



**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**ANALISIS DE RENDIMIENTO DE TRANSMISION DE VIDEO EN UNA  
RED DE ACCESO PON.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de ingeniero en telecomunicaciones

**AUTORES: KEVIN CHRISTOPHER POZO GUERRERO**

**MATEO XAVIER LEIVA PILATAXI**

**TUTOR: JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO**

Quito -Ecuador

2025

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Christopher Pozo Guerrero con documento de identificación N° 1754662326 y Mateo Xavier Leiva Pilataxi con documento de identificación N° 1725505562;

manifestamos que:

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

Quito, 10 de febrero del año 2025

Atentamente



Kevin Christopher Pozo Guerrero  
1754662326



Mateo Xavier Leiva Pilataxi  
1725505562

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

Nosotros, Kevin Christopher Pozo Guerrero con documento de identificación N° 1754662326 y Mateo Xavier Leiva Pilataxi con documento de identificación N° 1725505562, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Análisis de rendimiento de transmisión de vídeo en una red de acceso PON”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,



Kevin Christopher Pozo Guerrero  
1754662326



Mateo Xavier Leiva Pilataxi  
1725505562

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johanna Berenice Arguero Tello con documento de identificación N° 1723989149, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANALISIS DE RENDIMIENTO DE TRANSMISION DE VIDEO EN UNA RED DE ACCESO PON, realizado por Kevin Christopher Pozo Guerrero con documento de identificación N° 1754662326 y por Mateo Xavier Leiva Piltaxi con documento de identificación N° 1725505562, 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, 10 de febrero del año 2025

Atentamente.



Ing. Johanna Berenice Arguero Tello MSc.

1723989149

## DEDICATORIA

A mi madre, por ser mi mayor inspiración y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Su amor, esfuerzo y sacrificio han sido fundamentales para que hoy alcance esta meta. A mi hermano, por su compañía y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. A mis amigos, por su comprensión, paciencia y por brindarme momentos de alegría en este camino desafiante. A mis profesores y mentores, quienes con su guía y conocimiento han contribuido enormemente a mi formación académica y profesional. Este logro no es solo mío, sino de todos los que, de una u otra forma, han estado presentes en este viaje.

Kevin Christopher Pozo Guerrero

A Dios, fuente de fortaleza, sabiduría y salud, por guiarme y darme el valor necesario para superar cada desafío a lo largo de este camino. A mis padres, Alberto Leiva y Elvia Pilataxi, quienes con su amor incondicional y apoyo constante me han enseñado que el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia son las verdaderas claves del éxito. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, porque siempre han sido mi mayor ejemplo. A mi hermano, Erwin Leiva, cuya inspiración me han recordado que no hay límites cuando uno sueña con el corazón. Gracias por ser un modelo de fortaleza y optimismo en mi vida. A Fernanda, por su confianza inquebrantable en mí y por convertirse en un pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme a no rendirme y por estar a mi lado en cada paso de este camino. Esta tesis está dedicada a todos ustedes, pilares de mi vida, cuyo amor y apoyo hicieron posible la realización de este sueño.

Mateo Xavier Leiva Pilataxi

## AGRADECIMIENTO

Nuestro profundo agradecimiento a Dios por bendecirme y guiarnos en cada aspecto e instante a lo largo de nuestra carrera profesional y vida personal.

A nuestros padres por su apoyo y su amor incondicional que contribuyeron para que lo difícil sea más fácil para culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

A nuestra tutora por brindarnos su ayuda incondicional como guía y orientación durante la realización de este proyecto de investigación.

A cada uno de los docentes de la carrera de Telecomunicaciones que fueron partícipes de este proceso ya sea de manera directa o indirecta, por haber contribuido en nuestra formación profesional compartiéndonos sus amplios y sabios conocimientos.

Kevin Christopher Pozo Guerrero

Mateo Xavier Leiva Pilataxi

# ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE TRANSMISIÓN DE VÍDEO EN UNA RED DE ACCESO PON.

## ANALYSIS OF VIDEO TRANSMISSION PERFORMANCE IN A PON ACCESS NETWORK.

Kevin Christopher Pozo Guerrero <sup>1</sup>, Mateo Xavier Leiva Pilataxi <sup>2</sup>, Johanna Berenice Arguero Tello <sup>3</sup>

### Resumen

Este artículo analiza el desempeño de la transmisión de video en tiempo real en redes de acceso basadas en tecnologías PON en un enlace de 20 km. Se utilizó el USRP 2944R para la transmisión de video y se evaluaron métricas como la tasa de errores por bloques (BLER). Se optimizaron parámetros como la potencia de transmisión (-5.89 dBm), el voltaje de polarización (3.2 V) y el esquema de modulación (QPSK), demostrando que estas configuraciones son adecuadas. Además, se eliminó componentes redundantes, como amplificadores innecesarios, mejorando significativamente la calidad del enlace, reduciendo errores y garantizando la estabilidad del sistema. Los resultados muestran que se alcanzó un BLER de  $10^{-3}$  con una potencia recibida aproximada de -34.48 dBm, proporcionando una solución más adecuada para aplicaciones de alta demanda, como la transmisión de video en redes PON.

**Palabras clave:** PON, USRP, EDFA, BLER, OFDM, BLER.

### Abstract

This article analyzes the performance of real-time video transmission in access networks based on PON technologies over a 20 km link. The USRP 2944R was used for video transmission and metrics such as block error rate (BLER) were evaluated. Parameters such as transmit power (-5.89 dBm), bias voltage (3.2 V) and modulation scheme (QPSK) were optimized, demonstrating that these configurations are suitable. In addition, redundant components, such as unnecessary amplifiers, were eliminated, significantly improving link quality, reducing errors and guaranteeing system stability. The results show that a BLER of  $10^{-3}$  was achieved with an approximate received power of -34.48 dBm, providing a more suitable solution for high-demand applications, such as video transmission in PON networks.

**Keywords:** PON, USRP, EDFA, BLER, OFDM, BLER.

---

<sup>1</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, e-mail: kevinp@hotmail.es

<sup>2</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, e-mail: mateoleiva1989@gmail.com

<sup>3</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, e-mail: bjarguero@gmail.com

## 1. Introducción

La transmisión de vídeo en redes ópticas pasivas (PON) enfrenta desafíos significativos debido al creciente consumo de contenido en alta resolución, especialmente en transmisiones de alta definición (HD) y ultra alta Definición (UHD). Estas aplicaciones requieren un ancho de banda considerable y un rendimiento óptimo en cuanto a latencia y calidad de servicio (QoS). Problemas como la fluctuación de la latencia y el uso ineficiente de los recursos de red afectan directamente la experiencia del usuario, lo que hace crucial el análisis de la configuración de transmisión de vídeo [1]. Para abordar estos desafíos, se ha propuesto el uso de tecnologías avanzadas como la modulación OFDM y el procesamiento digital de señales (DSP), que permiten mejorar la eficiencia espectral y reducir la latencia [2]. Sin embargo, identificar una configuración óptima del canal óptico que sigue siendo un reto debido a la necesidad de equilibrar entre eficiencia y calidad del servicio [3].

La creciente demanda de servicios de vídeo de alta definición en tiempo real y bajo demanda requiere una infraestructura de red que proporcione la mejor calidad de transmisión [4]. Las redes PON, si bien ofrecen ventajas en términos de capacidad y eficiencia, enfrentan serios desafíos en la gestión del ancho de banda y la tasa de error de bits (BLER, Block Error Rate) especialmente cuando varios usuarios acceden simultáneamente a servicios de vídeo intensivos en datos o aplicaciones críticas [5]. Uno de los principales problemas en las redes ópticas pasivas radica en la naturaleza de las redes PON, cuando varios usuarios compiten por el ancho de banda disponible, esto causa retrasos especialmente en aplicaciones de vídeo en tiempo real como transmisiones en vivo, videoconferencias y juegos en línea [6]. Son particularmente vulnerables a retrasos y fluctuaciones en el rendimiento, recientes estudios han explorado estrategias para mitigar este problema, como el uso de algoritmos avanzados de asignación dinámica de ancho de banda (DBA) y técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que mejoran la eficiencia en la gestión de tráfico y reducen la latencia en escenarios de alto tráfico de datos [7], [8]. La calidad del vídeo puede llegar a degradarse por varios factores alguno de ellos es la dispersión cromática esto se produce por la diferencia en la velocidad de propagación de las distintas longitudes de ondas a través de la fibra óptica afectando directamente a la velocidad de la transmisión de vídeo [2], la atenuación a largas distancias esto hace necesario el uso obligatorio de amplificadores y la interferencia de ruido óptico como el amplificador de emisión espontánea (ASE) que es generado por los amplificadores introduciendo errores en los datos de transmisión, estos parámetros afectan directamente al rendimiento del canal óptico [9], [10], [11].

La importancia de este artículo radica en la necesidad de determinar los parámetros de configuración óptimos del canal óptico para evitar una degradación significativa de la calidad del vídeo. Estas aplicaciones requieren un ancho de banda considerable y un rendimiento óptimo en cuanto a latencia y calidad de servicio (QoS). Problemas como la fluctuación de la latencia y el uso ineficiente de los recursos de red afectan directamente la experiencia del usuario, lo que hace crucial el análisis de la configuración de transmisión de vídeo [12].

## 2. Configuración Experimental

En la Figura 1 se observa la configuración de red PON para la transmisión de vídeo en tiempo real sobre 20 km de fibra óptica, usando radio definido por software (SDR), con el fin de evaluar las métricas de desempeño como BLER este parámetro representa la proporción de bloques de datos recibidos que contienen errores, con la finalidad de obtener los parámetros óptimos de configuración. Se detalla en cada uno de los 3 bloques como el transmisor, canal y receptor:

### 2.1. Transmisor

Se usó el USRP 2944-R que es un dispositivo de radio definido por software para la transmisión de la señal RF, usado para el envío de vídeo en tiempo real. Con una frecuencia de portadora de 1.5 GHz con una modulación QPSK con una tasa de modulación de 0.19, la señal LTE está diseñada para ofrecer velocidades de transmisión alta, mejorando la capacidad y menor latencia, así como el uso de tecnologías OFDM esto permite dividir la señal en múltiples subportadoras mejorando la eficiencia espectral [13]. La potencia de transmisión de la señal LTE es de -5.89 dBm que garantiza una buena transmisión de vídeo.

Posteriormente, la señal LTE generada por el USRP 2944-R fue enviada al amplificador (RF) con una ganancia de 29 dB, el cual fue energizado utilizando una fuente de poder externa con una configuración de 0.6 A y 12 V. La salida del amplificador (RF) se conectó a un modulador (Mach-Zehnder) a través de un conector SMA de alta calidad, diseñado para minimizar las pérdidas. El modulador óptico fue energizado a 0.05 A y un voltaje de polarización ( $V_{bias}$ ) de 3.9 V este voltaje fue determinado para garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos [14]. Adicionalmente, se utilizó un láser DFB QDFBLD 1150-20 tipo mariposa con una potencia de salida de 6 dBm con una longitud de onda de 1550 nm, fue conectado al modulador Mach-Zehnder mediante un conector FC, este láser proporcionó la señal óptica portadora necesaria para el proceso de modulación, una vez la señal modulada pasa al canal óptico.

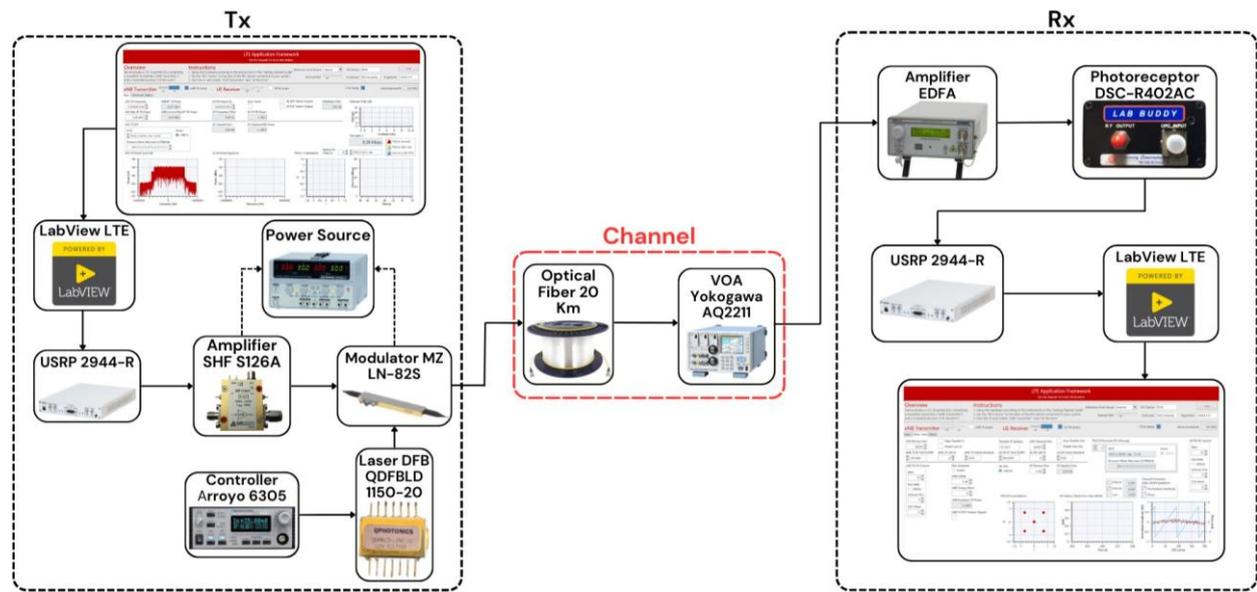


Figura 1. Red PON para transmisión y recepción de vídeo en tiempo real

## 2.2. Canal

La señal fue transmitida por una fibra óptica de 20 km, con una constante de atenuación de 0.22 dB/km que pertenece a la fibra monomodo SMF ITU T-G652, con una dispersión cromática de 17 ps/(nm\*km) a 1550 nm, lo cual lo hace ideal para sistemas de transmisión de alta capacidad. Se incorpora al enlace óptico un atenuador variable (VOA) con el fin de simular las condiciones de carga máxima del sistema. Con el objetivo de analizar el impacto que tendría el número de usuarios conectados al enlace. Este análisis permitirá identificar el límite operativo, asegurando la integridad del canal antes de llegar a su punto crítico en el cual se producirían muchas interferencias en la transmisión de vídeo.

## 2.3. Receptor

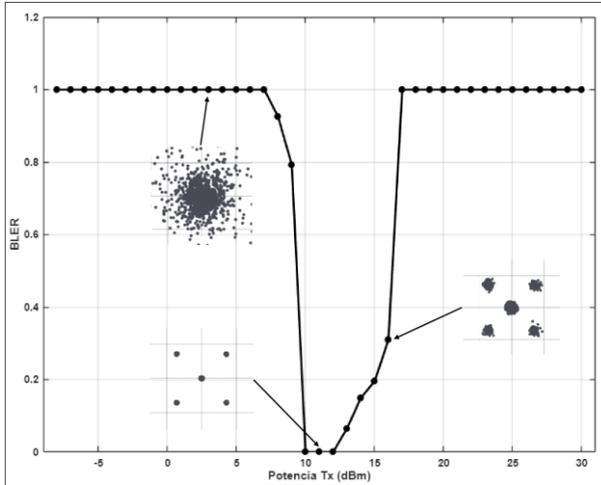
En el receptor óptico, se incorporó un amplificador óptico EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) con una corriente de 135.7 mA que permitió compensar las pérdidas de potencia que pueden ocurrir durante la transmisión de vídeo a largas distancias. La señal eléctrica fue recuperada por un fotodiodo PIN (DSC-r4O2AC), cuenta con una alta sensibilidad aproximadamente de -18 dBm y una responsividad de 0.8 A/W. La señal fue enviada al USRP 2944-R para el post procesamiento la señal LTE, demodulando y finalmente determinar las métricas de desempeño.

## 3. Resultados y análisis

En esta sección se describen los resultados obtenidos durante la implementación y evaluación de la red PON. El objetivo principal fue optimizar la transmisión de vídeo mediante el ajuste de parámetros críticos del sistema, como la potencia de transmisión y el voltaje de polarización del modulador MZ. Para garantizar la calidad y estabilidad de la señal en el enlace óptico, logrando configuraciones que maximizan el desempeño de la red.

Inicialmente, los parámetros del sistema se configuraron utilizando valores predeterminados comúnmente empleados en equipos de comunicaciones ópticas. En particular, el modulador MZ fue configurado con un voltaje de polarización de 3.9 V. Estos valores iniciales influyeron directamente en la potencia de transmisión generada por el USRP y sirvieron como punto de partida para evaluar el impacto de los ajustes realizados durante las pruebas.

Las pruebas realizadas tuvieron como objetivo identificar la potencia de transmisión óptima, tomando como referencia la tasa de errores de bloques (BLER) recibida en el USRP. Para lo cual, se analizaron en el rango de -8 dBm hasta 30 dBm. Durante estas pruebas, se capturaron múltiples muestras del BLER a través de la interfaz gráfica de LabVIEW LTE, permitiendo evaluar el desempeño del sistema en tiempo real. Los valores obtenidos fueron promediados para cada nivel de potencia, facilitando la comparación y la determinación de las configuraciones más adecuadas.



**Figura 2.** Potencia Tx vs BLER

En la Figura 2 se observa la gráfica de BLER vs Potencia de Tx, donde se muestra la curva de potencia, y se observa que la potencia óptima es de 11 dBm, que es el punto más bajo de la curva, ya que con dicho valor se registraba una tasa de errores de bloques de cero.

Una vez establecida la potencia de transmisión (Tx), se procedió a incrementar la atenuación aplicada mediante el atenuador óptico variable (VOA), con el objetivo de simular el impacto de un número máximo de usuarios transmitiendo video simultáneamente a través de la misma fibra óptica. No obstante, se observó un aumento en los errores de transmisión. Este incremento de errores resultó problemático, ya que los niveles de error no se mantenían constantes con la potencia establecida. Además, el funcionamiento continuo del sistema durante más de una hora provocaba una degradación drástica en la calidad del diagrama de constelaciones de la señal.

Se procedió a ajustar el valor del voltaje de polarización (bias) del modulador MZ con el propósito de garantizar una transmisión de video sin errores. Para lo cual, se utilizó el valor óptimo de operación especificado por el fabricante, que en el caso del modulador LN-82S es de 3.2 V. Este valor fue configurado en la fuente de alimentación conectada al modulador Mach-Zehnder (MZ), como se ilustra en la Figura 1.

$$V_{\text{USRP}} = \frac{V_{\pi}}{G_{\text{lineal}}} \quad (1)$$

Donde:

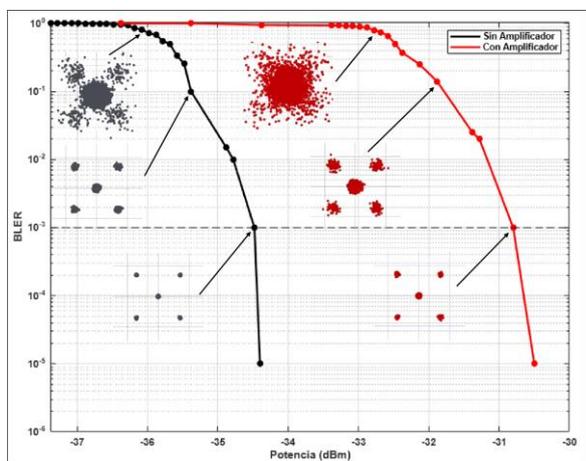
- $V_{\text{USRP}}$ : Es la tensión de salida del USRP.
- $V_{\pi}$ : Es el voltaje de semionda del modulador óptico.
- $G_{\text{lineal}}$ : Es la ganancia de tensión en escala lineal del amplificador RF utilizado en el sistema.

Para determinar la potencia de transmisión óptima RF, se utilizó un  $V_{\pi}$  de 3.2 V y una ganancia RF de 29 dB, correspondiente al valor del amplificador RF que fue conectado a la salida del USRP. El cuál tiene un equivalente a un factor de amplificación de tensión de 28.18. Utilizando la Ecuación 1, se calculó la tensión de salida del USRP dividiendo el voltaje de referencia entre este factor, obteniéndose un valor de 113.54 mV. Obteniendo una potencia de transmisión óptima de -5.89 dBm. Este procedimiento garantiza que la potencia esté adecuadamente ajustada para optimizar el desempeño de la red PON.

Con las configuraciones óptimas establecidas anteriormente, se evaluó el comportamiento de la red, sin embargo, se identificaron inconsistencias en los resultados obtenidos. Al variar el VOA aumentando la atenuación de la señal, se observó un comportamiento inusual, ya que la calidad de la señal mejoraba en lugar de deteriorarse como era esperado. Por otro lado, al incrementar la potencia de transmisión, el diagrama de constelaciones presentaba una inversión inesperada. Estas anomalías señalaron la necesidad de investigar y proponer una solución adecuada para garantizar la estabilidad y el desempeño del sistema.

Se identificó que el problema radicaba en la potencia excesiva generada por el fotodiodo. Esto se debía a que no se había considerado la presencia de un amplificador interno en el USRP, lo que resultó en una saturación de la señal. Esta condición provocaba un deterioro progresivo en la calidad de la señal a medida que el sistema permanecía en operación prolongada. Este fenómeno explicaba por qué las pruebas iniciales mostraban resultados satisfactorios, mientras que, con el tiempo, la calidad de la señal se degradaba de manera significativa.

Para mitigar este problema, se decidió eliminar el amplificador de la red PON, permitiendo así un ajuste más preciso de los niveles de potencia. Con esta modificación, se repitieron las pruebas de transmisión de video, registrando los valores obtenidos por el receptor. Los resultados se presentan en la Figura 3, donde se evidencia una mejora considerable en la calidad de la señal recibida.



**Figura 3.** Impacto del Amplificador en el Desempeño de la Red PON

En la Figura 3 se muestra la relación entre la potencia de recepción, y la tasa de errores de bloques (BLER). El análisis incluye dos escenarios: uno en el que el sistema opera sin amplificador (curva negra) y otro con el amplificador ubicado después del fotodiodo (curva roja). Donde se observa el impacto del uso del amplificador en la calidad de la señal.

La curva roja evidencia un comportamiento anómalo que se atribuye a la presencia del amplificador. Este amplificador introduce una saturación en la señal, afectando de manera directa la calidad del enlace y los niveles de error. A medida que se aumenta la potencia de transmisión, la saturación ocasiona que la BLER permanezca en niveles altos incluso en condiciones que, sin amplificación, deberían garantizar una transmisión casi sin errores.

Al analizar la gráfica correspondiente a la red PON sin el amplificador, se observa una mejora significativa en comparación con la gráfica que incluye el amplificador. Se adopta un valor de referencia para el BLER de  $10^{-3}$  con el fin de comparar las dos curvas [15]. Los resultados muestran que la curva con amplificador alcanza este nivel de BLER con una potencia aproximada de  $-30.8$  dBm, mientras que la curva sin amplificador lo alcanza con una potencia cercana a  $-34.48$  dBm. Esta diferencia representa una penalización de aproximadamente  $3.68$  dB, lo que evidencia que la eliminación del amplificador después del fotodiodo optimiza de manera significativa el desempeño del sistema.

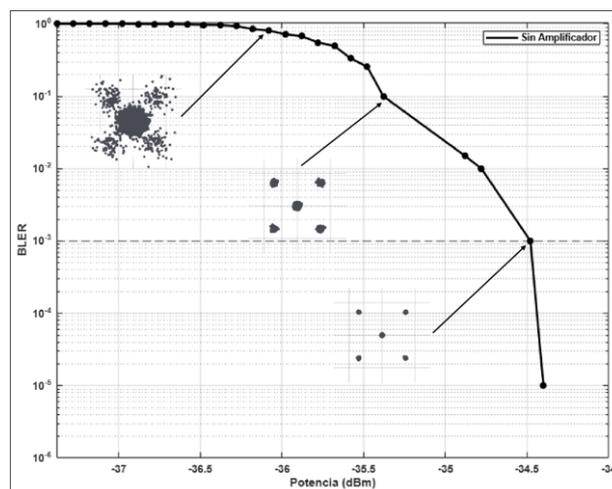
Con potencias cercanas a  $-37$  dBm, se observa que el sistema opera en un estado saturado, con una BLER constante cercana a 1. Este comportamiento indica que los errores dominan completamente la transmisión, debido a que la amplificación excesiva degrada la señal

desde su origen.

Conforme la potencia se incrementa, la curva muestra una ligera reducción en la BLER, pero los valores permanecen significativamente altos en comparación con el escenario sin amplificador. Este comportamiento refleja cómo la saturación del amplificador afecta el sistema, limitando su capacidad para procesar señales con niveles de potencia más altos.

Además, los diagramas de constelación insertados en este rango corroboran la distorsión de la señal. En potencias moderadas, la constelación comienza a separarse ligeramente, pero los puntos aún están dispersos, lo que indica un alto nivel de errores.

Al trabajar con potencias mayores a  $-33$  dBm, el BLER comienza a disminuir significativamente, acercándose a 0. Esto puede interpretarse como un efecto de sobrecompensación de la saturación inicial, en donde los niveles de potencia logran superar parcialmente los efectos negativos del amplificador.



**Figura 4.** Desempeño de la Red PON sin Amplificador

La Figura 4 ilustra el desempeño de un sistema de transmisión digital en una red PON (Passive Optical Network) en el contexto de una señal QPSK (modulación por desplazamiento de fase). En este caso, se presenta exclusivamente el análisis del sistema operando sin amplificador. En donde la curva muestra un comportamiento predecible y esperado en un sistema sin amplificador, donde el desempeño mejora de manera consistente con el incremento de la potencia.

Con potencias cercanas a  $-37$  dBm el BLER se mantiene constante en un valor próximo a  $10^0$ . Esto indica que la transmisión está dominada por errores debido a que la señal recibida es insuficiente para superar los niveles de ruido y garantizar una correcta

demodulación. Demostrado por los puntos de la constelación, que están distribuidos de manera aleatoria y densamente dispersos alrededor del centro, lo que evidencia una alta probabilidad de error y una pobre identificación de los símbolos transmitidos.

Dentro del rango de las potencias aproximado de -36 y -34.5 dBm la potencia de transmisión aumenta, en donde la curva comienza a descender de manera pronunciada. Este comportamiento refleja una mejora significativa, permitiendo al sistema demodular los bloques de datos con mayor precisión. En esta región, los puntos comienzan a agruparse alrededor de las posiciones ideales de la constelación QPSK. Sin embargo, aún existe una leve dispersión, lo que indica que los errores no han sido eliminados completamente.

Con potencias superiores a -34.48 dBm el BLER desciende rápidamente hacia 0, indicando que prácticamente todos los bloques son transmitidos y demodulados correctamente. Este comportamiento se estabiliza a potencias menores o igual a -34.38 dBm, donde el sistema alcanza un desempeño óptimo. En donde los puntos están perfectamente alineados con las posiciones ideales de la constelación, lo que demuestra una transmisión libre de errores y una excelente identificación de los símbolos.

El sistema implementado demostró un rendimiento superior al no incluir un amplificador conectado después del fotodiodo, logrando alcanzar el BLER objetivo de  $10^{-3}$  con una potencia recibida de aproximadamente -34.71 dBm, cumpliendo con los criterios de rendimiento especificados. Este desempeño representa una mejora en comparación con sistemas implementados con modulaciones 4QAM y 16QAM, en los cuales la potencia recibida necesaria para alcanzar un BER de  $10^{-3}$  es de aproximadamente -29 dBm [15]. Estos resultados evidencian que el sistema sin amplificador requiere una menor potencia para alcanzar el mismo nivel de desempeño, con una reducción de potencia significativa a -34.48 dBm, reflejando una mejora sustancial en la eficiencia general del enlace óptico, proporcionando una solución más adecuada para aplicaciones de alta demanda, como la transmisión de video en redes PON.

## 4. Conclusiones

Se transmitió video en tiempo real usando los USRP 2944-R en redes ópticas pasivas (PON) el cual ofrece una solución eficiente para la transmisión de video, donde se obtuvo los parámetros óptimos del sistema. Los resultados demostraron que una potencia de transmisión de -5.89 dBm asegura una tasa de error del

BLER de cero, garantizando una transmisión sin errores. Además es importante mantener un voltaje de polarización óptima del modulador Mach-Zender en donde se estableció un voltaje de Bias de 3.2 V logrando estabilidad en la señal. La eliminación de un amplificador redundante en la salida del fotodiodo redujo la saturación de la señal ya que el USRP en su sistema ya cuenta con una etapa de amplificación, mejorando la calidad del enlace en aproximadamente 3.68 dB. Estos ajustes demuestran que una configuración adecuada y la gestión precisa de recursos permiten mantener un alto rendimiento en redes PON, incluso en escenario de alta demanda, adaptándose a las exigencias de aplicaciones de videoconferencia y transmisión de video en alta definición,

Los resultados muestran que se alcanzó un BLER de  $10^{-3}$  con una potencia recibida aproximada de -34.48 dBm., lo que demuestra un rendimiento óptimo del sistema tras la eliminación del amplificador conectado al fotodiodo. Esto evidencia la eficacia de las configuraciones realizadas, destacando la capacidad del sistema para operar eficientemente en condiciones de baja potencia, optimizando así el enlace óptico en la red PON diseñada.

## Referencias

- [1] J. Yu, O. Akanbi, Y. Luo, L. Zong, T. Wang, Z. Jia, and G. K. Chang, "Real-time investigation of transmission latency of standard 4k and virtual reality 4k videos in pon," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 325–328, 2020.
- [2] D. Kakati and R. K. Sonkar, "Performance of dsp-assisted gray-coded dp-16-qam nyquist-dwdm transceiver for high-speed optical interconnects," *Photonic Network Communications*, vol. 43, pp. 412–421, 2022.
- [3] A. H. Ali, H. J. Alhamdane, and B. S. Hassen, "A study of wdm-pon for ultra-hd video streaming and video-on-demand services," *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, vol. 12, no. 10, pp. 7350–7354, 2022.
- [4] M. H. Hussain, S. Raza, and M. A. Imran, "Next-generation passive optical networks (ng-pon2) for gigabit broadband access," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 22 645–22 654, 2019.
- [5] L. Xie, J. Liu, Y. Wang, and Z. Wei, "Dynamic bandwidth allocation in gpon with the use of multiple priorities," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 16, no. 3, pp. 1155–1167, September 2019.

- [6] M. I. Cho, J. H. Kim, and J. W. Choi, "The impact of wavelength division multiplexing (wdm) in pon for high-capacity data transmission," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 5, pp. 342–349, May 2020.
- [7] H. X. J. Wang and Y. Zhang, "A dynamic bandwidth allocation algorithm for delay-sensitive services in epons," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 1833–1836, 2021.
- [8] S. H. I. M. S. Rahman and A. Z. Mahmud, "Qos-aware scheduling in hybrid tdm/wdm-pon for real-time applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120 153–120 166, 2021.
- [9] Y. Zhang, Q. Li, and Z. Zhang, "High-performance pon for future internet services: Challenges and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 381–403, 2020.
- [10] J. Yu, O. Akanbi, Y. Luo, L. Zong, T. Wang, Z. Jia, and G. K. Chang, "Real-time investigation of transmission latency of standard 4k and virtual reality 4k videos in pon," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 325–328, 2020.
- [11] A. H. Ali, H. J. Alhamdane, and B. S. Hassen, "A study of wdm-pon for ultra-hd video streaming and video-on-demand services," *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, vol. 12, no. 10, pp. 7350–7354, 2022.
- [12] A. A. El-Mallawany, R. M. Al-Dosari, and A. R. Al-Dweik, "5g integration with pons: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223 345–223 361, 2020.
- [13] B. Vique, C. Bayas, M. Escobar, A. Infante, and A. Proaño, "Comparación de modelos de propagación de radio en cinco celdas de cobertura lte de riobamba," *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 34, no. 3, pp. 171–190, 2022. [Online]. Available: <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/947>
- [14] M. Dávila, J. Camacho, B. Arguero, G. V. Arévalo, and C. Tipantuña, "Analysis of the optimal bias voltage for an optical fronthauling modulator in a rof system," in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ECTM)*, 2023, pp. 1–5.
- [15] J. B. Arguero Tello, M. N. Tipán, G. V. Arévalo, and C. Tipantuña, "Analysis of conventional direct detection and coherent optical receivers in optical access networks," *Engineering Proceedings*, vol. 77, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-4591/77/1/30>