



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**ESTUDIO DEL DESPLIEGUE DE UNA RED DE ACCESO NG-PON2 EN  
LA CIUDAD DE QUITO**

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

**AUTOR:** MATEO FERNANDO BRITO JIMÉNEZ

**TUTOR:** GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO

Quito-Ecuador

2022


## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Mateo Fernando Brito Jiménez con documento de identificación N° 1750020800 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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.

Quito, 02 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Mateo Fernando Brito Jiménez

1750020800

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

Yo, Mateo Fernando Brito Jimenez con documento de identificación No. 1750020800, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Estudio del despliegue de una red de acceso NG-PON2 en la ciudad de Quito”, 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, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de septiembre del año 2022

Atentamente,



-----  
Mateo Fernando Brito Jimenez

1750020800

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Germán Vicente Arévalo Bermeo con documento de identificación N° 0103152500, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DEL DESPLIEGUE DE UNA RED DE ACCESO NG-PON2 EN LA CIUDAD DE QUITO, realizado por Mateo Fernando Brito Jiménez con documento de identificación N° 1750020800, 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.

Quito, 02 de septiembre del año 2022

Atentamente,



-----  
Ing. Germán Vicente Arévalo Bermeo, PhD.

0103152500

## **DEDICATORIA**

Con mucho orgullo yo Mateo Fernando Brito Jiménez dedico mi trabajo de titulación primeramente a Dios por ser mi guía en mi vida personal como profesional ayudándome a resolver cada dificultad presentada en todo el trayecto de mi vida. A mis padres Diego Brito y Patricia Jiménez quienes son mi motivación más grande para cumplir esta meta, quienes, con su apoyo incondicional, su gran sacrificio y su lucha y preocupación diaria que han puesto en mi para poder cumplir mis metas y así ir alcanzando mis sueños, dándome fortaleza cuando más lo necesitaba. A mis hermanos Diego y Nathaly que con sus consejos y palabras de aliento me han impulsado a seguir adelante sin importar los obstáculos que se me presenten, para que siga luchando por cumplir mis objetivos, siendo mis grandes ejemplos a seguir. También dedico este trabajo a mis angelitos que me están cuidando desde el cielo siendo mis guardianes y mi motivación para cumplir con determinación cada meta que me propongo. A mi novia Alisson por su apoyo y ayuda en esta etapa de mi vida, acompañándome con mucho amor en mis planes personales y profesionales, quien siempre creyó en mí y me impulsa a ser mejor cada día. Y por último a cada uno de mis amigos que estuvieron en todo el trayecto universitario con su apoyo y por cada buena experiencia vivida.

## **AGRADECIMIENTO**

Empiezo agradeciendo a Dios por brindarme salud y perseverancia en toda mi etapa universitaria, por bendecirme y guiarme en cada paso que daba para cumplir mis objetivos.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi familia por el apoyo, por el amor que me tienen para poder ayudarme a construir un camino profesional de buenos principios y valores para defenderme y sobresalir entre la sociedad.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por mi formación humana y a cada uno de sus docentes por compartirme sus conocimientos y guiarme en un buen camino profesional, haciendo posible la culminación satisfactoria de esta meta importante en mi vida.

De antemano también agradezco a mi tutor el doctor Germán Arévalo PhD, que ha sabido guiarme en el proceso de desarrollo de este proyecto de titulación, mediante cada valioso aporte, consejo y conocimiento profesional que me impartió en cada dificultad presentada.

Finalmente, agradezco a mi novia y a mis amigos que me deja esta etapa universitaria, gracias por cada momento de ayuda, alegría, enojo y tristeza que han hecho que este recorrido sea inolvidable y ameno.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	xvi
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivo específicos	3
1.4. Marco Teórico.....	3
1.4.1. Método de comunicación óptica	3
1.4.2. Transmisor Óptico	4
1.4.2.1. Diodo LED	4
1.4.2.2. Diodo ILD	5
1.4.3. Línea de Transmisión Óptico	6
1.4.4. Receptor Óptico	6
1.4.4.1. Fotodiodo PIN	6
1.4.4.2. Fotodiodo APD	7
1.4.5. Multiplexación en enlaces de comunicaciones ópticas	8
1.4.5.1. Multiplexación al dividir el tiempo	8
1.4.5.2. Multiplexación al dividir las longitudes de onda	9
1.4.6. Redes PON	10
1.4.6.1. Estructura de una red PON	10
1.5. Marco metodológico .....	12
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	14
<b>2. DISEÑO</b> .....	14
2.1. Introducción .....	14
2.2. NG-PON .....	14
2.2.1. Tecnología XG-PON	15
2.2.2. Tecnología NG-PON2	15
2.3. Diseño de la red XG-PON y NG-PON2 de referencia .....	16
2.4. Exigencias principales en la capa física.....	17
2.4.1. Propiedades de la fibra óptica	17

2.4.2.	Magnitud de la fibra óptica	18
2.4.3.	Capacidad	18
2.5.	Escenario de simulación .....	19
2.5.1.	OPTSIM	19
2.5.2.	Topología lógica de PON múltiples	20
2.6.	Parámetros de la simular .....	21
2.7.	Escenario de la simulación .....	22
2.7.1.	Simulación de la red XG-PON	22
2.7.1.1.	Bloque del transmisor	23
2.7.1.2.	Bloque de distribución óptica	24
2.7.1.3.	Bloque del receptor	25
2.7.2.	Simulación de la red NG-PON2	26
2.7.2.1.	Bloque del transmisor	27
2.7.2.2.	Bloque de distribución óptica	29
2.7.2.3.	Bloque del receptor	30
<b>CAPÍTULO 3</b>	.....	31
<b>3. ANÁLISIS</b>	.....	31
3.1.	Introducción .....	31
3.2.	Análisis de la simulación .....	31
3.2.1.	Tecnología XG-PON	31
3.2.1.1.	Señal transmitida downstream a 10 [Gbps]	31
3.2.1.2.	Señal recibida downstream a 10 [Gbps]	34
3.2.2.	Tecnología NG-PON2	41
3.2.2.1.	Señal transmitida downstream a 10 [Gbps] por cada landa $\lambda$	41
3.2.2.2.	Señal recibida downstream a 10 [Gbps] por cada landa $\lambda$	44
3.3.	Comparación de la tecnología XG-PON con la tecnología NG-PON2 .....	52
<b>CAPÍTULO 4</b>	.....	55
<b>4. ANÁLISIS DE COSTOS</b>	.....	55
4.1.	Introducción .....	55
4.2.	OTS (Optimal Topology Search).....	55
4.2.1.	Funciones de OTS	56
4.2.1.1.	Funciones Principales	56
4.2.1.2.	Funciones Secundarias	56
4.2.2.	Precios de referencia	57
4.3.	Parámetros demandados de Bit Rate .....	59



4.4.	Resultados del algoritmo OTS .....	59
4.4.1.	Análisis de OTS con tecnología XG-PON	60
4.4.2.	Análisis de OTS con tecnología NG-PON2	63
4.5.	Comparativa de los costos de implementación.....	65
<b>CONCLUSIONES</b>	.....	67
<b>RECOMENDACIONES</b>	.....	70
<b>REFERENCIAS</b>	.....	71
<b>ANEXOS</b>	.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Sistema de comunicación óptico.....	4
<b>Figura 1.2.</b> Espectro del diodo LED.....	5
<b>Figura 1.3.</b> Espectro del diodo LÁSER.....	5
<b>Figura 1.4.</b> Fotodiodo PIN.....	7
<b>Figura 1.5.</b> Fotodiodo ADP.....	7
<b>Figura 1.6.</b> Método de intercalado OTDM.....	9
<b>Figura 1.7.</b> Sistemas que conforman WDM.....	10
<b>Figura 1.8.</b> Estructura principal de las redes PON.....	11
<b>Figura 2.1.</b> Diseño de referencia XG-PON y NG-PON2.....	16
<b>Figura 2.2.</b> Fibra monomodo ITU.TG.652 Atenuación y dispersión.....	18
<b>Figura 2.3.</b> Esquema de la topología de PON múltiples.....	21
<b>Figura 2.4.</b> Enlace óptico XG-PON.....	22
<b>Figura 2.5.</b> Bloque de transmisión óptico XG-PON.....	24
<b>Figura 2.6.</b> Bloque de la ODN – XG-PON.....	25
<b>Figura 2.7.</b> Bloque de recepción óptico XG-PON.....	26
<b>Figura 2.8.</b> Enlace óptico NG-PON2.....	27
<b>Figura 2.9.</b> Bloque de transmisión NG-PON2.....	28
<b>Figura 2.10.</b> Bloque de la ODN – NG-PON2.....	29
<b>Figura 2.11.</b> Bloque de recepción óptico NG-PON2.....	30
<b>Figura 3.1.</b> Espectro eléctrico de la señal transmitida a una velocidad de 10 [Gbps]...	32
<b>Figura 3.2.</b> Espectro óptico de la señal transmitida en relación a la frecuencia a una velocidad de 10 [Gbps].....	33
<b>Figura 3.3.</b> Espectro óptico de la señal transmitida en relación a $\lambda$ a una velocidad de 10 [Gbps].....	34
<b>Figura 3.4.</b> Espectro óptico de la señal recibida en relación a la frecuencia a una velocidad de 10 [Gbps].....	35
<b>Figura 3.5.</b> Espectro óptico de la señal recibida en relación a la $\lambda$ a una velocidad de 10 [Gbps].....	36
<b>Figura 3.6.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 1.....	37
<b>Figura 3.7.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 3.....	38
<b>Figura 3.8.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 5.....	39
<b>Figura 3.9.</b> BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 10 [Gbps].....	40
<b>Figura 3.10.</b> Espectro eléctrico del 3 canal NG-PON2 que trasmite a una velocidad de 10 [Gbps].....	42

<b>Figura 3.11.</b> Espectro óptico de la señal transmitida en relación la frecuencia a una velocidad de 40 [Gbps].....	43
<b>Figura 3.12.</b> Espectro óptico de la señal transmitida en relación a la $\lambda$ a una velocidad de 40 [Gbps] .....	44
<b>Figura 3.13.</b> Espectro óptico de la señal recibida del canal 3 en relación a la frecuencia a una velocidad de 40 [Gbps] .....	46
<b>Figura 3.14.</b> Espectro óptico de la señal recibida del canal 3 en relación a la $\lambda$ a una velocidad de 40 [Gbps].....	47
<b>Figura 3.15.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 1 .....	48
<b>Figura 3.16.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 3 .....	49
<b>Figura 3.17.</b> Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 5 .....	50
<b>Figura 3.18.</b> BER vs Potencia de Receptora a una velocidad de 40 [Gbps].....	51
<b>Figura 3.19.</b> Comparación de XG-PON con NG-PON2 .....	53
<b>Figura 4.1.</b> Mapeo de la parroquia de Rumipamba y sus alrededores.....	60
<b>Figura 4.2.</b> Esquema del despliegue de OF optimo con tecnología XG-PON, para el primer escenario .....	62
<b>Figura 4.3.</b> Esquema del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el tercer escenario. ....	64
<b>Figura 4.4.</b> Costo de instalación de la tecnología XG-PON y NG-PON2, en tres escenarios de demanda de ancho de banda en el lado de los abonados (residenciales y corporativos).....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Tasas nominales por canal que soporta XG-PON. ....	19
<b>Tabla 2.2.</b> Tasas nominales por canal que soporta NG-PON2 .....	19
<b>Tabla 2.3.</b> Parámetros de las tecnologías XG-PON y NG-PON2.....	21
<b>Tabla 2.4.</b> Landa ( $\lambda$ ) XG-PON configurada para downstream. ....	23
<b>Tabla 2.5.</b> Parámetros de la configuración del tramo de OF .....	24
<b>Tabla 2.6.</b> Escenarios con el aumento de la atenuación .....	25
<b>Tabla 2.7.</b> Longitud de onda NG-PON2 usada para downstream .....	27
<b>Tabla 2.8.</b> Parámetros de la configuración del tramo de OF .....	29
<b>Tabla 3.1.</b> Potencia óptica transmitida a una velocidad de 10 [Gbps].....	32
<b>Tabla 3.2.</b> Potencia óptica recibida una velocidad de 10 [Gbps].....	35
<b>Tabla 3.3.</b> KPI del Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] para cada caso.....	37
<b>Tabla 3.4.</b> Datos de todos los escenarios del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de 10 [Gbps].....	40
<b>Tabla 3.5.</b> Potencia óptica transmitida a una velocidad de 40 [Gbps].....	42
<b>Tabla 3.6.</b> Potencia óptica recibida a una velocidad de 40 [Gbps].....	45
<b>Tabla 3.7.</b> KPI del Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] para cada caso.....	48
<b>Tabla 3.8.</b> Datos de todos los escenarios del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de 40 [Gbps].....	51
<b>Tabla 4.1.</b> Precio de la fibra óptica de alimentación.....	57
<b>Tabla 4.2.</b> Precio de la instalación .....	57
<b>Tabla 4.3.</b> Precio de los componentes del gabinete .....	58
<b>Tabla 4.4.</b> Precio del hardware PON en el bloque de transmisión. ....	58
<b>Tabla 4.5.</b> Precio del hardware PON en el bloque de recepción .....	58
<b>Tabla 4.6.</b> Precio de los elementos de instalación para la oficina central. ....	58
<b>Tabla 4.7.</b> Casos de demanda de bit rate. ....	59
<b>Tabla 4.9.</b> Usuarios totales y PON utilizadas, de cada escenario en tecnología XG-PON .....	60
<b>Tabla 4.10.</b> Resultados de los costos de implementación para la tecnología XG-PON, de los tres escenarios de bit rate. ....	61
<b>Tabla 4.11.</b> Usuarios totales y PON utilizadas de cada escenario en tecnología NG-PON2 .....	63
<b>Tabla 4.12.</b> Resultados de los costos de implementación para la tecnología NG-PON2 de los tres escenarios de ancho de banda. ....	63

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A1.</b> BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 10 [Gbps], creada por OptSim.....	74
<b>Anexo A2.</b> BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 40 [Gbps], creada por OptSim.....	74
<b>Anexo B.</b> Codificación en Matlab para la creación de las figuras del BER vs Prx .....	75
<b>Anexo C1.</b> Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología XG-PON, para el segundo escenario.....	76
<b>Anexo C2.</b> Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología XG-PON, para el tercer escenario.....	77
<b>Anexo C3.</b> Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el primer escenario.....	77
<b>Anexo C4.</b> Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el segundo escenario.....	78

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación, se encuentra detallado el estudio de la comparación del despliegue de redes de acceso con tecnología XG-PON y NG-PON2 para la ciudad de Quito.

En el primer capítulo se realiza las especificaciones de los conceptos fundamentales del método de comunicación óptica para redes PON, una breve revisión de la multiplexación en sistemas de comunicación óptica. Además, se describe la infraestructura de redes PON.

En el segundo capítulo se presenta de manera breve las dos fases creadas por NG-PON, especificando los parámetros generales para ambas tecnologías XG-PON y NG-PON2, junto a la implementación de cada escenario de simulación de dichas redes de acceso mencionadas anteriormente, mediante el software OptSim.

En el tercer capítulo se identifica los mejores escenarios de desempeño de la red XG-PON y NG-PON2, a través de los datos obtenidos en la simulación y su respectiva comparación de ambas tecnologías de acceso. Mostrando los indicadores claves de desempeño (KPI) como el Bit Error Rate (BER), Jitter y el coeficiente de calidad Q de la transmisión.

En el cuarto capítulo se detalla el funcionamiento del algoritmo Optimal Topology Search (OTS), que a través de datos obtenidos por el programa OSM, para así buscar las soluciones óptimas del despliegue de las tecnologías XG-PON y NG-PON2 en la parroquia Rumipamba y sus alrededores, comparando cada escenario de demanda de ancho de banda para las dos tecnologías. Se especifican los costos de referencia ocupados por OTS. Por último, se exponen las más relevantes conclusiones y recomendaciones analizadas en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

**PALABRAS CLAVE:** KPI, NG-PON2, OptSim, OTS, PON, XG-PON

## ABSTRACT

In this degree work, the study is detailed of the comparison of the use of access networks with XG-PON and NG-PON2 technology for the city of Quito.

In the first chapter, the specifications are made of the fundamental concepts of the optical communication method for PON networks, a brief review of multiplexing in optical communication systems. Also, It will be described the structure of a PON network.

In the second chapter, It is briefly presented the two phases created by NG-PON, specifying the general parameters for both XG-PON and NG-PON2 technologies, together with the implementation of each simulation scenario of access networks mentioned above, using the OptSim software.

In the third chapter, the best performance scenarios are identified of the XG-POM and NG-PON2 network, through the data obtained in the simulation and their respective comparison of both access technologies. Showing key performance indicators (KPIs) such as Bit Error Rate (BER), Jitter and the transmission quality factor Q.

The fourth chapter details the operation of the Optimal Topology Search (OTS) algorithm, which through data obtained by the OSM program, to find the optimal solutions for the deployment of XG-PON and NGPON2 technologies in the Rumipamba parish and its surroundings, comparing each bandwidth demand scenario for the two technologies. The reference costs are specified that were used by OTS. Finally, the respective conclusions and recommendations are presented that leave the development of this degree work.

**KEYWORDS:** KPI, NG-PON2, OptSim, OTS, PON, XG-PON

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las necesidades de comunicación de todas las personas a nivel mundial han ido creciendo exponencialmente. Esta evolución viene de la mano del avance de la tecnología, apareciendo retos primordiales para el área de las telecomunicaciones, en especial a las instituciones encargadas del desarrollo y estandarización de los nuevos parámetros para implementar nuevas tecnologías por medio de fibra óptica, enfocado en el aumento de las peticiones por parte de los abonados finales, y en el aumento de la demanda de la tasa de bits, que hoy en día requieren las áreas de telecomunicaciones (Torres & Patricio, 2020).

La demanda de los servicios de telecomunicaciones como altas tasas de velocidad en internet, protocolo de internet para voz (Voice Over Internet Protocol, VoIP) y protocolo de internet para televisión (Internet Protocol TV, IPTV), los cuales sobresalen por su rápida y obligatoria evolución se están encontrando en grandes desafíos. A futuro, se comprometerá el límite de la capacidad de las redes PON tradicionales, como las redes con fibra óptica al hogar (Fiber To The Home, FTTH) y gigabit de fibra óptica pasiva (Gigabit Passive Optical Network, GPON). En la búsqueda de soluciones atractivas a tal problemática, la más llamativa es, la red óptica pasiva de siguiente generación (Next-Generation Passive Optical Network 2, NG-PON2), para poder abastecer la demanda de altas tasas de bits que requieren este tipo de servicios (Paucar, 2021).



# CAPÍTULO 1

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. Planteamiento del problema

En Ecuador es ampliamente implementada la tecnología PON, siendo GPON la tecnología con mayor impacto en el país como en el mundo. GPON utiliza la técnica de acceso al medio de un multiplexado dividido por el tiempo (Time Division Multiplexing, TDM) y se caracteriza por la baja complejidad de su infraestructura del bloque de distribución óptica de red (Optical Distribution Network, ODN). Varios años atrás se investigaban varias propuestas sobre PON de nueva generación. Desde el 2009 la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, ITU) a partir del trabajo de la Red de Acceso de Servicio Completo (Full Service Access Network, FSAN) presento nuevos avances a GPON, empezando con red óptica pasiva para 10 Gigabit (10 Gigabit Mode Passive Optical Network, XG-PON), que abastece un ancho de banda hasta 10 [Gbps] bidireccional y cuyo ODN es compatible con GPON. El estándar NG-PON2 fue presentado en el 2015 teniendo la misma compatibilidad con GPON (María, Yacelga-Pinto, & Arévalo, 2018).

Por esta razón, el presente proyecto de titulación se enfoca en el estudio del diseño de tecnologías de acceso XG-PON y NG-PON2, en un sector donde existen entidades públicas y privadas de la ciudad de Quito; por lo que, se hace necesario estudios tanto en el diseño con sus respectivos parámetros generales, como en los costos para que sea viable la implementación de estas tecnologías de gran capacidad y de manera escalable poder cumplir con las demandas de los usuarios finales y las exigencias de las distintas actividades de telecomunicaciones (Paucar, 2021).

## 1.2. Justificación

Tanto las redes XG-PON como las redes NG-PON2 constituye un hito en la evolución de las redes para el acceso óptico. Actualmente la que más destaca es NG-PON2 por sus requisitos de su capa física, como 40 [Gbps] de capacidad upstream / downstream, usando la tecnología híbrida de Multiplexado por División de Longitud de Onda – Multiplexado por División de Tiempo (Wavelength Division Multiplexing - Time Division Multiplexing, WDM-TDM) con confiabilidad y eficiencia en bit rate y consumo de energía. El estándar NG-PON2 también exige una ODN compatible con el estándares ITU-T PON anteriores (María, Yacelga-Pinto, & Arévalo, 2018).

El instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), enfatizo que las redes PON del tipo FTTH está constantemente en aumento para un envío de información que abastezca la demanda. Con NG-PON2, se tiene una multiplexación mínima de cuatro landas ( $\lambda$ ), sin perjudicar el sistema de comunicación óptica, teniendo un enlace con altas tasas de reconfiguración en el área de gestión del tráfico y la obtención del algoritmo ideal para DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) con una asignación dinámica de capacidad de trasmisión de acuerdo a los requerimientos de cada respectiva ONT u ONU, sin perjudicar el rendimiento de transmisión de los datos en el sistema óptico (Nesset, 2015). Se debe tener en cuenta que, a pesar de que esta tecnología es una realidad conservando un aplico entorno de análisis con respecto al desempeño de esta red para lograr abastecer la demanda de bit rate, no es tan conocida en nuestro entorno, por sus altos costos de implementación.

La importancia de este proyecto radica en el análisis de su funcionamiento y sus correspondientes precios de instalación para el despliegue de redes de acceso XG-PON y NG-PON2. El diseño y análisis del desempeño de la red se realizará en el software OptSim, y mediante el algoritmo de búsqueda óptima de topologías de red OTS

(desarrollado por G. Arévalo - 2014) se podrá conocer con más exactitud la optimización de los costos del despliegue de XG-PON en comparación de NG-PON2.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Estudiar el despliegue de una red de acceso con tecnología NG-PON2 en la ciudad de Quito.

#### **1.3.2. Objetivo específicos**

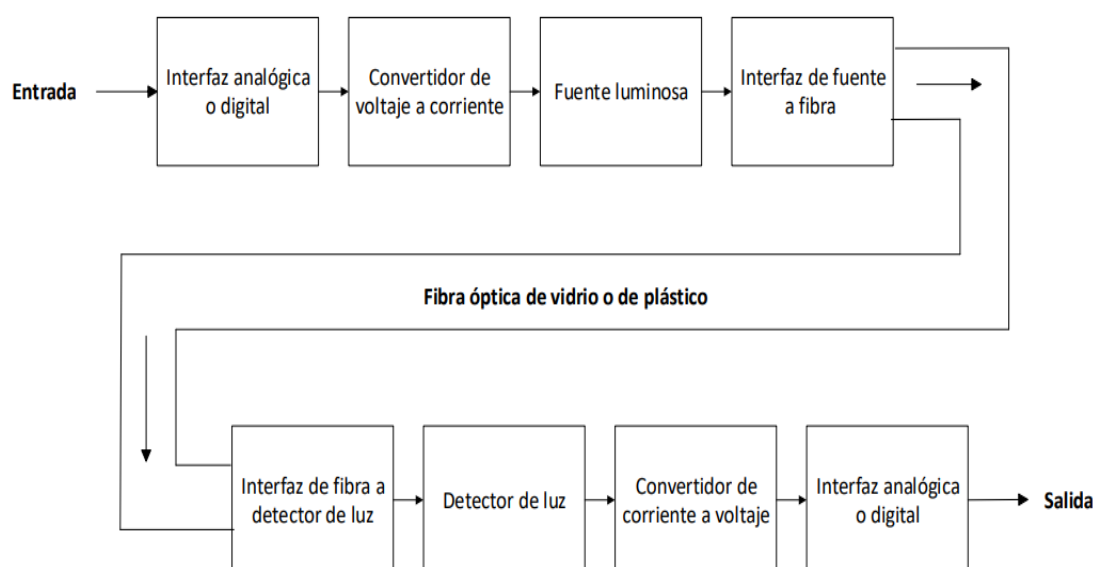
- Estudiar los conceptos fundamentales de redes PON y los componentes que intervienen en redes de acceso óptico.
- Implementar un escenario de simulación de una red NG-PON2 mediante el software OptSim.
- Identificar los mejores escenarios de desempeño de la red a través del análisis de indicadores clave de desempeño (KPI) como el BER y el factor de calidad de la transmisión, Q.
- Examinar los costos de implementación para la red NG-PON2, aplicando el algoritmo OTS.

### **1.4. Marco Teórico**

#### **1.4.1. Método de comunicación óptica**

En la Figura 1.1 se visualiza el esquema de bloques para general una correcta comunicación óptica, este esquema se simplifica para un correcto entendimiento en tres bloques fundamentales, los cuales son: el transmisor, la línea de envío y el receptor.

**Figura 1.1.** Sistema de comunicación óptico.



**Fuente:** (Tomasi, 2003)

## 1.4.2. Transmisor Óptico

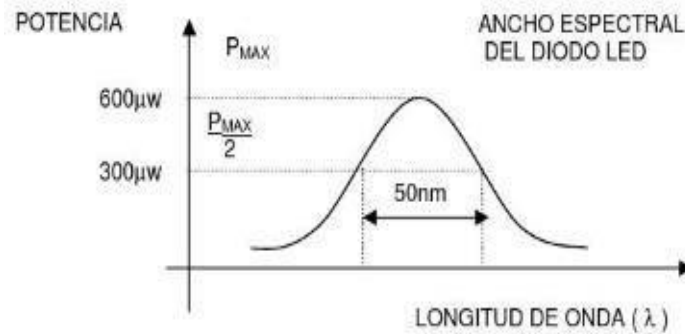
La transmisión óptica está construida principalmente por un origen de luz, el trabajo primordial de dicha luz es convertir bits de información eléctricas en bits ópticos. La abundancia de luz radiada por estos generadores de luz depende únicamente de la intensidad de excitación que se le añade. Existen dos tipos de fuentes las cuales se detallan a continuación:

### 1.4.2.1. Diodo LED

El diodo semiconductor LED (Light Emitting Diode) es dotado de dos terminales, P-N respectivamente. Su función a través de una propagación espontanea es emitir luz cuando el diodo es directamente polarizado; en otros términos, la luz expulsada tiende a recombinarse entre los electrones expulsados con huecos libres en el área de excitación. Las fibras multimodo de distancias cortas son las favoritas para el LED, debido que su espectro de ancho de banda es aplico, oscilando entre 30 [nm] y 150 [nm], como se muestra en la Figura 1.2. Añadiendo que estos generadores presentan extensos tiempos de respuesta con una potencia baja, generando una menor tasa de transmisión. Los

aspectos que realzan al LED es su bajo costo de implantación, con mayor tiempo de vida útil (Geronimo, 2014).

**Figura 1.2.** Espectro del diodo LED.

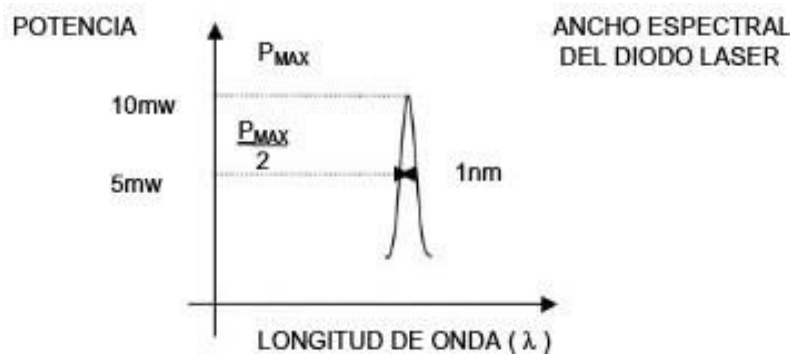


**Fuente:** (Geronimo, 2014)

#### 1.4.2.2. Diodo ILD

El diodo semiconductor ILD (Injection Laser Diode, ILD) funciona a través de la propagación estimulada es la generación de luz bajo la excitación con corrientes mayores al LED, teniendo un ancho del espectro fino, es decir que la luz originada no posee de una dispersión extensa, como se muestra en la Figura 1.3. Si se necesita transmitir por fibra óptica monomodo en distancias largas lo recomendable es usar este tipo de diodos. El resultado de un LASER funcional carece en mayores tasas de bits enviados, con un tiempo de respuesta menor para potencias mayores, Su implementación tiene un costo por encima del LED (Geronimo, 2014).

**Figura 1.3.** Espectro del diodo LÁSER.



**Fuente:** (Geronimo, 2014)

### **1.4.3. Línea de Transmisión Óptico**

En la mayoría de los escenarios para poner en marcha cualquier sistema de comunicación óptica es recomendable que en la línea de transmisión empleada sea una fibra óptica de vidrio. Los materiales con que son fabricadas las fibras ópticas son componentes por excelencia, dado que no están en dominio eléctrico no constan de interferencias electromagnéticas, enviando grandes tramas de información a velocidades elevadas por distancias largas considerables, sin optar por la implementación de aumentadores de potencia o repetidores para recuperar las pérdidas de la señal. Este medio se aprecia frecuentemente en redes de área amplia (Wide Area Network, WAN), enlaces que cruzan grandes distancias de recorrido (países, continentes, mares), implementación de redes para área local (Local Area Network, LAN) y principalmente y más importante las redes PON (Instituto Tecnológico de Agascalientes, 2014).

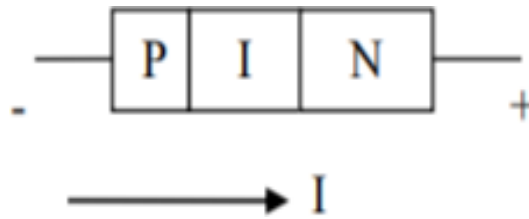
### **1.4.4. Receptor Óptico**

El receptor óptico está construido principalmente por un fotodetector de luz, la función principal de los fotodetectores ópticos es convertir los bits ópticos en eléctricos, existen principalmente dos clases de fotodetectores, entre los principales están:

#### **1.4.4.1. Fotodiodo PIN**

El diodo PIN es básicamente el fotodiodo más ocupado en cualquier enlace óptico de comunicación. Este fotodetector consta de dos capas externas semiconductoras extremadamente dopadas del tipo P y N, y una capa intermedia semiconductoras del tipo I. Como se muestra en la Figura 1.4.

**Figura 1.4.** Fotodiodo PIN.



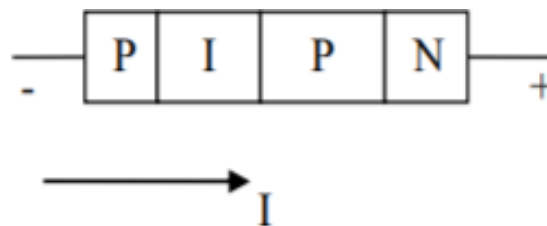
**Fuente:** (Cabezas & García, 2014)

Para permitir el movimiento de corriente a partir de los diodos, es necesario la excitación adecuada de los materiales dopados para transmitir una buena cantidad de energía y así los electrones del material saltan de la banda de valencia directa a la de conducción. Dicho fotodetector se caracteriza por trabajar en polarización inversa con baja potencia, el diodo PIN posee un tiempo de vida útil bastante amplio, con la excepción que requiere de una amplificación considerable (Cabezas & García, 2014).

#### **1.4.4.2. Fotodiodo APD**

El diodo APD es un fotodetector de luz tipo P-I-P-N, fabricado principalmente con materiales semiconductores, como se muestra en la Figura 1.5.

**Figura 1.5.** Fotodiodo ADP.



**Fuente:** (Cabezas & García, 2014)

Al ingresar la luz al fotodetector, estimula a que los electrones brinquen a la banda de conducción. Lo que provoca un efecto avalancha de corriente fotoeléctrica, o también conocida como ionización por impacto generada por la emisión de la polarización inversa al incremento abundante de la intensidad en el dominio eléctrico, y a su vez varios electrones pueden lograr velocidades extremas con el fin de estrellarse con otro electrón

para ionizarlo, de esta forma conlleva un ciclo donde a su vez vuelven a colisionar e ionizar otros electrones generando una cadena de ionización. Las características a favor del fotodiodo APD es la alta sensibilidad y la poca necesidad de altas tasas de amplificación, en cambio sus características negativas es la generación de ruido causa al gran impacto de los electrones por una intensidad mayor de excitación y tiempos altos de transformación (Cabezas & García, 2014).

#### **1.4.5. Multiplexación en enlaces de comunicaciones ópticas**

La multiplexación es un método que permite enviar varias tramas o señales múltiples por un mismo vía transmisora. En el dominio óptico se considera a dos técnicas de multiplexación como optimas, como es la multiplexación óptico a través de la división del tiempo (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) y multiplexación a partir de la división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Dichas multiplexaciones son capaces de abarcar mayores tasas de bit rate que trabaja la fibra óptica en el rango de los [THz] requeridos en los procesos de comunicación óptica (Paucar, 2021).

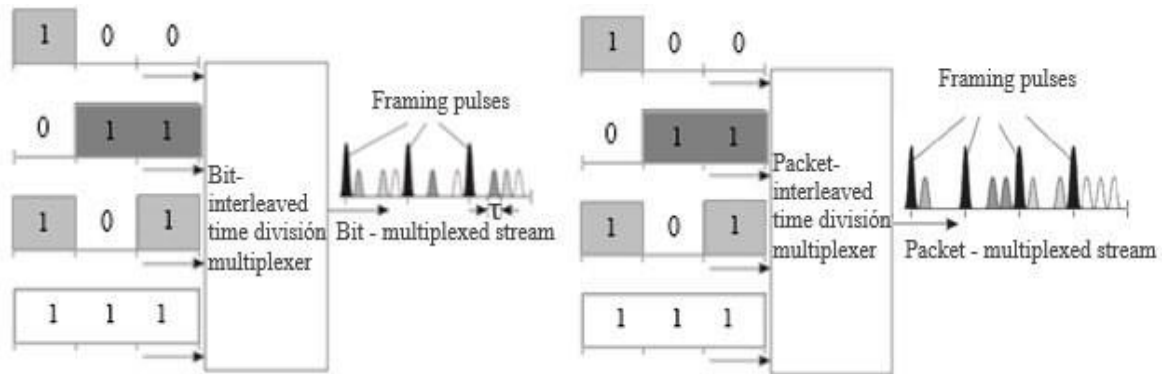
##### **1.4.5.1. Multiplexación al dividir el tiempo**

En el dominio eléctrico se conoce como multiplexación dividiendo el tiempo (TDM), mientras que en el dominio óptico se denomina multiplexor óptico a través de la división de tiempo (OTDM). La funcionabilidad de OTDM es muy parecida a la multiplexación en el dominio eléctrico, lo que les diferencia es que OTDM alcanza velocidades que sobrepasan los [Tbts] con un multiplexado con varias señales ópticas, lo que TDM le resulta imposible. Las señales luminosas arrojadas por distintas fuentes para que viajen por una sola línea de transmisión que se intercalan en el tiempo, teniendo una superposición de los bits o paquetes, usando marcadores de inicio y fin para identificar la



separación de cada agrupación de bits o paquetes, como se visualiza en la Figura 1.6. Además, dichos pulsos son los encargados de poder decodificar la señal en la recepción.

**Figura 1.6.** Método de intercalado OTDM.



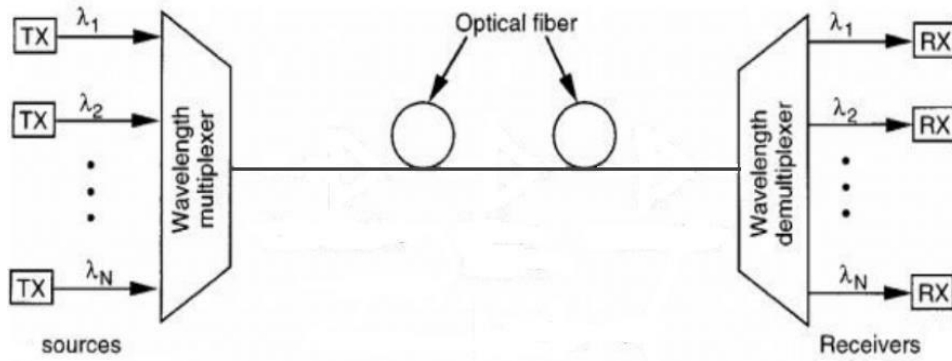
**Fuente:** (Raj, 2015)

La codificación que admite OTDM son códigos del tipo retorno a cero (Return to Zero, RZ), de esta manera los pulsos resultantes presentaran 1 lógico y 0 lógico para evitar dificultades en la recuperación del clock en el receptor. También se destaca que para lograr velocidades que sobrepasen los [Gbps], se necesita fuentes que emitan pulsos en el rango de los picosegundos [ps] (Paucar, 2021).

#### 1.4.5.2. Multiplexación al dividir las longitudes de onda

La multiplexación partiendo de la división de longitud de onda (WDM) permite aprovechar de mejor manera el gran bit rate que posee la fibra óptica, ya que la capacidad se compromete dependiendo por el número de canales que deben ser multiplexados. La función principal de WDM es enviar simultáneamente por una sola línea de transmisión múltiples señales ópticas asignadas distintas longitudes de onda ( $\lambda$ ). En la Figura 1.7, se observa que en transmisión cada señal o canal se unen en el multiplexor para así ingresar a la fibra óptica por solo una vía, al llegar al demultiplexor las señales son separadas para dirigirse a los receptores sintonizables asignados.

**Figura 1.7.** Sistemas que conforman WDM.



**Fuente:** (Raj, 2015)

#### **1.4.6. Redes PON**

Las redes ópticas pasivas (Passive Optical Network, PON) se caracterizan por ser redes de acceso que utilizan la fibra óptica como línea de transmisión uniendo las oficinas centrales a dispositivos intermedios pasivos (divisores ópticos o splitters), de esta manera el servicio puede llegar a múltiples abonados. Ocupa una topología punto a multipunto, por lo que su infraestructura empieza en el terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT) perteneciente al lado del proveedor, donde la señal pasa por los divisores de potencia para ser ramificada y pueda llegar hasta la unidad de red óptica (Optical Network Unit, ONU) o terminal de red óptica (Optical Network Terminal, ONT) perteneciente al cliente final, recibiendo la misma señal de la OLT (Abreu, 2016).

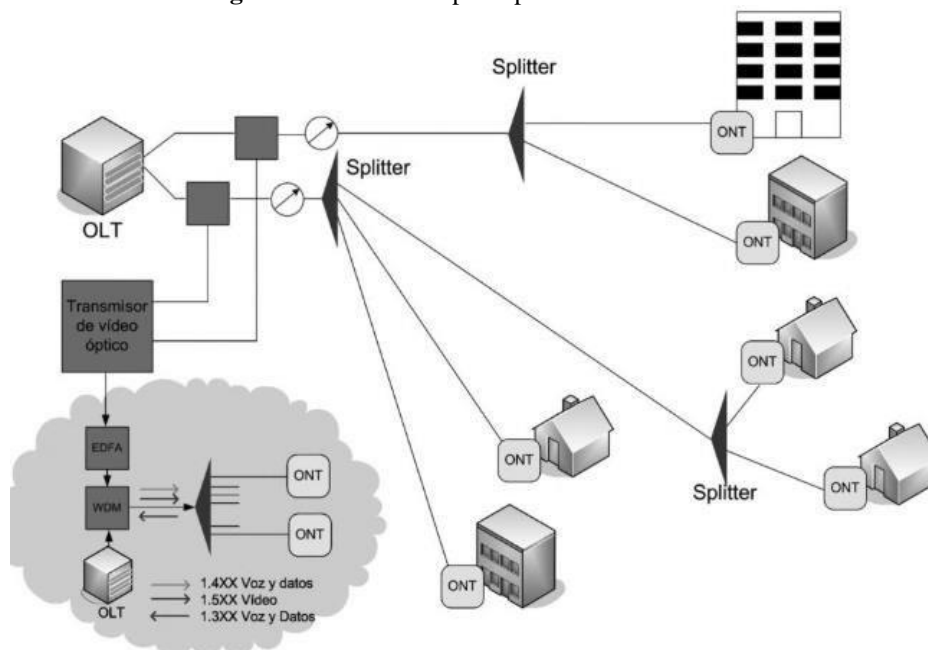
##### **1.4.6.1. Estructura de una red PON**

Las redes PON son diseños basadas en una topología punto-multipunto, como se visualiza en la Figura 1.8, y consta de los siguientes bloques:

- OLT: Se localiza en la oficina central del distribuidor de servicios siendo la parte activa de la red. Este equipo maneja la información tanto de entrada y salida controlando el tráfico y evitando colisiones de todos los servicios solicitados por el abonado final. Por esa razón, funciona en sentido downstream y upstream (Brasero Herranz, 2017).

- ODN: Se encargada de trasladar los paquetes o bits ópticos desde la OLT a la ONT u ONU tanto de subida y bajada, siendo todo el camino que cruza la fibra óptica desde el transmisor al receptor. La ODN conforma los elementos pasivos de la red donde se encuentran diferentes elementos como son: la fibra óptica de alimentación (Feeder), splitters, fibra óptica de distribución y de interiores y los elementos de acoplamiento (Brasero Herranz, 2017).
- ONT u ONU: Se ubica en la infraestructura del cliente final; ONU si el servicio es para cliente corporativo y ONT si el cliente es residencial. Siendo el punto de acceso a la red, por el cual el transmisor, en este caso las oficinas centrales del proveedor brindaran servicio. El equipo está encargado de convertir los bits o paquetes ópticos en eléctricos para downstream y bits o paquetes eléctricos a ópticos para upstream. (Brasero Herranz, 2017).

**Figura 1.8.** Estructura principal de las redes PON.



**Fuente:** (ESCALONA, 2008)

## **1.5. Marco metodológico**

En este proyecto técnico se proporcionará un eficaz resultado a la problemática de abastecimiento de altas tasas de bits provocada por los servicios telecomunicaciones actuales para adquirir una mejora en las redes de acceso tradicionales haciéndolas escalables y rápidas.

Esto se dará paso con un análisis y recopilación de datos de la tecnología XG-PON junto a la tecnología NG-PON2. Adicional a esto, se introduce una breve y concisa descripción de los aspectos teóricos de un sistema de comunicación óptico tanto de la transmisión, línea de transmisión y recepción, se define la multiplexación del sistema de comunicación óptica adecuada para red PON. Por último, se añade una red PON acompañada de la descripción de su respectiva estructura.

Se realizará el diseño de redes de acceso con tecnologías XG-PON y NG-PON2 en un ambiente de pruebas con el software OptSim, incluyendo los parámetros fundamentales para ambas tecnologías. Se especifica cada componente activo o pasivo implementa en el software, desglosado como: bloque de transmisión, bloque de la línea de transmisión y bloque de recepción.

Se observará los resultados obtenidos en el despliegue de la red de acceso con tecnologías XG-PON y NG-PON2 en los escenarios de pruebas. Dichos datos se obtendrán de la simulación a través del software OptSim en el periodo de desarrollo del mismo, que permita verificar los respectivos parámetros para su óptimo desempeño, especificando los indicadores clave de desempeño como: BER, Jitter, Factor Q, entre otros.

Se examinarán los costos de implementación del sistema de comunicación de acceso óptico para ambas tecnologías presentadas, mediante la simulación del algoritmo OTS (Optimal Topology Search), en sus diferentes componentes como: la instalación del

hardware PON, montaje del zanjado o Trenching y la implementación de todos los componentes de la ODN, consiguiendo un presupuesto referencial de los componentes del área pasiva y activa de las redes XG-PON y NG-PON2 diseñadas.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. DISEÑO**

#### **2.1. Introducción**

En este capítulo se detalla la teoría principal de la tecnología NG-PON, junto al diseño y los valores establecidos por su recomendación para todos los parámetros principales que maneja las redes de acceso XG-PON y NG-PON2, empleando en el software OptSim. Se crea una topología para el estándar XG-PON y otra para NG-PON2 para la demanda de bit rate de bajada, en cada una se especifica la creación del bloque de transmisión, bloque de la línea de transmisión y bloque de recepción, con sus respectivos ajustes para dicho software.

#### **2.2. NG-PON**

La FSAN con ayuda de su prestigiado comité de trabajo llamado NG-PON o redes ópticas pasivas de siguiente generación (Next Generation Passive Optical Network), crearon el proyecto dividido en dos recomendaciones. La primera fase es XG-PON y la segunda fase NG-PON2, estos dos estándares son el objeto de estudio para el presente trabajo de titulación.

Dicho grupo se dedica a profundizar las investigaciones y poder desarrollar nuevos estándares para mejorar todas las cualidades de las redes de acceso a partir de la fibra óptica, sacándole provecho a la reutilización del despliegue de fibra óptica ya implementadas anteriormente en los estándares ya creados, para que el costo de implementación no tenga un incremento brusco, es decir que su prioridad para los nuevos estándares es la coexistencia y migración entre las distintas tecnologías de redes de acceso XPON y NG-PON (Paucar, 2021).

### **2.2.1. Tecnología XG-PON**

La primera propuesta considerada por el grupo de trabajo NG-PON son las redes de acceso pasivas para las nuevas generaciones XG-PON (10 Gigabit Passive Optical Network), la cual se estandarizó en las recomendaciones ITU-T G.987. Sus tecnologías predecesoras descritas en ITU-T G.983.x (BPON y APON) e ITU-T G.984.x (GPON) tienen las mismas características para XG-PON por lo que se busca la compatibilidad en la ODN (redes de distribución óptica). El elemento de coexistencia llamado WDM1r es una característica principal de dicha tecnológica, ya que admite la compatibilidad de la tecnología GPON con XG-PON en el mismo escenario, uniendo las asignadas landas ( $\lambda$ ) para cada modelo (Paucar, 2021).

### **2.2.2. Tecnología NG-PON2**

La segunda propuesta planteada por el grupo de trabajo NG-PON son las redes ópticas pasivas de nueva o siguiente generación versión 2 (Next Generation Passive Optical Network 2, NG-PON2), siendo estandarizada en la recomendación ITU-T G.989. Este estándar conserva funcionalidades analógicas de tecnologías anteriores propuestas con el fin de emparejar toda su red de distribución óptica (ODN) con el propósito de minimizar el costo de su implementación (Nesset, 2015).

Las tecnologías descritas anteriormente fueron creadas para dar tanto servicios a abonados residenciales, como a cubrir todos los servicios corporativos, por su alta demanda solicitan mayor ancho de banda, que se logra cubrir sin problema. A parte NG-PON2 se caracteriza por al menos constar de cuatro longitudes de onda por dirección y XG-PON por tener una landa ( $\lambda$ ). Se ocupa el mismo protocolo tanto para XG-PON como para NG-PON2. La red de acceso XG-PON ocupa una multiplexación para enlaces downstream del tipo OTDM y NG-PON2 emplea una tecnología PON híbrida

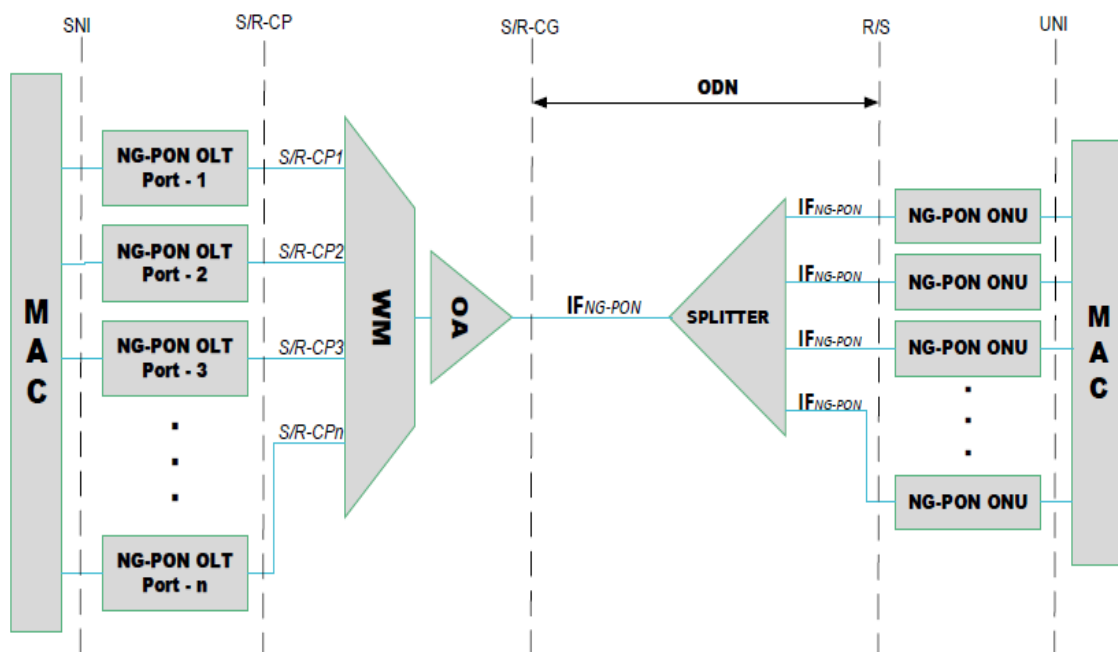
denominada TWDM PON (la unido de la multiplexación TDM sobre WDM) (Arévalo G., 2022).

### 2.3. Diseño de la red XG-PON y NG-PON2 de referencia

GPON y XG-PON al igual que NG-PON2 trabajan con una arquitectura punto-multipunto, en XG-PON funciona con un diseño que soporte OTDM para una longitud de onda y en NG-PON2 funciona con un diseño que soporte TWDM PON con 4 u 8 bandas ( $\lambda$ ) con un crecimiento a partir de la demanda del usuario final; lo que significa que cada canal es activado con la tasa de bit rate de envío dependiente lo solicite en los usuarios finales. Esta investigación está enfocada en el ancho de banda demandado downstream en el lado del usuario, dado que esta demanda es mucho mayor que el upstream.

El diseño de referencia de redes XG-PON – NG-PON2 por medio de múltiples divisiones en el tiempo y longitudes de onda respectivamente, se muestra en la Figura 2.1.

**Figura 2.1.** Diseño de referencia XG-PON y NG-PON2.



Elaborado por: Mateo Brito



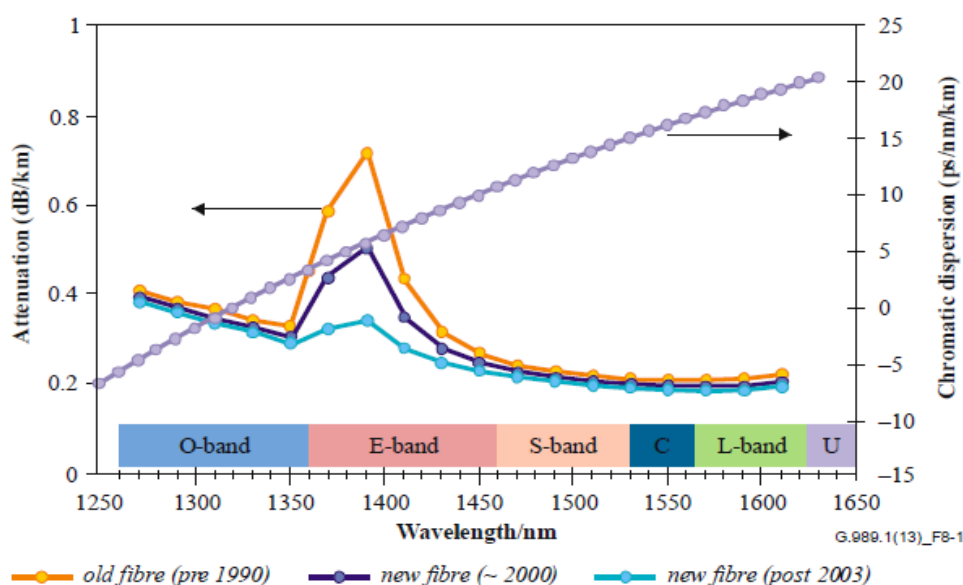
En la Figura se describe: empezado por la MAC de transmisión, encargada del envío de paquetes de información que necesita ser transmitida a cualquier usuario asignado, para eso pasa por la OLT, la cual está compuesta de varios puertos (Port) que se conectan al multiplexor de tiempo o landa ( $\lambda$ ) respectivamente (Wavelength Multiplexer, WM) mediante líneas de transmisión denominados par de canales (Channel Pair, S/R-CP), del multiplexor se conecta a un amplificador óptico (Optical Amplifier, OA), va actuar como un pre-amplificador. A la salida del amplificador se detalla un el marcador S/R-CG (Channel Group) el que se encarga de la multiplexar o demultiplexar el conjunto de landas ( $\lambda$ ) ya sea para el enlace ascendente como descendente. De modo que, el área entre los marcadores S/R-CG (salida del OA) y R/S (entrada de la ONT u ONU) corresponde a la ODN siendo la parte pasiva de la red. La OLT y ONT u ONU se conforman de los marcadores asignados S/R y R/S pertenecen a los ruidos o interfaces que se forman en el transmisor y receptor del sistema. En el caso de las redes NG-PON2 las ONT u ONU configuradas en el sistema detallado anteriormente son del tipo sintonizables ya que funcionan con múltiples longitudes de onda.

## **2.4. Exigencias principales en la capa física**

### **2.4.1. Propiedades de la fibra óptica**

La fibra monomodo ITU-T G.652 es recomendada para la mayoría de las redes de acceso NG-PON, ya que esta fibra óptica está sujeta a la landa ( $\lambda$ ) con la que opera. En la Figura 2.2 se visualiza el espectro óptico de la fibra óptica monomodo vs la atenuación, donde se resalta que para sistemas XG-PON y NG-PON2 las bandas de interés son la C y L ya que presentan atenuaciones bajas.

**Figura 2.2.** Fibra monomodo ITU.TG.652 Atenuación y dispersión.



**Fuente:** (International Telecommunication Union, 2013)

#### 2.4.2. Magnitud de la fibra óptica

La distancia de cobertura mínima para la arquitectura de los sistemas XG-PON es de 20 Km sin expansión de alcance y 40 Km con expansión de alcance, en cambio en NG-PON2 es de 40 Km sin expansión de alcance y con expansión de alcance su distancia máxima es de 60 Km.

#### 2.4.3. Capacidad

Las redes XG-PON en la fibra de alimentación (Feeder) toleran velocidades máximas en enlaces downstream y upstream de 10 [Gbps], y velocidades mínimas en enlaces downstream (bajada) de 10 [Gbps] y en enlaces upstream (subida) de 2,5 [Gbps], tanto para el pico máximo y mínimo en las velocidades de transmisión es indispensable ocupar un multiplexor del tipo OTDM. En los sistemas NG-PON2 la red feeder (fibra de alimentación) tolera una velocidad mínima añadida de 10 [Gbps] en el enlace ascendente y 40 [Gbps] en el enlace descendente con una arquitectura TWDM de 4 landas ( $\lambda$ ); además, es capaz de alcanzar velocidades máximas ya sea de subida y bajada de 80 [Gbps] con un diseño empleando una multiplexación del tipo TWDM de 8 landas ( $\lambda$ ). Se toma

en cuenta que, teóricamente cada ONT u ONU tiene la facultad de aguantar bit rate máximo de 10 [Gbps], realmente la capacidad va de la mano con una máxima repartición de splitters y que servicio se requiere.

En la Tabla 2.1 se describe las posibles combinaciones de las tasas nominales de subida y bajada por canal que puede soportar sistemas XG-PON.

**Tabla 2.1.** Tasas nominales por canal que soporta XG-PON.

	<i>Upstream</i> [Gbps]	<i>Downstream</i> [Gbps]
<i>Tasa nominal 1</i>	2,5	10
<i>Tasa nominal 2</i>	10	10

**Elaborado por:** Mateo Brito, basado en (International Telecommunication Union, 2016)

En la Tabla 2.2 se describe las posibles combinaciones de las tasas nominales de subida y bajada por canal que puede soportar sistemas NG-PON2.

**Tabla 2.2.** Tasas nominales por canal que soporta NG-PON2.

	<i>Upstream</i> [Gbps]	<i>Downstream</i> [Gbps]
<i>Tasa nominal 1</i>	10	40
<i>Tasa nominal 2</i>	2,5	10
<i>Tasa nominal 3</i>	2,5	2,5

**Elaborado por:** Mateo Brito, basado en (International Telecommunication Union, 2013).

## 2.5. Escenario de simulación

### 2.5.1. OPTSIM

OPTSIM (OPTical properties SIMulation), es un programa basado en una herramienta de software para la arquitectura y la simulación de procedimientos de comunicaciones ópticas a nivel de transferencia de señales. Incluye métodos de simulación de última generación, una interfaz gráfica entendible para los usuarios y herramientas de medición semejantes a los de un laboratorio (Synopsys Photonic Solutions, 2021).

### **2.5.2. Topología lógica de PON múltiples**

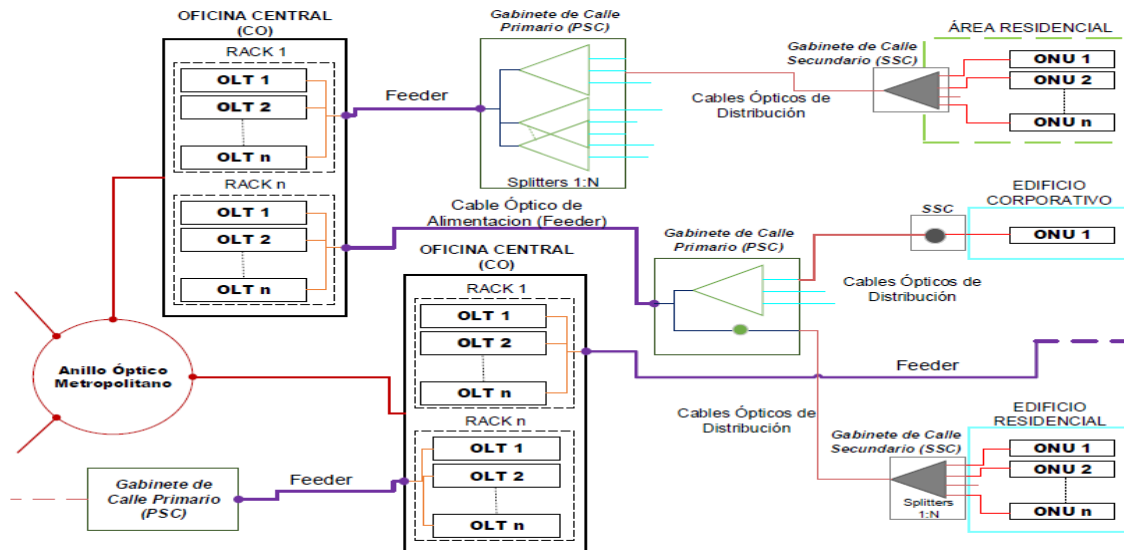
La topología empleada se centra en el tipo árbol de PON, basada principalmente en trabajar con divisores de potencia ópticos (splitters) del tipo 1: N (una entrada, N salidas) empleados en cascada, está diseñado con dos niveles de splitting siendo lo más óptimo. La topología de la red PON parte de varios transceptores ópticos designados OLT (Terminal de Línea Óptica), encontrándose dentro de la oficina central (Central Office, CO). La ODN contiene una sola fibra óptica (Optical Fiber, OF) que sale de la OLT hacia el splitter remoto denominado fibra de alimentación (feeder), recorriendo varios kilómetros de distancia hasta llegar a dicho splitter, ubicado dentro un gabinete con acceso al público, denominado gabinete de calle primario (Primary Street Cabinet, PSC), dicho splitter se encarga de enrutar la ODN hacia las ONT u ONU. Desde aquí se ocupa una fibra óptica de distribución de inferior longitud o última milla para llegar generalmente a un segundo splitter del tipo 1:N, ubicándose en el designado gabinete de calle secundario (Secondary Street Cabinet, SSC) (Arévalo & Gaudino, 2019), dividiendo los hilos de fibra óptica a cada una de las ONT u ONU colocado en lo más cerca de los usuario residenciales y corporativos (casa, edificio, acceso a condominios o campus), como se muestra en la Figura 2.3.

El contexto en el que se plantea el desarrollo del presente estudio abarca una región urbana de Quito, dado que consta con un amplio número de habitantes, ente los cuales se asegura una inmensa densidad de usuarios ya sea residenciales y corporativo (cientos de miles) que solicitan prestación de servicios con diferente bit rate para el acceso a Internet mediante conexiones FTTH.

En la Figura 1.9 se visualiza que una sola CO no puede soportar una gran cantidad de usuarios, por lo que es necesaria la presencia de diversas CO en la zona, cada CO implementada debe cubrir una subzona abasteciendo máximo 20000 abonados

aproximadamente mediante cientos de OLT. Para que la red sea compatible cada CO están interconectadas mediante un anillo óptico metropolitano (Arévalo & Gaudino, 2019).

**Figura 2.3.** Esquema de la topología de PON múltiples.



Elaborado por: Mateo Brito

## 2.6. Parámetros de la simulación

Las referencias generales de las tecnologías XG-PON y NG-PON2 que se examinan en este estudio se detallan en la Tabla 2.3, orientada en la demanda de ancho de banda de bajada (Downstream), por medio de los abonados, ya que el tráfico downstream es más elevado que el ancho de banda de subida (Upstream) por parte de los usuarios.

**Tabla 2.3.** Parámetros de las tecnologías XG-PON y NG-PON2

Parámetros	Tecnología XG-PON	Tecnología NG-PON2
Abonados por cada OLT	64	64
Longitud de enlace máximo [Km]	20	20
Atenuación de ODN máximo [dB]	35	35
Bit rate Downstream por OLT [Gbps]	10	40
Numero de longitudes de onda ( $\lambda$ )	1	4
Acceso	OTDM	TWDM-PON

Elaborado por: Mateo Brito, basado en (International Telecommunication Union, 2013), (International Telecommunication Union, 2016)

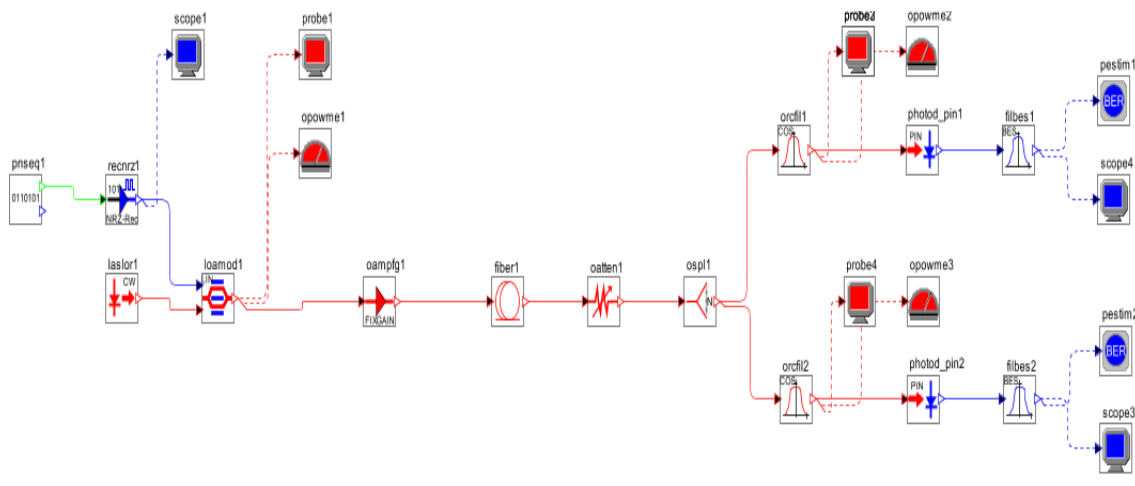
## 2.7. Escenario de la simulación

Al definir todos los parámetros de los enlaces XG-PON y NG-PON2 que se emplea en el software de simulación OptSim para sistemas de comunicaciones ópticas. Se crea dos escenarios para poder realizar las comparaciones de rendimiento con NG-PON2, como primer escenario se simula un enlace óptico downstream que trabaje a 10 [Gbps] correspondiente a la tecnología XG-PON, y como segundo escenario se simula un enlace óptico downstream que trabaje a 40 [Gbps] correspondiente a la tecnología NG-PON2 diseñada con 4 longitudes de onda que trabajan a 10 [Gbps] cada landa ( $\lambda$ ).

### 2.7.1. Simulación de la red XG-PON

En el primer escenario se define que en el dominio del tiempo los límites mínimo y máximo de las longitudes de onda en la simulación son 1575 [nm] y 1580 [nm] respectivamente. En la Figura 2.4 se observa el enlace óptico XG-PON completo que está trabajando a 10 [Gbps] en el software OptSim.

Figura 2.4. Enlace óptico XG-PON.



Elaborado por: Mateo Brito

### 2.7.1.1. Bloque del transmisor

Se crea el bloque de transmisión óptico modulado externamente, para la cual se arrastra a la hoja de trabajo del software una fuente de datos (Data Source) con velocidad de transmisión de 10 [Gbps], va a estar conectado mediante una conexión lógica (enlace verde) a un driver de modulación rectangular del tipo sin retorno a cero (NRZ Rectangular Driver), se coloca un láser de onda continua del tipo Lorentziano (CW Lorentzian Laser) configurado en banda L de acuerdo a la recomendación para las respectivas longitud de onda XG-PON aplicada en downstream.

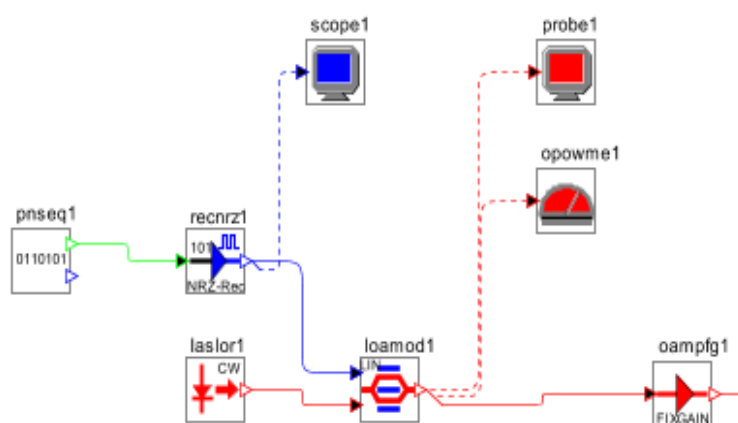
**Tabla 2.4.** Landa ( $\lambda$ ) XG-PON configurada para downstream.

$\lambda$ [nm]	Canal	Frecuencia [THZ]
1577.025	1	190.1

**Elaborado por:** Mateo Brito, basado en (International Telecommunication Union, 2016)

Del láser va a estar conectado mediante una conexión óptica (enlace rojo) a un modulador externo del tipo seno al cuadrado (Linear Amplitude Modulator) con una pérdida de inserción de 3 [dB], de igual manera, a la salida del driver de modulador mediante una conexión eléctrica (enlace azul) se conecta al modulador externo, por último, se introduce a la salida del modulador un pre-amplificador (Booster Amplifier) con una ganancia de 10 [dB]. Se añade equipos de medición a la salida del bloque de transmisión para comprobar si el transmisor está funcionando correctamente. En la parte eléctrica, a la salida del driver de modulador se coloca un osciloscopio eléctrico (Electrical Scope), y en la parte óptica, a la salida del modulador externo se coloca una sonda óptica (Optical Probe) y un medidor de potencia óptica (Optical Power Meter), como se visualiza en la Figura 2.5.

**Figura 2.5.** Bloque de transmisión óptico XG-PON.



Elaborado por: Mateo Brito

### 2.7.1.2. Bloque de distribución óptica

Se crea el bloque del medio de transmisión óptico (ODN), como se muestra en la Figura 2.6, donde se introduce a la salida del pre-amplificador un tramo de fibra óptica, con su configuración establecida en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Parámetros de la configuración del tramo de OF.

<i>Tramo de Fibra Óptica</i>	
<i>Parámetros generales</i>	<i>Configuración</i>
Distancia	20 [Km]
Pérdida	0.35 [dB/Km]
Longitud de onda de referencia para pérdida	1575 [nm]
Dispersión a la frecuencia de referencia	17 [ps/nm/Km]
Longitud de onda de referencia para dispersión	1575 [nm]

Elaborado por: Mateo Brito

A la salida de la OF se añade un atenuador óptico (Optical Attenuator) con una variable para el aumento de la atenuación como se muestra en la Tabla 2.6.



**Tabla 2.6.** Escenarios con el aumento de la atenuación.

<i>Casos</i>	<i>Atenuación [dB]</i>
1	18
2	20
3	22
4	24
5	26

**Elaborado por:** Mateo Brito

De esta manera se va a simular a la vez el aumento de los niveles de splitting en el mismo enlace óptico, con pasos de 2 [dB] al atenuador óptico, y por último se coloca un divisor de potencia óptica 1: N (Splitter, en este caso se empieza con uno del tipo 1:16), por ese motivo se configuró su atenuación de 14 [dB].

**Figura 2.6.** Bloque de la ODN – XG-PON.



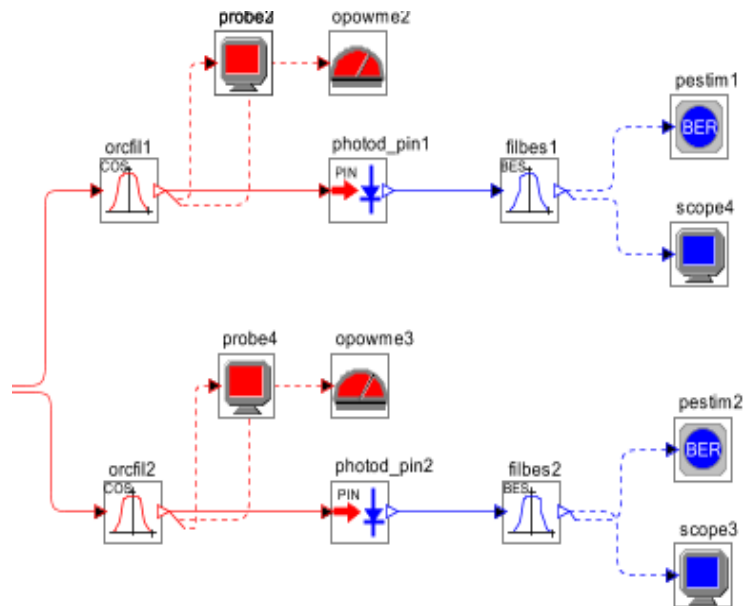
**Elaborado por:** Mateo Brito

### 2.7.1.3. Bloque del receptor

Por último, se crea el bloque de recepción óptico, añadiendo después del splitter varias ONT u ONU que se conforman de un filtro óptico pasabanda del tipo coseno levantado (Raised-Coise), dicho filtro de cada ONT u ONU se especificara su landa ( $\lambda$ ) central las mismas ocupada para la longitud de onda del láser del transmisor, como se muestra en la Tabla 2.4, luego va conectado a un fotoreceptor PIN (Photodetectors PIN), y al final se conecta un filtro eléctrico pasabajo del tipo Beddel configurado en la frecuencia de corte (-3dB Bandwidth) de 7.5 [GHz]. Se añade equipos de medición a la salida del bloque de recepción para comprobar si el receptor está funcionando correctamente y recibiendo la señal con poca interferencia. En la parte óptica, la cual es, a la salida del filtro óptico

pasabanda tipo coseno levantado se añade un medidor de potencia óptica y un osciloscopio óptico, y en la parte eléctrica, la cual es, a la salida del filtro eléctrico pasabajo tipo Bessel se introduce estimador de BER (BER Estimator) y un osciloscopio eléctrico, como se muestra en la Figura 2.7.

**Figura 2.7.** Bloque de recepción óptico XG-PON.

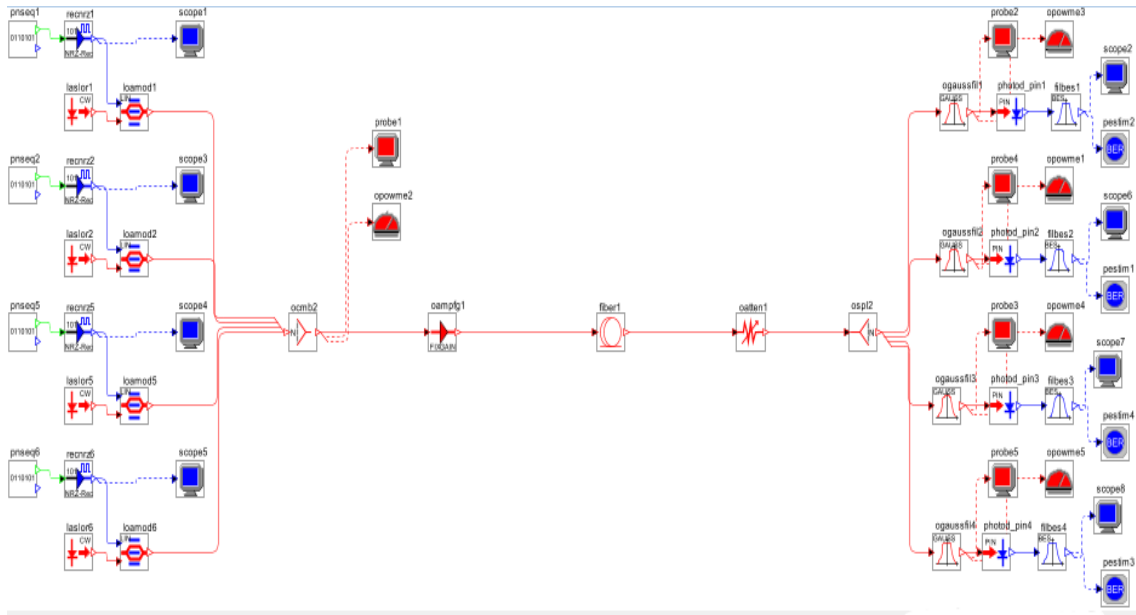


Elaborado por: Mateo Brito

### 2.7.2. Simulación de la red NG-PON2

En el segundo escenario se configura que en el dominio del tiempo los límites mínimo y máximo de las longitudes de onda en la simulación son 1595 [nm] y 1600 [nm] respectivamente. En la Figura 2.8 se observa el enlace óptico NG-PON2 completo que está trabajando a 40 [Gbps] downstream en el software OptSim.

**Figura 2.8.** Enlace óptico NG-PON2.



**Elaborado por:** Mateo Brito

### 2.7.2.1. Bloque del transmisor

Se crea el bloque de transmisión NG-PON2 con 4 longitudes de onda, introduciendo a la hoja de trabajo del software cuatro fuentes de datos (Data Source) cada una con una velocidad de 10 [Gbps], van a estar conectados mediante una conexión lógica (enlace verde) cada fuente a su respectivo driver de modulación rectangular del tipo sin retorno a cero (NRZ Rectangular Driver). Se coloca cuatro láseres de onda continua del tipo Lorentziano (CW Lorentzian Laser) configurado en banda L de acuerdo a la recomendación de banda ( $\lambda$ ) NG-PON2 para downstream.

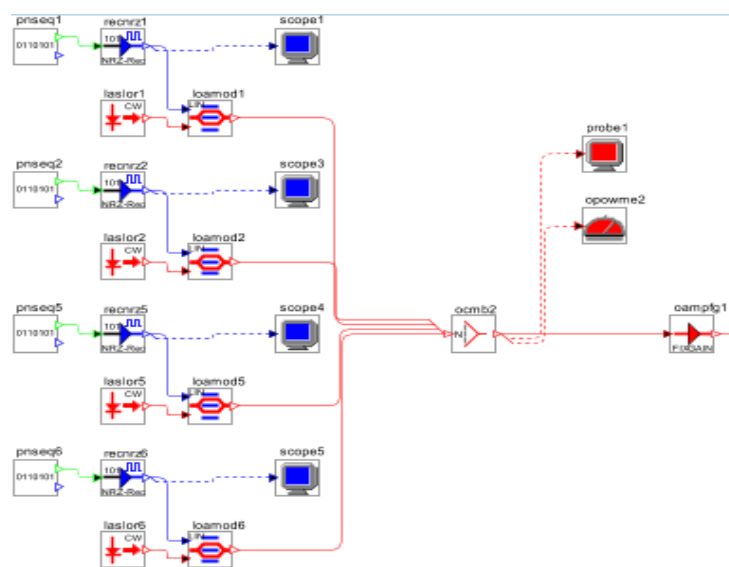
**Tabla 2.7.** Longitud de onda NG-PON2 usada para downstream.

$\lambda$ [nm]	Canal	Frecuencia [THZ]
1596.339	1	187.8
1597.189	2	187.7
1598.041	3	187.6
1598.893	4	187.5

**Elaborado por:** Mateo Brito, basado en (International Telecommunication Union, 2019)

La separación entre cada landa ( $\lambda$ ) empleada para downstream es de aproximadamente 0.8 [nm], para que así se cumpla el espaciado de 100 [GHz] en la frecuencia de cada canal, cada laser va a estar conectado mediante una conexión óptica (enlace rojo) a su correspondiente modulador externo del tipo seno al cuadrado (Linear Amplitude Modulator) con una pérdida de inserción de 3 [dB], de igual manera, a la salida de cada driver de modulador mediante una conexión eléctrica (enlace azul) se conecta a su respectivo modulador externo. Se une cada puerto o longitud de onda añadiendo un combinador óptico (Optical Combiner) del tipo N:1 (en este caso 4:1) con su atenuación configurada en 4 [dB], por último, se introduce a la salida del combinador un pre-amplificador (Booster Amplifier) con una ganancia de 10 [dB]. Se añade equipos de medición a la salida del bloque de transmisión para comprobar si el trasmisor está funcionando correctamente. En la parte eléctrica, a la salida del driver de modulador se coloca un osciloscopio eléctrico (Electrical Scope), y en la parte óptica a la salida del combinador óptico se coloca una sonda óptica (Optical Probe) y un medidor de potencia óptica (Optical Power Meter), como se visualiza en la Figura 2.9.

**Figura 2.9.** Bloque de transmisión NG-PON2.



**Elaborado por:** Mateo Brito

### 2.7.2.2. Bloque de distribución óptica

Se crea el bloque del medio de transmisión óptico (ODN), como se muestra en la Figura 2.10, donde se introduce a la salida del pre-amplificador un tramo de fibra óptica, con su configuración establecida en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Parámetros de la configuración del tramo de OF.

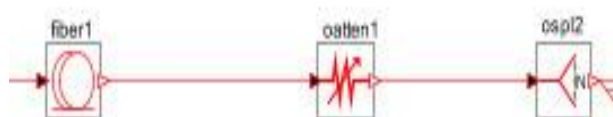
<i>Tramo de Fibra Óptica</i>	
<i>Parámetros generales</i>	<i>Configuración</i>
Distancia	20 [Km]
Pérdida	0.35 [dB/Km]
Landa ( $\lambda$ ) de referencia para pérdida	1595 [nm]
Dispersión a la frecuencia de referencia	17 [ps/nm/Km]
Landa ( $\lambda$ ) de onda de referencia para dispersión	1595 [nm]

**Elaborado por:** Mateo Brito

A la salida de la OF se añade un atenuador óptico (Optical Attenuator) con una variable para el aumento de la atenuación como se muestra en la Tabla 2.7.

De esta manera se va a simular a la vez el aumento de los niveles de splitting en el mismo enlace óptico, aumentándole con pasos de 2 [dB] al atenuador óptico, y por último se coloca un divisor de potencia óptica 1: N (Splitter, en este caso se empieza con uno del tipo 1:16), por ese motivo se configuró su atenuación en 14 [dB].

**Figura 2.10.** Bloque de la ODN – NG-PON2.

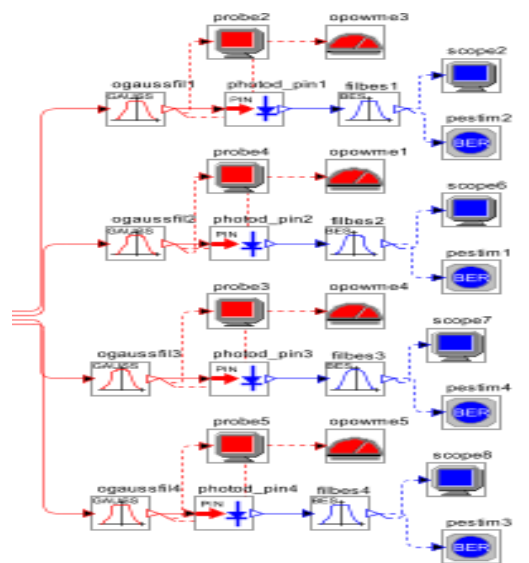


**Elaborado por:** Mateo Brito

### 2.7.2.3. Bloque del receptor

Por último, se crea el bloque de recepción óptico, añadiendo después del splitter varias ONT u ONU (en este escenario se introducen 4 ONTs u ONUs), que se conforman de un filtro óptico pasabanda del tipo gaussiano (Optical Filter Gaussian), el cual trabaja como un filtro sintonizable, cada filtro de cada ONT u ONU se especificara su longitud de onda central las mismas ocupadas para cada landa ( $\lambda$ ) del láser del transmisor, como se muestra en la Tabla 2.7, luego va conectado cada filtro a su correspondiente fotoreceptor PIN (Photodetectors PIN), y al final para cada PIN se conecta un filtro eléctrico pasabajo del tipo Beddel configurado en la frecuencia de corte (-3dB Bandwidth) de 7.5 [GHz]. Se añade equipos de medición a la salida del bloque de recepción para comprobar si el receptor está funcionando correctamente y recibiendo la señal con poca interferencia. En la parte óptica, la cual es, a la salida del filtro óptico pasabanda del tipo gaussiano se añade un medidor de potencia óptica y un osciloscopio óptico, y en la parte eléctrica, la cual es, a la salida del filtro eléctrico pasabajo tipo Bessel se introduce estimador de BER (BER Estimator) y un osciloscopio eléctrico, como se muestra en la Figura. 2.11.

Figura 2.11. Bloque de recepción óptico NG-PON2.



Elaborado por: Mateo Brito

## **CAPÍTULO 3**

### **3. ANÁLISIS**

#### **3.1. Introducción**

En este capítulo se analizan los resultados del software OptSim para los distintos escenarios del aumento de la atenuación, en el lado de transmisión se examinan los espectros eléctricos y óptico, mientras que en el lado de recepción se analiza la potencia recibida, el diagrama del ojo, la correlación del BER vs la potencia de recepción (Prx) y los datos del factor de calidad Q, el Jitter y el Bit Error Rate (BER) para los estándares XG-PON y NG-PON2.

#### **3.2. Análisis de la simulación**

Al analizar los indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators, KPI) el software proporciona la pérdida de potencia resultante en la transmisión de los datos, los resultados del BER y el factor de calidad Q para distintos niveles de atenuación. Realizando una comparación del BER con la potencia de recepción, verificando el escenario más óptimo para la red de acceso XG-PON y NG-PON2.

Las simulaciones se emplea parámetros de referencia para así considerar un aproximado de los resultados que se obtendrían en la implementación real de dichas redes de acceso con las tecnologías propuestas. Los espectros eléctricos en el software se visualizan en banda base mientras que los espectros ópticos se observan en banda modulada.

##### **3.2.1. Tecnología XG-PON**

###### **3.2.1.1. Señal transmitida downstream a 10 [Gbps]**

A la salida de la OLT (Bloque de transmisión) en el segmento eléctrico se analiza el espectro eléctrico en relación a la frecuencia [GHz] verificando la velocidad de

transmisión, y en el segmento óptico se analiza la potencia óptica y el espectro óptico en relación a la frecuencia [THz] y la  $\lambda$  [nm] a la salida del modulador externo, el cual une la señal eléctrica con el láser para generar una señal óptica. De esta manera se garantiza que el envío de los datos concuerden con las configuraciones implementadas en el software asegurándose que la señal eléctrica se convierta en señal óptica de la manera que se configuro.

En la Tabla 3.1 se muestra la potencia óptica que sale del bloque de transmisión.

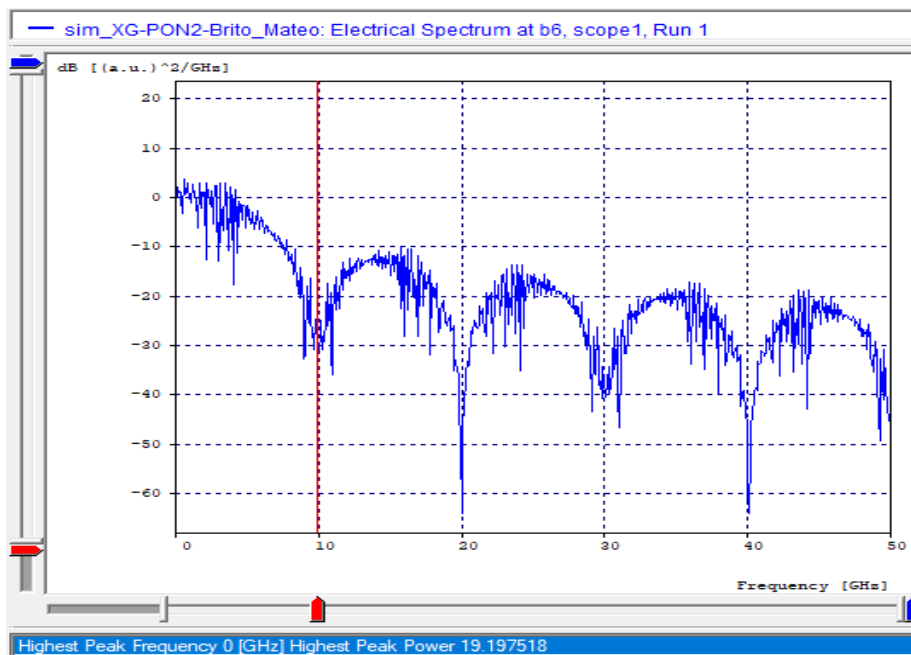
**Tabla 3.1.** Potencia óptica transmitida a una velocidad de 10 [Gbps].

<i>Potencia Óptica</i>	
[dBm]	-6.141
[mW]	0.24316440

**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.1 se muestra el espectro eléctrico en la transmisión de la señal en relación a la frecuencia, reconociendo que el ancho espectral en banda base es de 10 [GHz].

**Figura 3.1.** Espectro eléctrico de la señal transmitida a una velocidad de 10 [Gbps].



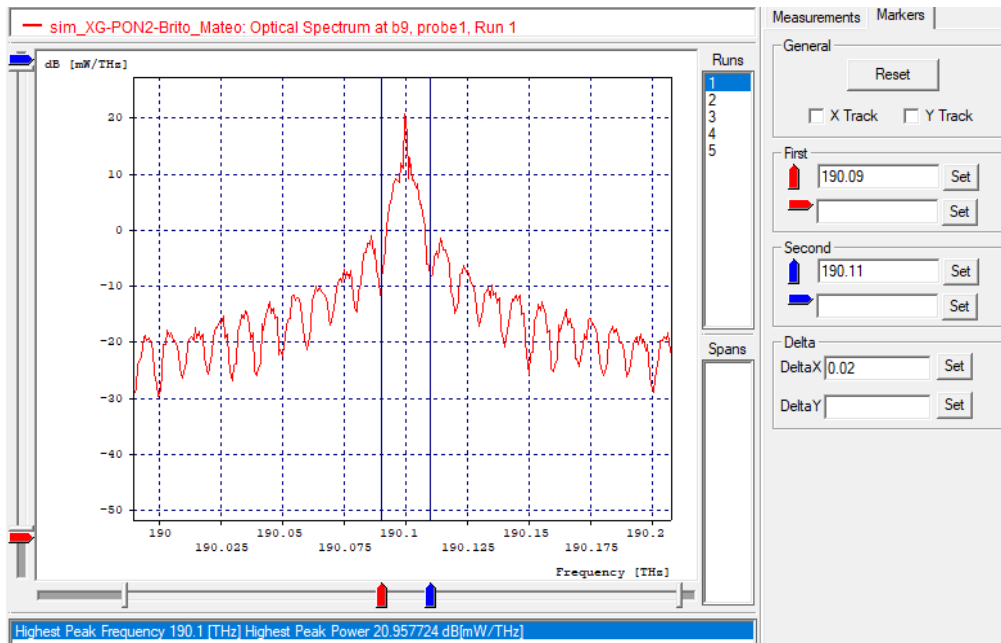
**Elaborado por:** Mateo Brito



En el espectro eléctrico ilustra la distribución de la energía vs la potencia con respecto a la frecuencia. Puede observarse que la mayor cantidad de potencia está concentrada en la componente fundamental del espectro (0 a 10 [Ghz]).

En la Figura 3.2 se observa el espectro óptico en la transmisión de la señal en relación a la frecuencia [THz], verificando con ayuda de marcadores que el ancho espectral en banda modulada, es de 0,02 [THz] o 20 [GHz].

**Figura 3.2.** Espectro óptico de la señal transmitida en relación a la frecuencia a una velocidad de 10 [Gbps].

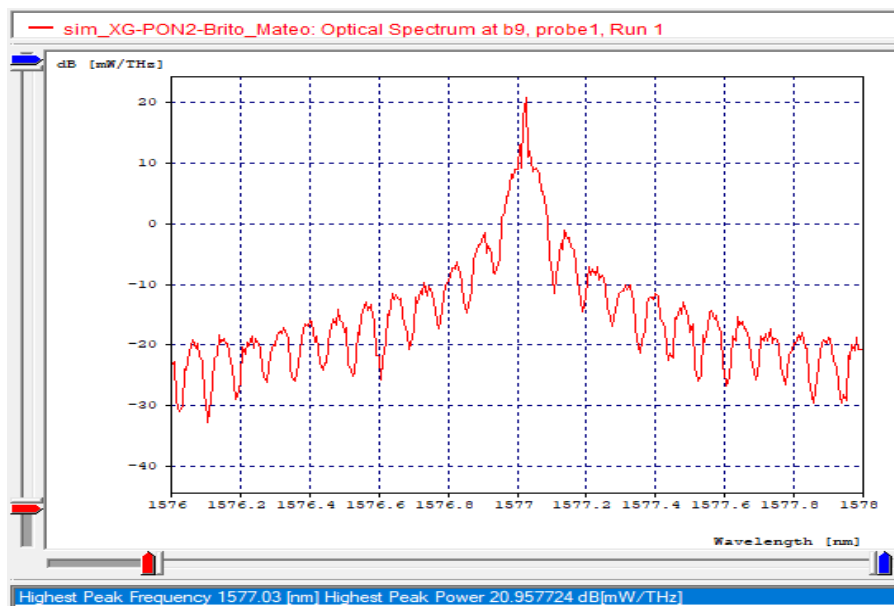


**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [THz], resaltando la máxima frecuencia pico: 190.1 [THz] y la máxima potencia pico: 20.9577 dB[mW/THz].

El espectro óptico en relación a  $\lambda$  [nm] que se observa en la Figura 3.3, donde se visualiza de manera correcta la longitud de onda central configurada en dicho canal.

**Figura 3.3.** Espectro óptico de la señal transmitida en relación a  $\lambda$  a una velocidad de 10 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [nm], resaltando la máxima longitud de onda pico: 1577.03 [nm] y la máxima potencia pico: 20.9577 dB[mW/THz].

### 3.2.1.2. Señal recibida downstream a 10 [Gbps]

En la ONT o ONU (Bloque de receptor) en el segmento óptico se analiza la potencia óptica y el espectro óptico en el dominio de la frecuencia [THz] y  $\lambda$  [nm] a la salida del filtro óptico pasabanda coseno levantado, a razón de los cinco diferentes escenarios de atenuación, y en el segmento eléctrico al instante que la señal óptica cruza por el fotoreceptor PIN para convertir los bits o paquetes ópticos en eléctricos y en seguida pasa por el filtro eléctrico pasabajo Bessel, donde a su salida se analiza la señal resultante examinando los datos de VER. Analizando el diagrama del ojo resaltando los respectivos datos de factor de calidad Q y Jitter, por último, se analiza el BER vs la potencia de recepción, considerando cada escenario de atenuación. De esta manera se garantiza que la señal en el receptor cumpla con todas las exigencias de la red XG-PON.

En la Tabla 3.2 se muestra la potencia óptica que llega del bloque del receptor, para los diferentes escenarios de la variable de la atenuación.

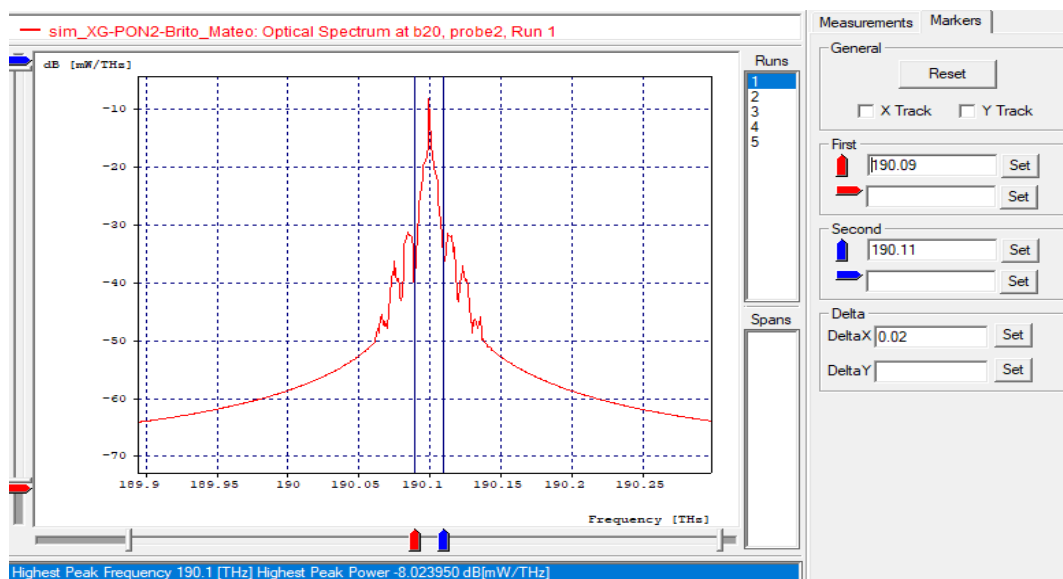
**Tabla 3.2.** Potencia óptica recibida una velocidad de 10 [Gbps].

<i>Escenarios</i>	<i>Potencia Óptica</i>	
1	[dBm]	-35.004
	[mW]	0,00031594
2	[dBm]	-37.004
	[mW]	0,00019934
3	[dBm]	-39.004
	[mW]	0,00012578
4	[dBm]	-41.004
	[mW]	0,00007936
5	[dBm]	-43.004
	[mW]	0,00005007

Elaborado por: Mateo Brito

En la Figura 3.4 se observa el espectro óptico en recepción de la señal en relación a la frecuencia [THz], verificando con ayuda de marcadores que el ancho espectral en banda modulada siga en 0,02 [THz] o 20 [GHz] y que la señal recibida este en el mismo canal transmitido, destacando que la señal óptica llega con poca presencia de ruido.

**Figura 3.4.** Espectro óptico de la señal recibida en relación a la frecuencia a una velocidad de 10 [Gbps].

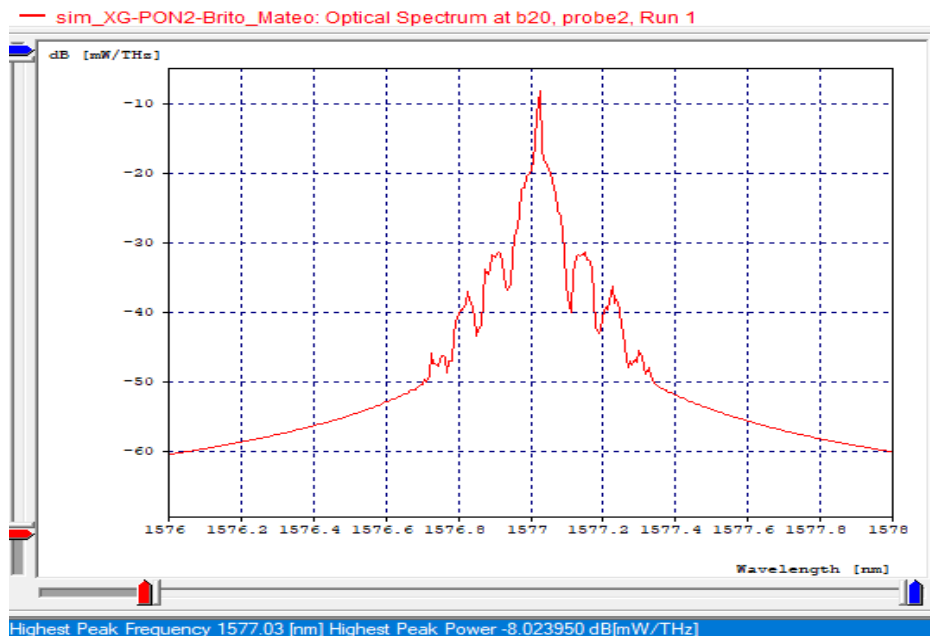


Elaborado por: Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [THz], resaltando la máxima frecuencia pico: 190.1 [THz] y la máxima potencia pico: -8.0239 dB[mW/THz].

El espectro óptico en relación a de la  $\lambda$  [nm] que se observa en la Figura 3.5, donde se visualiza de manera correcta la  $\lambda$  central configurada en dicho canal 1577,02 [nm] confirmando que se está recibiendo la señal del mismo canal de transmisión, pero con poca interferencia.

**Figura 3.5.** Espectro óptico de la señal recibida en relación a la  $\lambda$  a una velocidad de 10 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [nm], resaltando la máxima longitud de onda pico: 1577.03 [nm] y la máxima potencia pico: -8.0239 dB[mW/THz].

En el diagrama del ojo se visualiza en el dominio del tiempo distintas combinaciones posibles entre 1 (lógico) y 0 (lógico), superponiéndose con cada combinación. Determinando de manera más precisa el factor de calidad Q, BER y el Jitter para reafirmar el funcionamiento ideal de la red. En la Tabla 3.3 se detalla dichos valores de todos los casos propuestos, obtenidos del análisis de cada Figura del diagrama del ojo resultante de

la simulación XG-PON del software. Realizando solo el análisis del diagrama del ojo de los escenarios 1, 3 y 5.

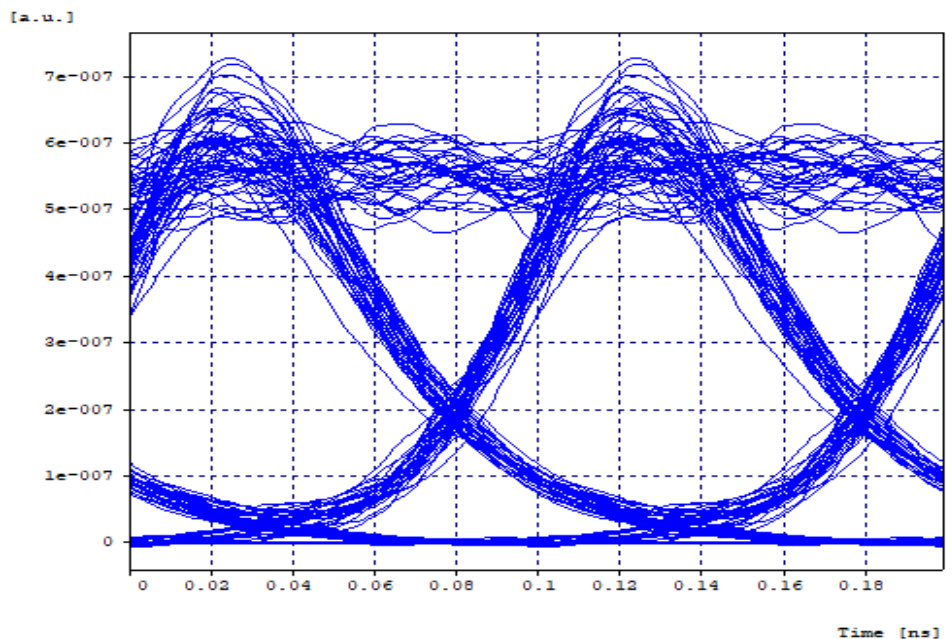
**Tabla 3.3.** KPI del Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] para cada caso.

<b>Diagrama del ojo</b>				
<i>Escenarios</i>	<i>Factor de Calidad Q</i>		<i>Jitter</i>	<i>BER</i>
	[lin]	[dB]	[ns]	
<b>1</b>	9.2022	19.2778	0.0178	$6.8045 \times 10^{-20}$
<b>2</b>	7.9342	17.9901	0.0182	$3.8732 \times 10^{-15}$
<b>3</b>	6.6643	16.4751	0.0179	$4.1091 \times 10^{-11}$
<b>4</b>	5.5101	14.8232	0.0188	$4.0358 \times 10^{-8}$
<b>5</b>	4.0859	12.2259	0.0193	$1.8221 \times 10^{-5}$

**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.6 se visualiza el diagrama del ojo para el escenario 1, donde la abertura es óptima con mínima presencia de interferencia. Su factor de calidad Q es bastante alto por lo que existe una menor tasa de pérdidas de energía, con una presencia de ruido casi nula, y un jitter con una oscilación en el tiempo muy baja, como se muestra en la Tabla 3.3.

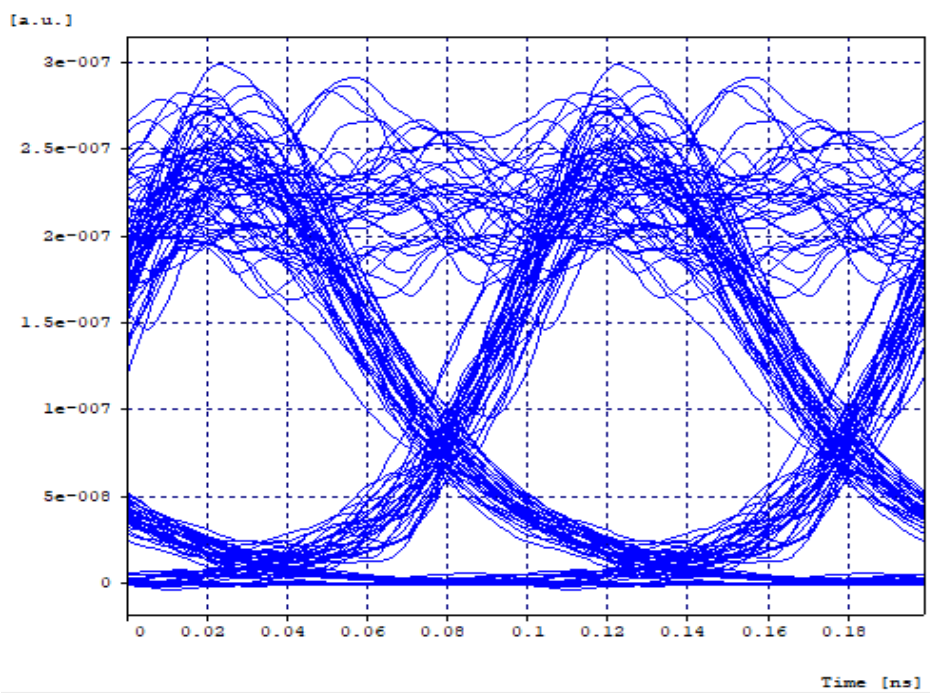
**Figura 3.6.** Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 1.



**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.7 se observa el diagrama del ojo para el escenario 3, donde la abertura se redujo, pero sigue siendo una apertura optima, con más presencia de interferencia. Su factor de calidad Q ha disminuido poco, aunque sigue siendo un valor alto por lo que existe un aumento irrelevante en la tasa de pérdidas de energía, por lo que el ruido va en aumento, y un jitter con una oscilación en el tiempo que va creciendo de a poco, como se muestra en la Tabla 3.3.

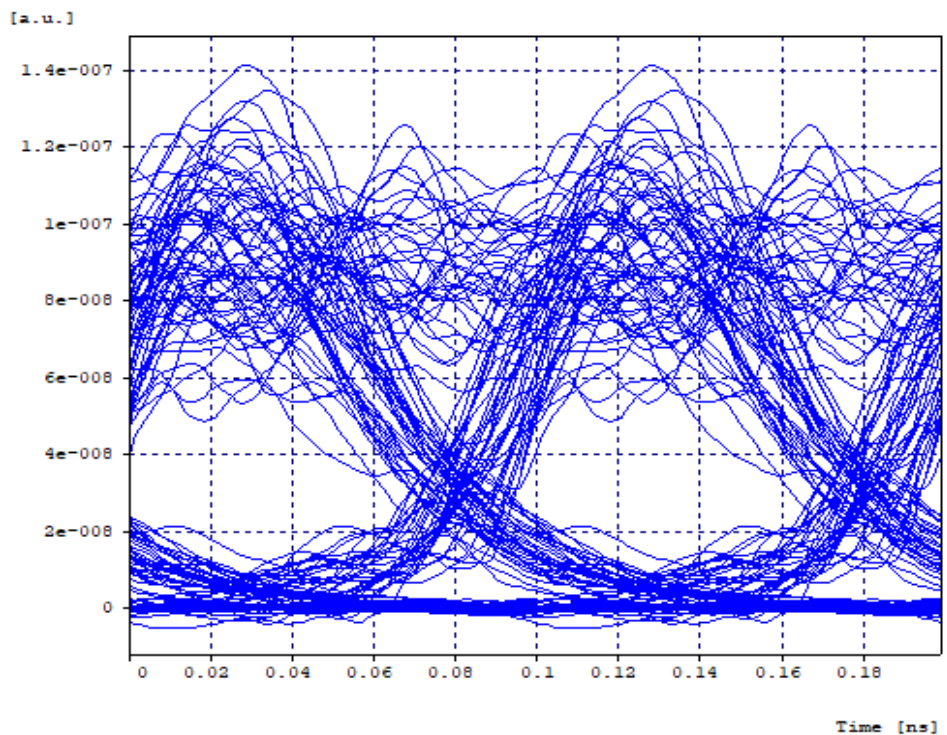
**Figura 3.7.** Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 3.



**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.8 se observa el diagrama del ojo para el escenario 5, donde la abertura es deforme con gran cantidad de distorsión, por ende, se está recibiendo la señal con gran presencia de pérdidas e interferencias. Su factor de calidad Q ha disminuido considerablemente por lo que existe un gran aumento en la tasa de pérdidas de energía, el ruido del sistema ya se hace notar en grandes cantidades, y un jitter con una oscilación en el tiempo en aumento, como se muestra en la Tabla 3.3.

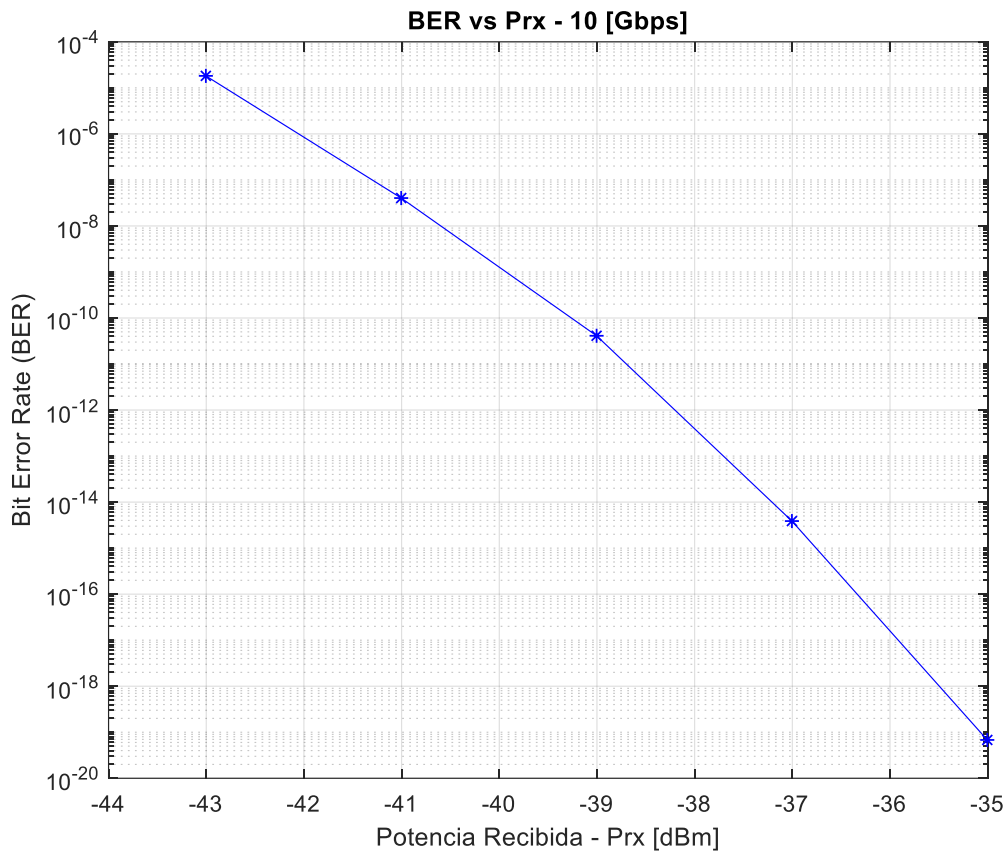
**Figura 3.8.** Diagrama del ojo a una velocidad de 10 [Gbps] - caso 5.



**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.9 se observa la gráfica del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de transmisión de 10 [Gbps], variando la potencia recibida debido al incremento de la atenuación como se muestra en la Tabla 2.6, elaborado en el software Matlab para una mejor visualización de cada escenario. Como puede observarse, se logra un BER de  $10^{-9}$  o mejor con al menos -40dBm de potencia recibida. Una potencia menor a -44dBm en el receptor degradando el BER considerablemente, sin embargo, aún sería posible tener una transmisión efectiva con esos niveles de señal, tomando en cuenta que a partir de un BER de  $10^{-3}$  se podría recuperar la información utilizando técnicas FEC.

**Figura 3.9.** BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 10 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

La Tabla 3.4 se resalta en todos los escenarios los valores de BER, de la potencia de recepción y los diferentes niveles de splitter para cada caso.

**Tabla 3.4.** Datos de todos los escenarios del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de 10 [Gbps].

<i>Casos</i>	<i>Splitter</i>	<i>Potencia de Recepción</i>	<i>BER</i>
<b>1</b>	1:16	-35.004 [dBm]	$6.8045 \times 10^{-20}$
<b>2</b>	1:32	-37.004 [dBm]	$3.8732 \times 10^{-15}$
<b>3</b>	1:64	-39.004 [dBm]	$4.1091 \times 10^{-11}$
<b>4</b>	1:128	-41.004 [dBm]	$4.0358 \times 10^{-8}$
<b>5</b>	1:256	-43.004 [dBm]	$1.8221 \times 10^{-5}$

**Elaborado por:** Mateo Brito



La red de acceso empieza con un BER considerablemente óptimo, lo que significa que el sistema es garantizado, como se visualiza en la Tabla 3.4 en los escenarios 1, 2 y 3, lo que se significa que el aumento de la atenuación para simular un nivel de splitter 1:64 es excelente, aproximadamente sin presencia de pérdidas. En cambio, el aumento de la atenuación en el escenario 4 simulando un nivel de splitter de 1:128 mediante el análisis del BER se ve un poco afectado, equivaliendo a que un bit tenía error del enlace aproximadamente de un millón de bits transmitidos y recibidos, siendo un daño sin relevancia, se le considera un sistema óptimo ya que la señal podrá recuperar las pérdidas fácilmente. Por último, el aumento de la atenuación en el escenario 5 simulando un nivel de splitter de 1:256 mediante el análisis del BER, se observa una alta tasa de errores, equivaliendo a que cuatro bits tenía error del enlace aproximadamente de un millón de bits transmitidos y recibidos, apareciendo ya varias pérdidas considerables dentro de la señal, aunque no se le considera un sistema degradado. Finalmente se resalta que la penalidad entre cada escenario de la potencia recibida es de aproximadamente 2 [dB], como se observa en la Tabla 3.4.

### **3.2.2. Tecnología NG-PON2**

#### **3.2.2.1. Señal transmitida downstream a 10 [Gbps] por cada landa $\lambda$**

A la salida de la OLT (Bloque de transmisión) en el segmento eléctrico se analiza el espectro eléctrico en relación a la frecuencia [GHz] verificando la velocidad de transmisión independientemente de los 4 canales implementados, y en el segmento óptico se analiza la potencia óptica y el espectro óptico en relación a la frecuencia [THz] y la  $\lambda$  [nm] a la salida del combinador óptico, el cual une las señales ópticas de los 4 canales para mandarlo por una sola línea de transmisión. De esta manera se garantiza que el envío de los datos concuerden con las configuraciones implementadas en el software

asegurándose que la señal óptica abarque los 4 canales en una sola vía, de la manera que se configuro.

En la Tabla 3.5 se muestra la potencia óptica que sale del bloque de transmisión.

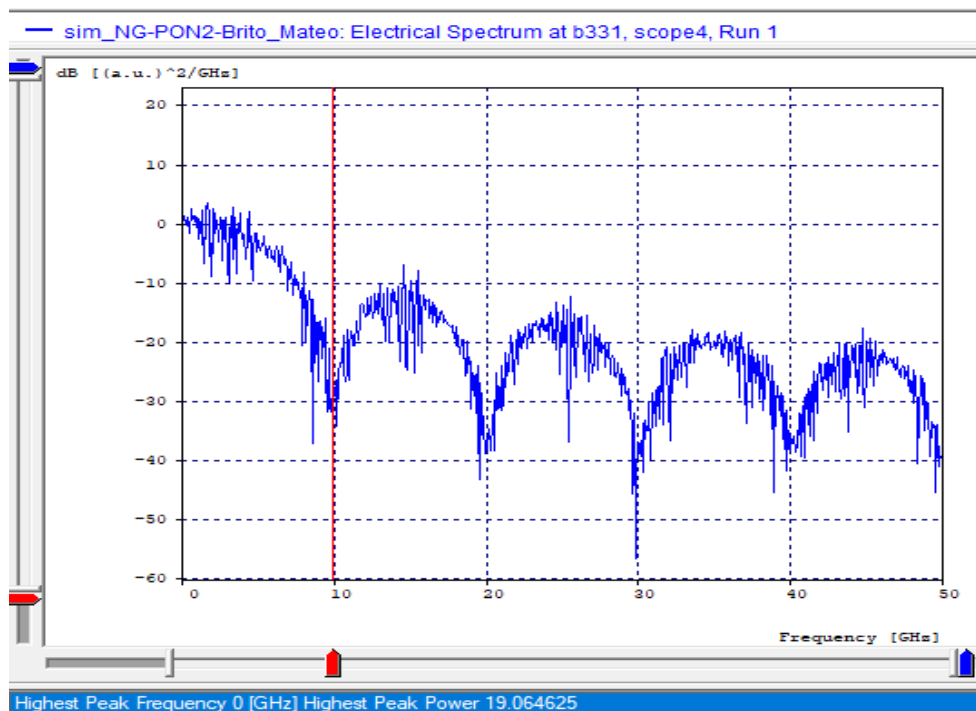
**Tabla 3.5.** Potencia óptica transmitida a una velocidad de 40 [Gbps].

<i>Potencia Óptica</i>	
[dBm]	-3.973
[mW]	0,40058990

**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.10 se muestra el espectro eléctrico en la transmisión de la señal en relación a la frecuencia, reconociendo que el ancho espectral en banda base es de 10 [GHz], dado que en el segmento eléctrico el análisis es independiente para cada canal por ende cada  $\lambda$  trabaja a 10 [Gbps], y la unión de las 4 longitudes de onda en el segmento óptico es de 40 [Gbps].

**Figura 3.10.** Espectro eléctrico del 3 canal NG-PON2 que trasmite a una velocidad de 10 [Gbps].

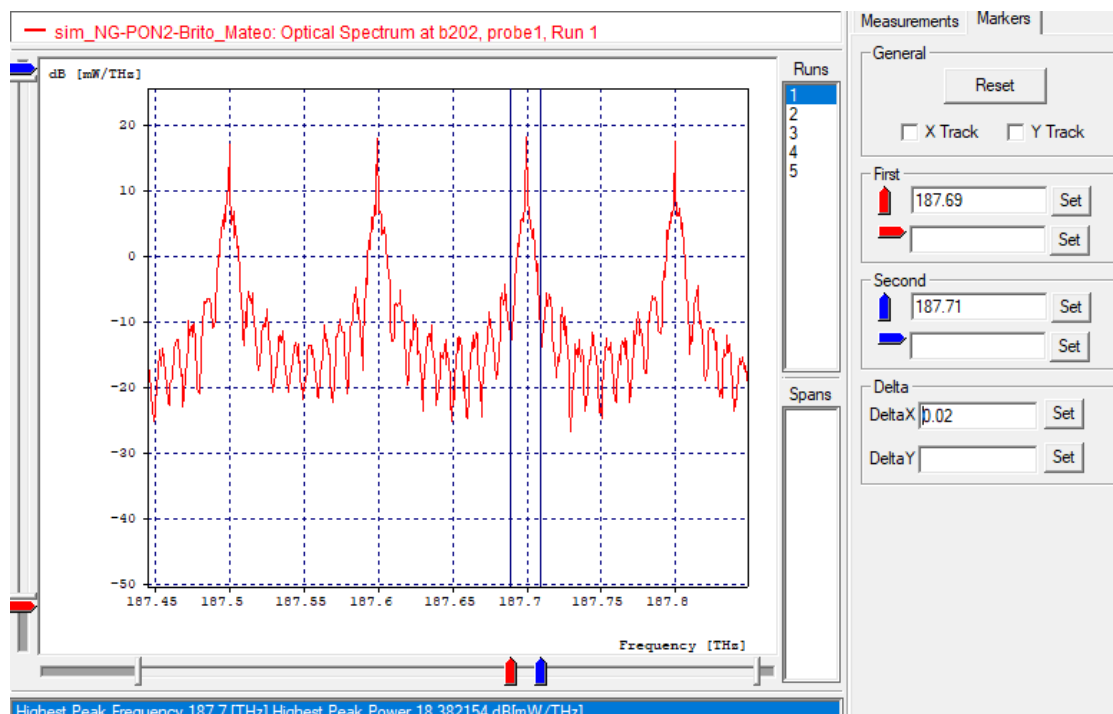


**Elaborado por:** Mateo Brito

En el espectro eléctrico muestra la distribución de la energía vs la potencia con respecto a la frecuencia. Puede observarse que la mayor cantidad de potencia está concentrada en la componente fundamental del espectro (0 a 10 [Ghz]).

En la Figura 3.11 se observa el espectro óptico en la transmisión de la señal, mostrando los 4 canales diseñados en relación a la frecuencia [THz]. Se verifica con ayuda de marcadores que el ancho espectral de cada canal en banda modulada es de 0,02 [THz] o 20 [GHz].

**Figura 3.11.** Espectro óptico de la señal transmitida en relación la frecuencia a una velocidad de 40 [Gbps].

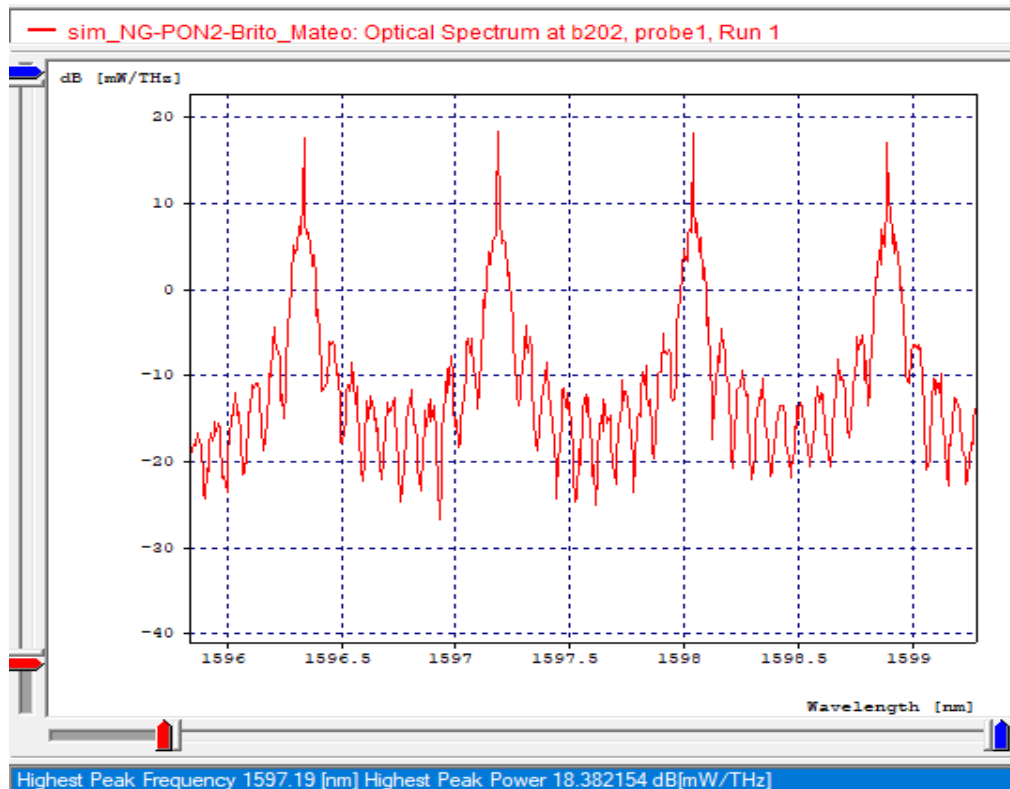


**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [THz], resaltando la máxima frecuencia pico: 187.7 [THz] y la máxima potencia pico: 18.3821 dB[mW/THz], correspondiente a la tercera longitud de onda del transmisor NG-PON2.

El espectro óptico en relación a la  $\lambda$  [nm] que se observa en la Figura 3.12, donde se visualiza de manera correcta las 4 longitudes de onda centrales correspondientes para cada canal configurada en el transmisor NG-PON2.

**Figura 3.12.** Espectro óptico de la señal transmitida en relación a la  $\lambda$  a una velocidad de 40 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [nm], resaltando la máxima longitud de onda pico: 1597.19 [nm] y la máxima potencia pico: 18.3821 dB[mW/THz], correspondiente a la segunda  $\lambda$  del transmisor NG-PON2.

### 3.2.2.2. Señal recibida downstream a 10 [Gbps] por cada landa $\lambda$

En la ONT o ONU (Bloque de receptor) en el segmento óptico se analiza la potencia óptica y el espectro óptico en relación a la frecuencia [THz] y  $\lambda$  [nm] a la salida del filtro sintonizable óptico pasabanda gaussiano, cada filtro se debe sintonizar con cada longitud de onda configurada en el transmisor, a razón de los cinco diferentes escenarios de

atenuación, y en el segmento eléctrico al instante que la señal óptica cruza por el fotoreceptor PIN para convertir los bits ópticos en eléctricos y en seguida pasa por el filtro eléctrico pasabajo Bessel, donde a su salida se analiza la señal resultante examinando los datos de BER, analizando el diagrama del ojo resaltando los respectivos datos de factor de calidad Q y Jitter, por último se analiza el BER vs la potencia de recepción, considerando cada escenario de atenuación. De esta manera se garantiza que la señal en el receptor cumpla con todas las exigencias de la red NG-PON2.

En la Tabla 3.6 se muestra la potencia óptica que llega del bloque del receptor, para los diferentes escenarios de la variable de la atenuación.

**Tabla 3.6.** Potencia óptica recibida a una velocidad de 40 [Gbps].

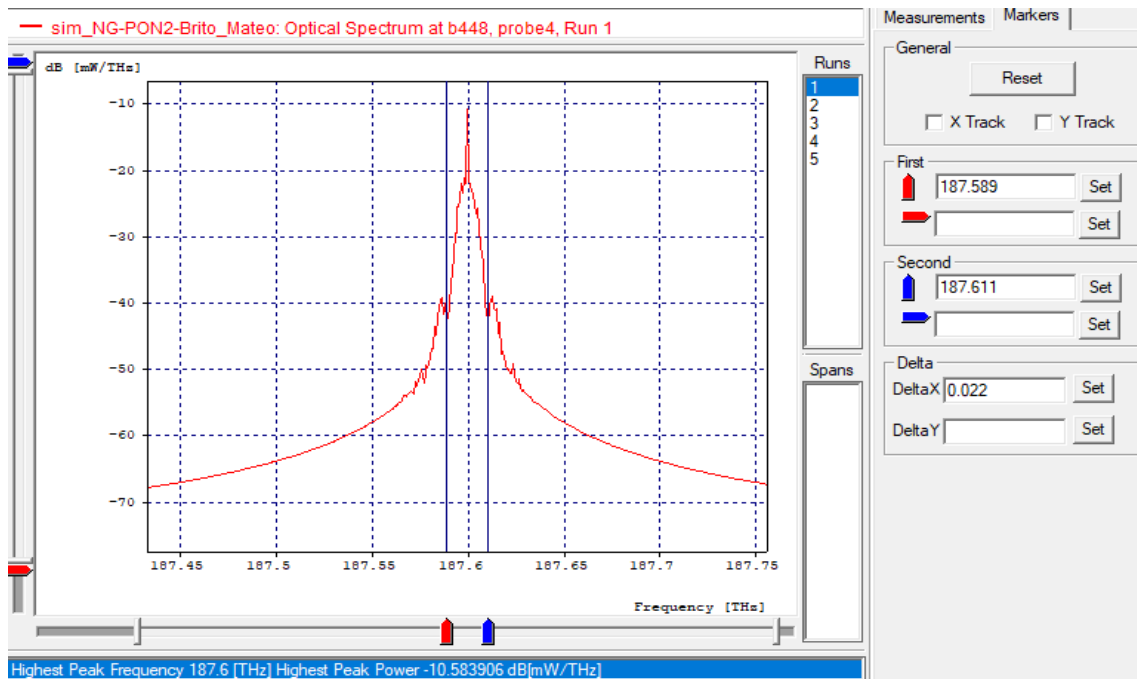
<i>Escenarios</i>	<i>Potencia Óptica</i>	
1	[dBm]	-35.004
	[mW]	0,00031594
2	[dBm]	-37.004
	[mW]	0,00019934
3	[dBm]	-39.004
	[mW]	0,00012578
4	[dBm]	-41.004
	[mW]	0,00007936
5	[dBm]	-43.004
	[mW]	0,00005007

**Elaborado por:** Mateo Brito

El análisis del espectro óptico en recepción se toma de cualquier canal (en este caso canal 3) ya que las cuatro longitudes de onda trabajan de la misma manera, pero con diferentes longitudes de onda, dado que la señal feeder que transmite las 4 longitudes de onda, en el bloque de recepción se distribuyen dependiendo de la sintonización de cada filtro. En la Figura 3.13 se observa el espectro óptico en receptor de la señal dentro del dominio de la frecuencia [THz] del canal 3, verificando con ayuda de marcadores que el ancho espectral

en banda modulada siga en 0,02 [THz] o 20 [GHz] y que la señal recibida sea el mismo de la sintonizada en su respectivo filtro óptico y este en el mismo canal transmitido, destacando que la señal óptica llega con poca presencia de ruido.

**Figura 3.13.** Espectro óptico de la señal recibida del canal 3 en relación a la frecuencia a una velocidad de 40 [Gbps].

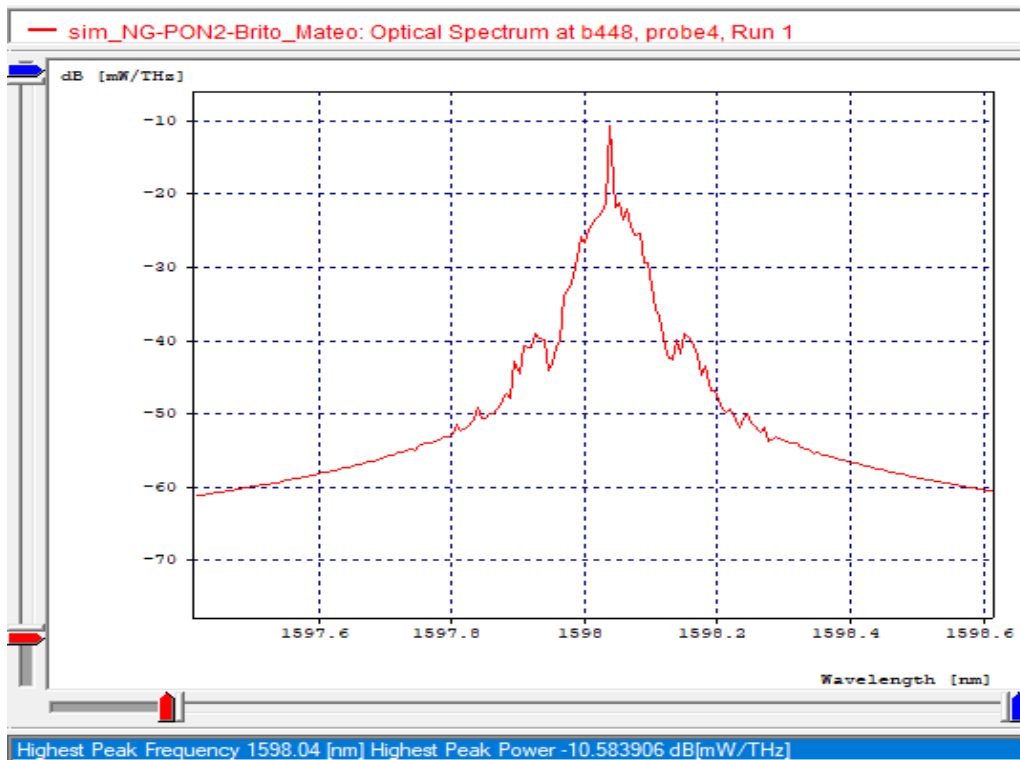


**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [THz], resaltando la máxima frecuencia pico: 187.6 [THz] y la máxima potencia pico: -10.5839 dB[mW/THz], correspondiente al resultado de la tercera longitud de onda del transmisor NG-PON2.

El espectro óptico en relación a la  $\lambda$  [nm] del canal 3 que se observa en la Figura 3.14, donde se visualiza de manera correcta la longitud de onda central configurada en el canal 3, confirmando que la señal recibida sea la misma de la sintonizada en su respectivo filtro óptico y este en el mismo canal transmitido, destacando que la señal óptica llega con poca presencia de ruido.

**Figura 3.14.** Espectro óptico de la señal recibida del canal 3 en relación a la  $\lambda$  a una velocidad de 40 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

El espectro óptico ilustra datos de dB[mW/THz] vs [nm], resaltando la máxima  $\lambda$  pico: 1598.04 [nm] y la máxima potencia pico: -10.5839 dB[mW/THz], correspondiente al resultado de la tercera longitud de onda del transmisor NG-PON2.

En el diagrama del ojo se visualiza en el dominio del tiempo distintas combinaciones posibles entre 1 (lógico) y 0 (lógico), superponiéndose con cada combinación. Determinando de manera más precisa el factor de calidad Q, BER y el Jitter para reafirmar el funcionamiento ideal de la red. En la Tabla 3.7 se detalla dichos valores de todos los casos propuestos, obtenidos del análisis de cada Figura del diagrama del ojo resultante de la simulación NG-PON2 del software. Realizando solo el análisis del diagrama del ojo de los escenarios 1, 3 y 5.

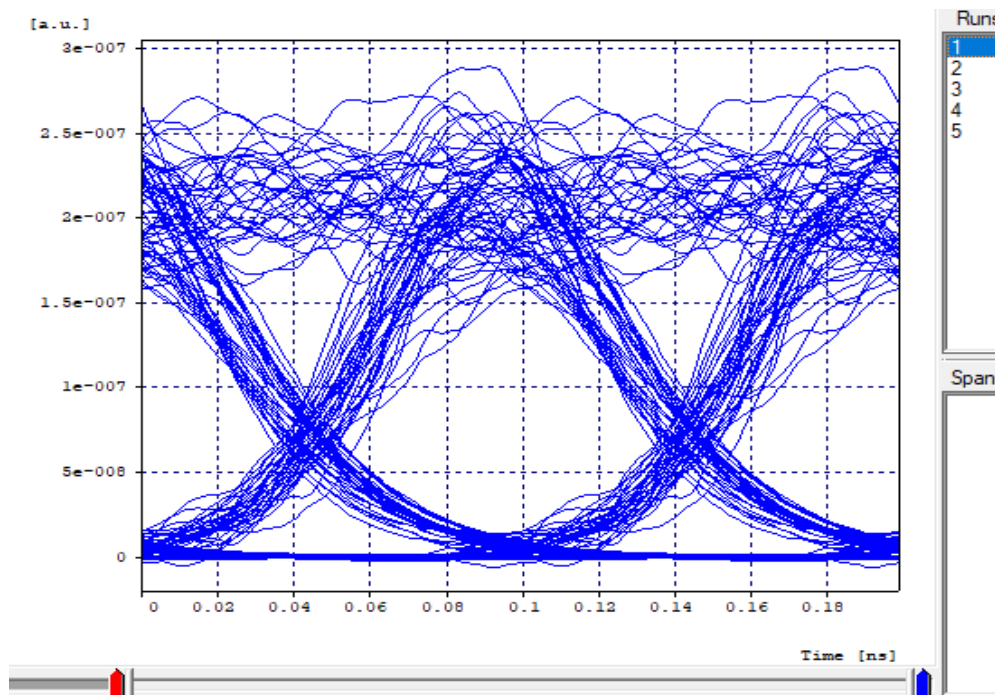
**Tabla 3.7.** KPI del Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] para cada caso.

Diagrama del ojo				
Escenarios	Factor de Calidad $Q$		Jitter	BER
	[lin]	[dB]	[ns]	
1	6.7239	16.5525	0.0175	$1.4608 \times 10^{-10}$
2	5.7793	15.2376	0.0182	$1.2129 \times 10^{-7}$
3	3.8013	11.5988	0.0189	$1.0757 \times 10^{-5}$
4	3.6671	11.2864	0.0199	$5.7386 \times 10^{-4}$
5	3.4762	10.8222	0.0216	$1.2175 \times 10^{-3}$

Elaborado por: Mateo Brito

En la Figura 3.15 se visualiza el diagrama del ojo para el escenario 1 del canal 3, donde la abertura es óptima con presencia de interferencia. Su factor de calidad  $Q$  es aceptable por lo que existe una menor tasa de pérdidas de energía, por lo que el ruido se hace notar, y un jitter con una oscilación en el tiempo baja, como se muestra en la Tabla 3.7.

**Figura 3.15.** Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 1.

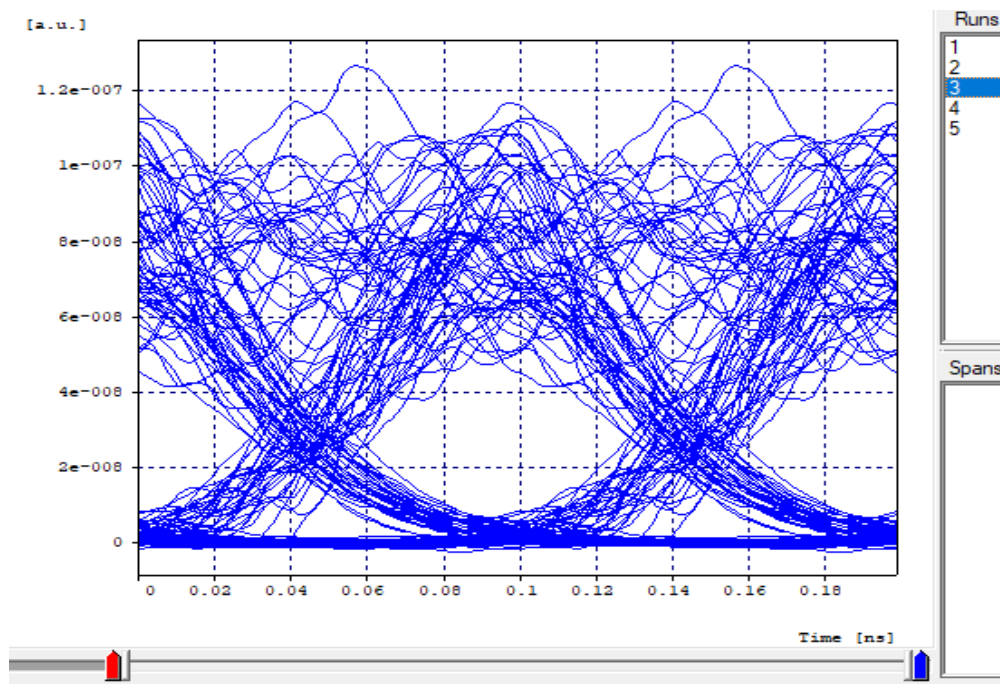


Elaborado por: Mateo Brito



En la Figura 3.16 se observa el diagrama del ojo para el escenario 3, donde la abertura se redujo, dejando de ser una apertura optima, con el aumento de la presencia de interferencia. Su factor de calidad Q ha disminuido, provocando que la tasa de pérdidas de energía genere más ruido en el sistema, y un jitter con una oscilación en el tiempo que va creciendo de a poco, como se muestra en la Tabla 3.7.

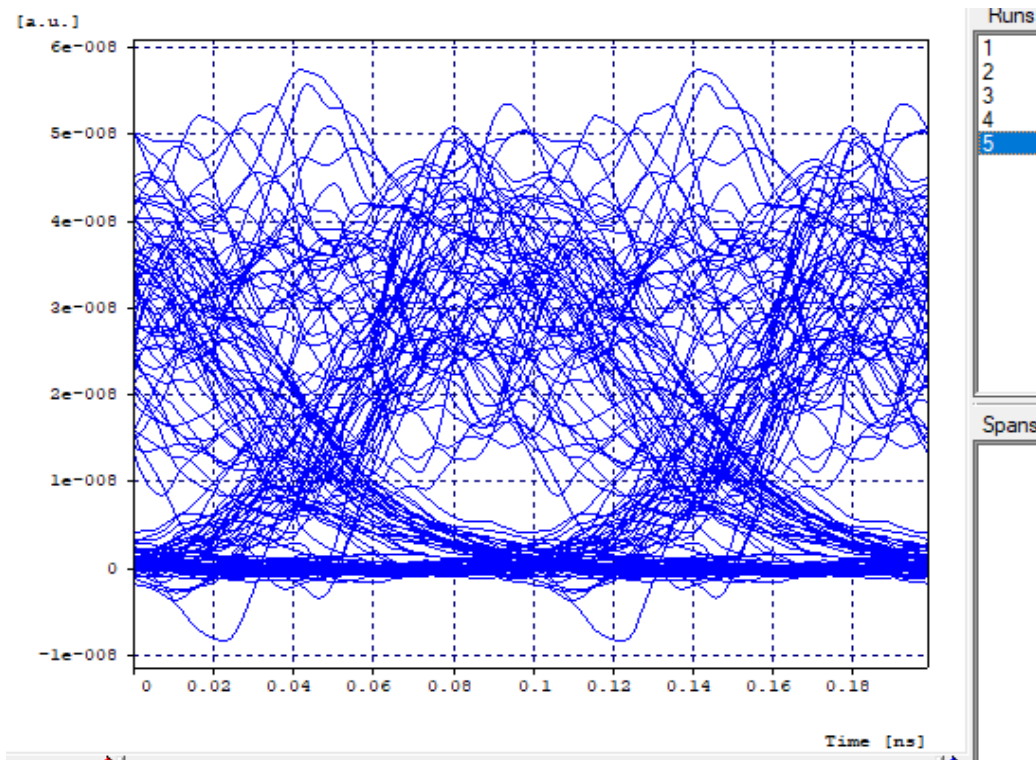
**Figura 3.16.** Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 3.



**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.17 se observa el diagrama del ojo para el escenario 5, donde la abertura es deforme con gran cantidad de distorsión, por ende, se está recibiendo la señal con gran presencia de pérdidas e interferencias, ya considerándolo un sistema obsoleto. Su factor de calidad Q ha disminuido considerablemente por lo que existe un gran aumento en la tasa de pérdidas de energía, generando un aumento del ruido bastante grande y un jitter con una oscilación en el tiempo en aumento, como se muestra en la Tabla 3.7.

**Figura 3.17.** Diagrama del ojo a una velocidad de 40 [Gbps] - caso 5.

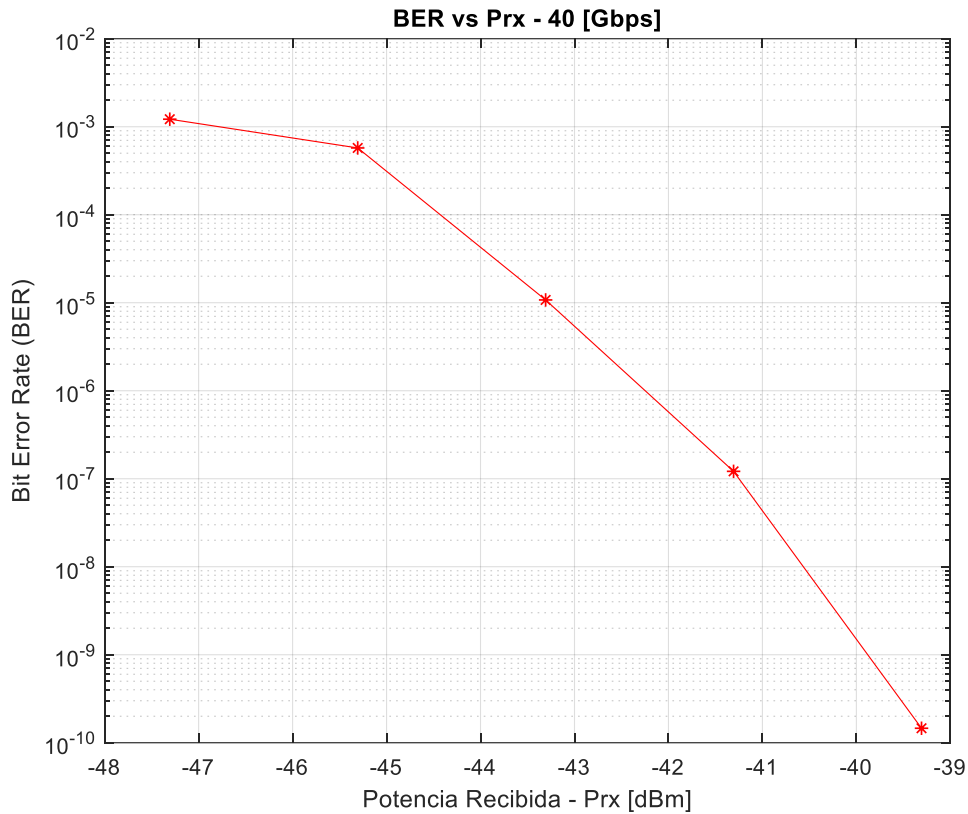


**Elaborado por:** Mateo Brito

En sistemas de comunicación por fibra óptica la referencia del BER es bastante baja (inferior a  $1 \times 10^{-9}$ ), se sabe que el sistema no es funcional cuando el BER es mayor a  $1 \times 10^{-3}$ . En la Figura 3.18 se observa la gráfica del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de 10 [Gbps] por longitud de onda, variando la potencia recibida debido al incremento de la atenuación como se muestra en la Tabla 2.6, elaborado en el software Matlab para una mejor visualización de cada escenario.

El desempeño es similar al de XG PON ya que se logra un BER de  $10^{-9}$  o mejor con al menos -40dBm de potencia recibida. Con una potencia de alrededor de -47dBm se obtiene un BER de  $10^{-3}$ , que sería el límite para recuperar la información utilizando técnicas FEC.

**Figura 3.18.** BER vs Potencia de Receptora a una velocidad de 40 [Gbps].



**Elaborado por:** Mateo Brito

La Tabla 3.8 se resalta en todos los escenarios los valores de BER, de la potencia de recepción y los diferentes niveles de splitter de cada caso.

**Tabla 3.8.** Datos de todos los escenarios del BER vs Potencia de Recepción a una velocidad de 40 [Gbps].

<i>Casos</i>	<i>Splitter</i>	<i>Potencia de Recepción</i>	<i>BER</i>
<b>1</b>	1:16	-39.307 [dBm]	$1.4608 \times 10^{-10}$
<b>2</b>	1:32	-41.307 [dBm]	$1.2129 \times 10^{-7}$
<b>3</b>	1:64	-43.307 [dBm]	$1.0757 \times 10^{-5}$
<b>4</b>	1:128	-45.307 [dBm]	$5.7386 \times 10^{-4}$
<b>5</b>	1:256	-47.307 [dBm]	$1.2175 \times 10^{-3}$

**Elaborado por:** Mateo Brito

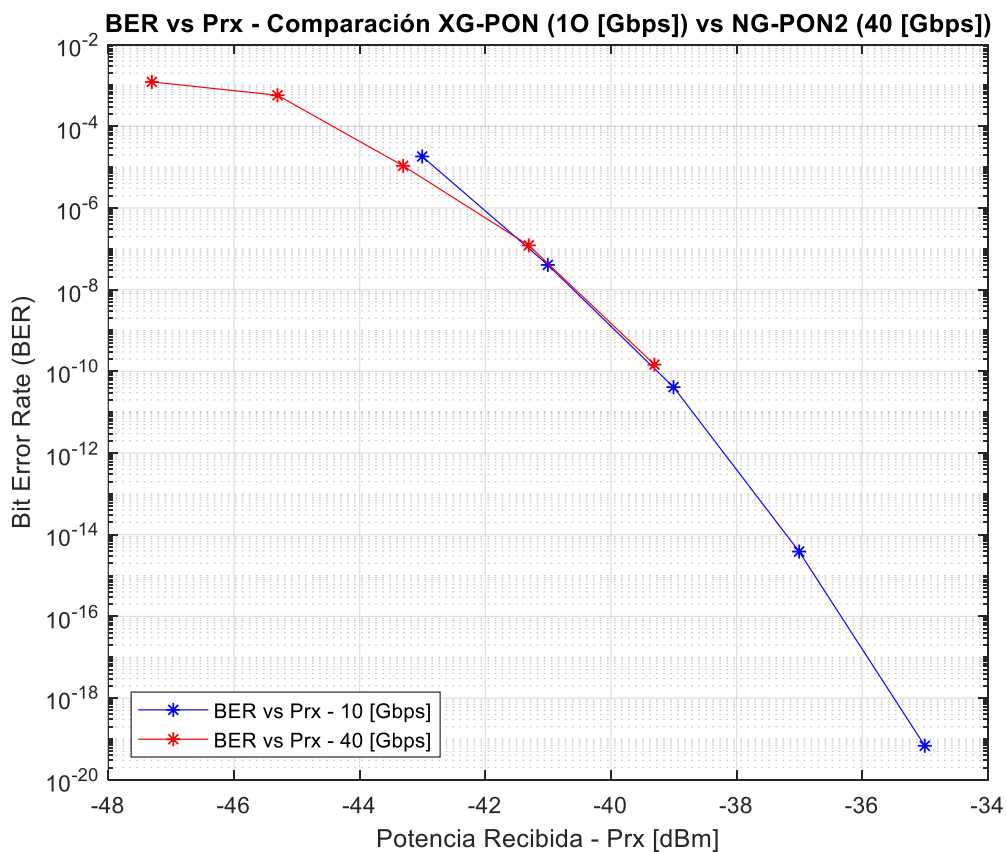
Al analizar la Tabla 3.8 se observa que la red de acceso en el escenario 1 empieza con un BER óptimo, lo que significa que el sistema es garantizado al simular un nivel de splitter de 1:16, aproximadamente sin presencia de pérdidas. En cambio, el aumento de la atenuación en el escenario 2 simulando un nivel de splitter de 1:32 mediante el análisis del BER se ve un poco afectado, equivaliendo a que dos bits tenía error del enlace aproximadamente de un millón de bits transmitidos y recibidos, siendo un daño sin relevancia, se le considera un sistema óptimo ya que la señal podrá recuperar las pérdidas con facilidad. En el escenario 3, el aumento de la atenuación al simular un nivel de splitter de 1:64 mediante el análisis del BER, se observa una alta tasa de errores, equivaliendo a que cuatro bits tenía error del enlace aproximadamente de un millón de bits transmitidos y recibidos, apareciendo ya varias pérdidas considerables dentro de la señal, aunque no se le considera un sistema degradado. En el escenario 4, el aumento de la atenuación al simular un nivel de splitter de 1:128 mediante el análisis del BER, se observa al sistema con una gran tasa de errores, equivaliendo a que cinco bits tenía error del enlace aproximadamente de un millón de bits transmitidos y recibidos, apareciendo ya muchas pérdidas considerables dentro de la señal, aunque no se le considera un sistema dañado. Por último, en el escenario 5 al simular un nivel de splitter de 1:256 mediante el análisis del BER, se visualiza a un sistema degradado, con muy altas tasas de errores, con un sistema con pocas posibilidades de recuperar las pérdidas. Finalmente se resalta que la penalidad entre cada escenario de la potencia recibida es de aproximadamente 2 [dB], observada en la Tabla 3.8.

### **3.3. Comparación de la tecnología XG-PON con la tecnología NG-PON2**

En los sistemas XG-PON al trabajar con una velocidad downstream de 10 [Gbps] con una sola  $\lambda$  en transmisión y los sistemas NG-PON2 al funcionar con una velocidad downstream de 40 [Gbps] con cuatro longitudes de onda en transmisión, estableciendo

cada estándar a una distancia general de 20 [Km] desde la OLT a la ONT u ONU y al ir aumentando la atenuación para así simular diferentes escenarios con distintos niveles de splitter, en este caso de XG-PON los valores de BER con una tasa de pérdidas casi nula son de los escenarios 1 (splitter 1:16), 2 (splitter 1:32) y 3 (splitter 1:64), dado que el BER más bajo es de  $10^{-20}$  y el alto es de  $10^{-11}$ . Para los sistemas NG-PON el valor de BER con una tasa de pérdidas sin relevancia es del escenario 1 (splitter 1:16) con su valor de BER de  $10^{-10}$ , como se muestra en la Figura 3.19.

**Figura 3.19.** Comparación de XG-PON con NG-PON2.



**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 3.19 también se visualiza los escenarios que ya van apareciendo errores en la tasa de bits tanto enviados como recibidos, en XG-PON son el escenario 4 (splitter 1:128) con un valor de BER de  $10^{-8}$  y el escenario 5 (splitter 1:256) con un valor del

BER de  $10^{-5}$ . Mientras que para NG-PON2 son el escenario 2 (splitter 1:32) con un valor de BER de  $10^{-7}$ , el escenario 3 (splitter 1:64) con su BER de  $10^{-5}$  y el escenario 4 (splitter 1:128) con el BER de  $10^{-4}$ . En relación de estas tecnologías se resalta que en XG-PON no existe sistemas completamente degradados, en cambio en NG-PON2 el escenario 5 (splitter 1:256) con el valor del BER de  $10^{-3}$ , se puede ver que la mayor parte del sistema se encuentra descompuesto con alta tasa de pérdida de bits.

La potencia de recepción para la red de acceso XG-PON como NG-PON2 tiene una penalidad entre escenarios de 2 [dB]. El sistema XG-PON empieza con una potencia de recepción de -35.004 [dB] (escenario 1) y termina con potencia de -43.004 [dB] (escenario 5) y en NG-PON2 empieza con una potencia recibida de -39.307 [dB] (escenario 1) y termina con una potencia de -47.307 [dB] (escenario 5).

## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS DE COSTOS

#### 4.1. Introducción

En este capítulo se aprecia la teoría fundamental de Optimal Topology Search (OTS) y sus costos de referencia que utiliza el algoritmo. OTS abarca problemas de optimización del tipo Árbol Mínimo de Steiner y busca las soluciones de optimización con una cadena de heurísticas. El algoritmo usa los datos de OpenStreetMaps (OSM), de esta manera se podrá simular en cualquier lugar del mundo, en este caso se hizo el despliegue en Quito (parroquia de Rumipamba y alrededores). Al final se comparan los costos de implementación de la tecnología XG-PON con la NG-PON2.

#### 4.2. OTS (Optimal Topology Search)

La búsqueda de topología óptima (OTS) se le considera hasta la actualidad un enigma de optimización del tipo Árbol Mínimo de Steiner, el cual no posee un resultado preciso ya que en tiempo finito no se la pudo calcular, estos problemas comúnmente se les conoce como modelos NP-hard. Para intentar brindar una solución con altos rangos de posibilidades a la solución exacta se creó un algoritmo que funciona con una serie de heurísticas, denominado Optimal Topology Search descrito a profundidad en (Arévalo, Hincapié, & Gaudino, 2017).

Dicho algoritmo consta de una función principal (FP) y una escala de funciones secundarias (FS) programadas para que cumplan un determinado rol logrando una solución con mayor probabilidad de exactitud. Lo novedoso de OTS es que posee una compatibilidad con la aplicación OSM (OpenStreetMaps), para trabajar usando la información de mapas reales de cualquier país, ciudad, o barrio del mundo (Arévalo & Gaudino, 2019).

## **4.2.1. Funciones de OTS**

### **4.2.1.1. Funciones Principales**

La FP es la encargada del cargar y manejar los datos proporcionado por la aplicación OSM, entre los datos que se usan se destaca las coordenadas de cada infraestructura ya sea de casa, edificio y calle, con los datos ya proporcionados la FP crea abonados aleatorios dependiendo del área, número de pisos, o si es casa o edificio (residencial o corporativo), de este modo ya puede asignar una demanda de bit rate correspondiente al mapa real de análisis.

OTS posee la capacidad de realizar análisis con usuarios capas de abarcar alrededor de las decenas de miles. Como siguiente la FP une a todos los abonados beneficiarios con una conexión con la CO en inmensos clústeres a través de una sucesión del modelo Voronoi de la zona seleccionada, lo que quiere decir que cada clúster representa el punto con más demanda de usuarios, denominada como una subzona aprovechada por su designada CO (Arévalo, Hincapié, & Gaudino, 2017).

### **4.2.1.2. Funciones Secundarias**

En las FS son encargadas principalmente de buscar el menor costo posible en el despliegue de múltiples PON abasteciendo a la mayoría de abonados dependiendo de la tecnología PON ocupada. La programación dedicada para esta solución es una heurística del tipo Tabu Search, ya que guarda el costo con la primera clusterización y compararla con diferentes escenarios donde varia el punto del clúster en parámetros de coordenadas con el mapa, de esta manera el algoritmo va buscando el menor costo posible con diferentes escenarios hasta encontrar el ideal (Arévalo & Gaudino, 2019).



Otras FS se dedican a identificar la agrupación para la asignación de los gabinetes ya sea primarios como secundarios dependiendo de la capacidad de la red de acceso ocupada en número de abonados máximos y ancho de banda máximo, también identifica la mejor ruta para el despliegue de la OF desde la OLT hasta la ONU, junto a los ductos y el zanjado.

#### 4.2.2. Precios de referencia

En base al documento mencionado (Arévalo & Gaudino, 2019), en el que se garantiza un costo real, dado que especifica que la información obtenida es directamente de vendedores de equipos y proveedores de servicios, estos precios serán los que se ocuparan en la simulación del algoritmo, describen en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6.

**Tabla 4.1.** Precio de la fibra óptica de alimentación.

<b>Cable Óptico</b>	<b>Precio (\$)</b>
Fibra Feeder, 2 hilos /Km	600
Fibra Feeder, 4 hilos /Km	800
Fibra Feeder, 6 hilos /Km	1000
Fibra Feeder, 12 hilos /Km	1500
Fibra Feeder, 24 hilos /Km	2000
Fibra Feeder, 48 hilos /Km	2500
Fibra Feeder, 64 hilos /Km	3000
Fibra Feeder, 96 hilos /Km	3500
Fibra Feeder, 140 hilos /Km	3700
Fibra Feeder, 280 hilos /Km	4000
Fibra de Distribución /Km	2000
Fibra de Interiores /abonado	50

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

**Tabla 4.2.** Precio de la instalación.

<b>Montaje</b>	<b>Precio (\$)</b>
Zanjado y Reinstatement /Km	30000
Ductos y fenders /Km	10000
Empalmes y Slicing	10
Excavación de Control	500

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

**Tabla 4.3.** Precio de los componentes del gabinete.

<b>Componente</b>	<b>Precio (\$)</b>
Caja de acoplamiento 8 OF	300
Caja de acoplamiento 16 OF	350
Caja de acoplamiento 48 OF	400
Caja de acoplamiento 140 OF	500
Splitter 1:2	20
Splitter 1:4	24
Splitter 1:8	28
Splitter 1:16	45
Splitter 1:32	70
Splitter 1:64	120
Gabinete añadido su instalación	1600

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

**Tabla 4.4.** Precio del hardware PON en el bloque de transmisión.

<b>Componentes OLT</b>	<b>Precio (\$)</b>
OLT rack - XG-PON (103 abo)	28000
OLT rack - NG-PON2 (103 abonados)	50000
OLT tarjeta - 8 x XG-PON	15000
OLT tarjeta - 8 x NG-PON2	25000

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

**Tabla 4.5.** Precio del hardware PON en el bloque de recepción.

<b>Componentes ONT u ONU</b>	<b>Precio (\$)</b>
ONT u ONU residencial - XG-PON	350
ONT u ONU residencial - NG-PON2	600
ONT u ONU corporativa - XG-PON	600
ONT u ONU corporativa - NG-PON2	1100

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

**Tabla 4.6.** Precio de los elementos de instalación para la oficina central.

<b>Componentes de instalación en la CO</b>	<b>Precio (\$)</b>
Empalme de OF a la CO	2800
Fusión/ por acople	10
Montaje de las OLT en la CO	2000
ODF por cada OLT rack en la CO	3500

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

### 4.3. Parámetros demandados de Bit Rate

Se tiene en cuenta dos tipos de abonados para hacer el análisis de las demandas de bit rate (BR): residenciales y corporativos (en el cual el número de corporativos constituyen el 2%). El ancho de banda máximo garantizado se va a considerar las demandas de los abonados y para representar un ambiente real, entre los tres probables rangos detallados en la Tabla 4.7 estos van a ser escogidos aleatoriamente (Arévalo & Gaudino, 2019).

**Tabla 4.7.** Casos de demanda de bit rate.

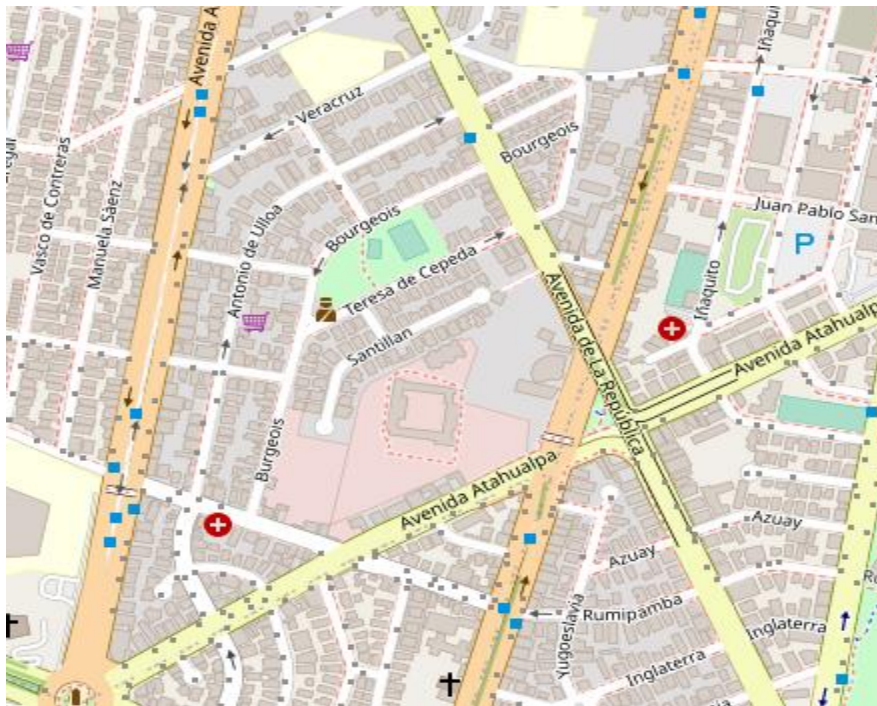
Caso	Bit rate [Mbps]	
	Residencial	Corporativo
1	100	1000
2	400	2500
3	1000	10000

**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (Arévalo & Gaudino, 2019)

### 4.4. Resultados del algoritmo OTS

La implementación del algoritmo OTS se enfatizó en la parroquia de Rumipamba y sus alrededores (norte de la ciudad de Quito) buscando un mínimo costo para el despliegue de redes de acceso con tecnología XG-PON como NG-PON2 ya que posee una gran cantidad de población (alrededor de 10000 habitantes) residenciales y corporativos, asignando a 3 escenarios con distintas demandas de BR, como se observa en la Tabla 4.8. La región de mapeo correspondiente al sector de Rumipamba y sus entornos se muestra en la Figura 4.1.

**Figura 4.1.** Mapeo de la parroquia de Rumipamba y sus alrededores.



**Elaborado por:** Mateo Brito, sacado de (OSM, 2022)

#### 4.4.1. Análisis de OTS con tecnología XG-PON

Al simular OTS en la zona descrita anteriormente, asumiendo que existe solo una oficina central para toda la parroquia, se encontró el costo mínimo del despliegue para cada escenario de demanda de bit rate, con una tecnología XG-PON. En la Tabla 4.9 se observa los usuarios totales y el número de PON utilizadas para cada escenario, y en la Tabla 4.10 se especifica los resultados de los precios de instalación, como: la implementación del hardware en la oficina central, instalación del zanjado, la ejecución de cada componente de la ODN y las implementaciones de la ONUs.

**Tabla 4.9.** Usuarios totales y PON utilizadas, de cada escenario en tecnología XG-PON.

<b>Casos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>Total Abonados</i>	7707	7707	7707
<i>Total PON</i>	129	215	485

**Elaborado por:** Mateo Brito

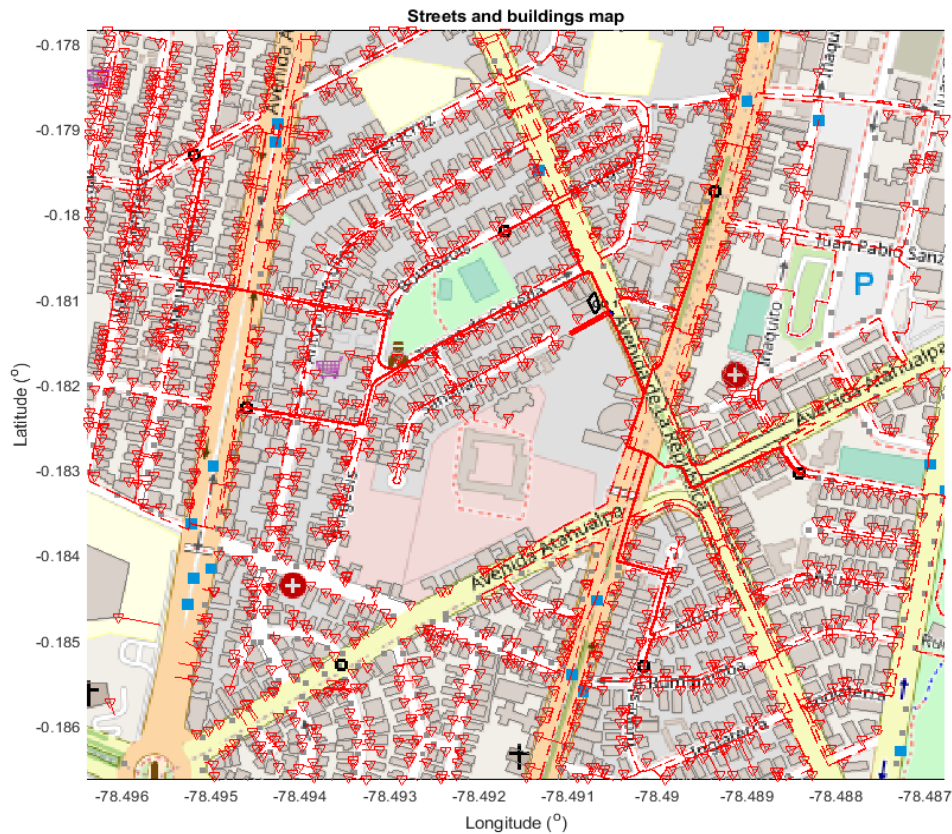
**Tabla 4.10.** Resultados de los costos de implementación para la tecnología XG-PON, de los tres escenarios de bit rate.

Escenarios	PRECIO (dólares \$)		
	1	2	3
<i>Implementación del hardware en CO</i>	10.344.500,00	16.474.500,00	36.806.500,00
<i>Implementación de Trenching</i>	16.352.051,23	18.360.927,43	15.783.423,32
<i>Implementación de OF de alimentación</i>	71.019,51	111.449,86	116.031,81
<i>Implementación de OF de distribución</i>	1.695.137,97	1.356.664,42	1.299.432,25
<i>Implementación de OF de interiores</i>	7.417.837,64	7.417.837,64	7.417.837,64
<i>Implementación de PSC</i>	242.880,00	293.270,00	313.230,00
<i>Implementación de SSC</i>	6.733.240,00	6.737.240,00	6.765.050,00
<i>Implementación de ONU</i>	26.987.000,00	26.987.000,00	26.987.000,00
<b>Total del despliegue XG-PON</b>	<b>69.843.666,35</b>	<b>77.741.938,11</b>	<b>95.488.505,04</b>

Elaborado por: Mateo Brito

Mientras en la Figura 4.2 se observa la solución dada por el algoritmo OTS del primer escenario para la ciudad de Quito (parroquia Rumipamba). En la gráfica se destaca la ubicación de la CO (rectángulo negro) donde salen todos los hilos de la fibra óptica de alimentación (línea roja consecutiva) a las respectivas posiciones optimas de los PSC ubicados en las calles principales (cuadrados negros), en el cual sale la fibra óptica de distribución (línea roja entrecortada) a sus respectivos SSC establecido para cada vivienda o edificio de ser necesario (triángulos rojos), para así llegar con ayuda de fibra óptica de interiores a las respectivas ONUs.

**Figura 4.2.** Esquema del despliegue de OF óptimo con tecnología XG-PON, para el primer escenario.



**Elaborado por:** Mateo Brito

A partir de la Tabla 4.9 y Tabla 4.10, se conoce que el número de abonados en los tres casos son de siete mil setecientos siete (7707). Lo más relevante viene siendo que en el escenario 1 donde a los abonados residenciales se les estableció un ancho de banda demandado de 100 [Mbps] (escenarios actuales), resaltando entre los otros casos por tener el menor costo total del despliegue de la red, aproximadamente de 69.843.666,35 dólares. Aunque en los escenarios 2 (escenarios próximos a llegar) con una demanda residencial de bit rate en 400 [Mbps] y 3 (escenarios a futuro) con un bit rate demandado residencial de 1 [Gbps], el costo de la implementación de toda la estructura de la ODN de estos dos escenarios es de aproximadamente de 15.900.00,00 dólares, menor del caso 1, que es de 16.160.115,00 dólares, notándose un decrecimiento cercano a 240 mil dólares en el costo de la implementación de la ODN del primer escenario con respecto a los demás,

verificando que mientras mayor es la demanda de bit rate el costo de instalación de la ODN es menor.

#### 4.4.2. Análisis de OTS con tecnología NG-PON2

De la simulación OTS anterior solo se hará el cambio de tecnología a NG-PON2, ocupando las mismas coordenadas de la CO y el punto de referencia. En la Tabla 4.11 se observa los usuarios totales y el número de PON utilizadas para cada escenario, la Tabla 4.12 se especifica los resultados de los costos de instalación, como: el montaje del hardware en la CO, instalación del trenching, la puesta en marcha de cada componente de la ODN y las instalaciones de las ONUs.

**Tabla 4.11.** Usuarios totales y PON utilizadas de cada escenario en tecnología NG-PON2.

<b>Casos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>Total Abonados</i>	7834	7834	7834
<i>Total PON</i>	133	133	134

**Elaborado por:** Mateo Brito

**Tabla 4.12.** Resultados de los costos de implementación para la tecnología NG-PON2 de los tres escenarios de ancho de banda.

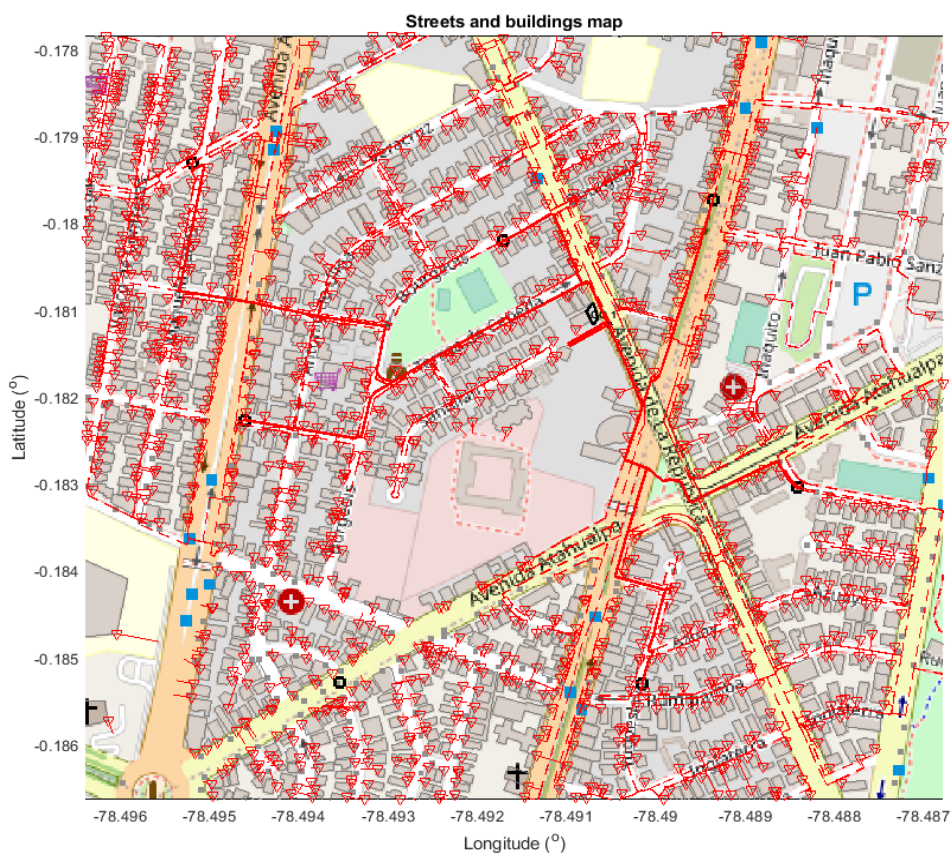
<b>Escenarios</b>	<b>PRECIO (dólares \$)</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>Implementación del hardware en CO</i>	15.874.500,00	15.874.500,00	15.874.500,00
<i>Implementación de Trenching</i>	16.656.695,91	18.795.271,81	16.350.371,67
<i>Implementación de OF de alimentación</i>	70.718,13	121.743,9	71.019,51
<i>Implementación de OF de distribución</i>	1.682.460,03	1.557.748,91	1.612.685,81
<i>Implementación de OF de interiores</i>	7.544.292,69	7.544.292,69	7.544.292,69
<i>Implementación de PSC</i>	245.090,00	305.590,00	0244.270,00
<i>Implementación de SSC</i>	6.749.340,00	6.749.340,00	6.749.340,00
<i>Implementación de ONU</i>	47.034.000,00	47.034.000,00	47.034.000,00
<b>Total del despliegue NG-PON2</b>	<b>95.857.096,77</b>	<b>97.982.487,33</b>	<b>95.480.479,69</b>

**Elaborado por:** Mateo Brito

En la Figura 4.3 se observa la solución dada por el algoritmo OTS del tercer escenario para la ciudad de Quito (parroquia Rumipamba). En la gráfica se destaca la ubicación de

la CO (rectángulo negro) donde empiezan todas las fibras ópticas de alimentación (línea roja consecutiva) a las respectivas posiciones de los PSC ubicados en las calles principales (cuadrados negros), en el cual sale la fibra óptica de distribución (línea roja entrecortada) a sus respectivos SSC establecido para cada vivienda o edificio de ser necesario (triángulos rojos), para así llegar con ayuda de fibra óptica de interiores a las respectivas ONUs.

**Figura 4.3.** Esquema del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el tercer escenario.



**Elaborado por:** Mateo Brito

A partir de la Tabla 4.11 y Tabla 4.12, se observa que el número de abonados en los tres casos son de siete mil ochocientos treinta y cuatro (7834). Lo más relevante viene siendo que en el escenario 3 donde a los abonados residenciales se les estableció un ancho de banda demandado de 1 [Gbps] (escenarios a futuro), resaltando entre los otros casos por tener el menor costo total del despliegue de la red, aproximadamente de 95.548.047,96

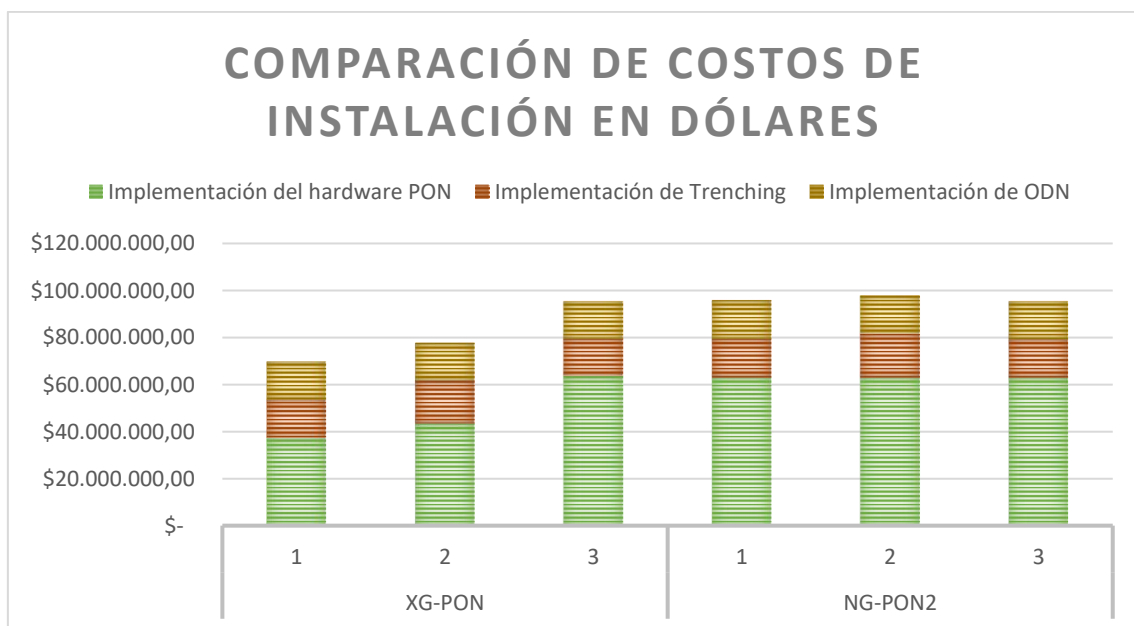


dólares, al igual que el costo de todos los componentes pertenecientes a la ODN, alrededor de 16.221.608,02 millones de dólares. Teniendo en cuenta que en el escenario 1 (escenarios actuales) con una demanda residencial de bit rate en 100 [Mbps], en el escenario 2 (escenarios próximos a llegar) con un bit rate demandado residencial de 400 [Gbps] y en el escenario 3 sus costos de implementación ya sea del hardware en CO, zanjado y la instalación de la ONU son precios parecidos para todos los casos, dándole a esta tecnología un nivel de escalabilidad eficiente.

#### 4.5. Comparativa de los costos de implementación

Para ambas tecnologías PON se nota que en la región se abarca aproximadamente 8000 usuarios, suficiente para trabajar con una sola CO. En la Figura 4.4 se puede observar los costos de implementación en comparación a dos tecnologías PON en tres escenarios de demanda de bit rate. Detallado para tres grandes componentes como son los costos de implementación en Hardware PON, Trenching y ODN.

**Figura 4.4.** Costo de instalación de la tecnología XG-PON y NG-PON2, en tres escenarios de demanda de ancho de banda en el lado de los abonados (residenciales y corporativos).



Elaborado por: Mateo Brito

En el caso de la tecnología XG-PON los costos de instalación del despliegue de la red, se aprecian que a medida va aumentando la demanda de bit rate en cada escenario, el precio de implementación crece exponencialmente, como se visualiza en el costo del hardware PON, que a medida la demanda crece los costos para la instalación también van en aumento para cada escenario, se resalta que el único componente que va en decrecimiento entre los tres escenarios es el zanjado (Trenching), con el menor costo en el tercer escenario. El costo de instalación de todos los componentes de la ODN, es aproximadamente constante para los tres escenarios.

Para la tecnología NG-PON2 se evidencia con claridad que los costos de implementación en los componentes de: Hardware en PON, Trenching y ODN se mantiene prácticamente constantes en los tres escenarios, aunque se destaca que el costo de las implementaciones de ONU en comparación a XG-PON, crecieron exponencialmente, por esta razón el costo de implementación de hardware tanto la CO con las OLT y en los usuarios con las ONUs son el costo que más destaca entre todos para el despliegue de la tecnología NG-PON2. En el tercer escenario el cual consta de la demanda más alta de bit rate simulado, es el que tiene un costo total de implementación menor a los dos escenarios anteriores.

## CONCLUSIONES

La infraestructura de los sistemas de comunicación óptico para redes PON empieza en la transmisión caracterizados por la aparición más común de un diodo laser que va a pasar por un multiplexor ya sea del tipo OTDM que divide la señal en división del tiempo para tecnologías XG-PON o del tipo TWDM-PON siendo una multiplexación híbrida uniendo la división del tiempo (TDM) con la división de la longitud de onda (WDM) para la tecnología NG-PON2, dicha señal va a pasar por una única vía de transmisión el cual es la fibra óptica más comúnmente de vidrio para llegar al receptor donde aparece un fotodiodo que transforma la señal luminosa en eléctrica.

La creación de la simulación XG-PON para downstream en OptSim, se basa en fabricar en la OLT una sola landa ( $\lambda$ ) con un BR enviado de 10 [Gbps] a través de una fuente de datos (señal eléctrica) y un láser (señal óptica), uniéndose estas señales en un modulador, para luego pasar por una única línea de transmisión a un pre amplificador, de aquí empieza el medio de transmisión que consta de un tramo de OF conectada a una variable de atenuación (aumenta o disminuye la atenuación de la red para la simulación) para llegar a un divisor de potencia del tipo 1:N, por ultimo aparece el receptor que comprende el paso de la señal por un filito óptico, y así entre al fotodiodo para su traspaso de óptico a eléctrico y poder llegar a las respectivas ONT u ONU, que viene siendo un filtro eléctrico respectivamente.

La creación de la tecnología NG-PON2 para downstream en OptSim, tiene el mismo principio que la tecnología XG-PON, solo que en esta tecnología permite funcionar con múltiples longitudes de onda para así aumentar el bit rate del canal a 40 [Gbps], de esta manera en cada OLT consta de cuatro fuentes de datos y láseres que se unen a su respectivo modulador, estas cuatro longitudes de onda se conectan a un combinador óptico dando como resultado una única línea de transmisión que debe cruzar al pre

amplificador y así viajar por la misma ODN de XG-PON, con el único cambio que en recepción el filtro óptico es sintonizable, filtrando longitudes de onda especificadas en la OLT del sistema.

Analizando los resultados de la simulación en OptSim se concluye que para la tecnología XG-PON los escenarios 1, 2 y 3 simulando splitter 1:16, 1:32 y 1:64 respectivamente posee un envío óptimo de la señal sin presencia de pérdidas adecuados para la implementación en un ambiente real, con un BER máximo de:  $10^{-20}$ , y mínimo de:  $10^{-11}$ . Con la tecnología NG-PON2 el primer escenario (splitter 1:16) es el único que la presencia de pérdidas de la señal es irrelevante, con un BER de:  $10^{-10}$ . Comparando estas tecnologías se resalta que en XG-PON no existe sistemas completamente degradados, en cambio en NG-PON2 el escenario 5 (splitter 1:256) con el valor del BER de  $10^{-3}$ , donde la mayor parte del sistema se encuentra descompuesto con alta tasa de pérdida de bits.

Al desplegar la red de acceso en la ciudad de Quito con las tecnologías PON planteadas, XG-PON es la tecnología con el costo de implementación más bajo en el primer caso de demanda de bit rate correspondiente a un escenario de ancho de banda actual demandado. Al paso que el bit rate demandado crece, el precio de su instalación va en aumento, siendo similar al estándar NG-PON2. Los usuarios residenciales y corporativos pueden llegar a demandar máximo 1 [Gbps] y 10 [Gbps] respectivamente, como es el tercer caso simulado (escenario a futuro), donde NG-PON2 resulta la mejor opción por lo que soporta un bit rate mínimo de 40 [Gbps] y su costo de implementación es menor que el escenario 1 y 2. NG-PON2 se le considera un sistema con mayor escalabilidad frente a XG-PON, siendo la mejor opción para su implementación, por el hecho de que al aumentar la demanda de bit rate, el precio total del despliegue de la red va decreciendo.

Al comparar los datos de los resultados simulados en el algoritmo OTS se concluye que la variable de mayor relevancia para el incremento del costo del despliegue de las tecnologías PON propuestas, es la instalación del hardware de la PON, lo que significa que el precio de las OLT y ONT o ONU son bastantes costos. Esto viene dado a que si se requiere más bit rate se pondrá en riesgo la capacidad fija de la tecnología, por ende, se tiene que colocar un hardware ideal tanto en transmisión como en recepción para que abastezca el ancho de banda solicitado.

## RECOMENDACIONES

Para logra un diseño e implementación con valores ideales en la red, enfocado a la obtención de sistema escalable y a la vez que soporten capacidades de abastecimiento adecuados para la demanda de servicio actuales, se logra con una topología con máximo dos niveles de splitting en el despliegue de la red de acceso.

La variable de atenuación ejecutada en el diseño de la red en el software OptSim ingresada para simular escenarios con splitters de distintas capacidades, más específico, la variable de atenuación implementada en bloque del medio de transmisión, se resalta que para su instalación se debe considerar que el aumento de la atenuación no sobrepase la atenuación total aceptada para ambas tecnologías, teniendo en cuenta la suma de las atenuaciones de todos los módulos implementados para el diseño de la red de acceso.

En este proyecto de titulación en el apartado de diseño se enfocó en el tráfico de ancho de banda downstream, por lo que el software OptSim no posee el modulador para controlar el tráfico de subida y de bajada, para que así se envíe la información correcta a las longitudes de onda asignada para cada enlace (Downstream o Upstream).

La obtención de los datos proporcionados por el programa OSM al mapear la zona de interés para el despliegue de la tecnología de acceso con ambas tecnologías se debe enfocar en regiones con una densidad de población abundante, y así asegurar que el programa conste con la información de esas coordenadas (calles, viviendas, edificios, entre otros). De esta manera la simulación del algoritmo OTS en conjunto de los datos obtenidos en el programa OSM va tener mayor precisión en la búsqueda óptima tanto del despliegue de la red en la zona como en el costo mínimo.

## REFERENCIAS

- Abreu, M. (2016). Características generales de una red de fibra óptica al hogar (FTTH). *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 40.
- Arévalo, G. (18 de Mayo de 2022). *Diseño y Administración Redes de Fibra Óptica*. (U. P. Salesiana, Ed.) Obtenido de AVAC.
- Arévalo, G., & Gaudino, R. (2019). Despliegue óptimo de redes PON, usando mapas reales, para un gran número de usuarios con diversas demandas de ancho de banda. En I. Ortega, *Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología* (págs. 201-232). Quito: Editorial Abya-Yala. doi:<https://doi.org/10.7476/9789978104910.0008>
- Arévalo, G., Hincapié, R., & Gaudino, R. (2017). *Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON*. Obtenido de ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2017.03.003>
- Brasero Herranz, S. (2017). *GLOSARIO ENRIQUECIDO DE TÉRMINOS DE TECNOLOGÍAS FTTx INGLÉS-ESPAÑOL ESPAÑOL-INGLÉS*. Madrid.
- Cabezas, A. F., & García, R. A. (2014). *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- ESCALONA, A. S. (2008). *TECNOLOGIAS DE ACCESO PARA LAS ICTS: EL INSTALADOR, LOS SERVICIOS Y LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES*. Barcelona: Experperencia, S.L.
- Geronimo, C. (9 de Mayo de 2014). *MANUAL DE COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA*. Obtenido de [issuu](https://issuu.com/cesargeronimo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas): [https://issuu.com/cesargeronimo2/docs/libro\\_de\\_comunicaciones\\_opticas](https://issuu.com/cesargeronimo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas)
- Giron, A., Rivera, E., & Gomez, G. (30 de Marzo de 2022). *Measurement of the Spectral Efficiency of a Heterogeneous Network Architecture of the NG-PON Type for a Quasilinear Propagation Regime*. (U. o. Cauca, Ed.) Obtenido de MDPI: <https://doi.org/10.3390/e24040481>
- Gómez, A. J. (Marzo de 2017). DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE REDES PON CON OFICINAS CENTRALES REDUNDANTES PARA EL SECTRO DE IÑAQUITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14040>
- Instituto Tecnológico de Aguscalientes*. (2014). Obtenido de Telecomunicaciones TICS, Unidad6 - Comunicaciones ópticas: <https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/>
- International Telecommunication Union. (9 de Marzo de 2013). *G.989.1 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gigabits (NG-PON2): Requisitos generales*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/es>

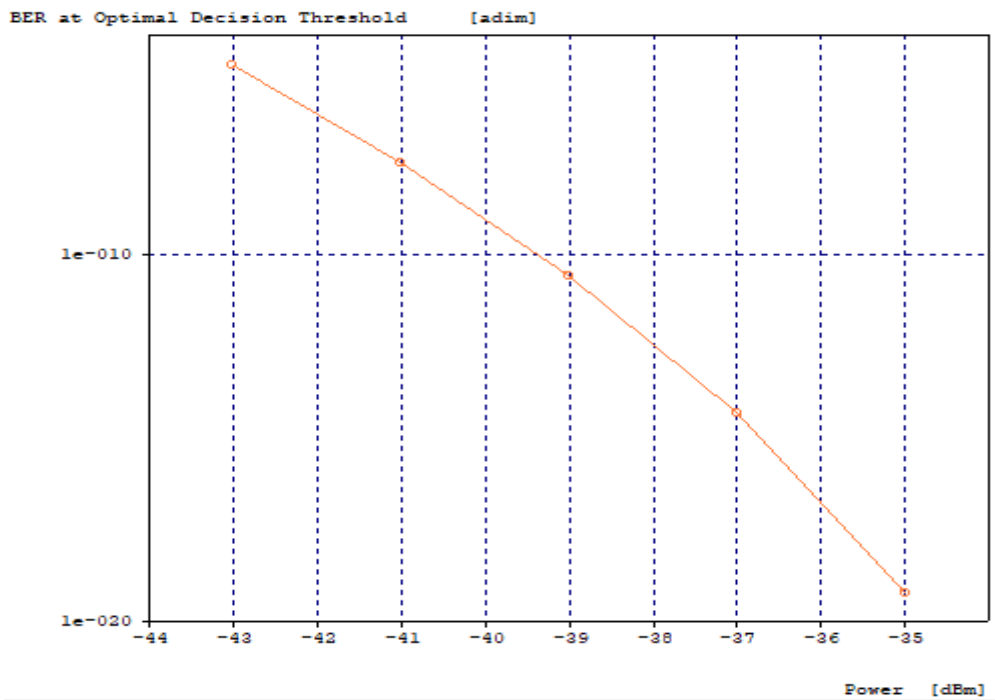
- International Telecommunication Union. (29 de Marzo de 2016). *G.987.1 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Requisitos generales*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201603-I/es>
- International Telecommunication Union. (26 de Febrero de 2016). *G.987.2 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Especificación de capa dependiente del medio físico (Physical media dependent, PMD)*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2-201602-I/es>
- International Telecommunication Union. (6 de Febrero de 2019). *G.989.2 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gigabits 2 (NG-PON2): Especificación de capa dependiente del medio físico (PMD)*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201902-I/es>
- María, A. O., Yacelga-Pinto, M., & Arévalo, G. v. (2018). Experimental evaluation of a NG-PON2 network. *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 1-4.
- Murano, R. (2014). *Optical Component Technology Options for NGPON2 Systems*. Obtenido de Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest: <https://doi.org/10.1364/OFC.2014.M3I.1>
- Nesset, D. (2015). NG-PON2 Technology and Standars. *IEEE*, 1-8.
- Oñate, L. G. (2015). ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS NO LINEALES EN LA CAPA FÍSICA DE UNA RED DE NUEVA GENERACIÓN (NGN). *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR*, 1-26.
- OSM. (2022). *OpenStreetMap*. Obtenido de <https://www.openstreetmap.org/>
- Paucar, J. F. (2021). Diseño de una Red de Acceso NG-PON2 (40-GIGAVIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS) para brindar un Servicio Triple Play a determinadas zonas urbanas de la parroquia de Sangolquí. *Escuela Politécnica Nacional*, 1-45.
- Rábano Alarcón, C. (22 de Junio de 2022). *Estudio tecno-económico del despliegue del estándar 50G-PON sobre infraestructura óptica heredada*. (U. O. (UOC), Ed.) Obtenido de Repositorio Institucional (O2): <http://hdl.handle.net/10609/145907>
- Raj, H. (2015). *Optical Time Division Multiplexing (OTDM)*. Ahmedabad: Institute of Technology, Nirma University.
- Synopsys Photonic Solutions. (2021). *OptSim for Optical Communication* . Obtenido de <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson Educación.
- Torres, C., & Patricio, C. (2020). Análisis comparativo entre NGPON2 y GPON para mejorar el desempeño de las redes pasivas de fibra óptica FTTH. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 1-20.



Truong, D. L., Do, P. T., & Pham, a. A. (2014). *Optimization of Survivable Mesh Long-Reach Hybrid WDM-TDM PONs* (Vol. 6). Journal of Optical Communications and Networking. Obtenido de <https://doi.org/10.1364/JOCN.6.000062>

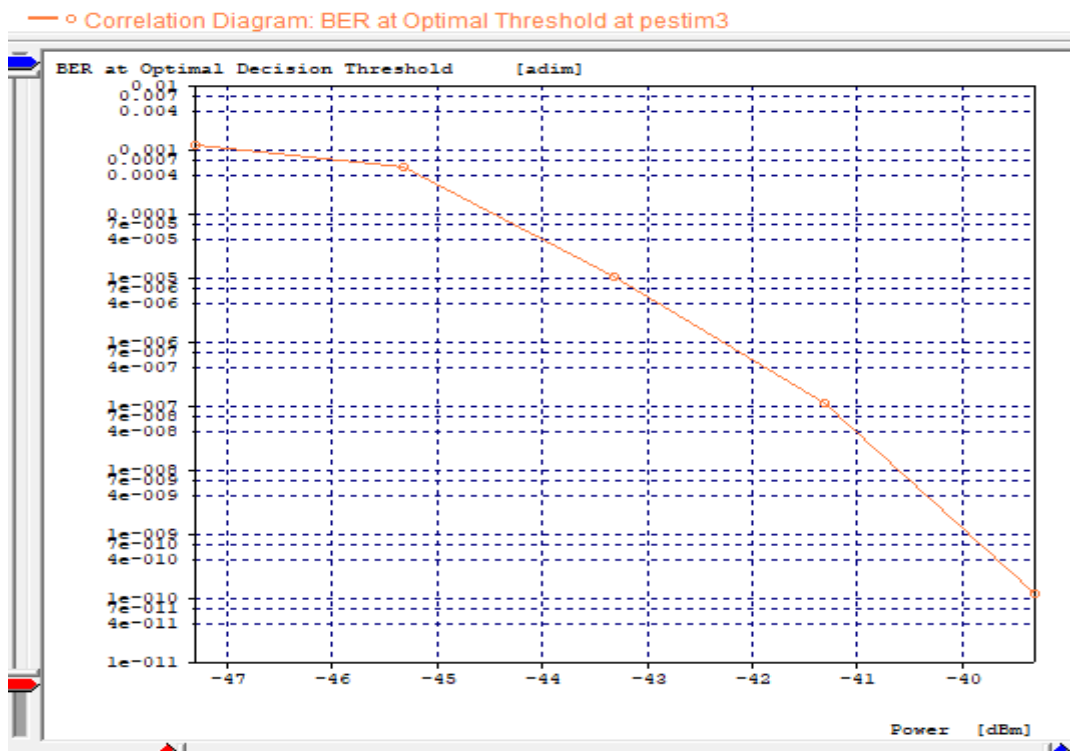
## ANEXOS

Anexo A1. BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 10 [Gbps], creada por OptSim.



Elaborado por: Mateo Brito

Anexo A2. BER vs Potencia en receptora a una velocidad de 40 [Gbps], creada por OptSim.



Elaborado por: Mateo Brito

**Anexo B.** Codificación en Matlab para la creación de las figuras del BER vs Prx.

```
% ===== Mateo Brito_Estudio del Diseño de una Red de Acceso=====
clc;
clear all;
close all;
% Correlación del BER vs la Potencia en el Receptor Prx.
% La afectación del BER y Prx es en presencia de una variable para la
% atenuación que va en aumento de 18 dB a 26 dB con pasos de 2 dB. +

%% ===== Ingreso de datos adquiridos en OptSim =====
% ----- Red XG-PON -----
BER_10Gbps=[6.8045E-20 3.8732E-15 4.1091E-11 4.0358E-8 1.8221E-5];
Prx_10Gbps=[-35.004 -37.004 -39.004 -41.004 -43.004];
% ----- Red NG-PON2 -----
BER_40Gbps=[1.4608E-10 1.2129E-7 1.0757E-5 5.7386E-4 1.2175E-3];
Prx_40Gbps=[-39.307 -41.307 -43.307 -45.307 -47.307];

%% ===== GRAFICAS =====
% ----- BER vs PRX canal de 10 Gbps -----
figure(1);
semilogy(Prx_10Gbps,BER_10Gbps,'-b');
hold on
title('BER vs Prx - 10 [Gbps]');
xlabel('Potencia Recibida - Prx [dBm]');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
grid on
% ----- BER vs PRX canal de 40 Gbps -----
figure(2);
semilogy(Prx_40Gbps,BER_40Gbps,'-r');
hold on
title('BER vs Prx - 40 [Gbps]');
```

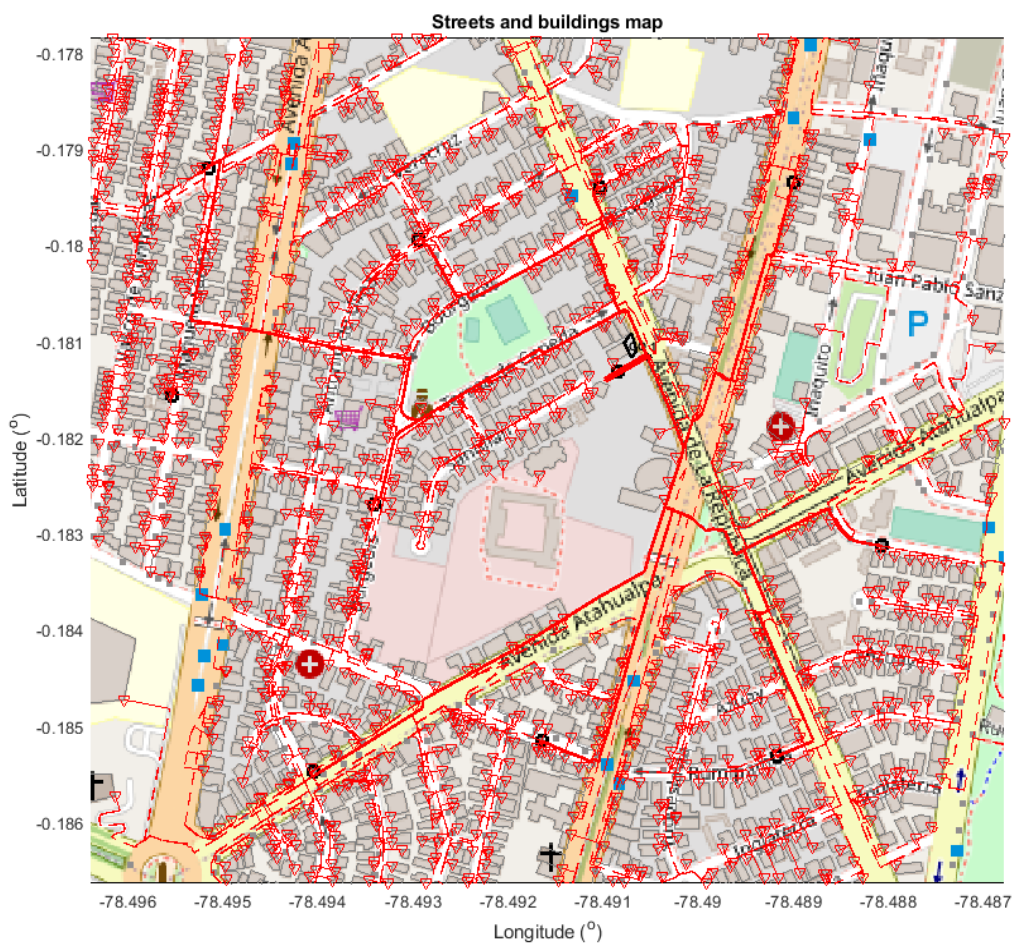
```

xlabel('Potencia Recibida - Prx [dBm]');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
grid on
% ----- BER vs PRX del canal de 10 Gbps vs 40 Gbps -----
figure(3);
semilogy(Prx_10Gbps,BER_10Gbps,'-b',Prx_40Gbps,BER_40Gbps,'-r');
hold on
title('BER vs Prx - Comparación XG-PON (10 [Gbps]) vs NG-PON2 (40 [Gbps])');
xlabel('Potencia Recibida - Prx [dBm]');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
grid on
legend({'BER vs Prx - 10 [Gbps]','BER vs Prx - 40 [Gbps]','Location','southwest'});

```

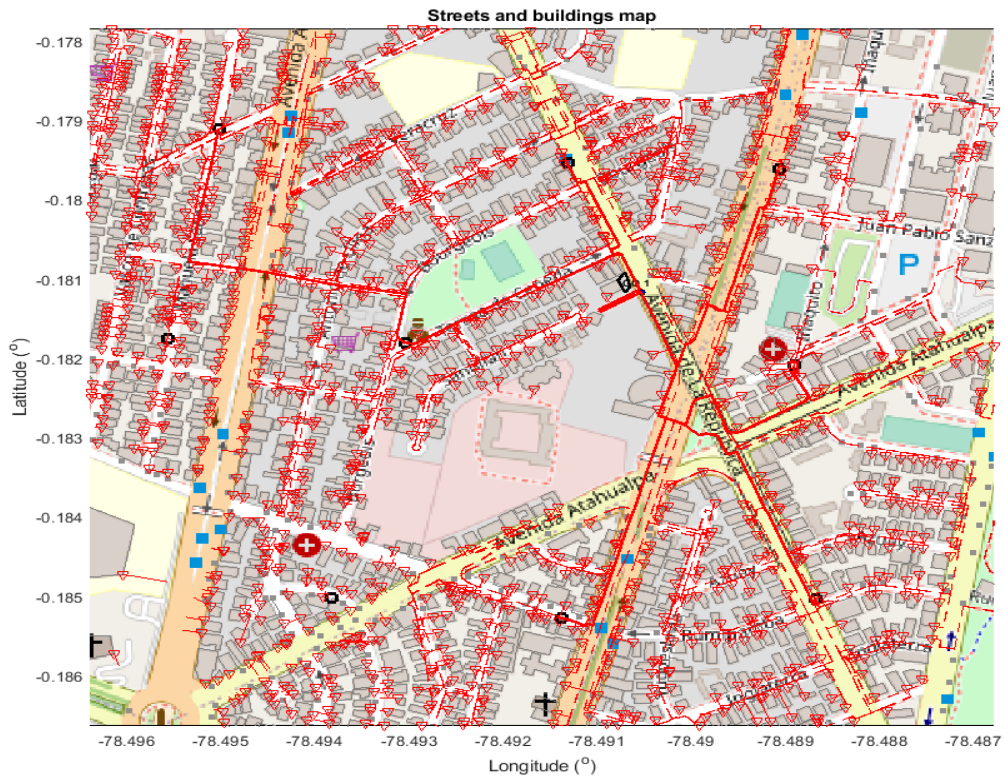
**Elaborado por:** Mateo Brito

**Anexo C1.** Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología XG-PON, para el segundo escenario.



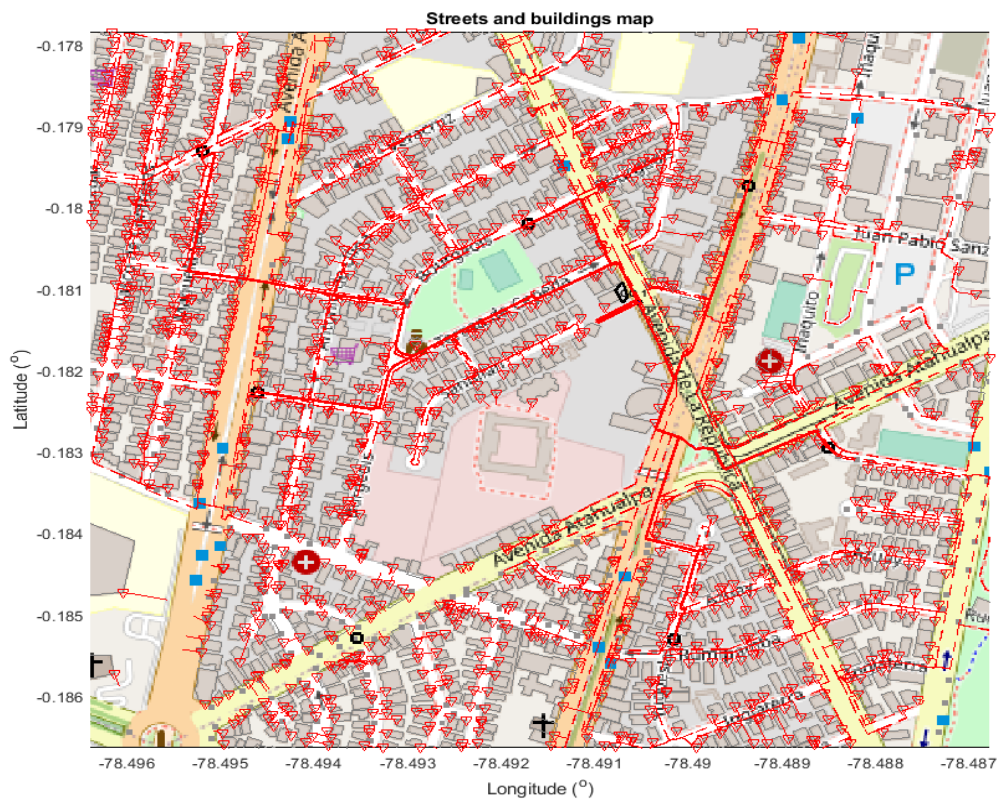
**Elaborado por:** Mateo Brito

**Anexo C2.** Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología XG-PON, para el tercer escenario.



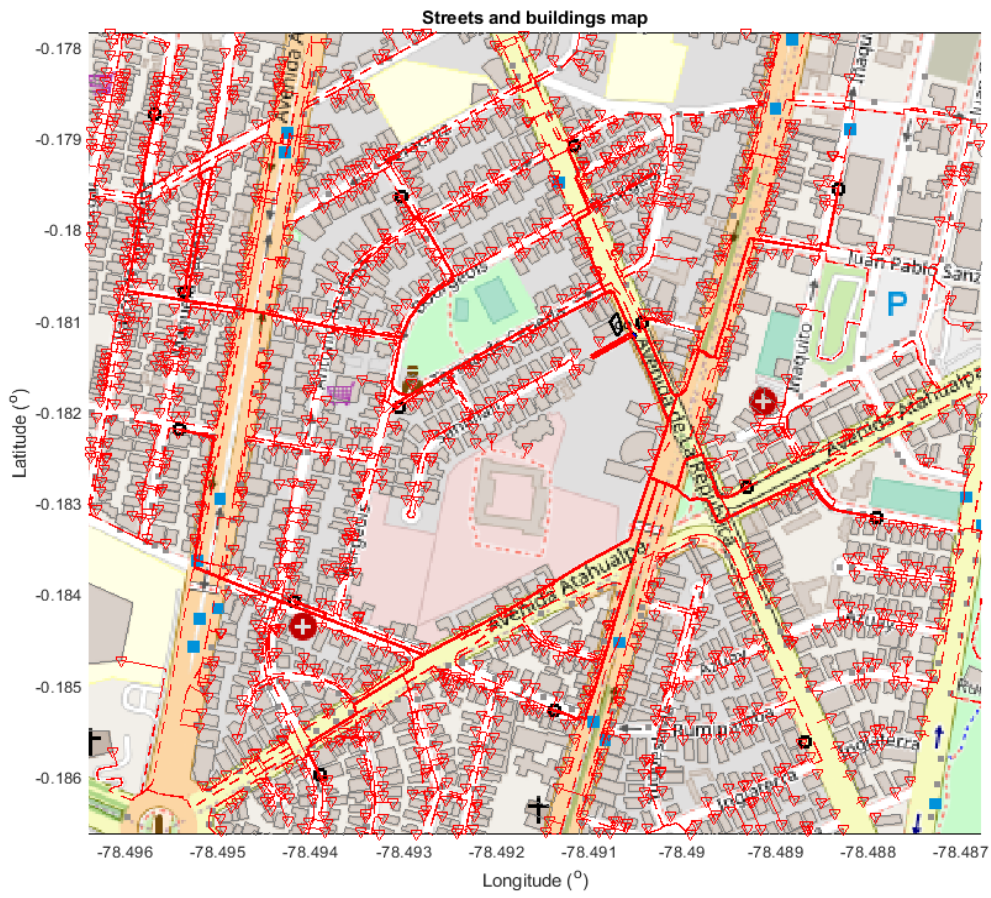
**Elaborado por:** Mateo Brito

**Anexo C3.** Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el primer escenario.



**Elaborado por:** Mateo Brito

Anexo C4. Diagrama del despliegue de OF optimo con tecnología NG-PON2, para el segundo escenario.



Elaborado por: Mateo Brito