra un rendimiento aceptable con factores Q entre 262.778 y 280.993. El valor de BER se mantiene en cero, y el diagrama de ojo refleja una transmisión confiable, como se muestra en la Figura 3.14.

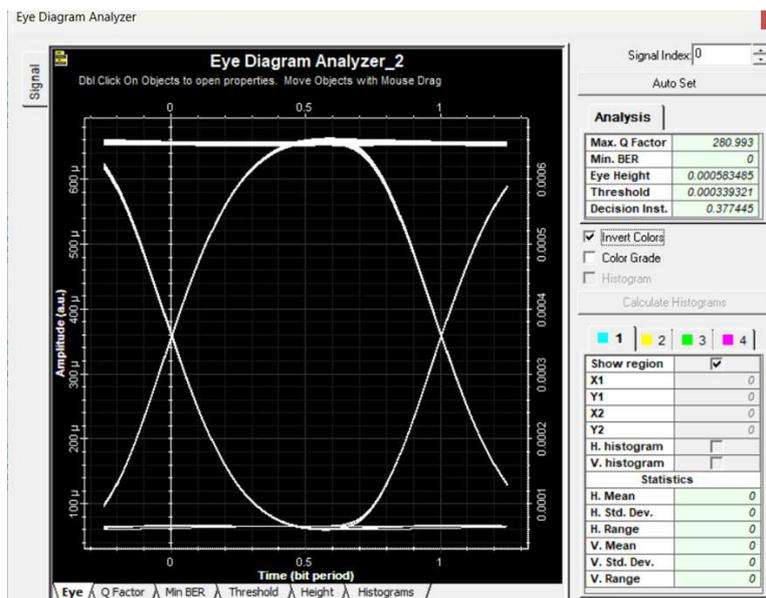


Figura 3.14: Diagrama de ojo (Uplink) NG-PON2 Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.14 presenta los resultados detallados del enlace ascendente.

Tabla 3.14: Resultados KPIs NG-PON2 - Ruta 3 (UL)

Análisis	Ruta 3	
	$\lambda_{1UL} = 1524 \text{ nm}$	$\lambda_{2UL} = 1526 \text{ nm}$
Max. Factor Q	280.993	262.778
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000583485	0.000582744
Límite	0.000339321	0.000348949
Decisión Inst.	0.377445	0.375489
Análisis	$\lambda_{3UL} = 1528 \text{ nm}$	$\lambda_{4UL} = 1530 \text{ nm}$
Max. Factor Q	270.153	270.705
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000582962	0.000583223
Límite	0.00034142	0.000351816
Decisión Inst.	0.377445	0.375489
Potencia Total	-4.496 dBm	

3.5.4. Tecnología IEEE 802.3ca

Enlace Downlink

En IEEE 802.3ca, el enlace descendente muestra factores Q altos, entre 279.38 y 301.731. El diagrama de ojo presenta una apertura clara, con una altura del ojo adecuada para decisiones lógicas precisas, como se muestra en la Figura 3.15.

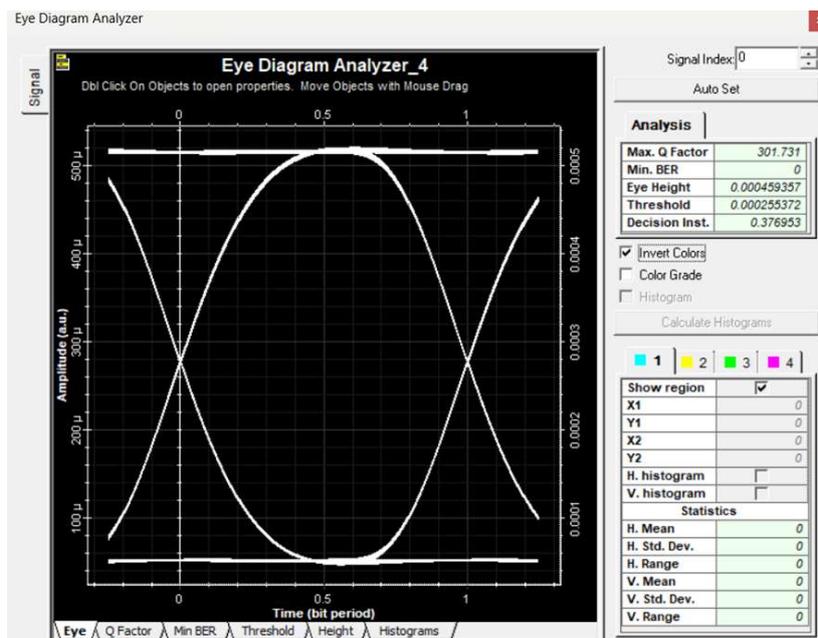


Figura 3.15: Diagrama de ojo (Downlink) IEEE 802.3ca Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.15 resume los valores analizados, destacando la estabilidad del sistema.

Tabla 3.15: Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 3 (DL)

Análisis	Ruta 3	
	$\lambda_{DL} = 1330 \text{ nm}$	$\lambda_{DL} = 1350 \text{ nm}$
Max. Factor Q	301.731	279.38
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000459357	0.000459008
Límite	0.000255372	0.000256529
Decisión Inst.	0.376953	0.378906
Potencia Total	-5.558 dBm	

Enlace Uplink

El enlace ascendente presenta factores Q que varían entre 280.593 y 326.112. El diagrama de ojo refleja una transmisión confiable y niveles de decisión consistentes, como se muestra en la Figura 3.16.

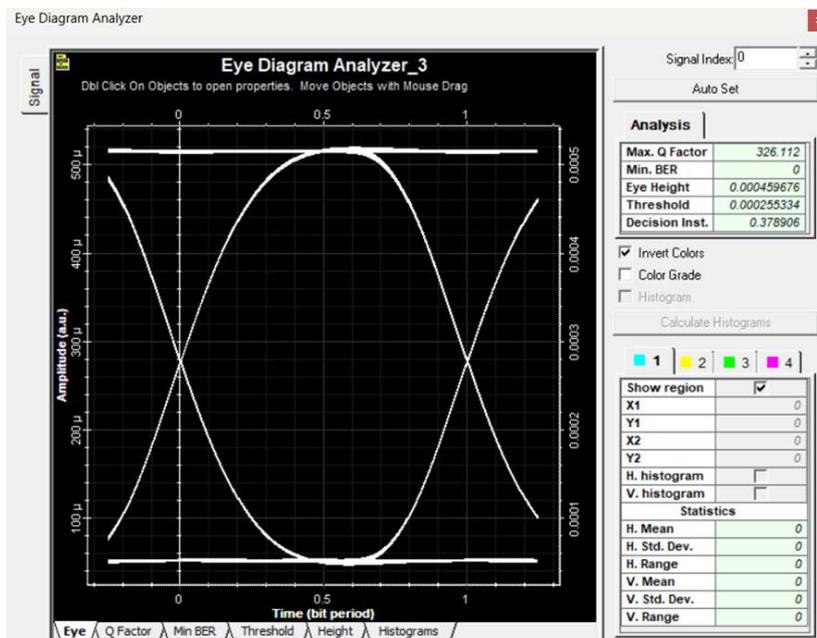


Figura 3.16: Diagrama de ojo (Uplink) IEEE 802.3ca Alternativa.
Fuente: [Los Autores]

La Tabla 3.16 detalla los resultados del enlace ascendente en la ruta 3.

Tabla 3.16: Resultados KPIs IEEE 802.3ca - Ruta 3 (UL)

Análisis	Ruta 3	
	$\lambda_{UL} = 1270 \text{ nm}$	$\lambda_{UL} = 1290 \text{ nm}$
Max. Factor Q	280.593	326.112
Min. BER	0	0
Altura del Ojo	0.000458965	0.000459676
Límite	0.000253947	0.000255334
Decisión Inst.	0.378906	0.378906
Potencia Total	-5.558 dBm	

3.6. Análisis Comparativo de las Tecnologías Evaluadas

De acuerdo con la tabla 3.17, se observa que para la Ruta 1, la tecnología IEEE 802.3ca destaca por proporcionar la mayor velocidad de transmisión, alcanzando hasta 50 Gbps mediante el uso de solo dos longitudes de onda (1330 nm y 1350 nm en el enlace descendente). Este enfoque permite minimizar la interferencia y maximizar la capacidad efectiva del enlace, en contraste con NG-PON2, que, aunque también ofrece altas velocidades (40 Gbps, 20 % menos velocidad), utiliza cuatro longitudes de onda más próximas, lo que puede ocasionar un efecto negativo por los efectos no lineales debido a la mezcla de cuatro ondas creando una interferencia entre canales y que se ve reflejado en el factor Q.

Tabla 3.17: Comparación de resultados por tecnología y rutas.

Tecnología	Ruta	Enlace	λ (nm)	Velocidad (Gbps)	Max. Factor Q	Altura del Ojo	Potencia Total (dBm)
GEAPON	Ruta 1	Downlink	1490	2.5	633.171	0.00177381	0.310
		Uplink	1310	1.25	1085.86	0.00167695	0.064
	Ruta 2	Downlink	1490	2.5	615.342	0.00170015	0.312
		Uplink	1310	1.25	1079.56	0.00162218	0.067
	Ruta 3	Downlink	1490	2.5	602.891	0.00165439	0.308
		Uplink	1310	1.25	1068.92	0.00158962	0.059
XGS-PON	Ruta 1	Downlink	1490	10	309.59	0.00176545	0.310
		Uplink	1310	10	419.492	0.00167102	0.064
	Ruta 2	Downlink	1490	10	302.874	0.00170522	0.311
		Uplink	1310	10	411.362	0.00164133	0.067
	Ruta 3	Downlink	1490	10	294.589	0.00168356	0.309
		Uplink	1310	10	405.721	0.00161498	0.063
NG-PON2	Ruta 1	Downlink	1596, 1598, 1600, 1602	40 (10x4)	253.072	0.00110929	-1.700
		Uplink	1524, 1526, 1528, 1530	40 (10x4)	992.181	0.00111915	-1.699
	Ruta 2	Downlink	1596, 1598, 1600, 1602	40 (10x4)	245.578	0.00109841	-1.705
		Uplink	1524, 1526, 1528, 1530	40 (10x4)	981.421	0.00110538	-1.704
	Ruta 3	Downlink	1596, 1598, 1600, 1602	40 (10x4)	239.673	0.00107456	-1.710
		Uplink	1524, 1526, 1528, 1530	40 (10x4)	970.512	0.00108947	-1.707
IEEE 802.3ca	Ruta 1	Downlink	1330, 1350	50 (25x2)	540.466	0.00105563	-1.962
		Uplink	1270, 1290	50 (25x2)	550.386	0.00105539	-1.962
	Ruta 2	Downlink	1330, 1350	50 (25x2)	530.291	0.00104273	-1.965
		Uplink	1270, 1290	50 (25x2)	540.179	0.00104839	-1.965
	Ruta 3	Downlink	1330, 1350	50 (25x2)	520.157	0.00103216	-1.969
		Uplink	1270, 1290	50 (25x2)	530.139	0.00103825	-1.968

De hecho, en el enlace Downlink se observa que el factor Q de IEEE 802.3ca es superior al de NG-PON2, pero en el caso de Uplink mejora significativamente NG-PON2. Esto se debe en gran parte a las especificaciones de la fibra que favorecen en sí a las tecnologías en ciertas longitudes de onda, beneficiando a NG-PON2 con un factor Q de 992.181 en el enlace ascendente. En el caso de uplink, IEEE 802.3ca no presenta el mayor factor Q, ya que cuenta con valores de 550.386 como máximo

y mínimo de 540.466. No obstante, a pesar de no tener el mejor factor Q, tiene velocidades superiores al resto y una gran estabilidad del factor Q que permanece constante en los rangos de (550.386-520.157) tanto como para Uplink y Downlink.

Por último, con respecto a los estándares como XGS-PON y GEPON que se mantienen los factores Q más altos de las simulaciones, alcanzando valores de 1085.86 en su máximo y 294.589 en su mínimo, pero con gran desventaja en ancho de banda con sus competencias más modernas.

De la misma forma, la altura del ojo para todas las tecnologías presenta valores semejantes en torno a 0,001, indicando un desempeño comparable en cuanto a la estabilidad de la señal. Por el contrario, en términos de potencia total, se visualiza una notable diferencia. En cambio, XGS-PON mantiene potencias positivas en ambos enlaces (hasta 0.310 dBm).

Por otra parte, en la ruta 2, los resultados muestran una clara disminución en el factor Q en general para todas las tecnologías, lo que nos indica una mayor atenuación presente en esta ruta. Sin embargo, el rendimiento general se mantiene constante de manera similar a la ruta 1, con IEEE 802.3ca manteniéndose a la cabeza con la mayor velocidad, mientras que XGS-PON se sitúa como la mejor en cuanto a estabilidad del factor Q.

En cambio, en la ruta 3, se visualizó las menores métricas en cuanto a desempeño de la red. Por ejemplo GEPON fue la tecnología más susceptible, indicándonos una disminución en el factor Q y altura del ojo. Al contrario, NG-PON2 y IEEE 802.3ca se constituyen como las opciones más robustas en términos de capacidad de transmisión. De este modo, los resultados demuestran la importancia de ajustar las configuraciones de red para cada ruta para maximizar su rendimiento.

Capítulo 4

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

4.1. Conclusiones Generales

Luego de simular una red **POLAN** para diversos estándares de redes **PON**, se pudo identificar que la tecnología IEEE 802.3ca se muestra como la mejor opción, ya que ofrece un mejor equilibrio entre velocidad y calidad de la señal. Esto se debe a que el factor Q se mantiene constante tanto en el enlace ascendente (*uplink*) como descendente (*downlink*), además permite la mayor velocidad en el enlace. A pesar de que NG-PON2 presenta el mejor factor Q en *uplink*, para el caso de *downlink* su factor Q es mucho menor, por lo que no hay un equilibrio. Esto, por tanto, permite confirmar que IEEE 802.3ca es la mejor opción si se prioriza la capacidad de datos y escalabilidad.

Desde la perspectiva de atenuación y por tanto de distancia, la mejor opción resulta ser NG-PON2 aunque se sacrifica velocidad en un 20 % respecto a IEEE 802.3ca. No obstante, en el concepto de redes **POLAN**, el objetivo es la posibilidad de una alta transferencia de datos entre equipos que en lo posible estén a la menor distancia, lo que permite confirmar que el estándar de IEEE es la mejor opción.

En cuanto a las rutas para el despliegue de la red de fibra óptica se identificó que es necesario considerar un balance entre el costo, la normativa y la viabilidad técnica. Respecto a la ruta 1, ya que no pasa por zonas donde se requiere soterramiento, destaca por su simplicidad, lo que sugiere un menor costo. Sin embargo, dicho

costo está limitado por el valor del arrendamiento de postes además de los costos propios por el uso de materiales. Ya que, para el caso de la ciudad de Cuenca existen zonas en las que, para cruzar de un lado a otro en ciertas avenidas principales es necesario soterrar la ruta; por esto y considerando la ubicación de los nodos H_1 y H_3 se propusieron dos rutas, la ruta 2 y 3. En este sentido, para el despliegue de una red **POLAN** entre los nodos H_1 y H_3 , la mejor opción es la ruta 2 en contraste con la ruta 3, ya que hay una diferencia considerable en el número de postes usados. Además, según el reglamento que especifica los techos tarifarios por arrendamiento de infraestructura para redes de telecomunicaciones de los municipios en el Ecuador, el costo del soterramiento es menor. No obstante, es importante destacar que la ruta 2 está limitada por la capacidad disponible de los ductos. Asimismo, el proceso para obtener la licencia de uso de los tramos soterrados puede ser engorroso, lo que hace que la ruta 3 también resulte atractiva.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda verificar la compatibilidad de la fibra óptica con las tecnologías a implementar, ya que cada una opera en diferentes longitudes de onda y bandas espectrales. Elegir una fibra inadecuada puede afectar el desempeño de la red y limitar su escalabilidad. De este modo, se recomienda el uso de la fibra óptica G.652D, tras comprobar que cumple con los requisitos para las tecnologías evaluadas. Esta fibra soporta el funcionamiento de las bandas S y C con **TWDM**, lo que garantiza su compatibilidad con **NG-PON2**. También, que cumpla con los requerimientos de **CWDM** en la banda O, utilizada en IEEE 802.3ca.

Para la utilización del software Optisystem se recomienda la investigación previa de las tecnologías a implementar para verificar si el software cumple con los requisitos necesarios para el desarrollo de las simulaciones. En este sentido, el presente documento puede ser usado como una herramienta para que estudiantes de carreras afines puedan desarrollar investigaciones futuras usando el software OptiSystem

Para el análisis de los resultados se recomienda utilizar directamente el "Eye Diagram Analyzer" que nos proporciona una vista completa de los indicadores clave

de rendimiento de la red.

Para aprovechar el uso de algoritmos de optimización en el diseño de redes, es importante que se pueda determinar una matriz de adyacencia (conectividad) apegada a la realidad, eliminando las conexiones no factibles para que el cálculo de la ruta sea correcto. Es decir, mientras la información que se cargue al modelo sea más acorde a la realidad, el resultado obtenido será mejor.

Se recomienda siempre planificar las rutas por donde se realizará el despliegue de una red PON ya que la optimización de la ruta permite minimizar la distancia y así garantizar que los aspectos de la capa física de la red puedan aprovecharse de la mejor forma posible. También permite la reducción de costos al reducir los requerimientos como la cantidad de cable o el uso de postes para un tendido aéreo.

4.3. Trabajos Futuros

Este proyecto abre la puerta a futuras investigaciones y avances de los que se beneficiará aún más la tecnología y su implementación. Estas incluyen:

- **Estimar su impacto en el medio ambiente:** Estudiar cómo las redes POLAN aportan para reducir los efectos de la huella ecológica.
- **Incorporar IoT:** Analizar cómo estas redes pueden transformarse en la base para dispositivos IoT en entornos educativos y urbanos.
- **Simular pruebas en escenarios críticos:** Evaluar fallos ocasionados en la fibra o picos de demanda para medir la robustez del sistema.
- **Expandir el trabajo a otras instituciones:** Probar el diseño en entornos educativos y corporativos que cumplan con los requerimientos y permitan aprobar su flexibilidad y escalabilidad.

Glosario

BER Tasa de error de bit – Bit Error Rate.

CWDM Multiplexación por División de Longitud de Onda Coarse – Coarse Wavelength Division Multiplexing.

DBA Asignación Dinámica de Ancho de Banda – Dynamic Bandwidth Allocation.

DWDM Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa – Dense Wavelength Division Multiplexing.

EPON Red Óptica Pasiva Ethernet – Ethernet Passive Optical Network.

FTTH Fibra hasta el hogar – Fiber To The Home.

GEPON Red Óptica Pasiva Ethernet a Gigabit – Gigabit Ethernet Passive Optical Network.

GPON Red Óptica Pasiva Gigabit – Gigabit Passive Optical Network.

KPIs Indicadores Clave de Rendimiento – Key Performance Indicators.

LAN Red de Área Local – Local Area Network.

NG-PON2 Red Óptica Pasiva de Nueva Generación 2 – Next-Generation Passive Optical Network 2.

ODN Red Distribución Óptica – Optical Distribution Network.

OLT Terminal Línea Óptica – Óptical Line Terminal.

ONT Terminal de Red Óptica – Optical Network Terminal.

ONU Unidad Red Óptica – Optical Network Unit.

POLAN LAN Óptica Pasiva – Passive Optical LAN.

PON Red Óptica Pasiva – Passive Optical Network.

TDM Multiplexación por División de Tiempo – Time Division Multiplexing.

TDMA Acceso por Multiplexación por División de Tiempo – Time Division Multiplexing Access.

TWDM Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda – Time and Wavelength Division Multiplexing.

WDM Multiplexación por División de Longitud de Onda – Multiplexing Division Wavelength.

XGS-PON Red Óptica Pasiva Simétrica de 10 Gigabits – 10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network.

Referencias

- [1] R. S. Argüello Lozano, «Diseño e implementación de una red POLAN para interconectar los campus de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito,» Universidad Politécnica Salesiana, 2024. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27177>.
- [2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley-Interscience, 2021, págs. 1-546, ISBN: 1119737362.
- [3] C. H. Lee, W. V. Sorin y B. Y. Kim, «Fiber to the home using a PON infrastructure,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, págs. 4568-4583, 12 dic. de 2006, ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/JLT.2006.885779.
- [4] N. Olifer y V. Olifer, *Redes de computadoras: principios, tecnología y protocolos para el diseño de redes*. McGraw-Hill Interamericana, 2009, ISBN: 9781456218195.
- [5] N. V. Ley Leyva, D. M. Granda Ayabaca, C. R. Benítez Flores y V. J. Guamán Gómez, «Eficacia y eficiencia de la seguridad de las redes LAN. Cantón Pasaje,» *Sociedad & Tecnología*, vol. 4, n.º 2, págs. 205-222, 2021. DOI: <https://doi.org/10.51247/st.v4i2.105>.
- [6] IEEE-Computer-Society, *802.3ca-2020 - IEEE Standard for Ethernet Amendment 9: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s Passive Optical Networks*, Approved by IEEE SA Standards Board, 4 June 2020., New York, USA: Institute of Electrical y Electronics Engineers, jul. de 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9135000>. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9134998>.
- [7] C. Lam, *Passive optical networks: Principles and practice*. 2007, ISBN: 9780123738530.

- [8] ITU-T, *G.984.2 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification*, ago. de 2019. dirección: <https://www.itu.int/rec/t-rec-g.984.2/recommendation.asp?lang=es&parent=T-REC-G.984.2-201908-I>.
- [9] A. F. González Carmona, Ó. A. Pérez Marín y A. I. Oviedo, «Simulador de enlaces SCMWDM para redes tipo PON,» *Revista en telecomunicaciones e informática*, vol. 1, n.º 2, 2011. dirección: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/6508>.
- [10] R. Rubenstein, «WDM-PON blurs the boundary between metro and last mile,» *FibreSystems Europe*, págs. 1-8, ene. de 2009, Reproduced from the December 2008/January 2009 issue of *FibreSystems Europe*. © Institute of Physics and IOP Publishing Ltd 2009. dirección: <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/407352/3912767/1250797337563/FSDec08Jan09WDMREPRINT.pdf?token=MM4uiQXg3KQ2t8BnnJZLQ41xFNA%3D>.
- [11] T. Thangappan, E. Manimaran, A. Arasu, R. Arulprakash y J. H. Ganapathi, «Review of dynamic bandwidth allocation in GPON,» en *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, IEEE, 2020, págs. 884-888. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSP48568.2020.9182151>.
- [12] G. Simon, A. E. Ankouri, L. A. Neto, P. Chanclou y D. Kurz, «FTTH AND OPTICAL LAN SYNERGY ENABLED BY VIRTUAL OLT FOR HOME, OFFICE AND CAMPUS,» *Institution of Engineering y Technology*, 2019, ISBN: 978-1-83953-185-9. DOI: 10.1049/cp.2019.0796. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9125524/keywords#keywords>.
- [13] F. J. Romero Espinosa, «Diseño y simulación de una red IEEE802.3CA para proveer servicios de acceso en una zona del sector urbano de la ciudad de Quito,» *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, jul. de 2023, págs. 1-45. dirección: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/41170>.
- [14] M. J. Cook y S. Al-Hallaj, «Film-based optical elements for passive solar concentration in a BIPV window application,» *Solar Energy*, vol. 180, págs. 226-242, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.078>.
- [15] Panduit-Corporation, «Passive Optical LAN,» Panduit, inf. téc., 2024, Documento técnico. dirección: <https://www.panduit.com/content/dam/panduit/en/products/media/8/98/298/9298/109909298.pdf>.

- [16] A. Roslyakov, «Passive optical LAN,» en *Optical Technologies for Telecommunications 2022*, SPIE, vol. 12743, 2023, pág. 1 274 302. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2673395>.
- [17] Cisco. «Comprender la tecnología GPON.» (2023), dirección: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.pdf.
- [18] IEEE, *802.3ah-2004 - IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks*, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.94617>. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9283>.
- [19] ITU-T. «G.9807 XGS-PON.» (2023), dirección: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9807.1-202302-I!!PDF-E&type=items.
- [20] ITU-T. «G.989 NG-PON2.» (2023), dirección: <https://www.itu.int/en/ITU-T>.
- [21] C. Knittle, *25G/50G EPON Standard Crosses the Finish Line, Enhancing Fiber Deployments as Part of Cable's 10G Platform*, CableLabs, Accessed: 2025-01-30, 2023. dirección: <https://www.cablelabs.com/blog/25g-50g-epon-standard-crosses-the-finish-line-enhancing-fiber-deployments-as-part-of-cables-10g-platform>.
- [22] ITU-T, *Recommendation ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, nov. de 2009. dirección: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-G.652-200911-S!!PDF-E&type=items.
- [23] H. S. Abbas y M. A. Gregory, «The next generation of passive optical networks: A review,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 67, págs. 53-74, 2016, ISSN: 1084-8045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516000989>.
- [24] C. E. Ortiz Torres, «Implementación de una red óptica NG-PON2 en el campus de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador para mejorar la conectividad en las áreas académicas,» Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), 2023. dirección: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/0f7e13d5-8b04-4e77-b3c2-2018896ae289>.

- [25] J. A. Vásquez Chim, «Tecnología GPON: la evolución tecnológica de las redes de comunicaciones.» Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería, 2020. dirección: <http://hdl.handle.net/20.500.12249/2641>.
- [26] O. J. Ciceri, C. A. Astudillo y N. L. da Fonseca, «Dynamic Bandwidth Allocation with Multi-ONU Customer Support for Ethernet Passive Optical Networks,» en *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, IEEE, 2018, págs. 1-6, ISBN: 9781538669501. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCC.2018.8538711>. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8538711>.
- [27] R. López Albán, «Estudio, diseño y simulación de una red NG-PON2 para analizar su rendimiento en el barrio Juan de Velasco,» Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, inf. téc., 2023, Accedido: 30 enero 2025. dirección: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10687>.
- [28] M. de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL), *Plan Nacional de Soterramiento y Ordenamiento de Redes e Infraestructura de Telecomunicaciones*, jul. de 2024. dirección: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2024/09/Plan_Nacional_de_Soterramiento_y_Ordenamiento_2024.pdf.
- [29] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), *Resolución No. ARCOTEL-CZO5-2021-0046*, jun. de 2021. dirección: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/06/resolucion_arcotel_czo5-2021-0046_-_r_-_municipio_guayaquil-1-signed.pdf.
- [30] D. S. Hochbaum, *Approximation algorithms for NP-hard problems*. An International Thomson Publishing Company, 1995. dirección: <https://www.cs.ucr.edu/~neal/publication/Klein99Approximation.pdf>.
- [31] Y. Donoso y R. Fabregat, *Multi-objective optimization in computer networks using metaheuristics*. CRC Press, 2016. dirección: https://www.researchgate.net/publication/263369777_Multi-objective_optimization_using_metaheuristics_Non-standard_algorithms.