



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED POLAN PARA INTERCONECTAR  
LOS CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE QUITO.**

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

AUTOR: Ronald Steven Argüello Lozano.

TUTOR: Germán Vicente Arévalo Bermeo

Quito, Ecuador

2024

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

Yo Ronald Steven Argüello Lozano con documento de identificación N° 1723713960 manifestó que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro, La Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de febrero de 2024

Atentamente,



---

Argüello Lozano Ronald Steven

1723713960

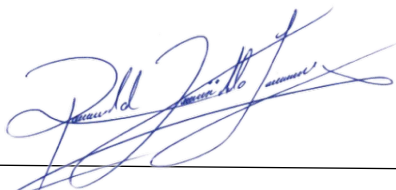
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo Ronald Steven Argüello Lozano con documento de identificación N° 1723713960, 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 Artículo Académico “Diseño e implementación de una red polan para interconectar los campus de la Universidad Politecnica Salesiana sede 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, 28 de febrero de 2024.

Atentamente,



---

Argüello Lozano Ronald Steven

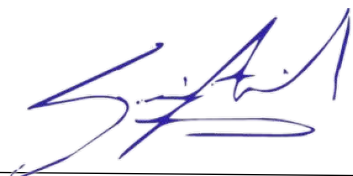
1723713960

## 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: DISEÑO E IMPLEPENTACIÓN DE UNA RED POLAN PARA INTERCONECTAR LOS CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE QUITO. Realizado por Ronald Steven Argüello Lozano con documento de identificación N° 1723713960 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de febrero de 2024

Atentamente,



---

Ing. Germán Vicente Arévalo Bermeo, PhD.

0103152500

## **DEDICATORIA**

"Dedicado con amor y gratitud a mis amados padres, Luis y Gladys, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor fortaleza en este camino hacia la culminación de mi trabajo de titulación. En palabras de Ralph Waldo Emerson, 'Lo que se obtiene con esfuerzo, se conserva con gozo'. A ustedes les debo cada logro, cada paso dado y cada obstáculo superado. Su amor y sacrificio son el motor que impulsa mis sueños. Este logro es también suyo. ¡Gracias por ser mis héroes!"

## **AGRADECIMIENTOS**

"Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Luis y Gladys, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido el pilar fundamental de mi vida y de este proyecto. Su sabiduría, paciencia y aliento inquebrantable han sido mi mayor inspiración. También quiero agradecer a todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron a este trabajo, brindando su tiempo, conocimientos y palabras de aliento. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y estoy profundamente agradecido por cada aportación. ¡Gracias por creer en mí y por acompañarme en este emocionante viaje!"

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED POLAN PARA INTERCONECTAR LOS CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE QUITO

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A POLAN NETWORK TO INTERCONNECT THE CAMPUSES OF SALESIAN POLYTECHNIC UNIVERSITY, QUITO CAMPUS

Argüello Lozano Ronald Steven<sup>1</sup>, Arevalo Bermeo German Vicente<sup>2</sup>.

*Resumen— El estudio se centró en analizar el rendimiento de un sistema de comunicación óptica que utiliza la modulación Non-Return-to-Zero, evaluando diferentes valores mediante el uso de un atenuador óptico variable. La evaluación se llevó a cabo en una red óptica pasiva (POLAN) a través de dos escenarios: la implementación en equipos reales y una simulación utilizando el software Optsim®. Los datos se transmitieron utilizando el estándar XGS-PON a lo largo de un enlace óptico con una distancia total de 13.84 km. En el kilómetro 8.33, se introdujo un splitter 1:2 para la interconexión de los campus SAN BARTOLO y SUR, utilizando fibra monomodo G652D. La recepción de los datos se realizó mediante un fotorreceptor de detección directa. Los resultados experimentales indican que, en el caso de la transmisión de datos con el estándar XGS-PON al aplicar atenuación con valores 1-16 dB, se observa en el diagrama de ojo se cierra, cuando el valor de la tasa de error de bits alcanza  $1.2e-3$  con una potencia en el receptor de -20 dBm. Este fenómeno ocurre a pesar de la corta distancia, que es inferior a 20 km, debido a la velocidad de transmisión. Es importante señalar que el cierre del diagrama del ojo a ese nivel de tasa de error de bits podría tener implicaciones significativas en la calidad de la transmisión. Estos hallazgos sugieren que la variación en el atenuador óptico variable puede desempeñar un papel crucial en la optimización del rendimiento del sistema de comunicación óptica, especialmente en distancias cortas donde la velocidad de transmisión puede afectar la integridad de la señal.*

**Keywords:** NRZ, BER, POLAN.

*Abstract— The study focused on analyzing the performance of an optical communication system using Non-Return-to-Zero modulation, evaluating different values through the use of a variable optical attenuator. The assessment was conducted in a Passive Optical LAN (POLAN) through two scenarios: implementation on real equipment and simulation using Optsim software. Data were transmitted using the XGS-PON standard over an optical link with a total distance of 13.84 km. At kilometer 8.33, a 1:2 splitter was introduced for the interconnection of the SAN BARTOLO and SUR campuses, using G652D single-mode fiber. Data reception was carried out using a direct-detection photoreceptor. Experimental results indicate that, in the case of data transmission with the XGS-PON standard and applying attenuation with values ranging from 1 to 16 dB, the eye diagram closes when the bit error rate reaches  $1.2e-3$  with a receiver power of -20 dBm. This phenomenon occurs despite the short distance, which is less than 20 km, due to the transmission speed. It is important to note that the closure of the eye diagram at this level of bit error rate could have significant implications for transmission quality. These findings suggest that variation in the variable optical attenuator can play a crucial role in optimizing the performance of the optical communication system, especially at short distances where transmission speed can impact signal integrity.*

**Keywords:** NRZ, BER, POLAN.

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Telecomunicaciones - Universidad Politécnica Salesiana, UPS - sede Quito. [rarguellol@est.ups.edu.ec](mailto:rarguellol@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup>Coordinador grupo GIETEC, Ingeniería en Telecomunicaciones – Universidad Politécnica Salesiana, UPS- sede Quito. [garevalo@ups.edu.ec](mailto:garevalo@ups.edu.ec)

## I. INTRODUCCIÓN.

Las redes ópticas pasivas (PON, por sus siglas en inglés) juegan un papel crucial en la infraestructura de comunicaciones, ofreciendo una solución eficiente y económicamente viable para la transmisión de datos a largas distancias [1]. Este artículo se enfoca en la evaluación del rendimiento de una red óptica pasiva que emplea la modulación NRZ a una velocidad de 10 Gb/s. La elección de la modulación NRZ, reconocida por su simplicidad y eficacia en la transmisión de datos a altas velocidades, resalta la importancia de esta investigación en el campo de las tecnologías de comunicación óptica. La velocidad de 10 Gb/s representa un estándar para la transmisión de datos de alta velocidad, y su implementación en redes ópticas pasivas busca maximizar la eficiencia de la transmisión y asegurar la entrega oportuna de información en entornos de comunicación exigentes [2].

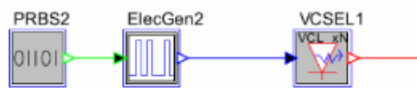


Figura 1. Representación de un esquema de modulación directa de un láser en el software Optisim®.

Fuente: Arévalo G. (2019). Curso de Sistemas de Comunicaciones Ópticas

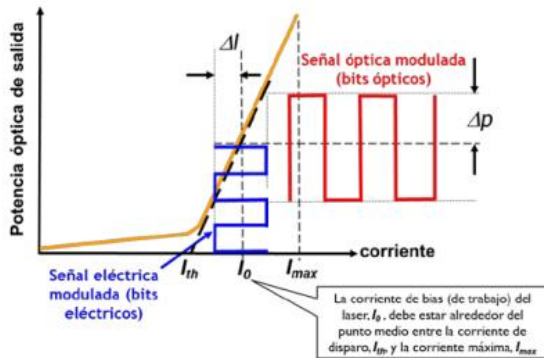


Figura 2. Se observa una representación de modulación directa de un láser tomando en cuenta la corriente de disparo.

Fuente: Plettemeier, D. (2017). VPI Photonics Curriculum V9.8.

En la Figura 1 podemos observar la modulación directa de un láser, seguido de la Figura 2 en la que se observa la potencia de disparo, además podemos observar la corriente de bias que es la corriente de trabajo del láser y la cual debe estar en un punto medio entre  $I_{th}$  y  $I_{max}$ . La metodología de este estudio implica no solo la implementación práctica de la red en equipos reales, sino también una simulación detallada utilizando el software Optisim. La inclusión de la simulación

aporta una capa adicional de análisis y comprensión, permitiendo la exploración de diversos escenarios y la evaluación de parámetros clave sin la necesidad de intervención física en la infraestructura. Esto no solo agiliza el proceso de investigación, sino que también facilita la identificación de tendencias y patrones en el rendimiento de la red bajo condiciones específicas.

La transmisión de datos a través de un enlace óptico a una velocidad de 10 Gb/s, con una distancia total de 13.84 km, agrega un componente realista a la evaluación del sistema. La incorporación de un divisor 1:2 en el kilómetro 8.33, para la interconexión de los campus SAN BARTOLO y SUR, y el uso de fibra monomodo G652D, representan decisiones estratégicas que influyen en la topología y eficiencia de la red.

Este estudio busca no solo analizar el rendimiento de la red en términos de tasas de error y tolerancia a la atenuación, sino también comprender cómo la modulación NRZ a 10 Gb/s interactúa con los elementos específicos de la infraestructura de la red. La combinación de la implementación práctica y la simulación en Optisim ofrece una perspectiva holística, contribuyendo al desarrollo continuo y la optimización de las redes ópticas pasivas en entornos de alta demanda de ancho de banda.

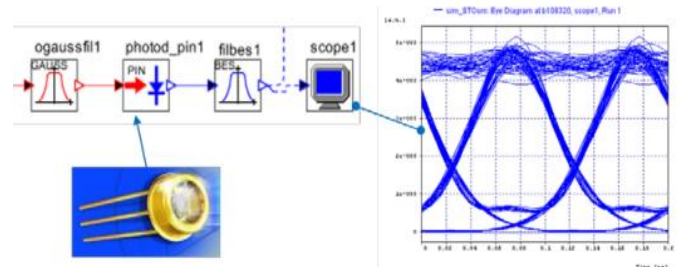


Figura 3. Representación de un esquema de recepción de una señal óptica por detección directa (DD) en el software Optisim.

Fuente: Arévalo G. (2019). Curso de Sistemas de Comunicaciones Ópticas.

En la Figura 3 muestra los componentes en la parte del receptor posteriormente conectado a un osciloscopio el cual nos muestra el diagrama del ojo. Las redes ópticas pasivas (PON) se han convertido en una opción preferida para la transmisión de datos de alta velocidad en entornos de comunicación de banda ancha, debido a su capacidad para ofrecer una mayor capacidad y alcance en comparación con otras tecnologías de red. [3]. En este tipo de redes, se usa la técnica de codificación NRZ es ampliamente utilizada en sistemas de comunicación óptica debido a su simplicidad y capacidad para transmitir grandes volúmenes de datos a velocidades altas. [4]



## II. DISEÑO DE LA RED POLAN

### 2.1 Situación Geográfica

El proyecto de diseño de la Red Óptica se encuentra en desarrollo en la ciudad de Quito, Ecuador, la cual se eleva a 2830 metros sobre el nivel del mar y sus variaciones en la temperatura, que oscilan entre 9 y 22 grados Celsius, estos factores no han sido un problema ya que los mismos no afectan a la transmisión para el diseño actual.

Con los campus universitarios distribuidos al Norte y Sur, se ha establecido el campus Girón ubicado al norte, como el punto de partida para trazar la ruta de la Red Óptica. La elección de este punto estratégico se basa en su importancia geográfica y su papel central en la red universitaria. La topografía única de la zona y la necesidad de cumplir con requisitos específicos de conectividad entre los diferentes campus han desempeñado un papel crucial en la planificación detallada de la red.

Se han tenido en cuenta las distancias entre los puntos de conexión, como se muestra en Figura 5, así como las características particulares del terreno, para garantizar una conectividad eficiente y confiable. Además, la planificación detallada de la red no solo se centra en la conectividad interna de la universidad, sino también en su capacidad para integrarse de manera efectiva con las infraestructuras externas, asegurando así una comunicación fluida con otros sistemas y servicios de la ciudad. Este enfoque holístico refleja el compromiso con la excelencia en el diseño de la Red Óptica, respaldado por un profundo entendimiento de las necesidades específicas de la comunidad universitaria y su entorno geográfico.

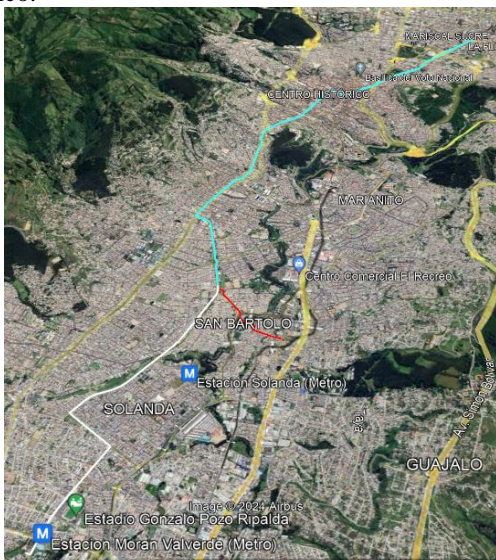


Figura 5. Diseño de la red Polan usando Google Earth, distancia 13.84 Km(total).



Figura 6. Tramo de fibra ubicada al Sur usando OpenStreetMap

En la Figura 6 indica el ultimo tramo de fibra optica SMF G652D para la conexión con el campus SUR, la distancia desde el splitter hasta el punto terminal es de 4.33 Km con una atenuacion en fibra de 0.2db/Km.



Figura 7. Tramo de fibra ubicada al Norte usando OpenStreetMap

En la Figura 7 indica el tramo inicial de la red POLAN partiendo desde el campus Girón con una fibra SMF G652D para posteriormente en a 8.33 Km de distancia añadir un splitter 1:2.



Figura 8. Tramo de fibra ubicada al San Bartolo usando OpenStreetMap

En la Figura 8 indica el tramo desde el splitter hacia el campus SAN BARTOLO usando una fibra SMF G652D. la distancia desde el splitter hasta la fibra es 1.17 Km.

## 2.2 Simulación

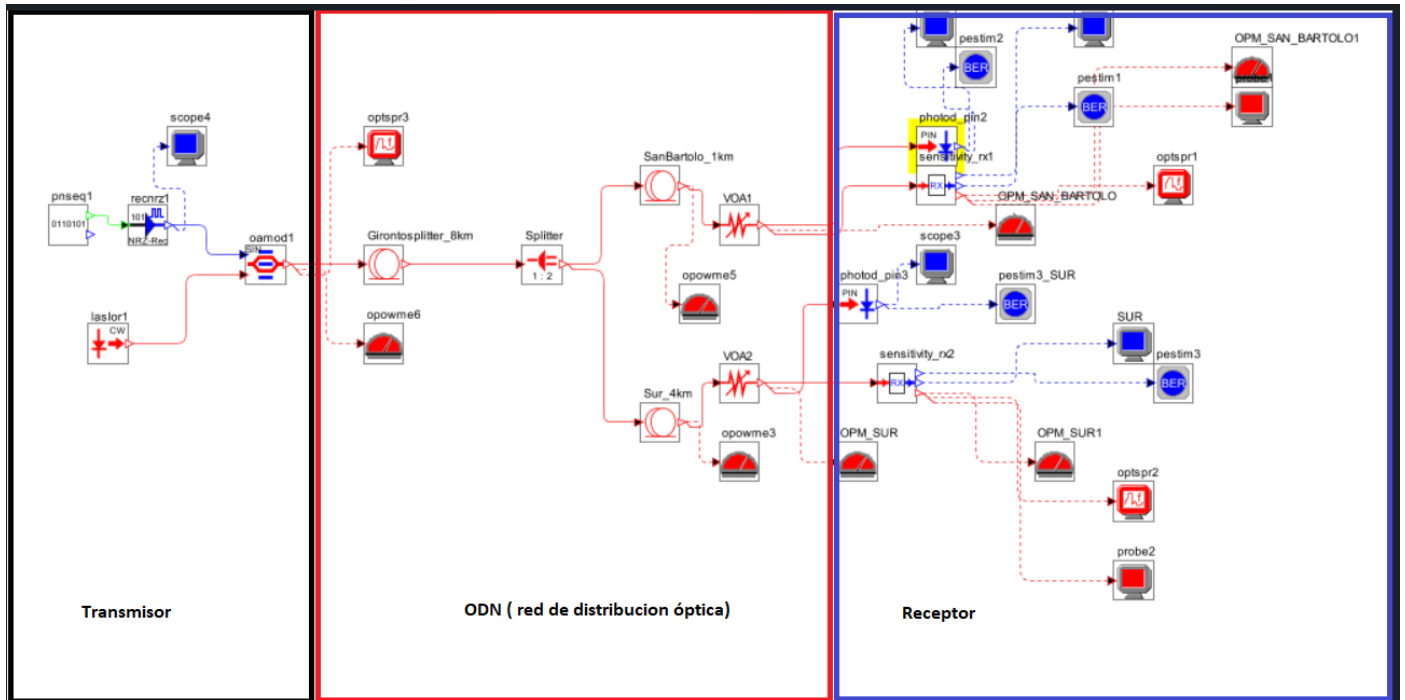


Figura 9. Representación de esquema con bloques Tx y Rx dentro del software Optisim.

En la Figura 9, se hace referencia a la simulación implementada para la transmisión y recepción de datos a través de Optisim. En la primera parte, se compone de un láser CW Lorentzian, el cual simula un láser de onda continua, con una potencia de transmisión de 1.99 mW, equivalente a 3 dBm. Además, incluye una fuente de datos a una longitud de onda de 1550 nm, equivalente a 193.1 THz, que simula un generador de señales lógicas pseudoaleatorias con una velocidad configurada de 10 Gb/s en secuencia aleatoria [4].

Otro componente para el transmisor es el NRZ Rectangular Driver, que cumple la función de simular un controlador eléctrico. Este componente realiza la conversión de la señal de entrada lógica a una señal eléctrica. Continuando con el proceso, se añadió un modulador de amplitud, el cual fue conectado a una fibra óptica G652D de 13.84 Km con una dispersión cromática de 17 ps/nm.Km [5].

La fibra óptica se conectó a un splitter 1:2, el cual produce una atenuación de 3.5 dB, calculada mediante la fórmula  $3.5 \log_2(2^1)$ . A continuación, se conectaron los dos tramos de fibra óptica de 1.17 Km y 4.34 Km, respectivamente. Finalmente, se conectaron los receptores de diodo PIN al final de cada tramo de fibra. Después de completar la configuración anterior, se incorporó un VOA, que facilita la generación de la carga de usuarios. Este proceso se llevó a cabo utilizando la Tabla 1, donde se incrementó progresivamente la atenuación en 3 dB para cada paso.

evaluar la carga máxima de usuarios de manera sistemática. [5]. El VOA desempeña un papel esencial al ajustar la potencia de la señal óptica de salida, ya que este simula la carga de usuarios, los cuales fueron evaluación en un rango de valores, permitiendo una evaluación cuidadosa de la capacidad del sistema para soportar cargas variables. La incorporación de este componente, junto con la variación progresiva de la potencia en la tabla, proporciona una metodología efectiva para determinar la capacidad máxima del sistema bajo diferentes condiciones de carga de usuarios. Este enfoque posibilita una evaluación exhaustiva de la robustez y rendimiento del sistema ante demandas cambiantes de carga.

El diagrama del ojo, cuando el nivel de atenuación es de 15 dB, muestra una apertura y amplitud deficientes, con un factor Q de 1.91, constituyendo así un indicador clave de la calidad de la transmisión óptica. Este indicador sugiere un rendimiento inicial sólido en términos de claridad y estabilidad de la señal. Sin embargo, a medida que la carga aumenta, el rendimiento disminuye gradualmente hasta llegar a un ojo cerrado a 15 dB. Este deterioro en la calidad de la señal puede atribuirse a la mayor atenuación, que afecta negativamente la capacidad del sistema para manejar eficientemente cargas variables. La disminución en la apertura del ojo y la amplitud de la señal a 15 dB indica una mayor susceptibilidad a errores de transmisión y una pérdida de calidad en la recepción de datos.

Para comprender completamente la dinámica del sistema frente a distintos niveles de atenuación, sería valioso llevar a cabo ejecuciones adicionales a diferentes valores de atenuación. Esto permitiría obtener una perspectiva más completa del comportamiento del sistema en diversas condiciones y proporcionaría información esencial para optimizar la capacidad y la fiabilidad de la transmisión óptica bajo cargas variables.

Además, sería relevante explorar posibles estrategias de mejora o ajustes en el diseño del sistema para mitigar los efectos negativos observados a niveles más altos de atenuación. Estas investigaciones adicionales contribuirían significativamente a la comprensión y optimización del rendimiento del sistema en entornos dinámicos y demandantes

### 2.3 Experimental

Mediante la utilización de los equipos de laboratorio, se ha logrado una descripción exhaustiva de la configuración del prototipo implementado para la transmisión y recepción de datos. En el transmisor, la red óptica se destaca por la inclusión de un láser continuamente ajustable (Continuously Tunable Laser - H01) con una potencia de transmisión de 3 dBm, equivalente a 1.99 mW. Este láser se conectó a una fibra óptica G652D de 20 km de distancia, seguido de un splitter óptico (1:2), posteriormente se añadió el VOA para simular la carga de usuarios antes de llegar al fotoreceptor de detección directa.

BERT el N4906B es un generador de patrones y detector de errores de alta velocidad con opciones avanzadas de análisis de señales. Su versatilidad y capacidad para probar diversas interfaces, ofreciendo un rendimiento preciso y rentable en pruebas de dispositivos de comunicación digital de alta velocidad. Este se configuró para la inyección de datos a 10Gb/s. se vinculó a un amplificador RF SHF115A energizado con 9 voltios, y 0.6A, alimentándose en sus pines 1 y 2 respectivamente [6]. El enlace óptico incluye una fibra Single Mode Fiber G652D, con una distancia de 20 Km, caracterizada por una dispersión de 17 ps/nm/Km y una atenuación de 0.2 dB/Km. Además de incluir el VOA con capacidad para variar la atenuación entre 1 y 33 dB, posibilitando la emulación de diversas potencias de recepción. Este componente resultó esencial para evaluar el BER en relación con la potencia recibida en el receptor.

En la parte receptora, el dispositivo se conectó al osciloscopio en tiempo real DSAV164A de 16 GHz y 4 canales analógicos. Este osciloscopio cuenta con una frecuencia de muestreo máxima de 80 GSa/s (2 canales) y 40 GSa/s (4 canales), lo que permite la captura de las señales I/Q. La combinación de estos elementos conforma un sistema óptico coherente avanzado diseñado para la transmisión y recepción de datos. La configuración detallada de este prototipo se logró mediante el uso de los equipos disponibles en el laboratorio.

### III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El presente estudio aborda un análisis detallado de la implementación y rendimiento de un sistema de transmisión de datos ópticos. A lo largo de esta investigación, se han llevado a cabo simulaciones y la implementación utilizando equipos de laboratorio especializados gracias a la Universidad Politécnica Salesiana. El enfoque principal se centra en evaluar la capacidad del sistema para manejar la carga de usuarios en diversas condiciones, destacando la influencia de componentes cruciales como el VOA.

En este estudio, se realizaron comparaciones entre la parte simulada y la implementada para obtener valores que permitieran evaluar el rendimiento del sistema en condiciones reales. Se explorarán los objetivos del análisis, incluyendo la evaluación del BER en relación con la potencia recibida, y se discutirá la relevancia de factores como el factor Q en la calidad de la señal. Los resultados obtenidos se presentarán en detalle, proporcionando una visión clara de la eficiencia del sistema en términos de capacidad de carga de usuarios y la influencia de la atenuación del VOA en la recepción de datos.

Este análisis arrojará luz sobre los límites operativos del sistema y proporcionará información valiosa para la optimización de su rendimiento en escenarios del mundo real. La comprensión detallada de la relación entre los diversos parámetros evaluados permitirá tomar decisiones informadas para mejorar la capacidad, fiabilidad y calidad de la transmisión óptica en entornos dinámicos y demandantes.



Figura 10. Diagrama del ojo con uso del VOA a 3dBm.

En la Figura 10 se presenta el diagrama del ojo resultante con el uso del VOA a 3 dB. Como se aprecia en la imagen, la carga de usuarios agregada por el VOA a 3 dB no presenta problemas significativos para la recepción de la transmisión. A medida que se incrementa la carga de usuarios, se observará cómo la relación BER versus la potencia recibida. Este comportamiento continuará hasta que la señal recibida sea inferior a la sensibilidad del receptor. En este punto, la señal se considerará como ruido, ya que su recepción es muy débil y no es posible decodificarla correctamente. Este fenómeno se refleja en la disminución de la calidad de la señal a medida que

se añade carga de usuarios, siendo fundamental para comprender los límites y la capacidad del sistema.

El análisis detallado de esta relación proporcionará información crucial sobre la robustez y la eficiencia del sistema frente a diferentes niveles de demanda de usuarios. Además, permitirá identificar el punto en el cual el sistema alcanza su capacidad máxima y cómo se ve afectado por el aumento de la carga. Estos resultados son esenciales para la toma de decisiones informadas en el diseño y la operación del sistema, contribuyendo a su optimización y rendimiento en situaciones del mundo real.



Figura 11. Diagrama del ojo con el uso del VOA a 15dBm.

En la Figura 11, se presenta el diagrama del ojo resultante al aplicar una atenuación de 15 dB con el VOA. Se observa claramente que la carga de usuario añadida por el VOA supera los límites del equipo, generando problemas significativos en la recepción de la señal. El gráfico de BER versus la potencia recibida muestra que ya no es posible identificar la secuencia binaria, evidenciando un ojo cerrado con un factor Q de 1.91. Es importante destacar que el valor del factor Q mínimo aceptable para fibra es de Q de 6.

Esta condición revela la incapacidad del sistema para manejar la carga de usuario adicional con la atenuación aplicada, resultando en una degradación significativa en la calidad de la señal. Este tipo de análisis es crucial para comprender los límites operativos del sistema y la necesidad de ajustar los parámetros para garantizar un rendimiento óptimo en condiciones de carga variadas.

La identificación temprana de estos límites críticos proporciona información valiosa para la optimización del sistema. Los resultados obtenidos en esta evaluación indican la necesidad de revisar y ajustar la configuración del sistema para mejorar su capacidad de manejo de cargas de usuario más elevadas, asegurando así la fiabilidad y eficiencia de la transmisión óptica en situaciones desafiantes.

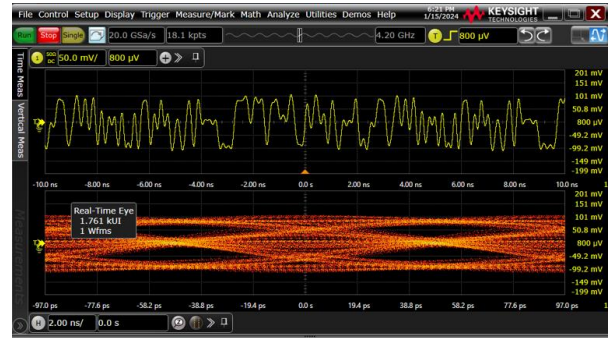


Figura 12. Diagrama del ojo con variación en el VOA

En la Figura 12, se puede apreciar que a medida que incrementa el valor de atenuación, el diagrama del ojo comienza a cerrarse, lo que resulta en la aparición de errores en la recepción de la señal. Este fenómeno se manifiesta claramente en la forma y la apertura del diagrama del ojo, donde un cierre gradual indica una mayor degradación en la calidad de la transmisión.

Este comportamiento revela la sensibilidad del sistema a la atenuación y destaca la importancia de mantener niveles de atenuación adecuados para garantizar una recepción precisa y confiable de la señal. La observación del diagrama del ojo proporciona una indicación visual de la integridad de la señal y es esencial para comprender cómo los cambios en la atenuación pueden afectar la calidad de la transmisión.

La presencia de errores en la recepción de la señal a medida que la atenuación aumenta resalta la necesidad de una cuidadosa gestión de los niveles de atenuación en el diseño y la operación del sistema. Este análisis visual del diagrama del ojo contribuye significativamente a la comprensión de los límites y la capacidad del sistema, proporcionando información crucial para ajustar los parámetros y optimizar el rendimiento del sistema en entornos dinámicos y variables.

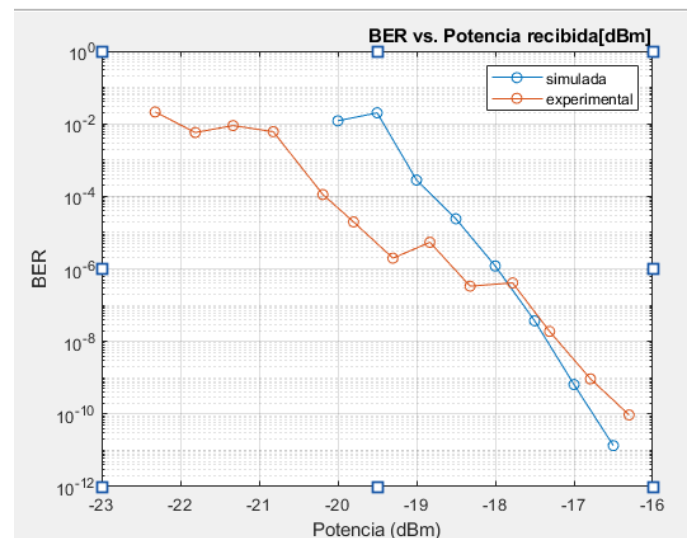


Figura 13. Grafica comparativa del BER vs Potencia recibida. Simulada vs Experimental (fuente Ronald Argüello).

Como se evidencia en la Figura 13, la fase inicial de la parte experimental revela un BER muy bueno con valores de  $10^{-9}$ . Tanto para la medición realizada en la parte experimental y simulada Este fenómeno se atribuye a la operación del equipo con valores de potencia extremadamente bajos, donde la sensibilidad del sistema en la recepción se ve comprometida al no cumplir con los requisitos mínimos y máximos necesarios para un funcionamiento correcto.

<i>BER experimental</i>	<i>potencia Rx experimental</i>	<i>BER simulada</i>	<i>potencia Rx simulada</i>
9.45E-11	-16.3	1.35E-11	-16.5
9.27E-10	-16.79	6.5E-10	-17
1.89E-08	-17.31	0.000000037	-17.5
0.000000411	-17.78	0.0000012	-18
0.000000334	-18.32	0.000024	-18.5
0.00000541	-18.83	0.00028	-19
0.00000197	-19.3	0.02	-19.5
0.0000197	-19.8	0.012	-20
0.000112	-20.19		
0.00603	-20.82		
0.00889	-21.33		
0.00573	-21.81		
0.0211	-22.32		

Tabla 1. Se muestra los datos obtenidos en los dos escenarios BER vs potencia de recepción.

Los datos proporcionados en la tabla 1, permiten realizar un análisis comparativo entre los resultados experimentales y los simulados del sistema, específicamente en términos BER y la potencia de recepción. Se observa una consistencia general entre los valores de BER experimental y simulado a diferentes niveles de potencia de recepción. Aunque existen pequeñas discrepancias en algunos puntos, la tendencia general sugiere una buena concordancia entre la simulación y la experimentación. En términos de potencia de recepción, se observa que los valores experimentales y simulados siguen una tendencia similar a medida que la potencia disminuye.

Las diferencias entre los valores experimental y simulado son más notables en los extremos de potencia más baja, pero en general, ambos conjuntos de datos siguen una trayectoria coherente. A niveles de potencia más bajos, tanto la BER experimental como la simulada tienden a aumentar, lo cual es un comportamiento esperado debido a la mayor sensibilidad del sistema a niveles de potencia más bajos. En niveles de potencia más altos, ambas tasas de error tienden a disminuir, indicando una mejora en la calidad de la transmisión. La comparación entre BER y potencia de recepción proporciona una validación útil del modelo de simulación utilizado. La coherencia general entre los resultados

respalda la efectividad del modelo en prever el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones. Las pequeñas discrepancias entre los valores experimentales y simulados podrían deberse a variaciones en las condiciones experimentales o a factores no considerados en el modelo de simulación.

La tendencia general sugiere que el modelo de simulación es una herramienta valiosa para comprender y anticipar el rendimiento del sistema en situaciones prácticas. La comparación entre los resultados experimentales y simulados proporciona una evaluación positiva del modelo de simulación, respaldando su utilidad para prever el comportamiento del sistema en condiciones de potencia variable. Este comportamiento subraya la importancia crítica de ajustar cuidadosamente los niveles de potencia para optimizar el rendimiento del sistema.

La capacidad de adaptarse a variaciones en la potencia de recepción se convierte en un aspecto esencial para garantizar la eficiencia y confiabilidad del sistema. Además, la necesidad de considerar tanto los resultados simulados como los experimentales resalta la complejidad del entorno operativo y subraya la importancia de un enfoque integral en la toma de decisiones para el diseño y la operación del sistema. Esta perspectiva holística proporciona información valiosa que contribuye a la eficiencia y confiabilidad del sistema, especialmente en entornos dinámicos y desafiantes.

La Figura 14 revela una destacada coincidencia entre los resultados simulados en Optsim y los datos recopilados experimentalmente en el diagrama del ojo. Este nivel de acuerdo entre las simulaciones y las observaciones prácticas es un indicador altamente satisfactorio, sugiriendo que el rendimiento del sistema es consistente tanto en el entorno simulado como en el experimental. Esta coherencia robusta refuerza la confianza en la utilidad de Optsim como una herramienta valiosa para anticipar de manera precisa el comportamiento del sistema antes de su implementación práctica. El hecho de que las simulaciones reflejen de manera fiel los resultados experimentales implica una validez y fiabilidad sustanciales en la capacidad predictiva de Optsim. Este respaldo de la coherencia entre la simulación y la realidad respalda la utilidad de Optsim como una herramienta confiable para evaluar y optimizar el rendimiento del sistema antes de la puesta en marcha. En última instancia, la confirmación de la consistencia entre los resultados simulados y experimentales subraya la eficacia de Optsim como una herramienta valiosa en el diseño y análisis de sistemas de transmisión óptica. Este enfoque integrado, combinando simulaciones y datos prácticos, fortalece la base para la toma de decisiones informadas en la implementación y mejora continua del sistema.

Otra herramienta que resultó de gran utilidad para comprender los conceptos teóricos fue Flex DCA. Esta herramienta no solo presenta de manera visual el diagrama del ojo, sino que también proporciona información detallada sobre los valores de potencia asociados. Además, Flex DCA cuenta con diversas funciones adicionales, entre ellas el cálculo del

factor Q, que ha sido especialmente valioso para nuestro análisis. La capacidad de obtener el diagrama del ojo y los valores de potencia de manera accesible, combinada con las herramientas adicionales, ha facilitado la interpretación y evaluación de la performance del sistema. La integración de estas herramientas ha permitido una comprensión más profunda

de los resultados obtenidos, proporcionando así una base sólida para la optimización continua del diseño y el rendimiento del sistema en diferentes escenarios y condiciones de operación.

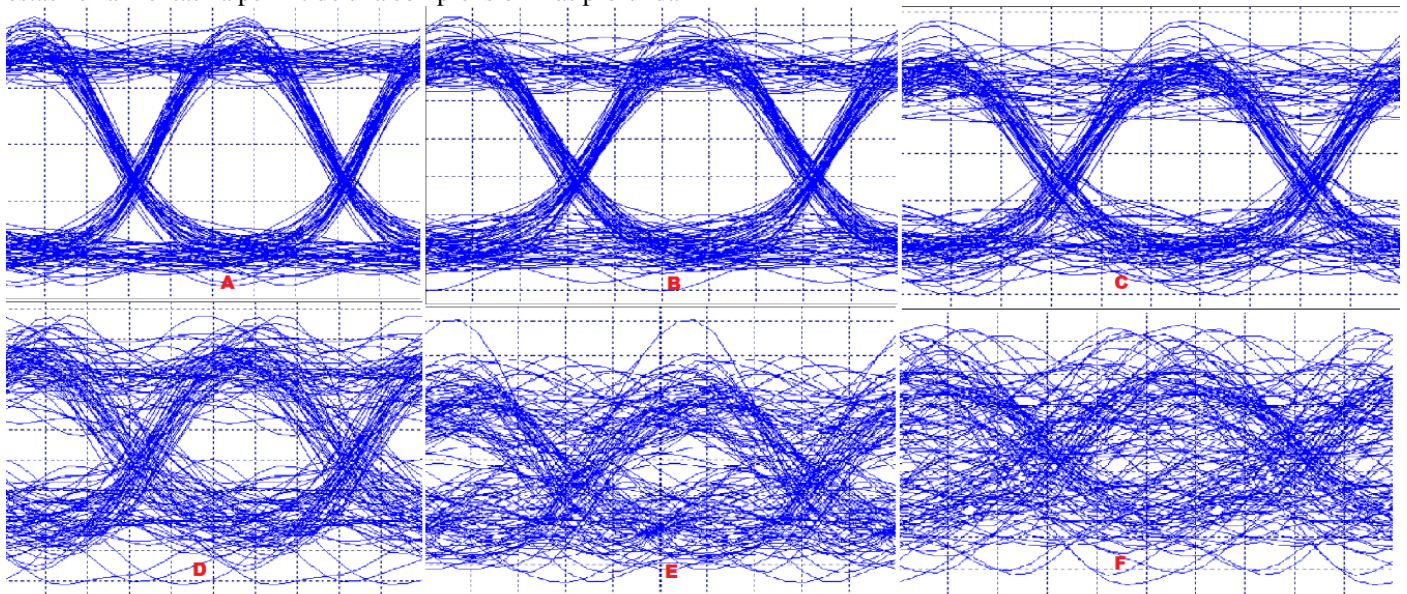


Figura 14. Se observa la degradación de diagrama del ojo a diferentes valores de atenuación, a través de Optsim, A(1dB),B(3dB),C(6dB),D(9dB),E(12dB),F(15dB).  
(Fuente Ronald Argüello)

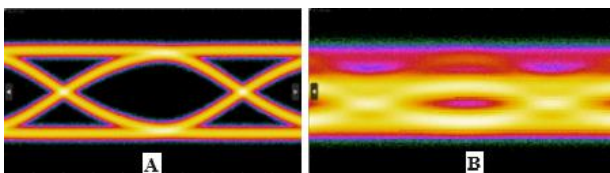


Figura 15. Se muestra el diagrama del ojo con estándar XGS-PON, A(sin atenuación),B(con atenuación).

Flex DCA se ha consolidado como una herramienta integral esencial en la caracterización y optimización de nuestro sistema, desempeñando un papel significativo en la comprensión detallada de su rendimiento en diversas condiciones. La Figura 15 presenta el diagrama del ojo obtenido mediante Flex DCA, aplicando una atenuación de 3dBm. Este análisis minucioso proporciona una visión clara de la calidad de la señal, destacando la apertura del ojo, niveles de ruido y otros parámetros esenciales que influyen en la transmisión óptica. Lo distintivo de Flex DCA no se limita a la visualización del diagrama del ojo; va más allá al ofrecer información técnica adicional, como la relación señal-ruido (SNR) y el margen de apertura del ojo. Estos datos técnicos proporcionan una evaluación profunda de la robustez de la transmisión, especialmente en condiciones específicas de atenuación, permitiendo así ajustar finamente los parámetros del sistema para lograr un rendimiento óptimo.

La capacidad de Flex DCA para proporcionar tanto datos cuantitativos como representaciones gráficas de manera simultánea lo posiciona como una herramienta excepcionalmente valiosa. No solo enriquece nuestra comprensión cualitativa de la señal, sino que también respalda la toma de decisiones informadas en la optimización continua del sistema, asegurando un rendimiento consistente y eficiente en una variedad de escenarios operativos.

#### IV. CONCLUSIONES

En conclusión, este proyecto ha proporcionado una comprensión integral del rendimiento del sistema de transmisión óptica, centrándose especialmente en la modulación, velocidad y la relación entre la Tasa de Error de Bits (BER) y la potencia recibida. Tanto la parte simulada como la experimental han arrojado resultados significativos que destacan, La modulación eficiente la selección y aplicación de la modulación han demostrado ser eficientes para la transmisión de datos. La consistencia entre los resultados simulados y experimentales sugiere que la modulación utilizada es robusta y capaz de mantener la integridad de la señal en diferentes condiciones.

La velocidad de transmisión de 10 Gbps/s ha mostrado un rendimiento sólido en ambas partes del proyecto. La capacidad

de mantener un rendimiento confiable a esta velocidad es esencial para aplicaciones que requieren transmisiones rápidas y eficientes.

La relación entre la Tasa de Error de Bits (BER) y la potencia recibida ha sido evaluada tanto en la simulación como en la parte experimental. Se observa una correlación coherente entre el aumento de la potencia recibida y la mejora en el BER, indicando una relación inversa esperada.

La concordancia entre los resultados obtenidos en las simulaciones (Optsim) y los datos experimentales fortalece la confianza en la utilidad de las herramientas de simulación para prever con precisión el comportamiento del sistema antes de la implementación práctica. La combinación de análisis simulado y experimental ha proporcionado una visión más completa y robusta del rendimiento del sistema. Esta aproximación integral es crucial para comprender los límites y las capacidades del sistema en condiciones variables.

Este proyecto resalta la importancia de la selección adecuada de la modulación, la velocidad de transmisión óptima y la comprensión detallada de la relación entre el BER y la potencia recibida para garantizar un rendimiento óptimo en sistemas de transmisión óptica. La consistencia entre los resultados simulados y experimentales valida la eficacia de las herramientas de simulación en la planificación y optimización del sistema. Estos hallazgos contribuyen al avance continuo en el diseño y operación eficiente de sistemas de comunicación óptica.

## V. REFERENCIAS

- [1] J. Crisp, Introduction to fiber optics, 3a ed, Amsterdam: Newnes, 2005.
- [2] C. D. y. C. J. S. DeCusatis, Fiber Optic Essentials, Elsevier Sci. Technol, 2010.
- [3] G. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Elsevier Sci. Technol. Books, 2012., 2012.
- [4] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems., Wiley Sons, Inc., 2021.
- [5] S. W. C. y. M. L. M. L. A. Coldren, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits., Wiley Sons, Inc., John, 2011., 2011.
- [6] E. B. H. y. B. Woodward, Fiber Optics Installer and Technician Guide, Wiley Sons, Inc., John, 2008., 2008.
- [7] J. Chesnoy, Undersea Fiber Communication Systems., Elsevier, 2016. , 2015.
- [8] L. Ibbotson., Fundamentals of Signal Transmission: Optical Fibre, Waveguides and Free Space., Technol. Books, 1998., 1998.