

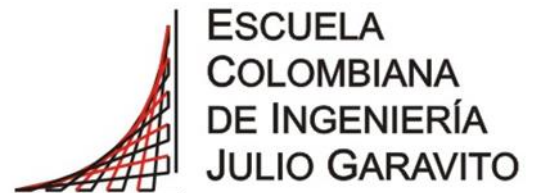
Maestría en Ingeniería Electrónica

**Diseño de una Red de Fibra Óptica WDM PON
de Bajo Costo**

Autor:

Iván Camilo Nieto Sánchez

Bogotá, D.C. 22 de julio de 2019



Diseño de una Red de Fibra Óptica WDM PON de Bajo Costo

**Tesis para optar al título de magister en Ingeniería Electrónica
con énfasis en Telecomunicaciones.**

PhD. Ing. Gustavo Puerto Leguizamón
Director del trabajo de grado

Jurados:

Autor:
Iván Camilo Nieto Sánchez

Bogotá, D.C. 22 de julio del 2019

La tesis de maestría titulada “Diseño de una Red de Fibra Óptica WDM PON de Bajo Costo” presentada por Iván Camilo Nieto Sánchez cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Electrónica con énfasis en Telecomunicaciones.

Jurado 1

Jurado 2

PhD. Ing. Gustavo Adolfo Puerto

Bogotá, 22 de julio de 2019

Dedicatoria

A mi familia que siempre me ha apoyado en cada etapa de mi vida.

Iván Camilo Nieto Sánchez

Agradecimientos

Al ingeniero Gustavo Adolfo Puerto por su asesoría en el desarrollo de este proyecto de grado y a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por sus aportes en este proceso de formación.

Iván Camilo Nieto Sánchez

RESUMEN

La fibra óptica surgió como uno de los medios más eficientes para transportar grandes volúmenes de información en sus inicios (década del 50), haciendo de ésta, una opción muy atractiva por su aumento en los anchos de banda, distancia alcanzada, además de otras características como mejoramiento en la seguridad de la información y escalabilidad, velocidades de 40 Gbps o mayores, entre otras.

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica se han consolidado por la aplicación de la técnica de multiplexación por división de longitud de onda en el segmento de red de acceso (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks*) que permite enviar información con diferentes longitudes de onda – denominadas con la letra λ – dentro del mismo hilo de fibra. A esta solución se le conoce como redes WDM PON.

Por otra parte, las investigaciones realizadas en redes WDM están fundamentadas en la disminución de costos ya sea de instalación y/o mantenimiento de la infraestructura de telecomunicaciones de fibra óptica, por lo tanto a través de este proyecto se planteó el diseño de una red WDM PON que envíe diversas señales ópticas a diferentes longitudes de onda, donde su principal característica es el costo reducido en el sistema de generación de señales multi-portadora.

Para ello fue necesario realizar una revisión documental para establecer las tendencias en redes WDM PON en términos de eficiencia, tecnología involucrada y soluciones existentes; posteriormente se establecieron las técnicas de particionado espectral y sus características de acuerdo a las fuentes ópticas. Una vez establecido el contexto teórico se procedió a diseñar el modelo de la red teniendo en cuenta lo establecido en el estándar GPON (ITU-T G.984.1) para finalmente realizar una validación comparando los resultados con un diseño de red existente.

En conclusión se estableció que es posible implementar una red WDM PON utilizando elementos pasivos y alcanzando las distancias adecuadas y con factores de calidad establecidos en el estándar antes mencionado.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	6
Índice de Tablas	10
Índice de figuras	11
Capítulo I: Descripción del proyecto	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 El proyecto	14
1.2.1 Título del proyecto.....	14
1.2.2 Descripción del problema.....	14
1.3 Objetivos del proyecto.....	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
Capítulo II: Marco Teórico	17
2.1 Definición de redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks).....	17
2.2 Dispersión cromática.....	17
2.3 Wavelength Division Multiplexing.....	18
2.4 Los estándares PON	18
2.4.1 Asynchronous PON (APON)	19
2.4.2 Broadband PON (BPON)	19
2.4.3 Ethernet PON (EPON)	20
2.4.4 10G-EPON.....	20
2.4.5 G-PON	20
2.4.5.1 Longitudes de onda de operación	21
2.4.5.2 Tasa de Bits Nominal	22
2.4.5.3 Distribución de canales (Splitt).....	22
2.4.5.4 Asignación de banda dinámica.....	23
2.4.5.5 Presupuesto de potencia.....	23
2.4.6 OFDM PON.....	24
2.4.7 Redes de Nueva Generación NG-PON	24
2.5 Fuentes ópticas	25
2.5.1 Láser	25
2.5.2 Light Emitting Diode – LED	26

2.6	Arrayed Waveguide Gratings (AWG).....	26
2.6.1	Características de AWG:.....	27
2.6.2	Modelo matemático de funcionamiento	28
2.6.3	Interacción con fuentes de banda ancha	30
Capítulo III: Metodología del Proyecto.....		31
3.1	Estado del arte	32
3.2	Particionado espectral.....	36
3.3	Diseño de la red	40
3.4	Validación de resultados	40
Capítulo IV: Diseño de la Red		42
4.1	Parámetros a evaluar en redes GPON	42
4.1.1	Parámetros de entrada	42
4.1.2	Parámetros de Salida.....	44
4.1.3	Tablas con los parámetros a evaluar	46
4.2	Elección de la herramienta para realizar la simulación de la red propuesta	46
4.3	Primeras pruebas en el software usando el dispositivo AWG.....	47
4.3.1	Método para el análisis de los resultados	49
4.3.2	Variaciones del dispositivo AWG	50
4.3.3	Mediciones del parámetro BER (Bit Error Rate)	51
4.4	Diseño de red propuesta	54
4.4.1	Esquema general de la red propuesta	55
4.4.2	Oficina central (C.O)	56
4.4.3	Transporte.....	58
4.4.4	Distribución	59
Capítulo V: Resultados y Discusión.....		61
5.1	Análisis de la red por canal	61
5.2	Análisis general de la red y evaluación de las variables de acuerdo a los parámetros establecidos	65
5.3	Comparación con el estándar GPON.....	66
5.4	Variación de parámetros de entrada para establecer el alcance de la red	68
5.5	Evaluación de costos	72
Conclusiones y Recomendaciones.....		75
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Recomendaciones finales	77

6.2.1	Fibra Óptica Monomodo (SMF):.....	77
6.2.2	Particionado espectral utilizando un AWG	77
6.2.3	Configuración del fotodetector:	78

En cuanto al proceso realizado en la distribución, es decir en las ONT, es necesario ubicar un filtro para regenerar la señal de tal forma que el resultado se ajuste a los valores establecidos de Q y BER, cumpliendo lo establecido en las recomendaciones del estándar GPON.

Anexo 1. Protocolo para realizar la medición de los parámetros en la red WDM PON	82
Anexo 2. Registro de pruebas realizadas en la red WDM PON	82
Anexo 3. Registro de pruebas realizadas en una red GPON	82
Anexo 4. Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit Rate, Ancho de Línea y Distancia de la Fibra Óptica para evaluar BER, Factor de Calidad Q y Potencia	82

Índice de Tablas

Tabla 1. Tasas de Bit del estándar GPON	22
Tabla 2. Parámetros de entrada de la red	46
Tabla 3. Parámetros a evaluar en la red propuesta	46
Tabla 4. Características de configuración de un AWG	56
Tabla 5. Configuración del AWG como multiplexor	58
Tabla 6. Distribución de usuarios por canal.....	61
Tabla 7. Frecuencias de la división del espectro del LED y sus potencias	62
Tabla 8. Resultados de potencia en usuarios de la red.....	64
Tabla 9. Comparación de factor Q y BER en la red WDM PON y GPON	67
Tabla 10. Parámetros a cambiar en el diseño propuesto	68
Tabla 11. Costos de la red GPON	72
Tabla 12. Costos de la red WDM PON usando una fuente de espectro amplio y un AWG para realizar el particionado espectral.....	73
Tabla 13. Parámetros de la fibra en el diseño	77
Tabla 14. Configuración del AWG para el particionado espectral	77
Tabla 15. Configuración del fotodetector	78

Índice de figuras

Figura 1. Arquitectura estándar GPON.....	21
Figura 2. Pérdidas por desfase.....	28
Figura 3. Descripción característica de un AWG.....	29
Figura 4. Red WDM PON implementada usando un receptor auto homodino.....	32
Figura 5. Diagrama esquemático de la red utilizando un sistema de ultra banda ancha sobre fibra.....	33
Figura 6. Esquema de la red WDM-MDM PON utilizando detección auto-homodina.....	34
Figura 7. Arquitectura PON condensadas en un cluster.....	34
Figura 8. Topología de red propuesta para la simulación.....	35
Figura 9. Red de acceso de bajo costo con particionado espectral.....	36
Figura 10. Penalización requerida para mantener un BER de 10^{-9}	37
Figura 11. Demultiplexor usado para particionar el espectro de una fuente de banda ancha.....	38
Figura 12. Particionado espectral usando filtros Fabry-Perot.....	39
Figura 13. Particionado espectral usando AWGs.....	39
Figura 14. Relación de factor Q vs VER.....	45
Figura 15. Primera prueba con el simulador.....	48
Figura 16. Respuesta del ejercicio mostrando las frecuencias centrales.....	49
Figura 17. Esquema con AWG como multiplexor y demultiplexor.....	50
Figura 18. Resultado salida 4 del AWG Demux.....	51
Figura 19. Señales moduladas, demoduladas y observadas en diagrama de ojo.....	52
Figura 20. Señales moduladas y posteriormente multiplexada por el AWG.....	52
Figura 21. Respuesta de la simulación con el analizador de diagrama de ojo.....	53
Figura 22. Diseño general de la red.....	55
Figura 23. Diseño detallado de la red.....	56
Figura 24. Esquema de un OLT.....	57
Figura 25. Filtro de Bessel después de la OLT.....	58
Figura 26. Etapa de transporte - Hilo de fibra óptica.....	59
Figura 27. Distribución de uno de los canales en ocho (8) usuarios.....	60
Figura 28. Proceso de particionado y filtrado previo a la transmisión por la fibra óptica.....	63
Figura 29. Proceso de multiplexación y demultiplexación de 16 canales.....	63
Figura 30. Estructura seguida en la simulación.....	69

Figura 31. Variación de Q en la respuesta del canal 1 de $\lambda 2$ según la tasa de transmisión	70
Figura 32. Variación de potencia en la respuesta del canal 1 de $\lambda 2$ según la tasa de transmisión	70
Figura 33. Gráfica factor Q vs. Distancia	71
Figura 34. Gráfica de potencia vs. Distancia F.O.	71

Capítulo I

Descripción del proyecto

1.1 Introducción

La fibra óptica es el medio más eficiente para el transporte de información debido a sus altas prestaciones en términos de ancho de banda, seguridad, entre otros. Desde su creación en la década del 50 (Singh, 2000), se ha convertido en una opción muy atractiva por su aumento en los anchos de banda (Chung, 2013), distancia alcanzada, además de otras características como mejoramiento en la seguridad de la información y escalabilidad, velocidades de 40 Gbps o mayores, entre otras (Chen et al., 2015). Sin embargo, uno de los aspectos más importantes en la actualidad en cuanto al diseño de una red de fibra óptica es el uso eficiente del espectro para la generación de portadoras ópticas y la disminución de costos de la implementación.

Actualmente, los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica se encuentran en la búsqueda de oportunidades de optimizar su funcionamiento sin hacer grandes cambios en su infraestructura física; en razón a esto surgió un método para enviar información con diferentes longitudes de onda – denominadas con la letra λ – dentro del mismo hilo de fibra; a esto se le conoce como *Redes Ópticas Pasivas con Multiplexación por División de Longitud de Onda* o *Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks* (WDM PON) (Chung, 2013)(Chen et al., 2015). Es importante establecer que el principio básico de una red PON conecta un único hilo de fibra desde un Terminal de Línea Óptica (OLT) a múltiples unidades de red óptica (es decir usuarios finales).

Por otra parte, este tipo de redes de fibra óptica se clasifican en *Redes de Transporte*, que son troncales que llevan información a largas distancias – hasta 100 km sin regeneración – como el empleado en los cables interoceánicos que unen los continentes, logrando velocidades de hasta 100 Gb/s (Agrawal G.P, 2002), y las *Redes de Acceso*, a través de las cuales se envía información desde la Oficina Central del Distribuidor (ISP) hasta el usuario final, también conocido como *Fiber to the Home* (FTTH). Inicialmente las redes de acceso con fibra óptica fueron concebidas para compañías con altos volúmenes de datos y

altas necesidades de transmisión; sin embargo la convergencia de servicios en el hogar (HDTV, voz y datos) a través de un único medio, ha potenciado este tipo de soluciones.

Respecto al hardware involucrado, los elementos en este tipo de redes son un aspecto importante en el diseño de redes de bajo costo, puesto que se clasifican en elementos activos (requieren de equipos electrónicos y una alimentación externa) y pasivos (su alimentación viene de la misma señal transmitida). De acuerdo al tipo escogido se obtiene un impacto desde el punto de vista presupuestal (Singh, 2000). En cuanto a las fuentes ópticas, es necesario utilizar fuentes de luz. Por ejemplo, un láser (dispositivo activo) emite un haz de luz que se transmite dentro de la fibra y alcanza una tasa de bits de 10 Gb/s y potencias de aproximadamente 100 mW, pero éstos – dadas sus características físicas – tienen un espectro de frecuencia angosto (unos cuantos micrómetros (Singh, 2000)), elevando los costos tanto de implementación como de operación. Por otra parte, otro inconveniente es la conversión de las señales del dominio óptico al dominio eléctrico, debido a que actualmente se realiza una transducción que aumenta los tiempos de operación.

Es así como se evidencia que las fuentes ópticas de ancho de banda amplio como los LEDs, en conjunto con dispositivos pasivos como filtros, multiplexores y demultiplexores, permiten configurar una red de acceso WDM PON con características reducidas de costos, aplicando el particionado espectral como eje fundamental de diseño.

1.2 El proyecto

1.2.1 Título del proyecto

DISEÑO DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA WDM PON DE BAJO COSTO

1.2.2 Descripción del problema

En la actualidad, el incremento de las necesidades de la convergencia de servicios a través de un mismo medio y con índices de calidad alto, ha ubicado a la fibra óptica como una solución adecuada que satisface los requerimientos actuales; por ende las investigaciones

realizadas en redes WDM PON están fundamentadas en la necesidad de aumento de capacidad requerido en el segmento de acceso. En este contexto, una red WDM PON distribuye un número determinado de canales ópticos, diferenciándose de los sistemas comerciales tradicionales desplegados como PON donde la oficina central (CO) cuenta con un número determinado de fuentes ópticas tipo láser con longitudes de onda determinadas, las cuales son recibidas por los usuarios finales, sin embargo la complejidad de tener un láser para cada longitud de onda se convierte en un factor que eleva los costos de operación. Por esta razón es importante definir un modelo de red que transporte de varias longitudes de onda y que no penalice en términos de costo el despliegue de la red por el hecho de tener un sistema multicanal.

Otro aspecto importante a tener en cuenta son los costos de instalación y/o mantenimiento de la infraestructura de telecomunicaciones de fibra óptica sin sacrificar potencia, involucrar elementos activos o hacer de ésta vulnerable a situaciones como dispersión cromática, atenuación, entre otras. En razón a lo anterior, este proyecto planteó el diseño de una red WDM PON utilizando una fuente óptica de espectro amplio que permita dividir su señal en diferentes longitudes de onda para transmitirse en diferentes canales, donde su principal característica serán los costos reducidos tanto en el sistema de generación de señales multi-portadoras, así como el uso de elementos pasivos para el desarrollo de este tipo de soluciones que a día de hoy poco se han implementado.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una red de acceso de fibra óptica WDM PON de bajo costo mediante el uso de técnicas de particionado espectral.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión documental sobre las redes de acceso WDM PON para delimitando el contexto del proyecto e identificando los componentes ópticos que conforman una red de acceso óptico, así como los casos de éxito existentes en la actualidad.
- Evaluar las técnicas de particionado espectral y sus características para la generación de portadoras ópticas.
- Diseñar una red de acceso WDM PON utilizando dispositivos ópticos de orden pasivo y LEDs como fuente óptica para disminuir costos, manteniendo la eficiencia.
- Validar el modelo diseñado mediante una herramienta de simulación para contrastar sus resultados con la teoría existente.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Definición de redes ópticas pasivas (PON)

Las redes ópticas pasivas se consideran los sistemas de comunicaciones construidos a partir de fibra óptica donde se realiza un proceso de comunicación a modo de punto-multipunto entre la Terminal Óptica de Línea (OLT) y los usuarios finales ONT (Optical Network Terminal). Dependiendo de la arquitectura del sistema, las redes PON pueden llegar bajo las descripciones de Fibra hasta la Acera (FTTC), Fibra hasta el Edificio (FTTB) o Fibra hasta la Casa (FTTH).

Dentro de sus características más importantes están el uso de componentes pasivos en toda la arquitectura de red, y sólo se involucran elementos activos en los extremos. Por otra parte, el proceso de bajada de información el OLT envía la misma información a todos los ONT a manera de broadcast, mientras que el proceso de subida cada ONT envía la información hacia el OLT.

2.2 Dispersión cromática

La dispersión cromática es un fenómeno presentado en la fibra óptica donde diferentes componentes de la señal transmitida viajan a diferentes velocidades, llegando con tiempos diferentes al receptor. En otras palabras, diferentes componentes espectrales de un pulso viajan a diferentes velocidades. Para este caso particular, este fenómeno sólo se presenta en las fibras monomodo, puesto que en las fibras multimodo, la dispersión intermodal es más significativa que la dispersión cromática.

La presencia de la dispersión cromática se debe a que las fibras ópticas en su mayoría son construidas con sílice, y dado que éste tiene un comportamiento dependiente de la frecuencia, produce este fenómeno; por esta razón es que las diferentes componentes de frecuencia viajan a diferentes velocidades. El resultado de este comportamiento con el silicio se le conoce como dispersión del material.

Existe una segunda causa de dispersión cromática denominada dispersión de guía de onda, la cual establece una relación entre los índices del núcleo y la cubierta en cuanto a la distribución de potencia dentro de la fibra, puesto que al cambio de la longitud de onda, la constante de propagación cambia. Es necesario recordar que la energía de la luz propagada en una fibra viaja parcialmente en el núcleo y en la cubierta, y el índice efectivo de un modo se encuentra dentro de los índices de refracción del núcleo y la cubierta, sin embargo este valor dependerá de la potencia retenida por éstas.

2.3 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

La multiplexación surge de la necesidad de disminuir los costos de operación, debido a que es más económico enviar mayores volúmenes de información a través de un hilo que pequeñas cantidades dentro de varios medios, generando dos alternativas para aumentar la capacidad de transmisión en la fibra óptica, la multiplexación por división de tiempo – TDM y la multiplexación por división de longitud de onda – WDM. TDM entrelaza cadenas de datos de moderada velocidad para obtener una cadena de alta velocidad.

Por otra parte, WDM modula varias portadoras ópticas a diferentes longitudes de onda para ser transmitidas sobre la misma fibra, pero éstas no se interfieren entre sí por el distanciamiento entre ellas. De esta manera, se entiende que un solo hilo de fibra tiene “n” hilos de fibra virtuales llevando una trama de información.

Desde los años 80, las investigaciones están encaminadas a reducir el espaciado entre longitudes de onda con el fin de optimizar el espectro (Singh, 2000), obteniendo como resultado separaciones de 0,1 nm, de acuerdo a la distribución estandarizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones - también conocida como ITU por sus siglas en inglés – que en la actualidad establece los espaciados para redes WDM PON como 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz y superiores o incluso frecuencias ajustadas dentro de los rangos mencionados (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010b).

2.4 Los estándares PON

Como se mencionó en el capítulo 1, las redes PON se caracterizan por ser un tipo de red Punto a Multipunto (P2MP) llevando servicios integrales hasta el usuario final a través de

un único hilo de fibra haciendo de éstas, una solución eficiente. Dentro de las características más representativas de esta tecnología se encuentra (Alobaidan, 2017):

- a. La red no cuenta con dispositivos activos
- b. Menor cantidad de fibra desplegada
- c. El alcance es de máximo 20 km en comparación con DSL (5,5 km aproximadamente)
- d. Mayor ancho de banda al usuario final
- e. Se ajusta fácilmente a mayores volúmenes de información
- f. Recude costos de mantenimiento
- g. Red de broadcast en downstream
- h. El tamaño de los dispositivos como Splitters es reducido en dispositivos pasivos

Posteriormente la ITU-T (International Telecommunication Union) y la FSAN (Full Service Access Network) establecieron que las redes de banda ancha deben coexistir con la tecnología actual, ofreciendo bajo costo, alta capacidad y cobertura para acaparar servicios como televisión de alta definición (HDTV), radio digital, entre otros.

En ese sentido las redes PON desde su creación han evolucionado en relación con la tecnología y las necesidades actuales de los usuarios, por esta razón es que existen las diferentes redes que serán explicadas a continuación.

2.4.1 Asynchronous PON (APON)

Es la primera de las redes pasivas que usan fibra óptica y fue estandarizada por la ITU-T, así como por la Full-Service Access Network (FSAN) en el año 1990 y usaba el protocolo ATM para encapsular la información en pequeños paquetes ajustados, haciendo de esta ideal para redes telefónicas y transferencia de datos. Soportaba 32 usuarios a una velocidad de 155 Mbps, alcanzando un máximo de 1,244 Gbps.

2.4.2 Broadband PON (BPON)

Conforme aumentaron las necesidades de ancho de banda y velocidad de transmisión, aparecieron las redes de banda ancha BPON definidas por el estándar ITU-T G.983 con el objetivo de desplegar sistemas de redes ópticas de banda ancha a un costo reducido, ofreciendo servicios como ATM, acceso Ethernet y transmisión de video. Es el primer estándar que incluye WDM para obtener longitudes de onda adicionales para distribución

de video. Igualmente utiliza la señalización y protocolo de transporte de las redes ATM, pero mejorando su seguridad.

Sus tasas de transmisión están en 155, 622 y 1244 Mbps.

2.4.3 Ethernet PON (EPON)

Nace como un estándar que utiliza tramas de Ethernet para hacer una integración acertada con tecnologías IP, obteniendo una alta escalabilidad, simplicidad, idoneidad y capacidad de ofrecer todos los servicios de acceso. Igualmente en cuanto a temas de seguridad, mejoró el formato de la trama para que envíe paquetes de diferentes tamaños sin destruirse, y en consecuencia se convirtió en una de las redes más implementadas de la tecnología PON, operando a una tasa de transmisión de 1,25 Gbps en Upstream y Downstream con un alcance máximo de 20 km y fue una de las redes que permitió el punto – multi punto (P2MP) con una división de hasta 23 usuarios.

Otra de las características más importantes de EPON es el Protocolo de Control Multipunto (MPCP) el cual efectúa una transmisión eficiente de datos entre una OLT y las ONUs.

2.4.4 10G-EPON

También conocido como el estándar IEEE 802.3av incrementó la velocidad de transmisión de su antecesor de 1 Gbps a 10 Gbps, conservando el protocolo MPCP, haciendo posible la coexistencia entre si en la misma red de distribución. Esto simplifica la actualización de los sistemas actuales para ofrecer las condiciones que este estándar establece de manera simétrica (es decir upstream y downstream en 10 Gbps) y asimétrica (1 Gbps de upstream en 1310 nm y downstream a 10 Gbps en 1270 nm).

2.4.5 G-PON

Las redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks – PON) son aquellas cuyos componentes físicos no requieren de una alimentación externa de energía para su funcionamiento; por el contrario ésta es proporcionada directamente por las señales que

viajan a través de la fibra, reduciendo sus costos en términos de potencia, administración y mantenimiento. Sus características le permiten modular diferentes servicios a través de una misma portadora, y con la ayuda de una red óptica de distribución (ej. Splitter) descompone la señal de entrada para enviar la información establecida a cada abonado. En la Figura 1, se observa el esquema básico de una red GPON, destacando que la longitud de esta red no debe ser mayor a los 20 km. Aquí es importante establecer que el alcance máximo del estándar es de 60 km, sin embargo por los elementos físicos involucrados aquí, el límite máximo recomendado por el estándar es del máximo 20 km.

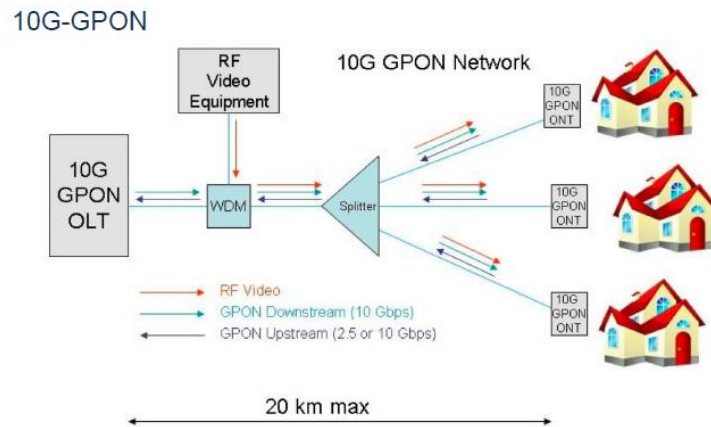


Figura 1. Arquitectura estándar GPON

Fuente: <https://goo.gl/images/veBWuA>

En el estándar G.984.1 de la ITU-T se describen los aspectos más relevantes sobre este tipo de redes, donde algunas de sus características más importantes se describen a continuación:

2.4.5.1 Longitudes de onda de operación

Los rangos de operación establecidos en el estándar GPON son:

- 1480 – 1500 nm para datos de bajada (downstream)
- 1260 – 1360 nm para datos de subida (upstream)

Existe otro rango de 1550 – 1560 nm que puede ser usado como canal de distribución de Video RF (Ivecovic, 2008).

2.4.5.2 Tasa de Bits Nominal

De acuerdo con el estándar GPON, las tasas nominales de transmisión deben ser mayores o iguales a 1.2 Gbps, en consecuencia se estableció una combinación entre tasas de subida y de bajada así:

1. 1,2 Gbit/s de subida (upstream) y 2,4 Gbit/s de bajada (downstream)
2. 2,4 Gbit/s de subida (upstream) y 2,4 Gbit/s de bajada (downstream)

En la actualidad, la opción 1 es la más utilizada a nivel comercial por los operadores que han desplegado su infraestructura de comunicaciones con fibra óptica, sin embargo existen otras distribuciones de bajada incluidas en el estándar, descritas en la Tabla 1:

Tabla 1. Tasas de Bit del estándar GPON

Dirección	Tasa de bits
Bajada (downstream)	1244,16 Mbit/s
	2488, 32 Mbit/s
Subida (upstream)	155,52 Mbit/s
	622,08 Mbit/s
	1244,16 Mbit/s
	2488, 32 Mbit/s

Fuente: Estándar GPON (Systems, 2008)

2.4.5.3 Distribución de canales (Splitt)

El objetivo de las redes GPON es conectar diferentes usuarios a través de un único canal de fibra óptica, por ende es necesario realizar una conexión punto a multi-punto (P2MP) entre la OLT y las diferentes ONUs. Para lograr esto se hace uso de un dispositivo denominado Splitter puesto que es de orden pasivo y divide la señal de entrada en n número de salidas de acuerdo a su arquitectura; de igual manera la potencia de la señal es dividida en cada una de las salidas en un factor de $n \times 3.5$ dB (incluyendo 0,5 dB de pérdidas en el dispositivo), por esta razón entre más salidas tenga el Splitter, mayor será la potencia requerida para garantizar el alcance físico de la red.

Por otra parte, el estándar indica que una distribución de 1:64 es considerada como real dada la limitación en potencia para garantizar el alcance de la red, sin embargo a día de

hoy se encuentran distribuciones de hasta 1:128. En relación a la distribución de canales, no solo existe una división en potencia desde el canal de entrada para cada usuario, sino también en tasa de bits, por consiguiente se estableció que en una distribución de 1:32, la tasa de bits por usuario será de 77,8 Mbit/s en bajada (downstream) y 38,9 Mbit/s en subida (upstream) (Systems, 2008).

También es necesario establecer que los dispositivos involucrados en la red tales como empalmes, conectores y splitters al igual que la fibra óptica, al ser dispositivos físicos generan pérdidas y deben ser tenidas en cuenta en el diseño. Por ejemplo un Splitter en una red 1:32 genera pérdidas por inserción entre 17 dB y 18 dB, por lo tanto este factor es muy importante dentro del diseño planteado.

2.4.5.4 Asignación de banda dinámica

Es una técnica que permite ajustar el ancho de banda del usuario de acuerdo al tráfico existente en el momento del envío de la información. Este proceso es controlado por la OLT debido a que allí se asignan los anchos de banda para cada usuario, sin embargo es importante establecer que esta asignación sólo se realiza en el proceso de subida, puesto que el tráfico de bajada es enviado en modo broadcast (es decir para todos).

2.4.5.5 Presupuesto de potencia

La potencia es una característica importante en el diseño de una red GPON puesto que a partir de esta variable y teniendo que las diferentes partes y dispositivos de la red generan pérdidas, se establece el alcance de la misma, por tal razón es de vital importancia realizar una planeación adecuada de dicha red.

Para determinar el alcance máximo de la red se debe aplicar la Ecuación 1:

$$P = FCA * L + SL + Pen$$

Ecuación 1. Alcance máximo de la red

Donde P: presupuesto de potencia

FCA: atenuación de la fibra

L: distancia

SL: pérdidas del splitter

Pen: pérdidas comunes

Estas pérdidas comunes hacen referencia a las pérdidas por empalmes y conectores. Típicamente estas pérdidas son de 0,4 dBm para longitudes de onda de 1330 nm y 0,3 dBm para 1550 nm según las recomendaciones ITU-T Rec. G.652.C y G.652.D.

En la actualidad, este es el estándar por excelencia utilizado en las redes de acceso, debido a los volúmenes de información que soporta y la distancia máxima alcanzada entre el usuario final y la Oficina Central (Interfaz entre la red de acceso y la red metropolitana), la cual no debe superar los 20 km (Agrawal G.P, 2002).

2.4.6 OFDM PON

Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Passive Optic Network (OFDM PON por sus siglas en inglés) es una alternativa con mucha aceptación debido a su resistencia a la interferencia inter-símbolo (ISI) y el uso de OFDM para aumentar la tasa de transmisión a través de la división de la portadora en sub- portadoras con frecuencias ortogonales.

La modulación se realiza a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT) y la asignación de portadora es dinámica, de acuerdo a las necesidades de cada ONU.

Dentro de sus ventajas más significativas está la mejora en la velocidad de transmisión, granularidad en la asignación de ancho de banda, entre otros.

2.4.7 Redes de Nueva Generación NG-PON

La FSAN y la ITU-T han definido que las redes PON de nueva generación deben ofrecer bajo costo, alta capacidad, cobertura amplia, multi-servicio, y la interoperabilidad con la tecnología e infraestructura existente. Es por esto que dentro de la definición de estos estamentos, NG-PON se dividió en dos generaciones NG-PON1 y NG-PON2.

La generación NG-PON1 está definida para desarrollarse a mediano plazo y que coexista con la infraestructura actual, operando simétrica y asimétricamente a unas tasas

upstream/downstream de 2,5 Gbps y 10Gbps respectivamente, mientras que NG-PON2 será un despliegue a largo plazo independientemente de las tecnologías existentes, alcanzando tasas de 40 Gbps en downstream y 10 Gbps de upstream, y está compuesto de un arreglo de canales TWDM y canales punto a punto WDM. Un ejemplo de estas últimas son las redes coherentes WDM PON las cuales establecen unos parámetros de conexión tales como frecuencia, fase y polarización.

2.5 Fuentes ópticas

Los transmisores son los elementos que proporcionan la fuente de luz que posteriormente será enviada a través de la fibra llevando la información hasta el destino. Frente a su clasificación, existen dos fuentes básicas de luz llamadas Laser y Light Emitting Diode – LED. A continuación se realizará una breve descripción de cada uno.

2.5.1 Láser

Es un amplificador óptico ubicado dentro de una cavidad reflectora que genera una oscilación de realimentación positiva. Están contruidos con materiales semiconductores que proporcionan una ganancia media y están catalogados como los más utilizados en sistemas de comunicaciones ópticos (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010a).

Por otra parte, para el bombeo de señales dentro de la fibra se utiliza un láser semiconductor debido a su alta eficiencia para hacer la conversión de esta señal de entrada del dominio eléctrico al dominio óptico.

La potencia obtenida típicamente se encuentra en el rango de 0 a 10 dBm para redes WDM, sin embargo debido a sus características, son dispositivos de un alto costo y no son recomendables en casos donde las tasas de datos son bajas, las distancias son cortas y los anchos de línea oscilan entre los 100 kHz y 10 MHz (Agrawal G.P, 2002; Thorlabs.com - Tutorials, n.d.).

2.5.2 Light Emitting Diode – LED

Las fuentes de luz a través de dispositivos LED surgen como una alternativa económica para redes de corto alcance. Se trata de una unión polarizada PN donde la recombinación de electrones en la región P y huecos en la región N, produce luz obedeciendo al proceso de emisión espontánea, y dado que esto ocurre dentro de la totalidad del ancho de banda de la ganancia media (gap entre la banda de valencia y la banda de conducción), el haz de luz de salida tiene un espectro amplio (a diferencia del láser).

Sin embargo la potencia de salida generada no es alta, dado que normalmente están en el orden de -20 dBm y no puede ser modulada directamente más allá de unos cuantos Mbps. En aplicaciones de bajas prestaciones, típicamente se ubica un filtro óptico pasabanda estrecho delante del LED para seleccionar una porción de su salida.

Por otra parte, la potencia de salida de un LED típicamente es de 0,1 mW aunque su potencia interna puede alcanzar los 10 mW, sin embargo dada su característica de espectro amplio ($\Delta\lambda = 50-60$ nm), el producto BER – Distancia limita considerablemente su uso en sistemas de comunicaciones debido a la dispersión de la fibra. Por esta razón la aplicación de este tipo de fuentes en redes GPON es una alternativa acertada puesto que no se superará una distancia de 20 km, alcanzando tasas de transmisión de 10 – 100 Mbps (Agrawal G.P, 2002).

2.6 Arrayed Waveguide Gratings (AWG)

Los dispositivos Rejilla de Guía de Onda – AWG son utilizados en redes ópticas debido al uso eficiente de frecuencias que permite enviar a través de la fibra óptica, logrado a partir de la técnica de particionado espectral sin pérdidas significativas. Su funcionamiento es similar al Interferómetro de Mach-Zehnder – el cual consiste en dos acopladores multipuerto interconectados por un arreglo de guías de onda que realiza una copia de la señal, cambiando la fase en diferentes valores de π y finalmente suma todas las señales – pero en este caso genera varias copias de la misma señal.

Este dispositivo puede ser usado como un multiplexor de n entradas por 1 salida, siendo n diferentes longitudes de ondas combinadas en una salida; por otra parte, teniendo en

cuenta que también se puede usar una configuración $1 \times n$, se considera como un demultiplexor.

Algunas de sus características son su bajo porcentaje de pérdidas, selectividad de filtrado y su facilidad de construcción, puesto que el sustrato usado – típicamente silicón – tiene un coeficiente de temperatura de $0,01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ y por lo tanto son fácilmente sintonizables (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010a). A continuación se describirán otras características importantes para este tipo de dispositivos:

2.6.1 Características de AWG:

- **Número de puertos:** Es el número de salidas en las cuales se envían las copias de la señal, los cuales se diferencian por la distancia recorrida desde la guía de onda de entrada hasta el arreglo de guías de onda. Este número de puertos está sujeto al espaciado entre canales, en consecuencia y de acuerdo a sus características teóricas es posible tener dispositivos de hasta 256 canales, sin embargo en la actualidad es posible conseguir AWGs con 64 canales (Electronics, n.d.; Ramaswami et al., 2010a).
- **Separación entre canales:** Se refiere al espacio que existe entre canales para evitar que las señales se superpongan, causando interferencia. Dichos canales deben operar en la Zona de Espectro Libre (o sus siglas en inglés FSR) del dispositivo, donde dicha separación puede alcanzar los $0,2 \text{ nm}$ (Agrawal G.P, 2002).
- **Anchos de banda en cada canal:** Es la división del ancho de banda del canal de entrada, dividido en el número de puertos del dispositivo. De acuerdo con la separación de canales para evitar la superposición de señales, cada canal puede tener 10 GHz con estándares de calidad adecuados para cada usuario (Agrawal G.P, 2002; Ahmed, Aljunid, Ahmad, & Fadil, 2010).
- **Pérdidas de inserción típicas:** Todos los dispositivos físicos dadas sus propiedades generan algún tipo de pérdidas a la red, por lo tanto para el caso de las redes G-PON existen pérdidas de propagación, conectores, guías de onda y la misma fibra; sin embargo existen otro tipo de pérdidas llamadas Pérdidas por desfase la cual hace relación a la distribución del campo fotoeléctrico en el conjunto de guías de entrada (distribución continua), hacia el arreglo de guías de onda puesto que inmediatamente pasa a ser una distribución discreta (Agrawal G.P, 2002; Hasegawa & Nara, 2004). En la figura 2 se observa un ejemplo.

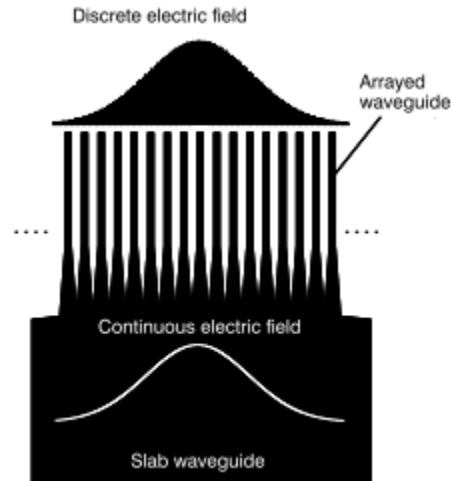


Figura 2. Pérdidas por desfase

Fuente: Optical Networks. A practical Perspective

El funcionamiento de este tipo de dispositivos es algo complejo, sin embargo es determinante en el diseño de la red propuesta y por ende se realizará una explicación general del modo de operación:

2.6.2 Modelo matemático de funcionamiento

Para explicar el modelo es importante establecer que un AWG tiene el mismo número de entradas y de salida (ver Figura 3); por ende se puede establecer que un acoplador de entrada es $n \times m$ y el acoplador de salida es $m \times n$. Los acopladores están conectados por b guías de onda (donde b se refiere al arreglo de guías de onda del AWG) y la separación entre guías de onda es tal que hay un incremento de un ΔL en cada una de las guías que conectan los dos acopladores (FOSCO (Fiber Optics for Sale CO.), n.d.; Ramaswami et al., 2010a).

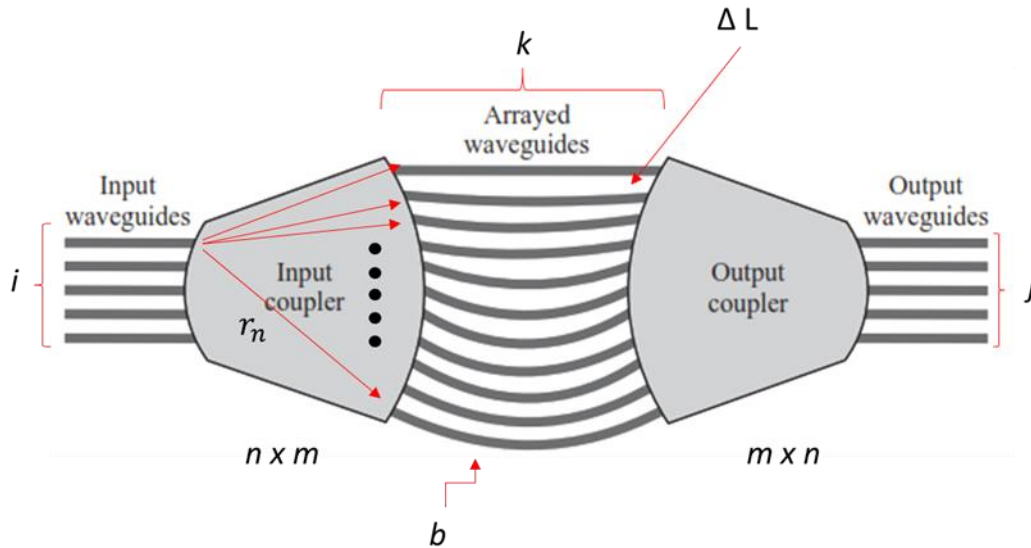


Figura 3. Descripción característica de un AWG

Fuente: Optical Networks. A Practical Perspective

2.6.2.1 Proceso de multiplexación de una señal

En la entrada se distribuye la señal en r partes, donde la fase de cada uno de estos fragmentos está relacionada, es decir que depende de la distancia recorrida por la señal en el acoplador desde la entrada n hasta la guía de onda seleccionada r . Dado que la señal que ingresa al AWG tiene un comportamiento de propagación radial, se establecen diferentes distancias recorridas desde la guía de onda de entrada i (cualquiera) hasta la guía de onda del arreglo de guías k , asumiendo que la guía de onda seleccionada tiene un camino más largo que $k - 1$. Igualmente se evidencian las distancias recorridas entre el arreglo de guía k y la guía de onda de salida j .

Con este contexto se establece que las fases de las señales que viajan desde una entrada i hasta una salida j están dada por la Ecuación 2:

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_{ik}^{in} + n_2 k \Delta L + n_1 d_{kj}^{out}); \quad k = 1, \dots, \dots, m$$

Ecuación 2. Fases de las señales

Donde n_1 es el índice de refracción de los acopladores de entrada y salida, mientras que n_2 es el índice de refracción del arreglo de guías de onda.

En la entrada, todas aquellas longitudes de onda λ cuyo ángulo ϕ difiera por un múltiplo de 2π se sumarán en fase a la salida j . Por otra parte si los acopladores de entrada y salida se diseñan de tal forma que $d_{ik}^{in} = d_i^{in} + k\delta_i^{in}$ y $d_{kj}^{out} = d_j^{out} + k\delta_j^{out}$, la ecuación 1 se puede expresar de la siguiente manera (ver Ecuación 3):

$$\Phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_i^{in} + n_1 d_j^{out}) + \frac{2\pi\lambda}{\lambda} (n_1 \delta_i^{in} + n_2 k \Delta L + n_1 \delta_j^{out}); \quad k = 1, \dots, \dots, m$$

Ecuación 3. Fases de las señales con acopladores de entrada y salida

Así las cosas, para longitudes de onda λ en la entrada i que satisfagan $n_1 \delta_i^{in} + n_2 k \Delta L + n_1 \delta_j^{out} = p\lambda$ para un p entero se sumarán en fase en la salida j .

2.6.2.2 Proceso de demultiplexación de la señal

Para utilizar el AWG como demultiplexor es importante tener en cuenta que todas las longitudes de onda λ están presentes en la misma entrada, por ende se deduce de la ecuación 1 que serán demultiplexadas. Sin embargo a pesar que δ_i^{in} y ΔL son importantes para precisar el conjunto de longitudes de onda que serán demultiplexadas, el espaciado mínimo entre ellas es determinado por δ_j^{out} .

De esta manera, se evidencia que el AWG tiene una respuesta periódica en frecuencia y todas las longitudes de onda deben estar dentro de un rango espectral libre.

2.6.3 Interacción con fuentes de banda ancha

Las fuentes ópticas de banda ancha como los LEDs tienen un espectro entre 30 a 60 nm (Agrawal G.P, 2002), sin embargo la relación entre ancho de banda y distancia lo hace ideal para transmisiones de corto alcance y de baja velocidad. Por otra parte la técnica de particionado espectral permite simplificar el número de fuentes ópticas en la Oficina Central (CO); esta división se logra a partir del uso de un AWG que divide el espectro de dichas fuentes con el fin de tener diferentes longitudes de onda que puedan ser utilizadas para el transporte de información en la red de acceso que cumple lo establecido en el estándar GPON de máximo 20 km.

En este sentido, las fuentes ópticas de espectro amplio se convierten en una opción importante para el despliegue de redes de acceso con fibra óptica.

Capítulo III

Metodología del Proyecto

De acuerdo a las características del proyecto se estableció que se trata de una investigación cuantitativa, dado que se trata de un diseño experimental cuya verificación se realizará a través de una simulación donde se compararán las respuestas de las variables mencionadas en el capítulo 2 con lo establecido en el estándar GPON. En este sentido, el proyecto requiere del análisis de la información obtenida del simulador para validar o refutar la propuesta de la red.

Desde este punto de vista se han planteado cuatro (4) objetivos específicos, en los cuales se desarrollan actividades que respondan al objetivo general del proyecto tales como el estado del arte de las redes GPON, el uso de dispositivos pasivos para el diseño de la red teniendo en cuenta el uso eficiente del espectro de una fuente óptica tipo LED y el particionado espectral a partir de un filtro AWG para finalmente validar los resultados en un simulador comparando los parámetros potencia de llegada (en el demultiplexor), factor de calidad y BER con lo establecido con el estándar G.983.1 de la ITU.

En ese sentido con el fin de establecer un contexto adecuado de las investigaciones y los avances hasta el momento de las redes de acceso de bajo costo con fibra óptica, se realizó la revisión en bases de datos como IEEE Explore debido a que es una de las fuentes más importantes para la publicación de resultados de investigación en redes de fibra óptica tanto de transporte como de acceso, y la *Full Service Access Network – FSAN* que unifica esfuerzos en temas de redes ópticas de banda ancha. Por otra parte, se consultaron artículos de investigación de revistas indexadas de orden nacional e internacional, evidenciando que la necesidad de tener mayores anchos de banda a menor costo continúa siendo un aspecto relevante en la investigación de redes de acceso.

A continuación, se describirán los resultados de investigaciones presentadas:

3.1 Estado del arte

Estudios recientes sobre la aplicabilidad de redes de acceso de bajo costo WDM PON han permitido avances hacia su implementación a nivel comercial, haciendo algunos ajustes en términos de Hardware (Chowdhury & Jaumard, 2012), rediseñado la forma de sincronizar las señales usando el mismo haz de luz como elemento de señalización (Chung, 2013), o aplican algún tipo de compensador para minimizar los efectos de la dispersión cromática (Zumba, Cabrera, & Coronel, 2016) (ver Figura 4). En este caso, además de establecer una reorganización de la red, se evidenció que uno de los elementos más utilizados en las redes ópticas por su versatilidad es el AWG.

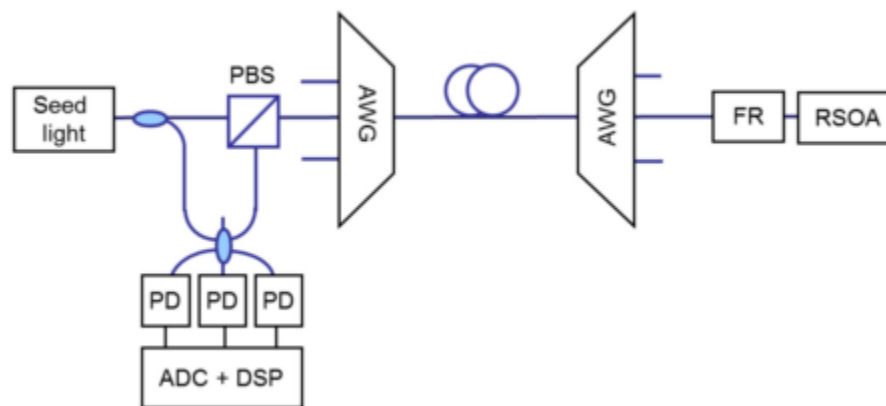


Figura 4. Red WDM PON implementada usando un receptor auto homodino

Fuente: High-speed coherent WDM PON for next-generation access network

Algunos referentes encontrados proponen la integración de un sistema denominado Ultra Banda Ancha Sobre Fibra (UWBoF) con una red WDM PON implementando un filtro pasabajo de microondas fotónicas (Pan & Yao, 2011), como resultado comprobaron que en fibras multimodo pueden alcanzar distancias de más de 20 km sin sufrir el fenómeno de dispersión, un problema común en el contexto actual de las telecomunicaciones. En este sentido se observa una limitación por el tipo fibra, sin embargo dependerá de la aplicación puesto que éstas – al igual que otros medios de transmisión – sufren de atenuación, dispersión, entre otras dificultades que resultan en pérdidas de potencia o información.

Este caso evidencia la versatilidad de las redes WDM PON, puesto que es posible establecer redes de banda ancha y alcanzar distancias que se encuentran contempladas

dentro del límite del estándar GPON. Igualmente se evaluó la calidad de la señal y la sensibilidad a partir de Diagramas de Ojo, los cuales evidenciaron la forma adecuada de interpretarlos en redes de fibra óptica y serán usados en el diseño propuesto.

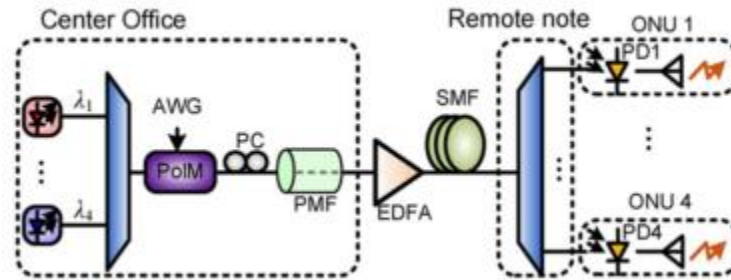


Figura 5. Diagrama esquemático de la red utilizando un sistema de ultra banda ancha sobre fibra

Fuente: IR-UWB-over-fiber systems compatible with WDM-PON networks

Por otra parte se encontró un diseño eficiente de redes WDM MDM PON (Wavelength Division Multiplexing – Mode Division Multiplexing – Passive Optical Networks), utilizando auto detección homodina en alta velocidad (Chen et al., 2015). La característica de esta propuesta se basa en el uso de un tono piloto para la detección homodina, y a través de MDM se minimiza el impacto sobre la eficiencia espectral. Los resultados demostraron que se puede hacer transmisiones de 4 señales OFDM por encima de 55 km sin presentar diafonía ni errores de operación en los moduladores. También se logró demostrar que es posible enviar información de diferentes fuentes a grandes distancias a través de la fibra, sin sacrificar potencia; además se minimizan los tiempos de análisis utilizando un indicador creado a partir de la misma señal óptica (ver Figura 6), permitiendo establecer la distancia máxima en la que se puede realizar una transmisión sin necesidad de regenerar la señal, sin embargo también evidenció que es necesario tener diferentes fuentes ópticas para su implementación, es decir que en la medida que se requieran más cantidad de usuarios, se deberá realizar una inversión mayor.

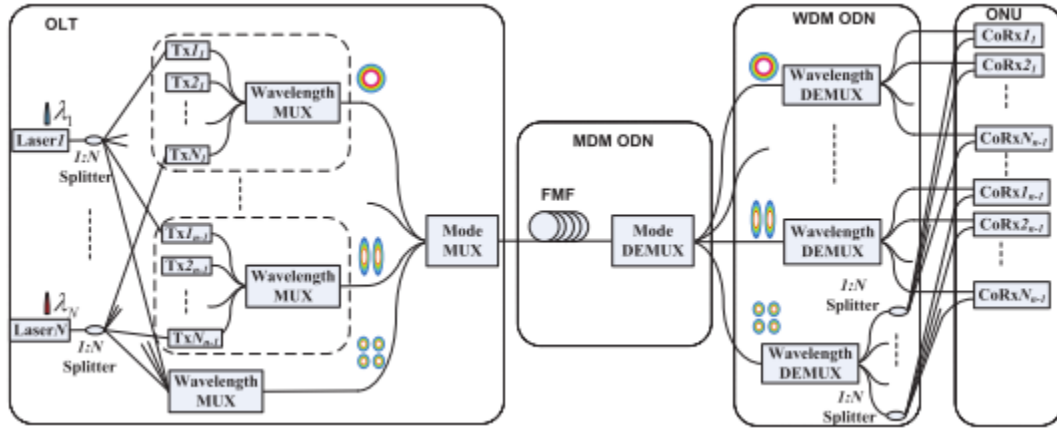


Figura 6. Esquema de la red WDM-MDM PON utilizando detección auto-homodina

Fuente: Novel MDM-PON scheme utilizing self-homodyne detection for high-speed/capacity access networks

A diferencia de los anteriores casos que se han centrado en aplicaciones de nuevas formas de transmisión, este caso centra su investigación en un esquema de optimización para el diseño y dimensionamiento de redes WDM PON (Chowdhury & Jaumard, 2012), proponiendo un modelo integral de programación que condensa las Terminales de Líneas Ópticas (OLT) en un clúster, determinando el número de clústeres; también el número de elementos necesarios que optimice el transporte de información. Finalmente concluyeron que teniendo en cuenta variables como las pérdidas en los diferentes elementos, así como en la fibra misma, se puede hacer una distribución eficiente que permita administrar adecuadamente los datos para la implementación de una red WDM PON (ver Figura 7).

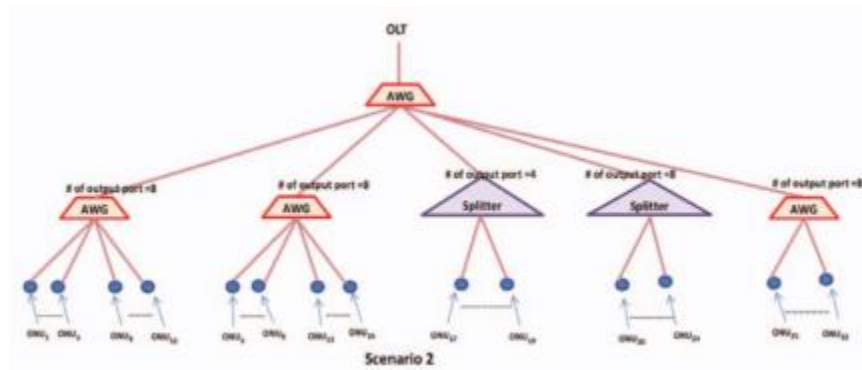


Figura 7. Arquitectura PON condensadas en un cluster

Fuente: A cross layer optimization scheme for WDM PON network design and dimensioning

Teniendo en cuenta esta estructura de red establecida de acuerdo a un número de clusters determinados por el diseño, se estableció que es posible desplegar redes constituidas por segmentos donde cada uno contempla un número de usuarios (ONUs), en consecuencia se evidenció que esta forma de distribución utilizando ya sea AWGs o Splitters es funcional para redes de fibra óptica.

En América Latina se encontraron otros casos de éxito, como el presentado en Ecuador, donde realizan un estudio de la dispersión cromática en redes WDM PON usando compensadores FBG (Fiber Bragg Grating), variando el tipo y la longitud del hilo de fibra óptica (Zumba et al., 2016). La investigación concluyó en que se logró disminuir la dispersión cromática mejorando las tasas de error (denominadas en inglés como Bit Error Rate o sus siglas BER) de $1,037 \cdot 10^{-5}$ a $6,61 \cdot 10^{-14}$ para el tipo de fibra G.652 y de $2,73 \cdot 10^{-5}$ a $1,54 \cdot 10^{-14}$ para la fibra G.654 (ver Figura 8). A partir de esto, se estableció la importancia de mantener valores de la tasa de error de bits de en valores muy pequeños para minimizar los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto este aspecto será una de las características de la red propuesta.

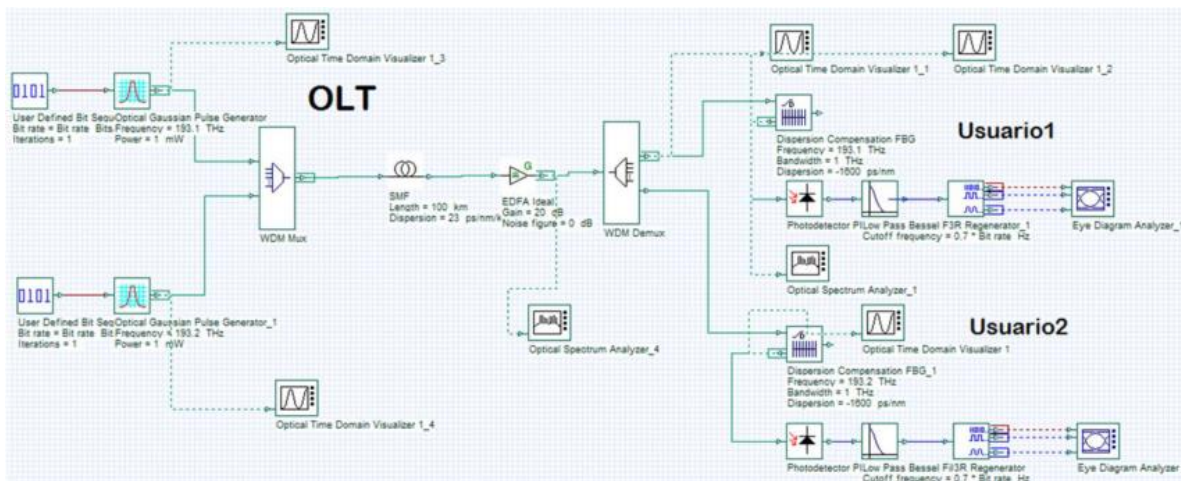


Figura 8. Topología de red propuesta para la simulación

Fuente: Chromatic Dispersion Analysis in a Network WDM-PON Using FBG Compensators

En el contexto colombiano, los operadores tradicionales como Claro (fijo), Movistar y ETB (esto en la ciudad de Bogotá), ofrecen servicios integrados – datos (internet y voz) al igual que televisión – a través de un hilo de fibra que llega hasta el hogar (solución de último kilómetro) (Empresa de Teléfonos de Bogotá, 2017). Esto ha permitido llegar al usuario final con velocidades cada vez mayores a las soportadas por medios tradicionales como el par

trenzado de cobre, coaxial entre otros (Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2016).

En términos generales se ha encontrado suficiente información acerca de los avances relacionados con el tema de WDM PON (Artiglia et al., 2016), los cuales se enmarcan en la optimización de los recursos tanto físicos como tecnológicos para aumentar los volúmenes de información enviados a través de éstas.

Como se evidencia en las referencias citadas, las redes de acceso WDM PON conservan un diseño basado en el estándar GPON (ver Figura 9).

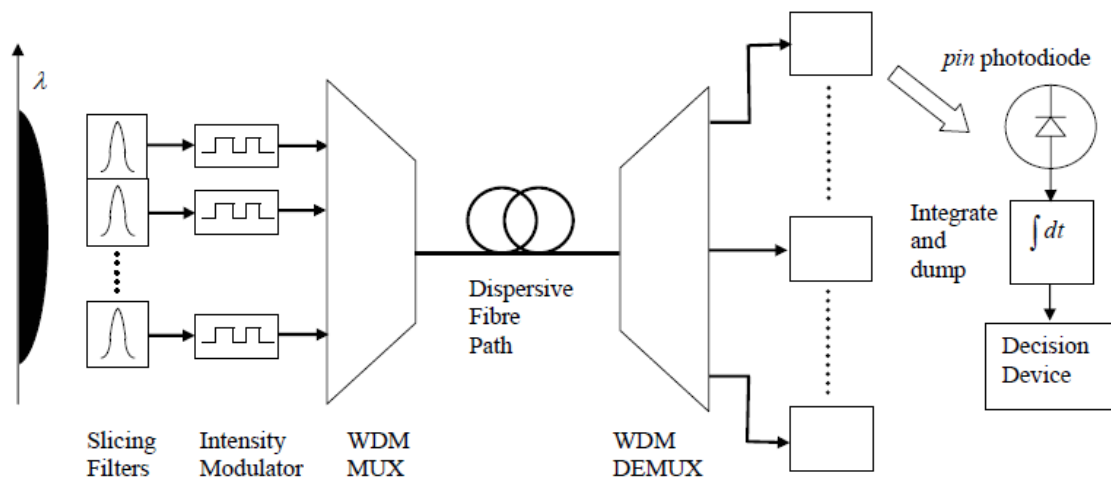


Figura 9. Red de acceso de bajo costo con particionado espectral

Fuente: *Spectral Slicing for Data Communications* (Leeson, Luo, & Robinson, 2006)

3.2 Particionado espectral

El particionado espectral (Spectral Slicing) es un método que se utiliza cuando se tiene una fuente de luz con un espectro amplio, con el fin de dividirlo en porciones más pequeñas que se envían a través de un hilo de fibra óptica. Típicamente son utilizados con fuentes tipo LED o Amplificadores de Generación Espontánea (ASE) y la división está sujeta al número de salidas del multiplexor.

Por sus características, ha sido ampliamente usado para satisfacer la demanda que se ha venido incrementando en términos de capacidad de transmisión en la siguiente generación

de redes de acceso óptico. De acuerdo con lo anterior, este método promete ser una solución eficiente y de bajo costo para un transmisor en una terminal óptica de red (Optical Network Terminal – OLT) en una arquitectura WDM PON.

Sin embargo, dado que cada partición tiene una longitud de onda asociada, la potencia de cada porción está directamente relacionada al tamaño de la misma, pero también causa dispersión y por lo tanto disminuye el número de canales.

Estudios realizados demostraron que es necesario ampliar el ancho de cada partición para aumentar la potencia, sin embargo, un efecto negativo es la dispersión cromática dependiendo de la longitud del enlace, pero si se reduce este ancho no solo afectará la potencia, sino que aumentará el ruido inherente dado la distribución espectral de la fuente (LED). Es por esto que los resultados arrojados evidenciados en un sistema simulado con una transmisión a 622 Mbps con una frecuencia central para el particionado de 1550 nm, un ancho de línea de 0,7 nm y un filtro Bessel de cuarto orden.

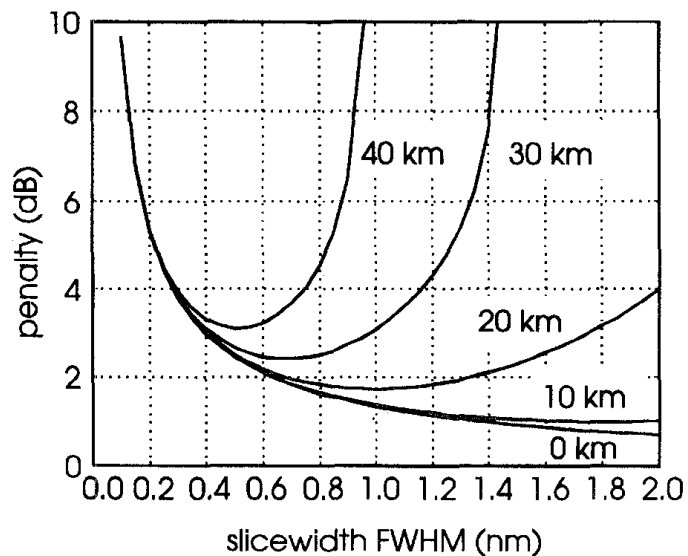


Figura 10. Penalización requerida para mantener un BER de 10^{-9}

Fuente: *Transmission Performance of High Bit Rate Spectrum-Sliced WDM Systems*

Como se observa en la Figura 10, para una distancia de 20 km se observa una penalidad entre 2 dB y 4 dB; en consecuencia, los resultados de estos estudios serán incorporados en el proyecto dado que el particionado espectral es la parte central de este diseño de red.

Por otra parte, existen diferentes alternativas para realizar el particionado del espectro de una fuente amplia como los LED, tales como multiplexores, redes de difracción, Filtros AWG, Filtros Fabry Perot, entre otros. En redes WDM PON se han utilizado Demultiplexores para dividir el espectro de una fuente amplia y posteriormente se multiplexan para tener una única señal que viaja a través de un hilo de fibra (ver Figura 11), sin embargo la relación de ruido es inversamente proporcional a la separación de canal dado que si la separación es pequeña, el ruido aumenta (Ahmed et al., 2010).

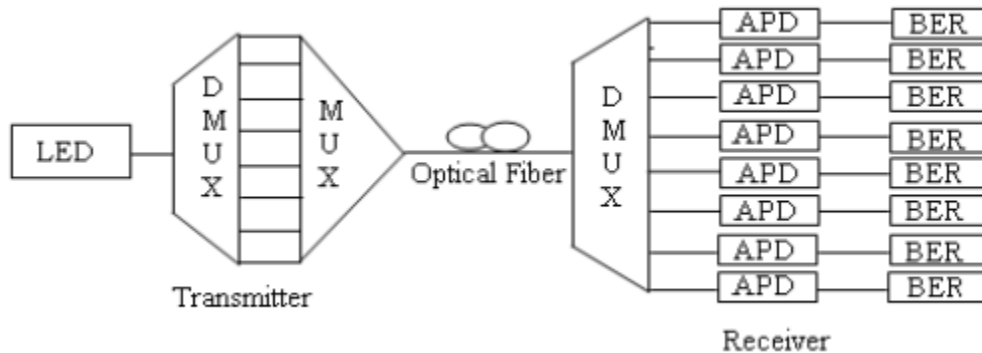


Figura 11. Demultiplexor usado para particionar el espectro de una fuente de banda ancha

Fuente: *Demonstration of Spectral Slicing WDM System using Light Emitting Diode (LEDs) Light Source*

Otra manera de realizar el particionado espectral es a través de la configuración de filtros Fabry Perot, pero una de sus limitantes es la dificultad para sintonizarlos en la frecuencia central adecuada de acuerdo al ancho de espectro libre (FSR por sus siglas en inglés). Para solucionarlo algunos autores utilizaron una fuente de espectro amplio y un EDFA con el fin de ajustar la señal para ser particionada, sin embargo esta señal debe ser amplificada para evitar las pérdidas generadas por los elementos de la red; posteriormente la señal se divide en dos filtros Fabry Perot, pero en uno de los brazos existe un retardo tal y como se muestra en la Figura 12. El resultado es nuevamente multiplexado para ser enviado a través de la fibra (Jeyachitra, Sukanesh, & Ajmera, 2009).

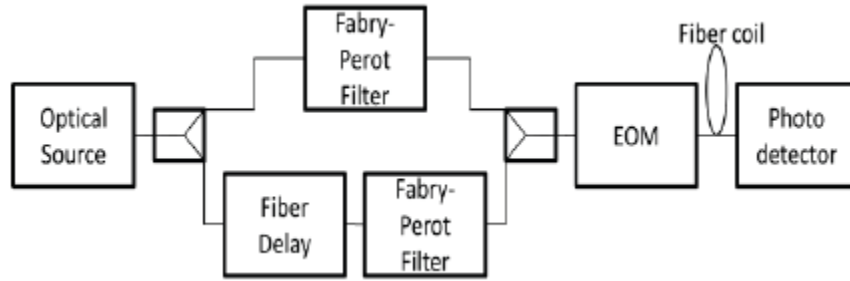


Figura 12. Particionado espectral usando filtros Fabry-Perot

Fuente: Flexible Tunable Spectrum Sliced Microwave Photonic Filter Using

De acuerdo a lo anterior, esta alternativa muestra que es posible realizar el particionado espectral, pero involucra diferentes elementos de red que incrementa los costos de implementación y de operación.

La última alternativa considerada es utilizando AWGs cuyas características han sido mencionadas en el capítulo 1; debido a sus facilidades de implementación y los resultados en cuanto a potencia de la señal, espaciado entre canales y factores como Q y BER, son muy usados en redes WDM PON. En la Figura 13 se presenta un modelo de red donde se utiliza el dispositivo no solo para hacer el particionado sino para realizar la distribución final hacia los abonados (Bobrovs, Spolitis, Trifonovs, & Ivanovs, 2013).

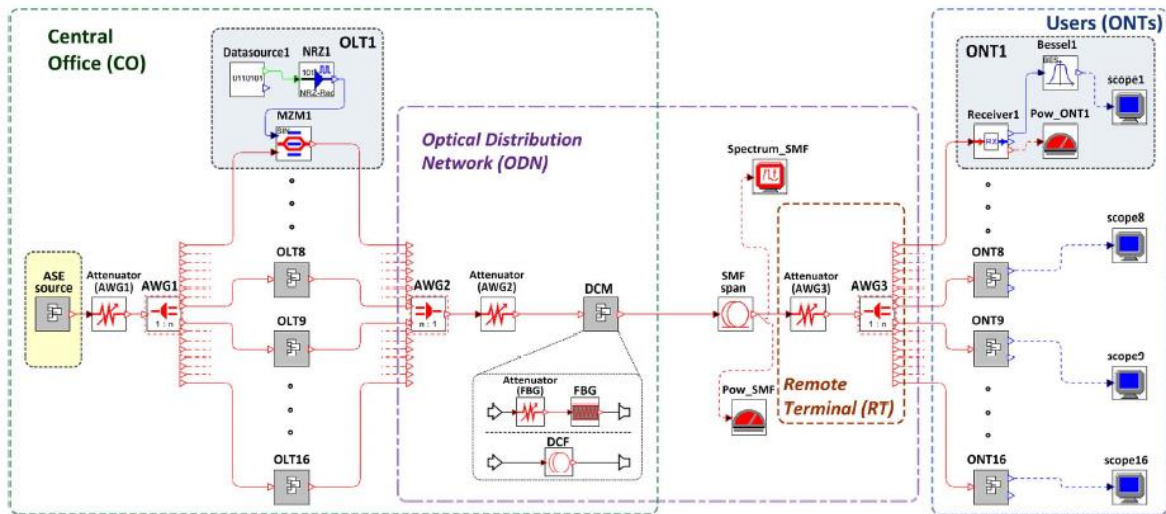


Figura 13. Particionado espectral usando AWGs

Fuente: Spectrum Sliced WDM-PON System as Energy

En la oficina central se observa que se utiliza el AWG_1 para realizar la división del espectro en diferentes portadoras que son moduladas y posteriormente multiplexadas en otro AWG_2 para ser enviadas a través de la fibra óptica. En el destino son demultiplexadas por el AWG_3 para finalmente hacer la distribución a los usuarios finales. De acuerdo a lo anterior, se estableció que los filtros AWG son ideales para el tipo de red propuesto puesto que además de su función de partición del espectro, también se usan como MUD/DEMUX para enviar o recibir una señal desde la Oficina Central hasta los usuarios finales. En ese sentido, el dispositivo elegido para realizar el particionado del espectro es el AWG.

3.3 Diseño de la red

Para el diseño de la red se tuvieron en cuenta diferentes factores, entre ellos que se cumplan los parámetros establecidos por el estándar GPON, es decir que los elementos que la componen deben ser de orden pasivo, manteniendo los valores de potencia de la señal que llega a cada usuario, el factor de calidad Q y e Bit Error Rate (BER). Por otra parte, al tratarse de una red de acceso, el diseño está limitado por el estándar antes mencionado a máximo 20 km desde la Oficina Central hasta el usuario final y teniendo en cuenta las capacidades de fuentes no convencionales, se eligió al LED como la alternativa adecuada dado que cuenta con un espectro de frecuencia amplio el cual se divide a través de un dispositivo AWG, logrando potencias adecuadas para el proceso de distribución.

En el capítulo 4 se presenta de forma más detallada el diseño de la red elaborado con los elementos antes mencionados y sus etapas de modulación, transmisión, recepción y distribución hacia los usuarios finales, teniendo en cuenta las variables mencionadas en el estándar GPON.

3.4 Validación de resultados

Para la validación de resultados fueron necesarias dos actividades específicas. En primer lugar, realizar la elección del software que permita construir la red como realizar las configuraciones propias de las pruebas tales como la distancia de la fibra óptica, la potencia de entrada, el ancho de línea de cada frecuencia sub portadora, entre otros. Posteriormente con la herramienta definida, en el **Anexo 1** se muestra el procedimiento para realizar la

validación de la red, donde se realizaron diferentes variaciones de las condiciones iniciales de la red, tales como la tasa de bit (Bit Rate), ancho de las portadoras (BW), y distancia de la fibra óptica, para evaluar su impacto sobre la red y la respuesta obtenida en los usuarios finales con el fin de establecer los límites de operación dentro de los parámetros establecidos por el estándar GPON.

En el capítulo 4 se ampliará el proceso realizado para la elección de la herramienta y las pruebas realizadas a la red propuesta, donde además se construyó un protocolo para la reproducción y toma de datos en la red propuesta.

Ahora bien, el número de host de acuerdo con el estándar GPON puede alcanzar hasta 128 usuarios, sin embargo para efectos de las pruebas realizadas y por la limitación del software, para realizar las pruebas en escenarios cercanos a los reales se ubicará un número variable de usuarios (mínimo 2 y máximo 8) en cada etapa de distribución, para argumentar las diferentes situaciones que en un momento dado se puedan presentar, evaluando la respuesta de los factores Q y BER.

Capítulo IV:

Diseño de la Red

Como se mencionó en la metodología descrita en el capítulo 3 de este documento, para el diseño de la red y su posterior proceso de validación, fue necesario hacer una revisión de las diferentes herramientas disponibles en el mercado para simular redes GPON en diferentes condiciones.

Una vez seleccionada la herramienta, se procederá a plantear y validar el diseño propuesto a partir de elementos pasivos, realizando variaciones en diferentes parámetros como la distancia de la fibra óptica, incluso a distancias superiores a las establecidas en el estándar GPON, así como el ancho de línea de cada señal portadora obtenida de la fuente óptica de espectro amplio y por supuesto la tasa de transmisión.

A continuación se describirán los parámetros a evaluar.

4.1 Parámetros a evaluar en redes GPON

Para evaluar la red GPON es importante establecer los parámetros de entrada y salida, por eso es que teniendo en cuenta configuraciones como la tasa de bits, el ancho de línea y la distancia de la fibra óptica incide directamente en variables como la Tasa de Error de Bits (BER por sus siglas en inglés) y el factor de calidad Q. A continuación se describirá cada factor.

4.1.1 Parámetros de entrada

4.1.1.1 Tasa de Bits

La tasa de muestreo define el número de bits enviados desde un origen a un destino en un tiempo determinado, cuyas unidades están en *bits por segundo (bps)* o su equivalente en notación científica (Kbps, Mbps o Gbps). Para la validación del funcionamiento de la red se realizará la variación de la tasa de bits así:

- 2,5 Gbps
- 10 Gbps
- 20 Gbps

Todas las anteriores responden a tasas de bits comerciales que son empleadas en la actualidad.

4.1.1.2 Ancho de línea

Al igual que la tasa de bits, el ancho de línea de cada portadora establece temas como la potencia de la señal e incluso el alcance. Ahora, dado que se tiene una fuente óptica de espectro amplio como el LED, con la técnica de particionado espectral este se puede variar para obtener más señales.

Para las pruebas a realizar en el diseño, se establecieron los siguientes valores:

- 1 MHz
- 2 MHz
- 5 MHz
- 10 MHz

4.1.1.3 Distancia de la fibra óptica

La fibra óptica tal y como se describió en el capítulo 1, es el medio de transmisión por excelencia en la actualidad, debido entre otras cosas al alcance que proporciona, sin embargo teniendo en cuenta la limitación que establece el estándar GPON, no se debe superar los 20 km entre la red de transporte y la distribución; es decir que desde la oficina central hasta el usuario final no se debe superar esta distancia.

Sin embargo, con el fin de validar la respuesta de la red, se decidió superar el límite establecido usando los siguientes valores:

- 15 km
- 30 km
- 50 km

4.1.2 Parámetros de Salida

4.1.2.1 *Bit Error Rate (BER)*

La tasa de error es la relación entre el número de bits perdidos en una transmisión, típicamente debido al ruido presente, interferencias o incluso distorsión. Ahora en el caso de las telecomunicaciones, se trata del porcentaje de bits que tienen errores en relación al total de bits de la transmisión, es decir que dicho factor establece la periodicidad con la que se debe retransmitir un mensaje por un error.

Dado lo anterior, se estableció que BER es un factor que permite caracterizar el comportamiento de un sistema de telecomunicaciones, y en el caso particular de las comunicaciones ópticas, los rangos oscilan entre 10^{-9} y 10^{-12} , por lo tanto este factor se considerará como óptimo si se encuentra dentro de los valores mencionados. Sin embargo si la tasa es menor a 10^{-12} indica que el valor supera los rangos normales de operación, mejorando aún más las condiciones de la red.

4.1.2.2 *Factor de calidad Q*

El factor de calidad Q (identificado por la letra Q) establece una relación entre la potencia y las pérdidas de energía de la señal, por lo tanto se espera que este número sea lo mayor posible, dado que a mayor Q, menor pérdida de energía. En otras palabras, básicamente se trata de un promedio de la Relación Señal a Ruido tanto eléctrico como óptico.

Para establecer el valor adecuado es necesario usar la Figura 14 que establece la relación de los parámetros BER vs Q.

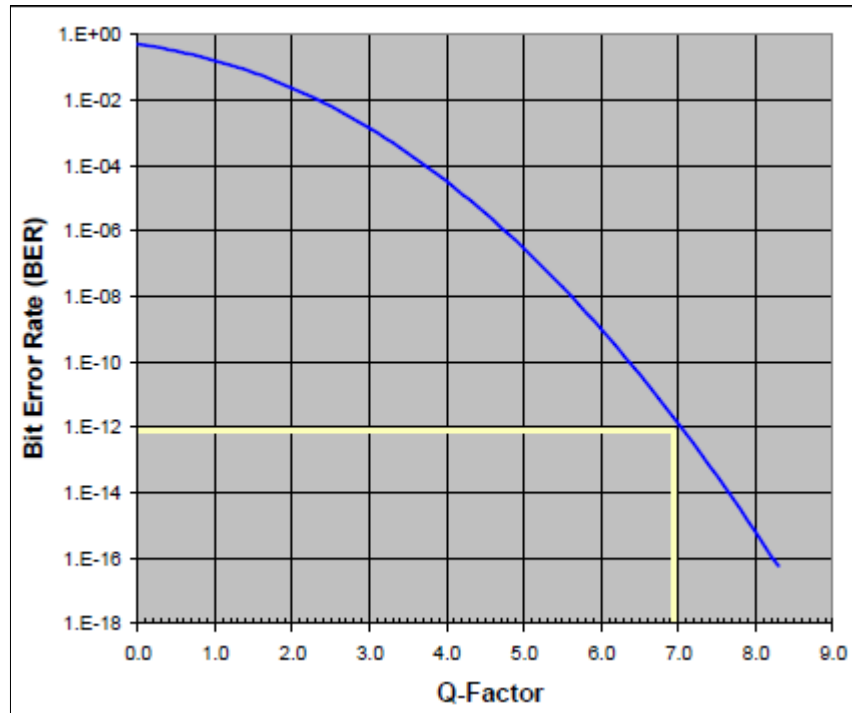


Figura 14. Relación de factor Q vs VER

Fuente: California Scientific, Inc.

De acuerdo a la gráfica anterior, teniendo en cuenta el rango establecido para el BER en la sección 4.2.1 se estableció que el valor mínimo será de 6.0, sin embargo se espera trabajar con un factor Q mínimo de 8.0.

4.1.2.3 Diagrama de OJO

El diagrama de ojo es la alternativa elegida para realizar la medición de los parámetros Q y BER. Consiste en la superposición de los bits de la señal, donde la apertura del ojo indica la diferencia entre un cero y un uno lógico; en consecuencia si la apertura es grande, indica que la señal cumple con los mínimos de calidad establecidos. En cuanto a la forma, un diagrama bien definido también indica que la tasa de error es baja y el factor de calidad es alto, por lo tanto el resultado esperado debe evidenciar un diagrama que cumpla lo antes indicado.

Algunos parámetros como el *jitter* el cual es el retraso en el envío de un paquete de datos que varía en el tiempo, es decir una variación de retrasos, o también la Interferencia Inter Símbolo (ISI por sus siglas en inglés).

4.1.3 Tablas con los parámetros a evaluar

Dado lo anterior, los parámetros de entrada se describen en la Tabla 2, mientras que los evaluados en cada usuario final utilizando una herramienta que visualice el diagrama de ojo para validar el diseño se definen en la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros de entrada de la red

Bit Rate	Ancho de línea	Distancia de la Fibra
2,5 Gbps	1 MHz	15 km
10 Gbps	2 MHz	30 km
20 Gbps	5 MHz	45 km
-	10 MHz	-

Tabla 3. Parámetros a evaluar en la red propuesta

Parámetro	Valor
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$
Factor Q	≥ 8

4.2 Elección de la herramienta para realizar la simulación de la red propuesta

En el mercado existen diferentes simuladores de redes ópticas disponibles; todos ellos con características y opciones para recrear situaciones ideales o reales donde existen factores como la dispersión, pérdidas por diferentes motivos, intermodulación y efectos no lineales, entre otros, que afectan la información enviada.

Soluciones como OptiSystem permiten realizar simulaciones con precisión reduciendo costos en diseño, ofreciendo convergencia con software de análisis como Matlab, SPICE, entre otras. Por otra parte el software permite realizar una estimación del costo de la red, de acuerdo a los elementos involucrados y su precio comercial. Además, el software cuenta con diferentes ejemplos de simulaciones en redes WDM – PON (Optiwave, n.d.; Synopsys Silicon to Software, 2017).

De igual manera de acuerdo con el fabricante, existen diferentes publicaciones a nivel mundial en temas relacionados con redes de fibra óptica que destacan el uso del software OptiSystem, como una solución confiable para el desarrollo de sus investigaciones, por ende se considera una opción válida a tener en cuenta como escenario de simulación del diseño a desarrollar.

Por otra parte existe otra solución como VPI Photonics que ofrece opciones para realizar diseños y análisis de red, a través de simulaciones con todos los requerimientos técnicos y elementos involucrados de orden activo y pasivo, permitiendo incluso realizar un estimado del costo de la solución de acuerdo a los valores de cada elemento (VPI Photonics, s/f).

En cuanto a fibra óptica, VPI Photonics cuenta con diversos ejemplos que permiten establecer un escenario deseado, además cuenta con diferentes ejemplos para ayudar al usuario no solo en el manejo de la herramienta, sino en la contextualización en el área correspondiente. No obstante, VPI Photonics no contempla licencias académicas o de prueba, por tal razón se descartó el uso de éste en la investigación.

En ese sentido, teniendo en cuenta el alcance del proyecto y las pruebas requeridas en el desarrollo del mismo, se decidió escoger el software OptiSystem, debido a la posibilidad de encontrar una versión académica o de prueba, su interfaz de usuario sencilla, la capacidad para realizar diferentes configuraciones y finalmente la posibilidad de crear un presupuesto real, de acuerdo con los precios del mercado al momento de evaluar costos.

Posteriormente se presentarán las diferentes pruebas realizadas con el simulador para llegar al diseño de red y los resultados obtenidos.

4.3 Primeras pruebas en el software usando el dispositivo AWG

Una vez seleccionado el software OptiSystem por sus bondades para el proceso de simulación cuya elección se realizó en la sección 4.2, se inició un proceso de reconocimiento con el fin de establecer sus características y sus capacidades para simular redes WDM PON realizando el proceso de particionado espectral, por eso se procedió a realizar una prueba básica con dos fuentes ópticas tipo laser con frecuencias centrales de 193.1 THz y 193.2 THz respectivamente para ser multiplexadas usando un AWG sin pérdidas y con un espaciado de 100 GHz. En la Figura 15 se observa la configuración

establecida, teniendo una frecuencia central de 193,1 THz, 10 GHz de ancho de banda y espaciado de 200 GHz.

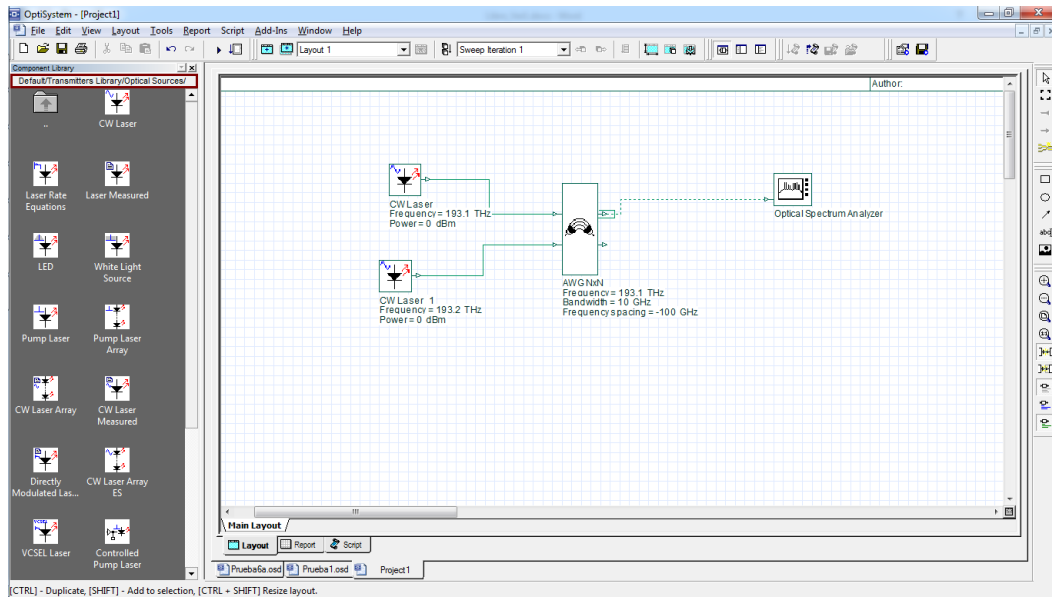


Figura 15. Primera prueba con el simulador

Fuente: Author

Los resultados fueron evaluados en un analizador de espectros donde se observó la respuesta de la frecuencia central de cada portadora y la potencia de salida, evidenciando que – en condiciones ideales – no hay ningún tipo de pérdidas en las señales. Sin embargo también se observaron otro tipo de picos adicionales en la salida a una distancia de 100 GHz de separación pero con pérdidas de más de 70 dBm, debido al comportamiento cíclico del AWG. No obstante, las frecuencias centrales resultantes tienen unas pérdidas casi despreciables, por lo tanto se observa el comportamiento ideal (ver Figura 16).

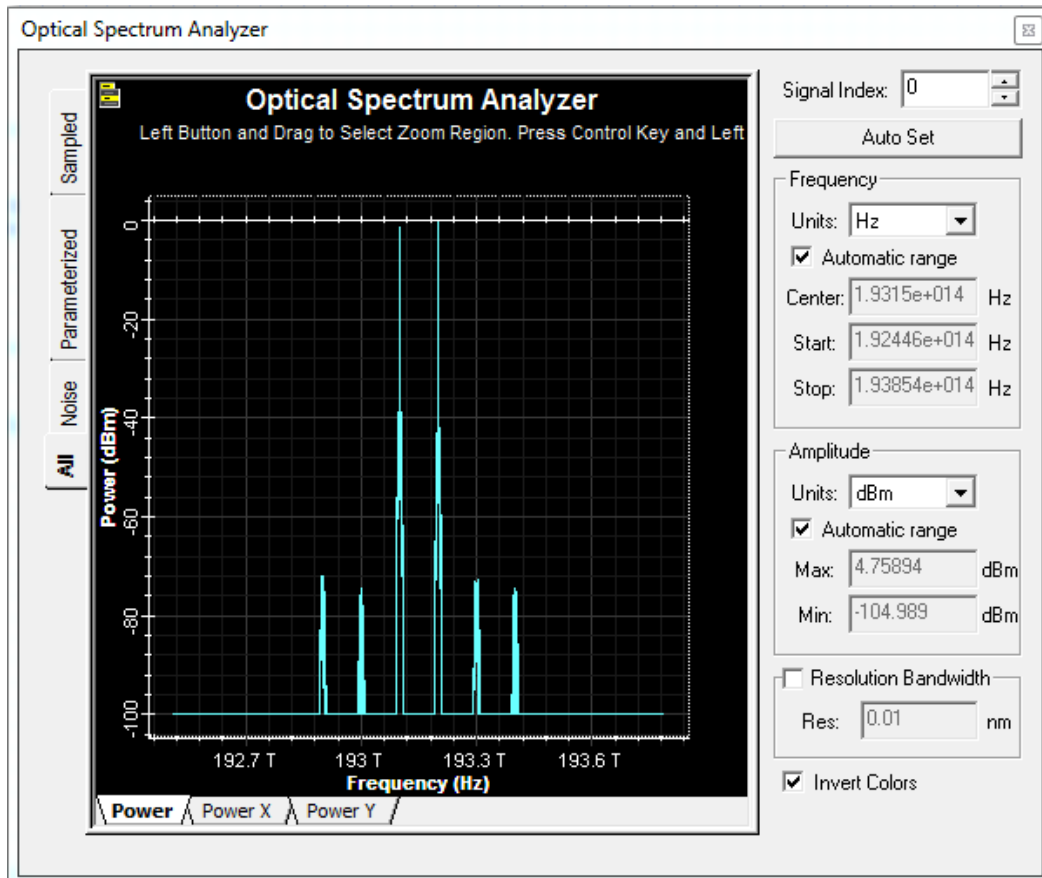


Figura 16. Respuesta del ejercicio mostrando las frecuencias centrales

Fuente Autor

4.3.1 Método para el análisis de los resultados

Para establecer la manera en la que se toman los datos que serán analizados, se procedió a repetir cinco (5) veces la simulación planteada en la sección 4.3, encontrando que si no se modifica algún parámetro de los que ya se encuentran configurados, la respuesta no cambiará.

Igualmente, se realizaron variaciones de parámetros como las frecuencias centrales de las fuentes ópticas, repitiendo nuevamente las cinco (5) iteraciones con el fin de validar respuesta de la herramienta. Como resultado se corroboró que una vez se tiene la nueva respuesta de la red, la respuesta no varía y en consecuencia se estableció que no es necesario realizar varias iteraciones para leer el resultado, dado que los valores evaluados no cambian en función del tiempo.

Dicha información será registrada en el protocolo diseñado para realizar las pruebas en el simulador.

4.3.2 Variaciones del dispositivo AWG

Dado que el dispositivo AWG tiene diferentes características que pueden ser configuradas en el simulador, se procedió a realizar algunas variaciones para comprender el funcionamiento de éste y cuál será su aporte para el diseño final de la red.

Es así como se procedió a incluir un segundo AWG para ser usados como multiplexores 2 x 2, cada uno con dos fuentes ópticas en diferentes frecuencias centrales que van desde 193.1 THz con una separación de 100 MHz hasta 193.4 THz como se mencionó en la sección anterior. Una vez multiplexadas las señales en los dos AWG, se utilizó un tercero como demultiplexor 4 x 4 para obtener cada frecuencia central por separado en una de las salidas (ver Figura 17).

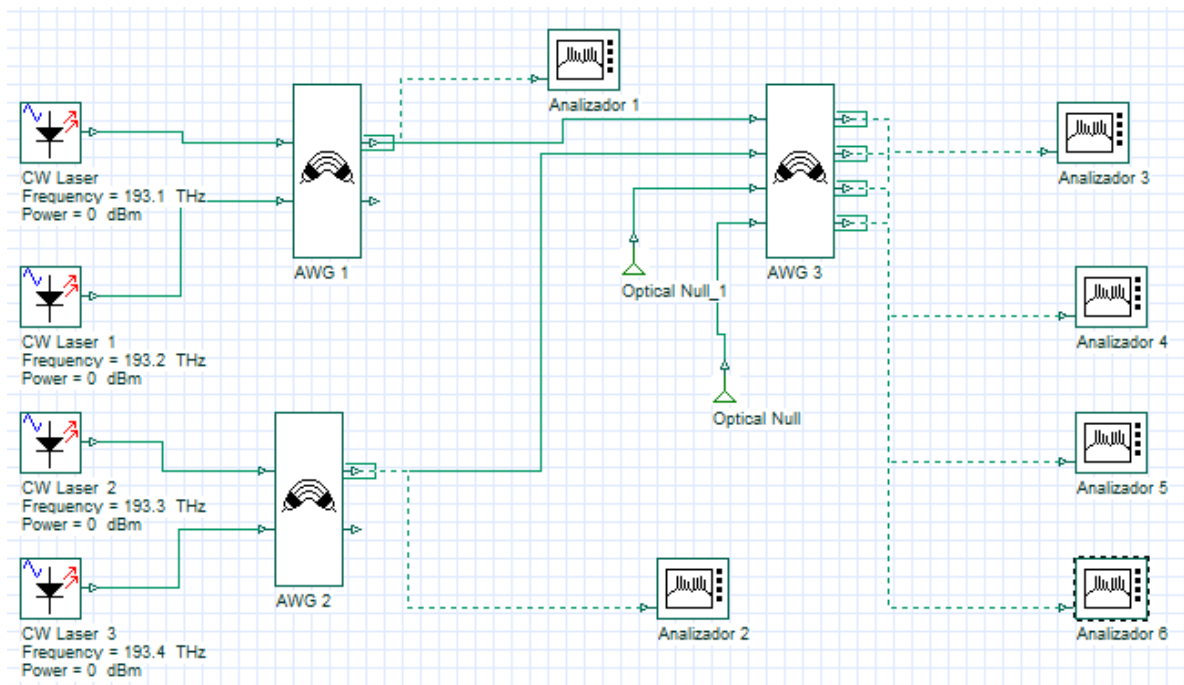


Figura 17. Esquema con AWG como multiplexor y demultiplexor

Fuente: Autor

Sin embargo el comportamiento cíclico del dispositivo genera un traslapamiento de señales en las salidas 3, 4, 5 y 6 (ver Figura 18), que puede corregirse con un filtro pasa banda,

pero los elementos requeridos para esto son activos y por lo tanto deben ser involucrados en la solución.

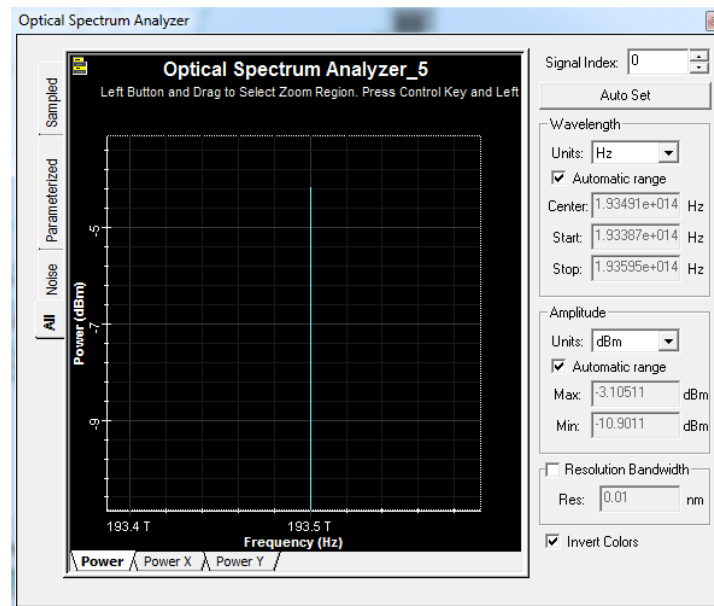


Figura 18. Resultado salida 4 del AWG Demux

Fuente: Autor

4.3.3 Mediciones del parámetro BER (Bit Error Rate)

Una vez terminada la fase exploratoria del software y la configuración de los dispositivos AWG para uso como multiplexor y demultiplexor, se procedió a realizar una prueba modulando las fuentes ópticas (OLTs), e incorporando en el diseño un generador de bits aleatorio y un codificador de señal, utilizando como modulador el Mach-Zehnder, uno de los más utilizados en modulación de señales ópticas. En la Figura 19 se observa el esquema configurado en el software.

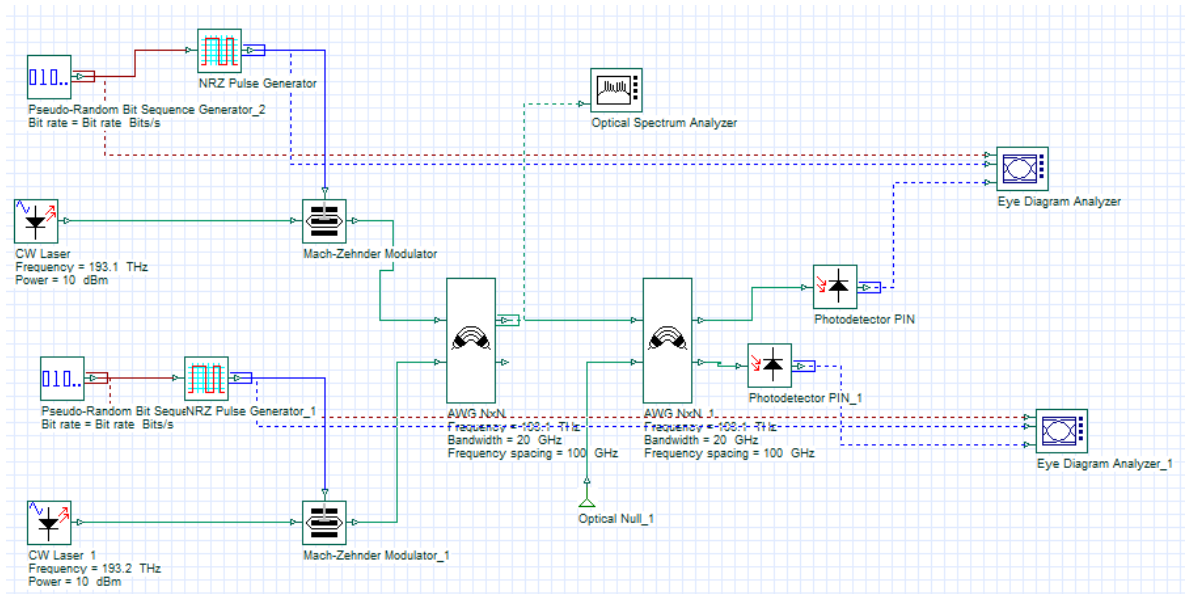


Figura 19. Señales moduladas, demoduladas y observadas en diagrama de ojo

Fuente: Autor

La respuesta a la salida del AWG 1 que multiplexa las señales es una mezcla de las frecuencias centrales como se muestra en la Figura 20.

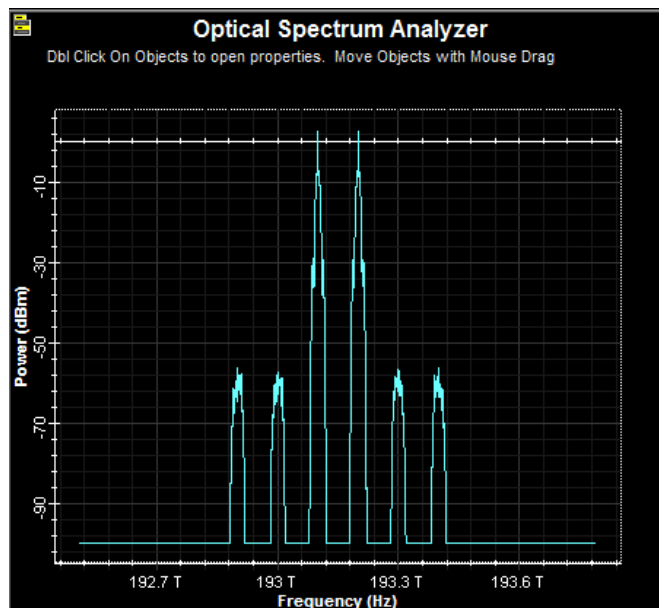


Figura 20. Señales moduladas y posteriormente multiplexada por el AWG

Fuente: Autor

Posteriormente se demultiplexan usando otro dispositivo AWG de donde cada es llevada a un fotodetector para convertir la señal del dominio óptico al dominio eléctrico, y finalmente se usa un *Analizador de Diagrama de Ojo* para establecer factores que serán evaluados como Calidad (Q), BER, ancho del ojo, entre otros, y así determinar la confiabilidad en la transmisión. Para este caso, en condiciones con pocas pérdidas (del orden de 4dBm) se obtuvo una respuesta satisfactoria (ver Figura 21).

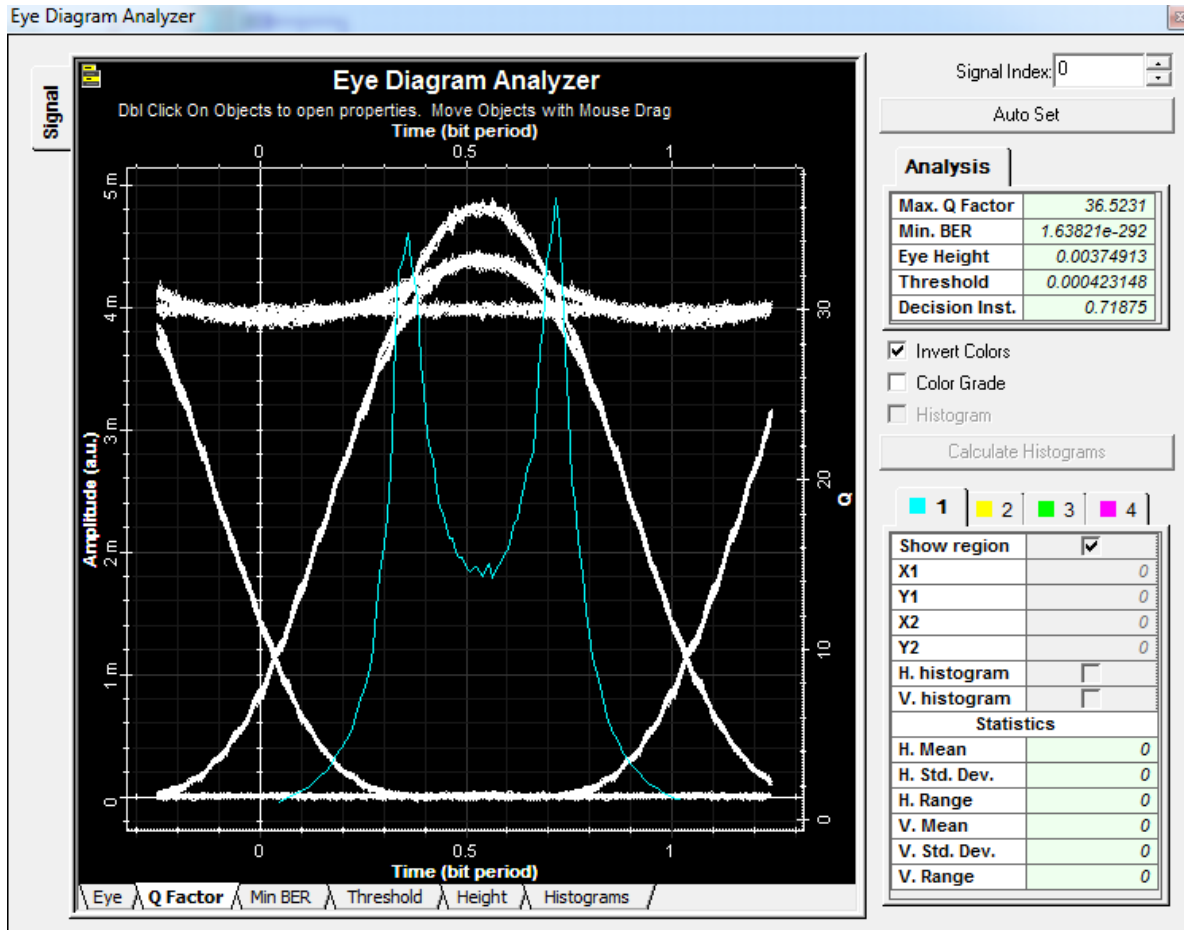


Figura 21. Respuesta de la simulación con el analizador de diagrama de ojo

Fuente: Autor

4.4 Diseño de red propuesta

Las redes ópticas pasivas son aquellas que no involucran elementos activos, es decir que no requieren alimentación externa para su funcionamiento; por ende esta es una característica es un parámetro de diseño en la propuesta.

En este sentido y de acuerdo con la investigación realizada en redes WDM PON, se estableció que elementos como los AWG por ser un elemento pasivo y sus características de funcionamiento, son ideales para dividir el espectro del cual disponen las fuentes ópticas de espectro amplio tipo LED, puesto que el ancho de línea es suficiente para la división con el fin de obtener múltiples portadoras a partir de una única fuente.

Posteriormente esta señal multiplexada es enviada por un hilo de fibra de longitud máxima de 15 km, de tal forma que en el proceso de demultiplexación y filtrado de la señal se tenga 5 Km y así cumplir lo establecido en el estándar GPON donde se establece que la longitud máxima de una red de acceso es de 20 km.

Por otra parte para la recuperación de la longitud de onda asignada a un usuario final se realiza con un Splitter $n \times m$, donde m es el número de abonados o usuarios finales, en cuya salida un fotodetector se encarga de seleccionar la frecuencia asignada y finalmente con un filtro Gaussiano para reducir el ruido que altere la información. El resultado es una señal cuyo factor de calidad es superior a 8, la tasa de error BER está entre 10^{-9} y 10^{-12} , y el diagrama de ojo se encuentre dentro de los niveles establecidos por el estándar GPON.

A continuación se presenta el diseño general de la red y se realizará una descripción de las características del diseño basado en el AWG para realizar el proceso de particionado del espectro.

4.4.1 Esquema general de la red propuesta

Esquema general

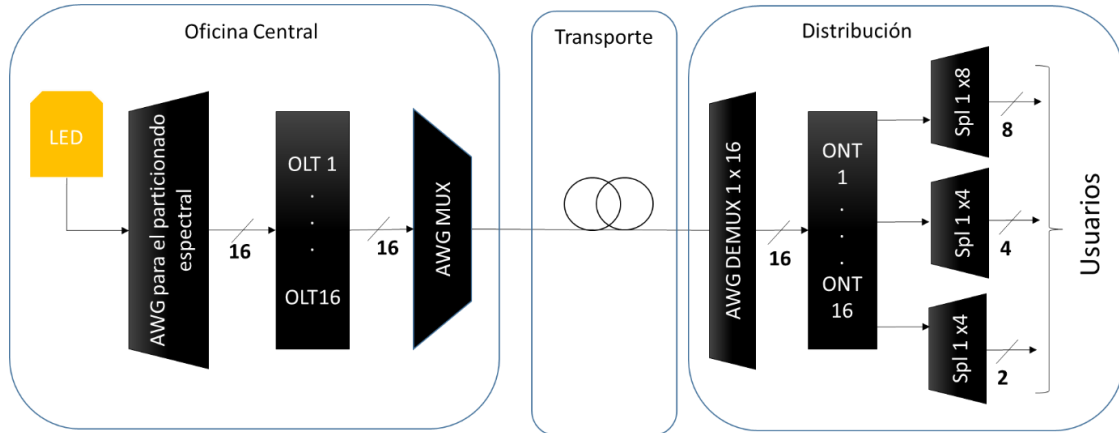


Figura 22. Diseño general de la red

Fuente: Autor.

La Figura 22 presenta el esquema general de la red propuesta la cual se compone de tres etapas básicas, Particionado espectral, Transporte y Distribución, en cada una de ellas se han involucrado elementos pasivos y filtros para conservar la señal con los niveles establecidos de BER, potencia y calidad.

Para comprender de forma más precisa el diseño, la Figura 23 muestra el diseño de forma más detallada, donde se observa la división espectral realizada por el filtro AWG para crear las portadoras que posteriormente serán moduladas en el cada OLT, luego multiplexadas para su transmisión a través del hilo de fibra óptica. Finalmente en la etapa de distribución se demultiplexa la señal y un Splitter 1 x 16 realiza la distribución de cada portadora hacia un grupo de usuarios específicos.

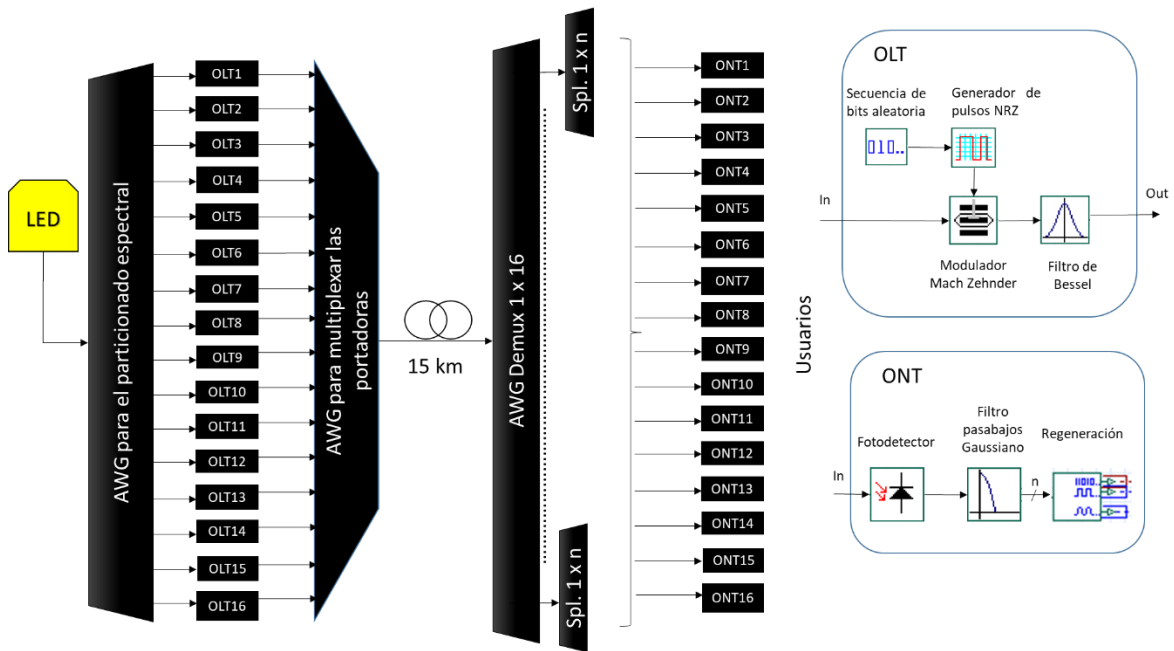


Figura 23. Diseño detallado de la red

Fuente: Autor

A continuación, se realizará la descripción de cada etapa.

4.4.2 Oficina central (C.O)

Esta es la etapa inicial de la red y se compone de una fuente de espectro amplio tipo LED, cuya señal posteriormente se envía a un AWG donde se realiza la división del espectro en diferentes longitudes de onda que pasarán a los OLT.

En la Tabla 4 se mostrará la configuración del AWG que realizará el particionado del espectro.

Tabla 4. Características de configuración de un AWG

Características	Valor
Tamaño	16 x 16
Frecuencia central	193,1 THz
Ancho de banda	1 MHz a 10 MHz
Frecuencia espaciado de	-100 GHz
Pérdidas por inserción	3 dB

Fuente: Autor

Siguiendo estas recomendaciones, de acuerdo con el comportamiento cíclico del dispositivo y su configuración como Demultiplexor, el AWG dividirá el espectro en 16 señales que serán moduladas en cada OLT y posteriormente multiplexadas utilizando otro AWG de tal manera que sean transportadas por el hilo de fibra para finalmente dividirla en el mismo número de ONTs.

Por otra parte en la Figura 24 se observa la composición de una OLT dado que consisten en un *Generador de Bits Pseudo-Aleatorio* el cual genera una secuencia de bits que se asemeja a los datos de una fuente de información de un sistema de comunicación, un *Generador de Pulsos NRZ* que convierte los datos binarios del al dominio eléctrico para ser codificados (el formato NRZ mantiene el bit en 1 y no cambia a cero si hay 2 o más bits en cero) y finalmente un *modulador Mach-Zehnder* que convierte la señal eléctrica entregada al dominio óptico y transmite la información con la frecuencia central de la portadora.

Es importante mencionar que el funcionamiento de este último establece que la señal de entrada ingresa a una guía de onda con una potencia P_i y posteriormente se divide en dos partes; una de ellas continúa su camino mientras que la otra sufre un desfase.

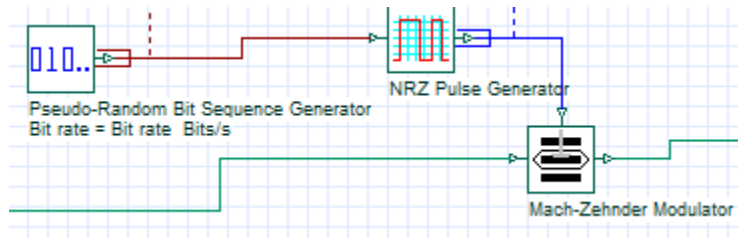


Figura 24. Esquema de un OLT

Fuente: autor

Posteriormente con las diferentes longitudes de onda con una separación de 100 MHz, se ubica un filtro de Bessel para limpiar la señal que posteriormente se envía a través de un hilo de fibra óptica de 15 km desde la Oficina central hasta la red de distribución. Es importante establecer que la elección del filtro mencionado obedece a sus características de selectividad, puesto que ofrece mejores prestaciones que un filtro gaussiano.

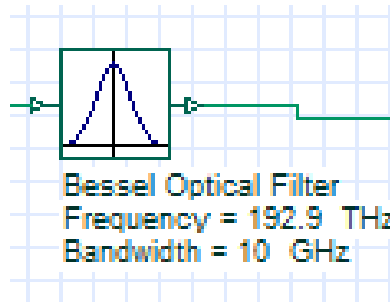


Figura 25. Filtro de Bessel después de la OLT

Fuente: Autor.

Como se observa (ver Figura 25), el filtro de Bessel ha sido configurado con una frecuencia de 192,9 THz y un ancho de banda de 10 GHz.

Finalmente esta etapa concluye con un AWG que a diferencia del particionado espectral, actúa como Multiplexor para enviar toda la información a la etapa de transporte a través de una única salida. Al cambiar su función dentro del diseño, también cambian los parámetros de configuración; en consecuencia la Tabla 5 muestra dicha configuración.

Tabla 5. Configuración del AWG como multiplexor

Características	Valor
Tamaño	16 x 16
Frecuencia central	193,1 THz
Ancho de banda	30 GHz
Frecuencia espaciado	de -100 GHz
Pérdidas por inserción	3 dB

Fuente: Autor

4.4.3 Transporte

Esta etapa es la más sencilla pero no menos importante, dado que es la encargada de llevar las diferentes señales portadoras multiplexadas hasta el destino. Consiste en un hilo de fibra óptica tipo monomodo de 1550 nm con una longitud de 15 km debido a que el estándar GPON establece que la longitud máxima de la red no debe exceder los 20 km, por ende, se ha reservado un máximo de 5 km de fibra para hacer la distribución (ver Figura 26).

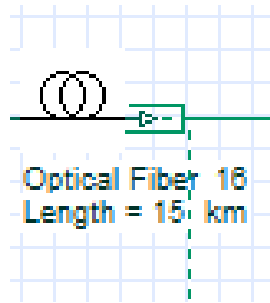


Figura 26. Etapa de transporte - Hilo de fibra óptica

Fuente: Autor

4.4.4 Distribución

Es la etapa final de la red, donde se realiza la demultiplexación de la señal transportada en la fibra óptica para recuperar cada una de las longitudes de onda creadas a partir del particionado espectral del LED, y posteriormente cada señal se distribuye entre los n usuarios finales a quienes se les abonará el servicio. Dicha distribución se compone de un Splitter $1 \times n$, donde n es el número de usuarios finales, el cual ha sido configurado con pérdidas por inserción de 3 dB.

Ya en la ubicación del usuario final se utiliza un Fotodetector y posteriormente un Filtro Gaussiano cuya frecuencia de corte es el 75% del *Bit Rate* que para este caso es de 10 Gbps y un regenerador de señal que siempre será necesario incluir con el fin de eliminar el ruido que se haya incorporado a la señal ya sea en el dominio óptico o en el dominio eléctrico. Finalmente, para verificar los niveles de BER y Factor de Calidad Q se utiliza un *Analizador de Diagrama de Ojo* y un *Lector de Potencia Óptica* comparando los valores con los establecidos anteriormente.

En la Figura 27 se observa la etapa de distribución en el diseño de red.

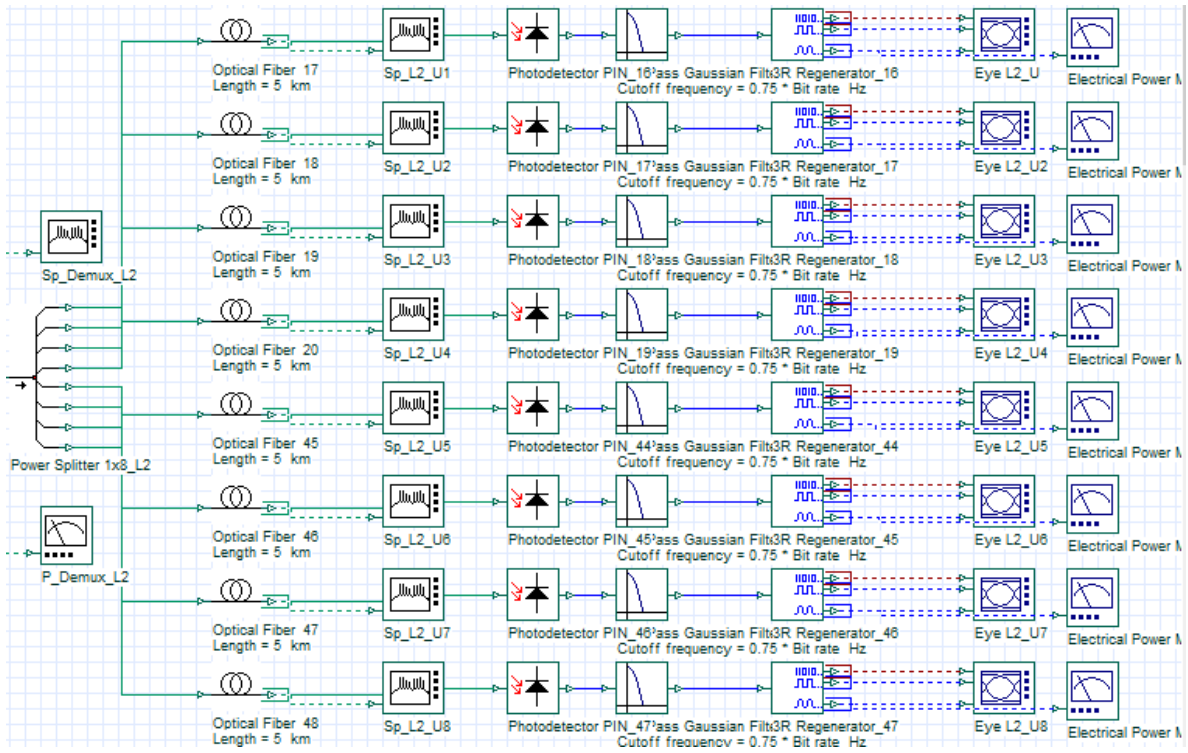


Figura 27. Distribución de uno de los canales en ocho (8) usuarios

Fuente: Autor

Capítulo V:

Resultados y Discusión

5.1 Análisis de la red por canal

Siguiendo el esquema planteado en el capítulo 4, se construyó la red en el software OptiSystem donde se demultiplexa la señal enviada por la fibra óptica para obtener nuevamente cada una de las 16 longitudes de onda y se distribuyen en diferentes ONTs.

Ahora en la etapa de distribución, el simulador tiene una limitación en cuanto a la tasa de muestreo puesto que el número de canales deja al último sin datos, por eso se decidió establecer un número de 8 host para cada longitud de onda; sin embargo para garantizar situaciones reales se realizará una distribución de cada longitud de onda en un número variable de usuarios que oscila entre 2 a 8 usuarios para cumplir con el criterio de diseño tal y como se estableció en la sección 3,4 de este documento.

Así las cosas, para configurar una red donde la cantidad de usuarios varíe dependiendo de la necesidad del servicio, se decidió ubicar un número diferente en cada canal para representar las diferentes opciones que en un momento dado se pueden presentar. La distribución se realizó de manera descendente, comenzando con 8 usuarios y finalmente a partir del canal 5 se mantuvo al menos 2 usuarios (Tabla 6).

Tabla 6. Distribución de usuarios por canal

Usuarios por canal	
Canales	Usuarios
λ_1	8
λ_2	8
λ_3	4
λ_4	4
λ_5	2
λ_6	2
λ_7	2
λ_8	2
λ_9	2
λ_{10}	2

λ_{11}	2
λ_{12}	2
λ_{13}	2
λ_{14}	2
λ_{15}	2
λ_{16}	2

Fuente: Autor

Además de evaluar las variables BER y Factor de Calidad Q, se evaluará la Potencia de Llegada de la señal, cuyo valor debe oscilar dentro de 10 dBm y - 20 dBm (Ramaswami et al., 2010b; Systems, 2008), con el fin de establecer si los resultados de la red WDM PON propuesta se ajustan al estándar GPON, fundamentada en el particionado espectral usando un filtro AWG.

Establecido los parámetros a evaluar, se procedió a configurar la red teniendo en cuenta la configuración de la Tabla 4 de la sección 4.4.2, para realizar el particionado del espectro del LED con una frecuencia central de 193.1 THz, ancho de banda de 1 MHz y un espaciado de -100 GHz. Como resultado, la potencia de cada canal se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Frecuencias de la división del espectro del LED y sus potencias

Frecuencias resultantes		Potencia del LED	
Canales	Frecuencia	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,16 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm
λ_6	193,6 THz	802,6 uW	-1 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm
λ_9	193,9 THz	1,04 mW	0,19 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,61 dBm
λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,45 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm

Fuente: Autor

El espectro de la señal donde se evidencia la partición se muestra en la Figura 28.

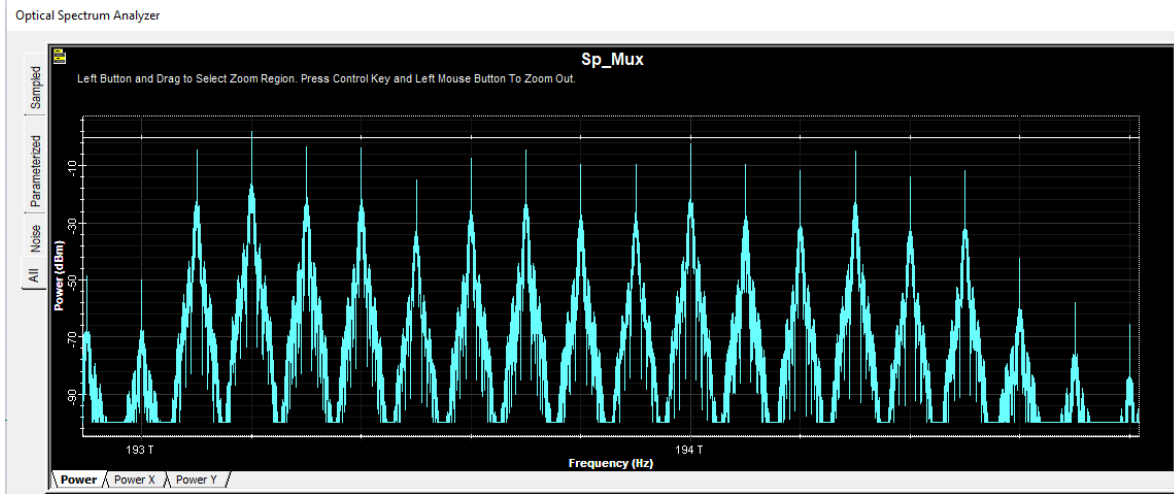


Figura 28. Proceso de particionado y filtrado previo a la transmisión por la fibra óptica

Ahora dichas señales son moduladas y multiplexadas para ser transportada por el hilo de fibra óptica de 15 km, y posteriormente demultiplexadas con otro dispositivo AWG para ser distribuidas en los últimos 5 km usando Splitters, donde se tendrán 16 canales con diferentes números de usuarios con un BER y un factor Q mayor a 8 de acuerdo a lo establecido en la sección 4.1.3. En la Figura 29 se observa la configuración mencionada.

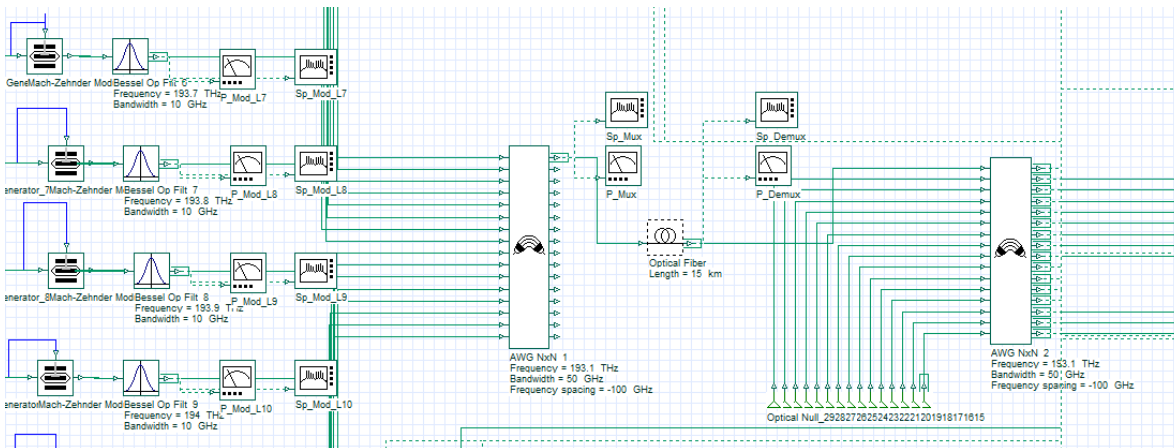


Figura 29. Proceso de multiplexación y demultiplexación de 16 canales

Fuente: Autor

Continuando en la etapa de distribución, se asigna cada una de las longitudes de onda a un segmento de red en los cuales se realizará la división entre 2 y 8 usuarios a través de un Splitter, y posteriormente se incluyó un fotodetector con un filtro gaussiano para convertir la señal del dominio óptico al dominio eléctrico sin ruido, para llegar al usuario y así ver los parámetros BER, Q y la potencia de llegada.

Finalmente se evaluaron las potencias de un usuario por cada canal para comparar con el mismo valor de cada sub portadora. El resultado se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de potencia en usuarios de la red

Canales	Frecuencias	Potencia (subportadora)		Potencia (Demux)		Potencia (usuario)	
$\lambda 1$	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	298,2 uW	-5,25 dBm	29,61 uW	-15,28 dBm
$\lambda 2$	193,2 THz	7,52 mW	8,16 dBm	1,39 mW	1,42 dBm	137,7 uW	-8,61 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	375,0 uW	-4,26 dBm	74,48 uW	-11,28 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	350,5 uW	-4,55 dBm	69,61 uW	-11,57 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	26,39 uW	-15,78 dBm	10,48 uW	-19,79 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	802,6 uW	-1 dBm	150,9 uW	-8,21 dBm	59,95 uW	-12,22 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	283,2 uW	-5,47 dBm	112,5 uW	-9,49 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	91,29 uW	-10,39 dBm	36,26 uW	-14,41 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	1,04 mW	0,19 dBm	91,10 uW	-10,40 dBm	36,18 uW	-14,41 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,93 mW	4,61 dBm	496,7 uW	-3,04 dBm	197,3 uW	-7,05 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	95,97 uW	-10,18 dBm	38,12 uW	-14,19 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	56,25 uW	-12,50 dBm	22,34 uW	-16,51 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	1,76 mW	2,45 dBm	265,6 uW	-5,76 dBm	105,5 uW	-9,77 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	33,60 uW	-14,73 dBm	13,35 uW	-18,75 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	53,22 uW	-12,74 dBm	21,14 uW	-16,75 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	61,68 uW	-42,10 dBm	34,50 uW	-15,01 dBm

Fuente: Autor

De esta manera se estableció que la potencia recibida por los usuarios, está dentro del rango establecido de 10 dBm y -20 dBm, evidenciando que el diseño de la red tiene la respuesta esperada y se ajusta a lo establecido en el estándar GPON tanto en factores como Q, BER y Potencia.

En el **Anexo 2** se realiza el análisis de cada uno de los canales donde se evaluará la respuesta de los parámetros establecidos en el usuario número 1, dado que este número varía de acuerdo al canal, tal y como se estableció anteriormente.

5.2 Análisis general de la red y evaluación de las variables de acuerdo a los parámetros establecidos

Realizar la evaluación de los parámetros en cada canal, se observa que los canales 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 cumplen con lo establecido en el estándar GPON, puesto que los valores de BER están por debajo de 10^{-12} y el factor de calidad Q está por encima de 8, indicando que las longitudes de onda obtenidas a partir de la fuente óptica tipo LED se ajustan al estándar GPON.

En contraste, los canales 5, 14, y 15 tuvieron resultados adversos debido a que el factor de calidad Q se encuentra por debajo del límite establecido de 8; sin embargo el valor de la BER aún se encuentra dentro del rango establecido (9.1×10^{-10} , 2.60×10^{-12} y 3.55×10^{-14} respectivamente). El caso del canal 16 es especial puesto que los resultados no permiten observar un diagrama de ojo definido y en consecuencia no se observan datos de Q y BER.

De acuerdo a lo anterior se concluyó que el resultado de los parámetros a evaluar en la red que están por fuera de lo establecido en la sección 4.1.3 en los canales antes mencionados se debe tanto la limitación del simulador OptiSystem como el comportamiento cíclico del AWG. No obstante se tienen 12 canales que evidencian el funcionamiento adecuado de la red. Por otra parte, en cuanto a la potencia de cada una de las señales evaluadas evidencia que se encuentran igualmente dentro del rango establecido en la sección 5.1 puesto que los valores son menores a 0 dBm.

De acuerdo a la evidencia encontrada en las simulaciones y teniendo en cuenta lo establecido por el estándar GPON, se evidenció que las redes WDM PON permiten la implementación de una red óptica regida por los parámetros de operación señalados en la

recomendación ITU-T G.984.1, puesto que los parámetros evaluados se encuentran dentro de los rangos determinados en el proyecto.

5.3 Comparación con el estándar GPON

El estándar ITU-T G984.1 establece que las redes de acceso GPON pueden ser tanto pasiva como activa y su arquitectura puede ser punto a punto o punto – multipunto. Por otra parte el diseño propuesto en este documento se ajusta a las tasas de transmisión de 2,4 Gbit/s de subida y de bajada, así como un alcance de máximo 20 km debido a las pérdidas por los elementos involucrados en la red, y una proporción de división de máximo 1:128.

Sin embargo bajo este estándar, la potencia se divide entre el número de usuarios que hacen parte de la red, mientras que utilizando fuentes de espectro amplio se logra llegar a cada usuario con 2,4 Gbits/s debido a que cada splitter tendrá su longitud de onda dedicada obtenida desde una misma fuente óptica, representando un beneficio importante dado que el usuario podrá contar con anchos de banda mayores a los establecidos actualmente.

Por otra parte, en cuanto a las fuentes ópticas se refiere, un láser funciona específicamente para un segmento de red, mientras que utilizando una fuente de espectro amplio, se tienen diferentes segmentos de red con la tasa de bits antes mencionadas, llegando a usuarios no solamente con servicios de voz sino de datos, los cuales incluyen acceso a internet, televisión de alta definición y demás aplicaciones que requieran de un sincronismo y un ancho de banda suficiente (por ejemplo el monitoreo).

De acuerdo a lo anterior, la principal característica del diseño propuesto en comparación con el estándar GPON es el uso de una fuente óptica tipo LED para obtener diferentes longitudes de onda desde un mismo dispositivo, en comparación con las fuentes ópticas tipo laser de las cuales sólo se puede obtener una única longitud de onda. Esta división del espectro de luz se conoce como División por Multiplexación de Longitud de Onda (WDM por sus siglas en inglés) y se realiza a través del particionado a través de un dispositivo AWG de acuerdo a lo establecido en la sección 3.2. En otras palabras, las redes WDM PON utilizando una fuente de espectro amplio y el particionado espectral con un dispositivo AWG permite el aumento de canales, reduciendo el costo de fuentes ópticas y en consecuencia el costo de la red en sí.

Por otra parte, en el **Anexo 3** se realizó un análisis de una red GPON para comparar los resultados con la red WDM PON propuesta en este trabajo. Las variables que se usarán para evaluar las redes serán el factor de calidad Q y la tasa de bits BER, las cuales se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación de factor Q y BER en la red WDM PON y GPON

Canal	WDM PON		GPON	
Variables	Q	BER	Q	BER
$\lambda 1$	8,0	$4,99 \times 10^{-16}$	10,0	$3,67 \times 10^{-24}$
$\lambda 2$	9,28	$6,14 \times 10^{-21}$	9,28	$6,14 \times 10^{-21}$
$\lambda 3$	8,89	$2,2 \times 10^{-19}$	9,72	$1,06 \times 10^{-22}$
$\lambda 4$	8,73	$9,78 \times 10^{-19}$	9,90	$1,83 \times 10^{-23}$
$\lambda 5$	6,0	$9,1 \times 10^{-10}$	10,06	$3,51 \times 10^{-24}$
$\lambda 6$	8,49	$7,54 \times 10^{-18}$	10,26	$4,67 \times 10^{-25}$
$\lambda 7$	8,85	$3,22 \times 10^{-19}$	8,85	$3,22 \times 10^{-19}$
$\lambda 8$	8,51	$6,73 \times 10^{-18}$	10,17	$1,19 \times 10^{-24}$
$\lambda 9$	8,51	$6,73 \times 10^{-18}$	9,78	$5,71 \times 10^{-23}$
$\lambda 10$	9,10	$3,3 \times 10^{-20}$	10,16	$1,37 \times 10^{-24}$
$\lambda 11$	8,24	$6,39 \times 10^{-17}$	10,09	$2,59 \times 10^{-24}$
$\lambda 12$	8,24	$6,39 \times 10^{-17}$	8,24	$3,73 \times 10^{-23}$
$\lambda 13$	9,09	$3,90 \times 10^{-20}$	10,0	$6,89 \times 10^{-24}$
$\lambda 14$	6,88	$2,60 \times 10^{-12}$	9,94	$1,27 \times 10^{-23}$
$\lambda 15$	7,47	$3,55 \times 10^{-14}$	10,34	$2,22 \times 10^{-25}$
$\lambda 16$	0	1	7,47	$3,55 \times 10^{-14}$

Fuente: Autor

En este sentido, el diseño propuesto es una red WDM PON que utiliza un LED como fuente de espectro amplio para realizar una división espectral a través de un AWG, obteniendo así tasas de transmisión de 2,5 Gpbs para cada usuario final, con BER menores a 1×10^{-10} y un Q de 8 tal y como se ha establecido en el estándar GPON, sin embargo en ambos casos (teniendo en cuenta la consecuencia de la limitación del software en la red WDM PON) el canal 16 muestra valores por debajo de lo establecido. No obstante se evidencia que los

demás canales muestran que la red propuesta es viable para su implementación reduciendo costos en los equipos y la tecnología involucrada.

5.4 Variación de parámetros de entrada para establecer el alcance de la red

Como se ha demostrado en la sección 5.3 de este documento, la red muestra un funcionamiento adecuado dentro de los límites establecidos por el estándar GPON, sin embargo es importante conocer los límites propios del diseño a través de variaciones de parámetros importantes como el *Bit rate*, el *ancho de la portadora* y la *distancia de la fibra* de tal manera que supere lo establecido en dicho estándar y evaluar los resultados.

En ese sentido, en la Tabla 10 se encuentran los valores de los parámetros a cambiar para evaluar el comportamiento de la red. Dichos parámetros fueron escogidos de acuerdo a valores utilizados actualmente y en cuanto a la distancia de la fibra se decidió aumentar hasta 3 veces la establecida en el estándar GPON.

Tabla 10. Parámetros a cambiar en el diseño propuesto

Bit Rate	2,5 Gbps	10 Gbps	20 Gbps	-
Distancia de la fibra	15 km	30 km	45 km	-
Ancho de la portadora	1 MHz	2 MHz	5 MHz	10 MHz

Fuente: Autor

Para realizar un proceso organizado de las simulaciones se siguió un orden jerárquico donde la variable superior fue *Bit rate*, la intermedia fue el *ancho de la portadora* y finalmente la variable inferior fue la distancia de la fibra, tal y como lo establece la Figura 30.



Figura 30. Estructura seguida en la simulación

Fuente: autor

Por otra parte, el protocolo de pruebas se encuentra descrito en el Anexo 1 donde se establece la variación de los parámetros de entrada mencionados de acuerdo a la estructura de la Figura 30.

La información recogida en dichas pruebas fueron los resultados de las potencias de salida de cada portadora generada, potencia después de la modulación, potencia de la señal multiplexada potencia de llegada después del hilo de fibra y finalmente potencia en la portadora distribuida, así como los parámetros Q y BER. Estos datos se han registrado en el **Anexo 4** donde se evidenció que los mejores resultados se obtuvieron con una tasa de transmisión de 10 Gbps puesto que las variables Q, BER y Potencia se mantienen dentro de los parámetros establecidos y todos los canales se encuentran funcionando, mientras que en el caso de 2,5 Gbps sólo los primeros 7 canales operan dentro de los valores establecidos por el estándar, y a 20 Gbps todos los canales operan pero los valores mínimos no se alcanzan.

Para evidenciar lo anterior, se presenta el comportamiento el canal 1 de la longitud de onda λ_2 que presenta los mejores resultados en términos de las variables antes mencionadas, fijando el ancho de portadora de 10 MHz y la distancia de la fibra óptica en 15 km, con el fin de evidenciar las diferencias del mismo en relación al cambio de la tasa de transmisión.

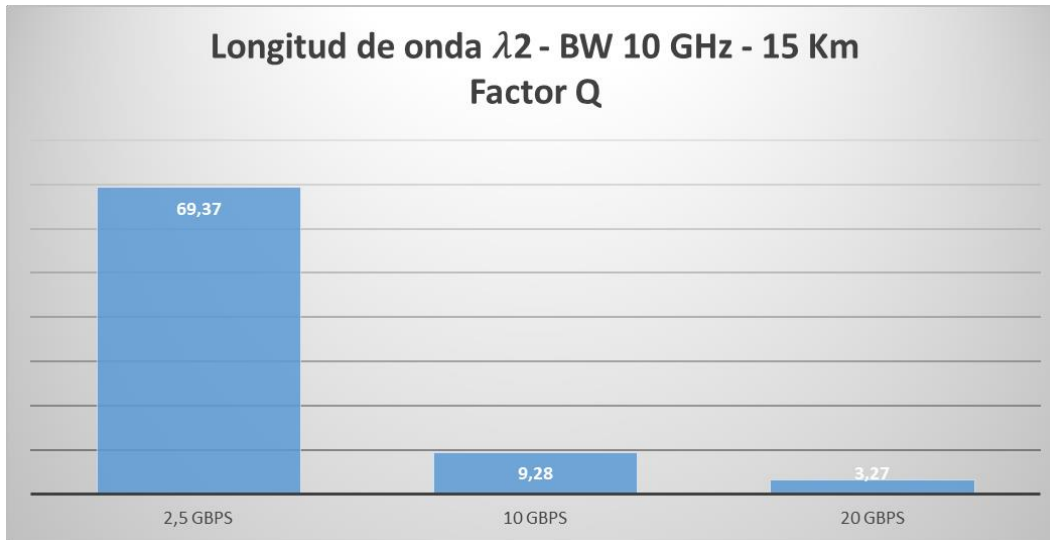


Figura 31. Variación de Q en la respuesta del canal 1 de λ_2 según la tasa de transmisión

Fuente: Autor

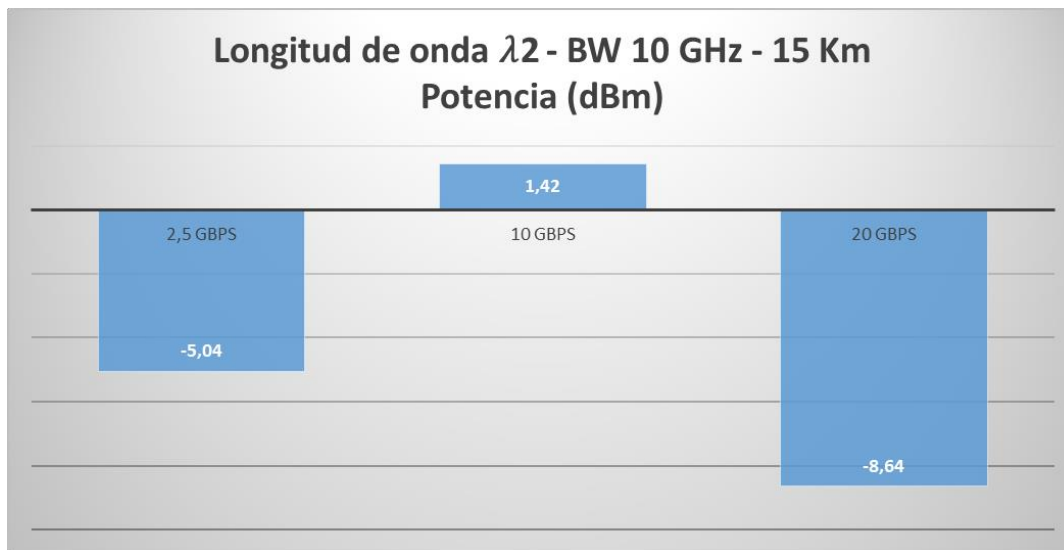


Figura 32. Variación de potencia en la respuesta del canal 1 de λ_2 según la tasa de transmisión

Fuente: Autor

Como se observa en las Figura 31 y Figura 32 con una tasa de 2,5 Gbps se tiene un factor de calidad muy alto y una potencia dentro de los parámetros establecidos, mientras a una tasa de 10 Gbps se obtuvieron valores de Q mayores a 8, así como potencias entre 10 dBm y -20 dBm. Sin embargo en el caso de 20 Gbps la potencia está dentro del rango establecido pero el factor Q está por fuera, evidenciando que no cumple con los requisitos necesarios para el diseño.

Retomando la tasa de 10 Gbps (al igual que en las demás tasas y anchos de línea) se encontró una relación indirecta entre la distancia de la fibra y la potencia, puesto que a mayor distancia de la fibra menor es la potencia en la etapa de distribución. En ese sentido. En la Figura 33 se observa el comportamiento del factor Q en relación a la distancia.

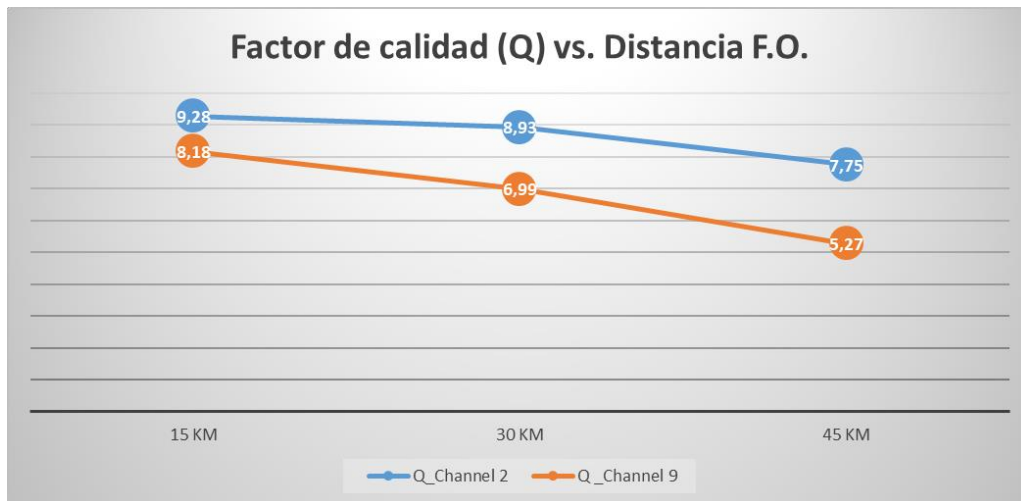


Figura 33. Gráfica factor Q vs. Distancia

Fuente: Autor

Igualmente, la relación de cambio de la potencia en función de la distancia es igualmente inversa puesto que a mayor distancia, menor potencia tal y como se muestra en la Figura 34.

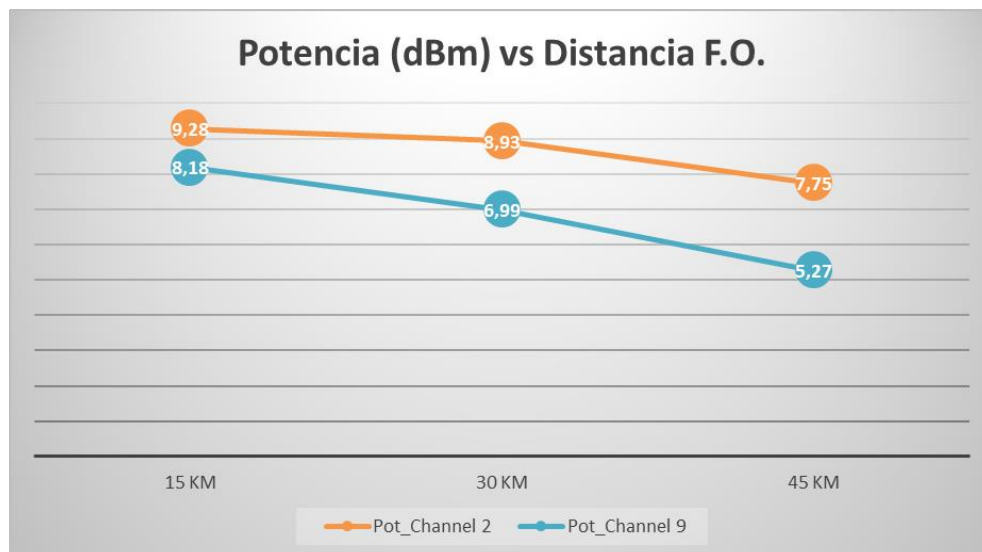


Figura 34. Gráfica de potencia vs. Distancia F.O.

Fuente: Autor

5.5 Evaluación de costos

Como se estableció en la sección 5.3 del documento, las redes WDM PON reducen el costo de operación teniendo en cuenta que no utilizan una fuente óptica de espectro estrecho, debido a que en su lugar usan una fuente de espectro amplio que es particionado en diferentes longitudes de onda, sin embargo es importante evaluar el costo de cada una de las opciones. A continuación se realizará la comparación de los costos de una red GPON vs la red WDM PON para 16 canales.

Antes de realizar la evaluación es necesario establecer que el tendido de fibra óptica ya se encuentra instalado, puesto que el diseño de la red propuesta cambia la fuente óptica y la red de distribución debido a que aumenta el número de usuarios. Por otra parte se estableció que una red GPON está compuesta en esencia por una OLT, la fibra óptica de transporte, Splitter y ONT, mientras que una red WDM PON se compone de una fuente de banda ancha, un AWG, Splitters y ONT. En las dos opciones se debe contar con un analizador de espectro para evaluar los resultados.

En ese sentido, se procedió a buscar los valores de cada una de las redes, encontrando fuentes como Ubiquiti Networks, Fiber.com, Thorlabs las cuales se dedican al comercio entre otras cosas, de tecnología para la implementación de redes de fibra óptica. Los costos de una red GPON se describen en la Tabla 11.

Tabla 11. Costos de la red GPON

Ítem	Cantidad	Valor unitario	Costo (USD)
Láser de 1550 nm	16	\$2620	\$41.920
OLT x 16 Huawei	1	\$3500	\$3.500
Splitter	2	\$200	\$400
ONT	16	\$200	\$3.200
Analizador	1	\$780	\$780
Valor total			\$56.820

Fuente: Autor

Como se observa, las redes GPON se componen de un único láser que genera una longitud de onda específica para cada rama de la red. Para el caso de un diseño similar al propuesto en este documento, se requieren de 16 fuentes ópticas estrechas tipo láser, incrementando su valor comercial. De esta manera se logró establecer que el precio total de la propuesta

es de \$56.820 USD, sin embargo estos costos no incluyen el talento humano calificado necesario para el desarrollo e instalación del diseño por lo que esto incrementaría su valor.

Por otra parte, en cuanto a los costos de implementación de la misma red utilizando una fuente de espectro amplio, es posible reducir los costos considerablemente, dado que el particionado espectral divide su ancho de banda en diferentes sub-portadoras, consiguiendo el mismo resultado que las fuentes tipo láser pero con un sacrificio de potencia, sin embargo y debido al alcance de las redes de acceso dicha potencia es la necesaria para llegar a los usuarios finales con la calidad, tasa de error y por supuesto potencia suficiente.

Ahora en la tabla 12 se evaluarán los costos de una red GPON.

Tabla 12. Costos de la red WDM PON usando una fuente de espectro amplio y un AWG para realizar el particionado espectral

Item	Cantidad	Valor unitario	Costo (USD)
LED de 1550 nm	1	\$130	\$130
AWG x 16	3	\$500	\$1.500
Splitter	16	\$200	\$3.400
ONT	50	\$200	\$10.000
Analizador	1	\$780	\$780
Valor total			\$15.810

Fuente: Autor

En contraste al presupuesto de la red GPON, WDM PON disminuye considerablemente debido a la creación de múltiples portadoras a partir de una única fuente de espectro amplio, en consecuencia una red WDM PON se implementaría por aproximadamente el 28% del presupuesto necesario para desplegar una red basada en el estándar GPON. Es así como se puede afirmar que la red propuesta en este trabajo reduce en un 72% los costos finales de implementación frente al presupuesto de GPON, sin sacrificar los niveles mínimos de calidad y tasa de bits.

También se debe mencionar que la implementación de esta solución se realizaría sobre una red de acceso que ya se encuentra desplegada, en consecuencia el valor por concepto de despliegue de fibra óptica no fue incluido en la propuesta, sin embargo

antes de hacer una implementación se debe realizar una evaluación del estado actual de la red pero este costo no ha sido incluido.

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- El particionado espectral demostró que es posible obtener múltiples portadoras con diferentes longitudes de onda a través de una fuente óptica de espectro amplio como el LED, con niveles de potencia y anchos de banda que se ajustan al estándar GPON y a los criterios de diseño establecidos en este proyecto.
- Los dispositivos AWG además de utilizarse para el proceso de particionado espectral, también pueden ser empleados como Multiplexores y Demultiplexores; Esto resultó en una opción del diseño de la red sin embargo, por efectos de costos y por pérdidas de potencia se consideró utilizar los Splitter 1 x 8 dado que logran el mismo resultado que los AWGs.
- Los factores de calidad (Q) y el BER del diseño propuesto se mantienen dentro de los valores establecidos en el estándar ITU. G 984.1 (Q mayor a 8 y BER menor a 10^{-9}), demostrando que la red es óptima para el tipo de aplicación y las limitaciones que dicho estándar propone (distancia no mayor a 20 km).
- El uso del software de simulación permite establecer un acercamiento al modelo real debido a sus características y configuraciones posibles, además de las herramientas de análisis, sin embargo para establecer el costo de la propuesta, es necesario involucrar otros factores que no son tenidos en cuenta como el talento humano requerido, la instrumentación adicional como las máquinas de empalme.
- Otro factor importante a tener en cuenta en el diseño es la potencia de cada señal puesto que a lo largo de la red, la señal pierde potencia por temas propios de la fibra, conectores e incluso la misma dispersión, sin embargo al realizar el seguimiento a cada portadora, se encontró que la potencia recibida en la etapa de distribución está dentro de los rangos establecidos de 10 dBm y -20 dBm, evidenciando un funcionamiento adecuado del diseño propuesto.
- Se observó que al variar la tasa de transmisión entre 2,5 Gbps, 10 Gbps y 20 Gbps el número de canales disponibles también aumenta, sin embargo con una tasa de bits pequeña, los factores Q y BER se mantienen en niveles adecuados pero sólo se obtienen sub portadoras con potencia adecuada, puesto que las demás están por encima de -50 dBm.

- Se demostró que el diseño propuesto opera adecuadamente en 10 Gbps, siempre que opere dentro de los límites establecidos por el estándar GPON puesto que al aumentar la distancia en la fibra óptica, existe una mayor pérdida de potencia, afectando la distribución de las longitudes de onda a los usuarios finales. Sin embargo teniendo un hilo de fibra de 30 km aún recibe señales dentro de los niveles establecidos de Q, BER y Potencia.
- Las redes WDM PON demostraron ser más eficientes en términos de costos puesto que el uso adecuado del espectro amplio de un LED y un dispositivo para realizar el particionado espectral, reemplaza las fuentes tipo láser empleadas individualmente en un único canal, reduciendo el valor de implementación de \$56,820.00 USD a \$15,810.00 USD (un aproximado del 28% en comparación al estándar GPON), sin sacrificar potencia, calidad y tasa de error dentro de los 20 km establecidos para redes de acceso.
- Con el desarrollo de este proyecto se evidenció que las redes WDM PON son ideales para optimizar las redes de acceso desplegadas en la actualidad, dado que el uso de fuentes de espectro amplio y un AWG como herramienta para el particionado espectral, permite obtener longitudes de ondas diferentes para cada segmento de red, aumentando el número de usuarios con tasas de transmisión desde 2,5 Gbps hasta 20 Gbps. Este factor, sumado al ancho de las portadoras y la distancia de la fibra pueden afectar negativamente la red, disminuyendo el alcance de la red en términos de usuarios y anchos de banda.

6.2 Recomendaciones finales

Dado que este proceso se realiza a través de simuladores, es recomendable utilizar valores comerciales de los elementos como la fibra óptica, el AWG, fotodetectores, entre otros para tener una aproximación lo más cercana posible a un funcionamiento real. Dichas recomendaciones se encuentran en los manuales técnicos entregados por los fabricantes de cada dispositivo y se pueden consultar directamente en las páginas web éstos.

De esta manera, se recomienda tener en cuenta los valores definidos en las siguientes tablas:

6.2.1 Fibra Óptica Monomodo (SMF):

Tabla 13. Parámetros de la fibra en el diseño

Fibra Monomodo	
Distancia	20 km
Coefficiente de dispersión cromática	17 ps/nm/km
Atenuación	0,2 dB/km
Longitud de onda de referencia	1550 nm

Fuente: ITU G.652. Características de las fibras Monomodo

6.2.2 Particionado espectral utilizando un AWG

Tabla 14. Configuración del AWG para el particionado espectral

Particionado con AWG	
Ancho de banda	1 MHz
Separación	-100 GHz
Pérdidas por inserción	3 dB
Frecuencia central	193,1 THz

Fuente: Fiber-Optic Communication System

6.2.3 Configuración del fotodetector:

Tabla 15. Configuración del fotodetector

Fotodetector	
Responsividad	1 A / W
Dark current	10 nA
Ganancia	3

Fuente: Fiber-Optic Communication System

Las fuentes ópticas tipo LED permiten dividir su espectro en diferentes longitudes de onda que son direccionadas a cada usuario usando un Splitter 1 x 8 con condiciones iguales a las que ofrece un láser, desde que no se superen los límites establecidos por el estándar GPON de máximo 20 km.

Igualmente, dado que la solución se plantea para una red de distribución que ya se encuentra desplegada, no es necesario incluir costos de instalación de fibra óptica dado que la esencialmente la solución planteada se realiza en la oficina central desde donde se realizará el particionado espectral y su posterior modulación para ser enviado a través de la fibra, y también conviene revisar el software necesario para la operación de las redes una vez se implemente la solución, dado que este costo no fue incluido dentro del proyecto debido a que sólo se contempló la capa física del proceso.

En cuanto al proceso realizado en la distribución, es decir en las ONT, es necesario ubicar un filtro para regenerar la señal de tal forma que el resultado se ajuste a los valores establecidos de Q y BER, cumpliendo lo establecido en las recomendaciones del estándar GPON.

Referencias

- Agrawal G.P. (2002). *Fiber-Optic Communication System* (Third; I. John Wiley & Sons, ed.). New York: Kai Chang.
- Ahmed, N., Aljunid, S. A., Ahmad, R. B., & Fadil, H. A. (2010). Demonstration of spectral slicing WDM system using Light Emitting Diode (LEDs) light source. *ICCAIE 2010 - 2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*, (Iccaie), 148–150. <https://doi.org/10.1109/ICCAIE.2010.5735064>
- Alobaidan, H. (2017). Current and Future FTTH Technologies. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 7(2), 35–40. <https://doi.org/10.5923/j.jwnc.20170702.02>
- Artiglia, M., Bottoni, F., Corsini, R., Presi, M., Ranello, M., Valvo, M., & Ciaramella, E. (2016). 4x10 Gb / s Coherent WDM-PON System over 110 km Single Mode Fibre and with 55 dB ODN Power Budget. *ICTON 2016*, 1(1), 7–9. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2016.7550264>
- Bobrovs, V., Spolitis, S., Trifonovs, I., & Ivanovs, G. (2013). Spectrum sliced WDM-PON system as energy efficient solution for optical access systems. *2013 IEEE Latin-America Conference on Communications, LATINCOM 2013 - Conference Proceedings*, (Dcm), 6–11. <https://doi.org/10.1109/LatinCom.2013.6759812>
- Chen, Y., Li, J., Zhu, P., Wu, Z., Zhou, P., Tian, Y., ... Chen, Z. (2015). Novel MDM-PON scheme utilizing self-homodyne detection for high-speed/capacity access networks. *Optics Express*, 23(25), 32054. <https://doi.org/10.1364/OE.23.032054>
- Chowdhury, R., & Jaumard, B. (2012). A cross layer optimization scheme for WDM PON network design and dimensioning. *IEEE International Conference on Communications*, 3110–3115. <https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6364146>
- Chung, Y. C. (2013). High-speed coherent WDM PON for next-generation access network. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602825>
- Electronics, N. (n.d.). AWG Multi/Demultiplexer | Photonics | NTT Electronics. Retrieved September 18, 2017, from https://www.ntt-electronics.com/en/products/photonics/awg_mul_d.html

- Empresa de Teléfonos de Bogotá. (2017). Transparencia y acceso a la información pública ETB. Retrieved April 13, 2017, from Enero website: <https://www.etb.com/accesoinformacion/>
- FOSCO (Fiber Optics for Sale CO.). (n.d.). What is AWG (Arrayed Waveguide Grating)? – Fosco Connect. Retrieved October 16, 2017, from <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95044486-what-is-awg-arrayed-waveguide-grating>
- Hasegawa, J., & Nara, K. (2004). Ultra-low-loss athermal AWG module with a large number of channels. *Furukawa Review*, (26), 1–5.
- Jeyachitra, R. K., Sukanesh, R., & Ajmera, S. (2009). Flexible tunable spectrum sliced microwave photonic filter using parallel Fabry-Pérot filters and fiber delay. *APMC 2009 - Asia Pacific Microwave Conference 2009*, 481–483. <https://doi.org/10.1109/APMC.2009.5384200>
- Leeson, M. S., Luo, B., & Robinson, A. J. (2006). *Spectral Slicing for Data Communications*. 2(April), 165–168.
- Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2016). Proyecto Nacional de Fibra Óptica. Retrieved April 13, 2017, from 03 de Agosto website: <http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-5319.html>
- Optiwave. (n.d.). Optiwave. Retrieved October 22, 2017, from <https://optiwave.com/>
- Pan, S., & Yao, J. (2011). IR-UWB-over-fiber systems compatible with WDM-PON networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(20), 3025–3034. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2165275>
- Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (2010a). *Optical Networks: A Practical Perspective*.
- Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (Galen H. (2010b). *Optical networks : a practical perspective*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123740922>
- Singh, Y. N. (2000). Introduction to Optical Networks. In *Electrical Engineering* (3rd Editio). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374092-2.50009-6>

Synopsys Silicon to Software. (2017). FDTD Software and Solutions: FDTD Simulation of Photonic Structures – FullWAVE | RSoft Products. Retrieved June 7, 2017, from <https://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>

Thorlabs.com - Tutorials. (n.d.). External Cavity Diode Lasers. Retrieved September 14, 2017, from <https://www.thorlabs.com/tutorials.cfm?tabID=f7dfa931-5afa-441b-8176-292d8735b143>

Zumba, P. X., Cabrera, P. T., & Coronel, E. J. (2016). Chromatic Dispersion Analysis in a Network WDM-PON Using FBG Compensators. *IEEE Latin America Transactions*, 14(6), 2817–2822.

Anexos

Anexo 1. Protocolo para realizar la medición de los parámetros en la red WDM PON

Anexo 2. Registro de pruebas realizadas en la red WDM PON

Anexo 3. Registro de pruebas realizadas en una red GPON

Anexo 4. Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit Rate, Ancho de Línea y Distancia de la Fibra Óptica para evaluar BER, Factor de Calidad Q y Potencia

Anexo 1. Protocolo para Medición de Parámetros de en la Red WDM PON

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Descripción

El siguiente documento describe el procedimiento que se llevará a cabo para realizar la validación de la red propuesta de red de bajo costo como opción de grado de la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Para ello se dispondrá del software **OptiSystem** que pertenece a *Optiwave Photonic Software* cuyo fin propósito es reducir los tiempos de diseño y costos relacionados al diseño de redes ópticas, permitiendo el planear, probar y simular casi todo tipo de enlaces ópticos en la etapa de transmisión de diferentes redes ópticas como LAN, SAN, MAN hasta Ultra Largo Alcance. Es ideal para diseñar y planear desde los componentes hasta el alcance, visualizando resultados de los escenarios¹.

Objetivos

- Establecer el funcionamiento de la red propuesta a partir de parámetros establecidos por el estándar GPON, a través de parámetros como *potencia de la señal*, *BER*, y *factor de calidad Q*.
- Realizar variaciones en el diseño en cuanto a Tasa de Bits entre 2.5, 10 y 20 Gbps para evaluar los resultados en las variables antes mencionadas
- Realizar variaciones del ancho de banda de las portadoras en el proceso de particionado del espectro proveniente de la fuente óptica para establecer sus efectos en los parámetros mencionados.

¹ Fuente: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>

- Modificar la distancia entre los extremos de fibra óptica que conecta la oficina central y la etapa de distribución para comprobar las limitaciones establecidas por el estándar GPON de 20 km.

Materiales:

Para el desarrollo de dichas pruebas se requiere de:

- Computador portátil
- Programa **Optiwave** (instalado en el computador portátil)
- Estándar ITU-T G.984.1

Metodología

Tomando el diseño de la red elaborado, donde se cuenta con 16 sub portadoras obtenidas de la fuente óptica de espectro amplio que son multiplexadas para enviarlas desde la Oficina Central hasta la Red de Distribución a través de la fibra óptica como se muestra en la figura 1, se realizarán variaciones de los siguientes parámetros para evaluar su incidencia.

1. Variar la tasa de bit entre 2.5 Gbps, 10 Gbps y 20 Gbps
2. Variar el ancho de banda de la portadora en 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz
3. Variar la distancia de la fibra óptica entre 15 km, 30 km, 50 km y 60 km
4. En cada caso, evaluar los resultados de los factores BER, Q y Potencia de la señal de llegada.

Esquema general

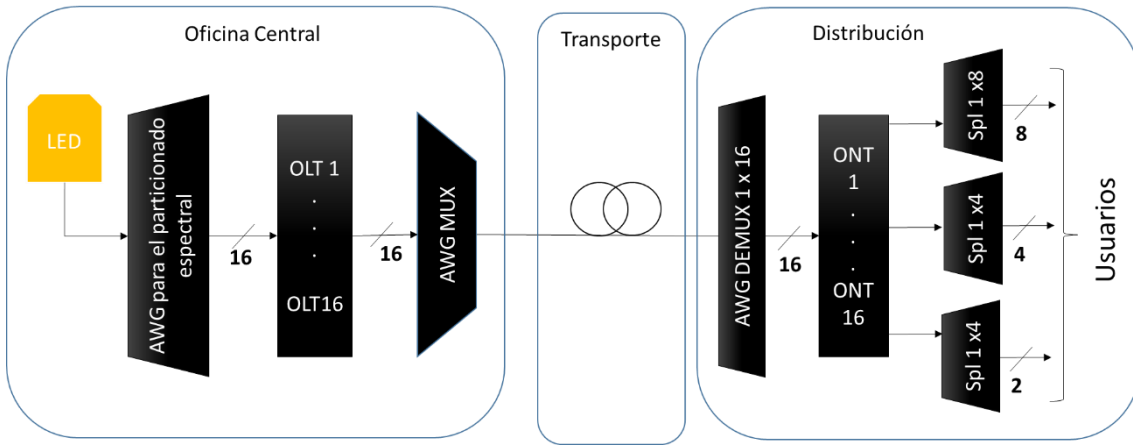


Figura 1. Esquema de la red propuesta

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el estándar GPON ITU-T G.984.1, se espera que los resultados cumplan con las siguientes características (ver tabla 1), dado que estos serán los valores de referencia para establecer el funcionamiento dentro de las condiciones óptimas de operación.

Tabla 1. Factores a evaluar en la red propuesta

Factores	Valor
Potencia	10 dBm y -20 dBm
BER	Entre 10^{-9} y 10^{-12}
Factor Q	≥ 8

En el proceso de selección de la herramienta, después de realizar varias simulaciones bajo parámetros determinados como la frecuencia central de la fuente óptica, una tasa de bits y distancia de la fibra óptica fija, se estableció que la respuesta no varía, por lo tanto no es necesario realizar varias simulaciones para promediar la respuesta.

Por otra parte, para el registro de los resultados se utilizará una tabla que establezca la tasa de bit, el ancho de línea y la distancia de la fibra óptica, para registrar los resultados de

cada canal evaluando los factores antes mencionados (Ver la tabla 2), en términos de potencia tanto en mW como en dBm, así como los valores de Q y BER.

Tabla 2. Registro de resultados de la red propuesta

Bit rate						BW				Dist. FO					
Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida			
Canales	Frecuencia	Potencia (mW - dBm)		Potencia (mW - dBm)		Potencia (mW - dBm)		Potencia (mW - dBm)		Potencia (mW - dBm)		Usuario	Q	BER	Potencia (mW - dBm)
λ_1	193,1 THz	mW	dBm	mW	dBm					mW	dBm	L1_U1			
λ_2	193,2 THz											L2_U1			
λ_3	193,3 THz											L3_U1			
λ_4	193,4 THz											L4_U1			
λ_5	193,5 THz											L5_U1			
λ_6	193,6 THz											L6_U1			
λ_7	193,7 THz											L7_U1			
λ_8	193,8 THz											L8_U1			
λ_9	193,9 THz					mW	dBm	mW	dBm			L9_U1			

λ_{10}	194,0 THz										L10 _U 1				
λ_{11}	194,1 THz										L11 _U 1				
λ_{12}	194,2 THz										L12 _U 1				
λ_{13}	194,3 THz										L13 _U 1				
λ_{14}	194,4 THz										L14 _U 1				
λ_{15}	194,5 THz										L15 _U 1				
λ_{16}	194,6 THz										L16 _U 1				

Protocolo de medición

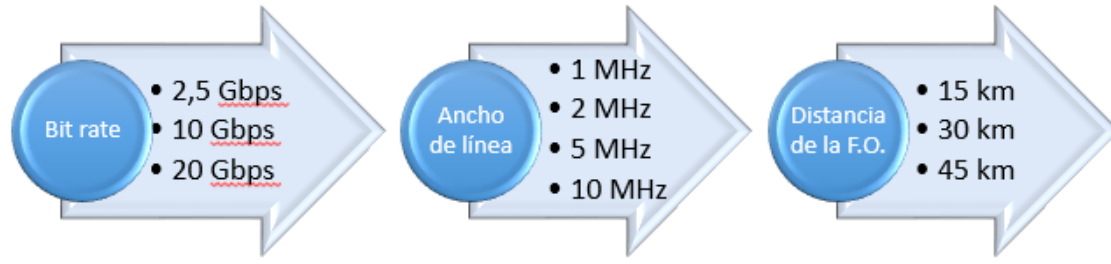


Figura 2. Estructura seguida en la medición Fuente: Autor

1. Configure los parámetros de la red en términos de la tasa de bits a 2,5 Gbps, ancho de línea de cada sub portadora y varíe entre las cuatro (4) distancias de la fibra.
2. Simule el proceso en el software Optiwave y registre los datos usando el modelo de la tabla 2.
3. Cambie el ancho de línea y repita la operación con las cuatro (4) distancias de la fibra óptica.
4. Registre los datos usando el modelo de la tabla 2.
5. Una vez haya probado los tres (3) diferentes anchos de línea, proceda a cambiar la tasa de bits y repita los pasos 1, 2, 3 y 4.
6. Registre todos los datos usando el modelo de la tabla 2.

Resultados esperados

Después de realizada la simulación de acuerdo a los diferentes escenarios posibles, se espera obtener.

- Niveles de potencia en cada uno de los escenarios
- Valores del factor Q en cada caso mayores o igual a 8
- Niveles de BER entre el rango establecido (10^{-9} a 10^{-12})
- Gráficos comparativos de cada factor en función de las variaciones.

Elaborado por:

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Anexo 2. Registro de pruebas realizadas en la red WDM PON

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Descripción

En el siguiente documento se registran los datos obtenidos en la red WDM PON utilizando una fuente de espectro amplio tipo LED y un filtro AWG para obtener un número determinado de longitudes de onda. Para el caso particular de este ejercicio se dividirá el espectro en 16 señales sub portadoras.

Los parámetros a evaluar en la red se definen en la sección 4.1.3 del documento de grado presentado, y la configuración de las condiciones de entrada de la red se definen en la sección 4.4.

A continuación se describen los resultados encontrados en cada caso.

1. Canal 1

En la Figura 1 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_1 , donde se observa un diagrama de ojo definido y sin distorsión.

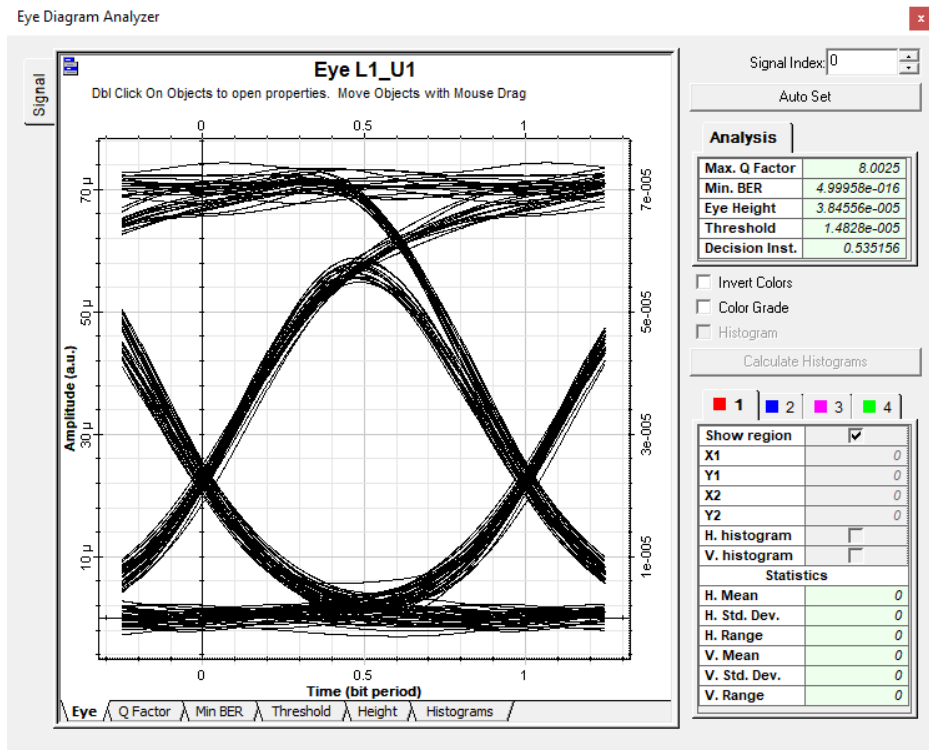


Figura 1. Respuesta de usuario 1 en el canal 1

Fuente: Autor

Para este caso, el resultado indica que los valores se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 1) de este documento puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_1 opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 1. Q y BER en el canal 1

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$4,99 \times 10^{-16}$
Factor Q	≥ 8	8

Fuente: Autor

2. Canal 2

En la Figura 2 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_2 , donde se observa un diagrama de ojo con mejor definición que el canal 1 e igualmente sin distorsión.

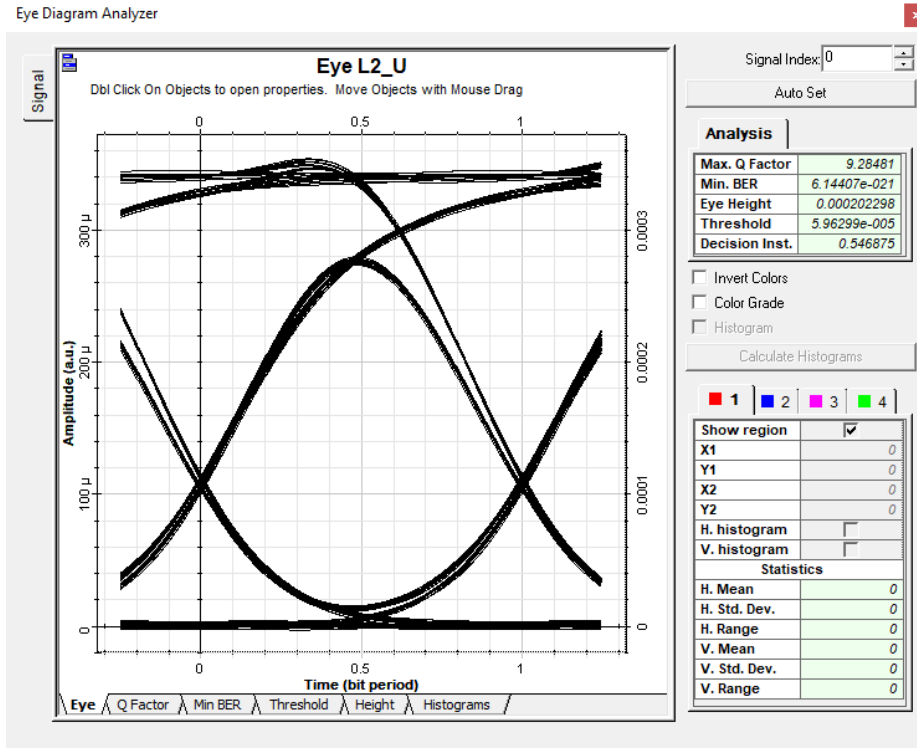


Figura 2. Respuesta de usuario 1 en el canal 2

Fuente: Autor

En este caso, el resultado indica que las variables también se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 2) de este documento, puesto que la BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_2 también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 2. Q y BER en el canal 2

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,14 \times 10^{-21}$
Factor Q	≥ 8	9,28

Fuente: Autor

3. Canal 3

En la Figura 3 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_3 , donde se observa un diagrama de ojo no tan definido como el canal dos, pero igualmente sin distorsión.

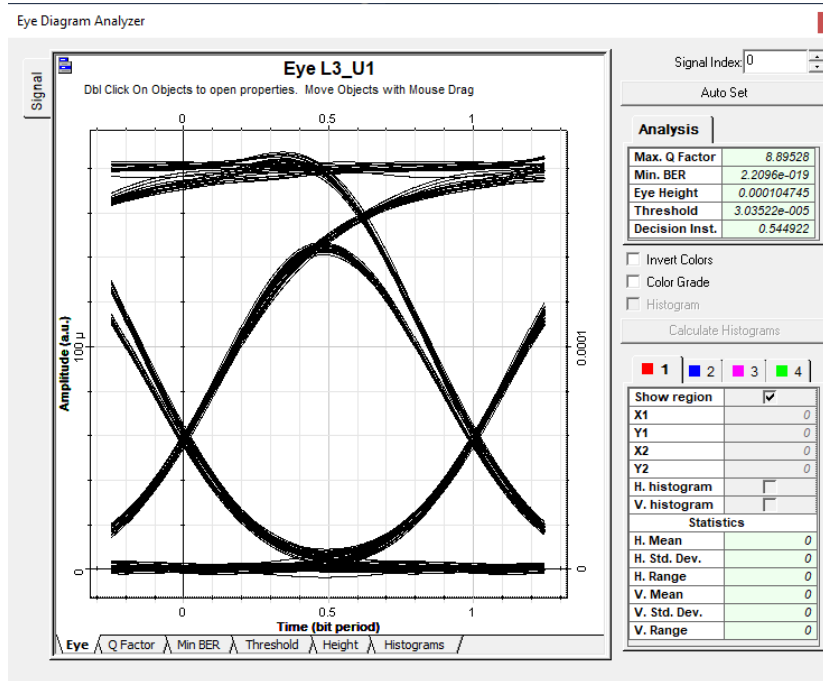


Figura 3. Respuesta de usuario 1 en el canal 3

Fuente: Autor

Para este caso, el resultado indica que las variables al igual que en los casos anteriores se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 3) de este documento puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_3 también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 3. Q y BER en el canal 3

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-19}$
Factor Q	≥ 8	8,89

Fuente: Autor

4. Canal 4

En la Figura 4 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_4 , donde se observa un diagrama de ojo definido y sin distorsión.

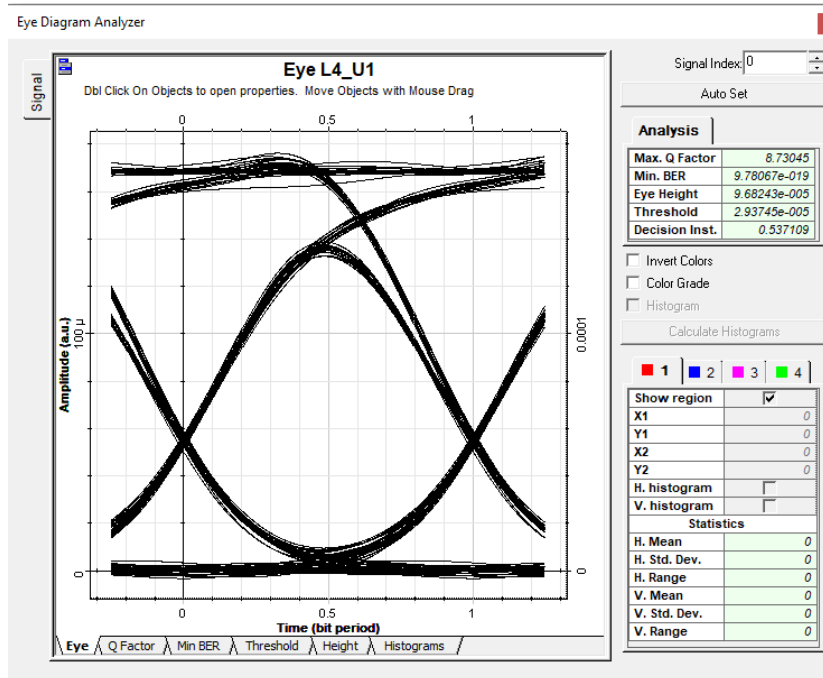


Figura 4. Respuesta de usuario 1 en el canal 4

Fuente: Autor

Observe que las variables se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 4) puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_4 también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 4. Q y BER en el canal 4

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$9,78 \times 10^{-19}$
Factor Q	≥ 8	8,73

Fuente: Autor

5. Canal 5

En la Figura 5 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_5 , donde se observa un diagrama de ojo con distorsión.

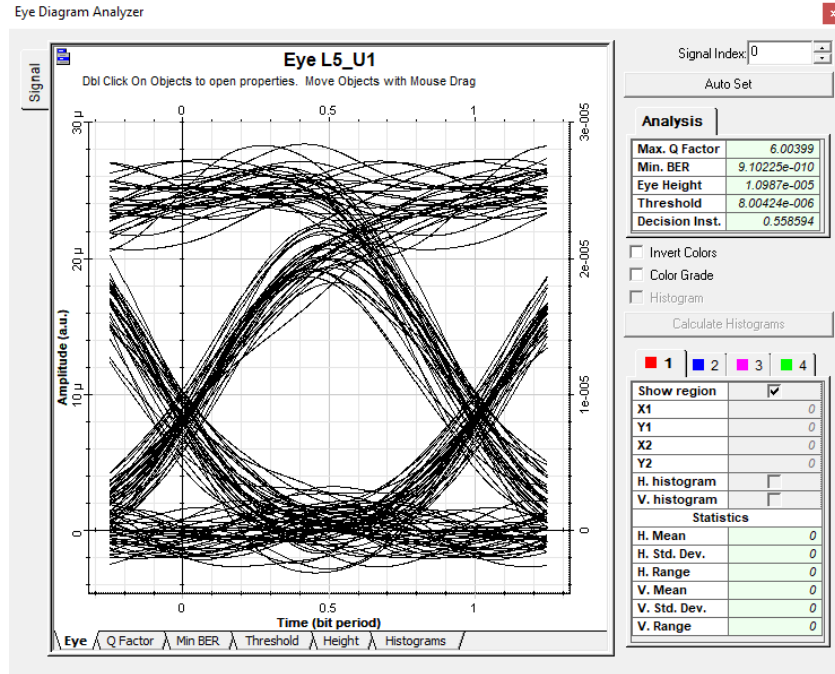


Figura 5. Respuesta de usuario 1 en el canal 5

Fuente: Autor

Para este caso, el resultado indica una disminución en el factor de calidad Q dado que está por debajo del límite establecido pero cumpliendo con lo indicado en la gráfica de la sección 4.1.2.2, mientras que BER si se encuentra dentro de los valores establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 5). Esta dificultad como ya se había mencionado se debe a la limitación del simulador y esto se verá evidenciado en los demás canales.

Tabla 5. Q y BER en el canal 5

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$9,1 \times 10^{-10}$
Factor Q	≥ 8	6

Fuente: Autor

6. Canal 6

En la Figura 6 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_6 , donde se observa un diagrama de ojo que recupera su forma natural, quedando definido y sin distorsión.

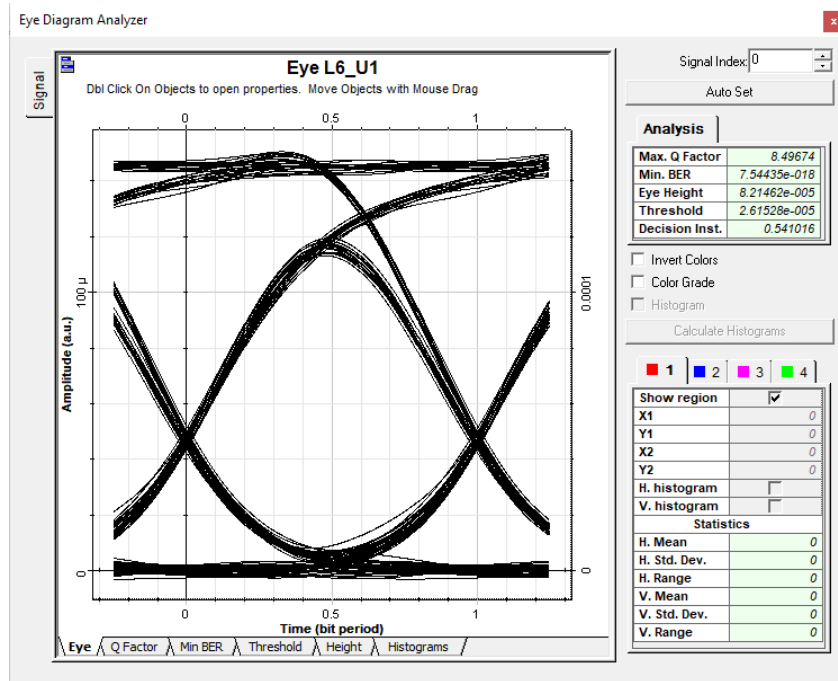


Figura 6. Respuesta de usuario 1 en el canal 6

Fuente: Autor

En este caso las variables también se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 6) debido a que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_6 también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 6. Q y BER en el canal 6

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$7,54 \times 10^{-18}$
Factor Q	≥ 8	8,49

Fuente: Autor

7. Canal 7

En la Figura 7 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_7 , donde se observa un diagrama de ojo con una definición mucho mejor al canal anterior.

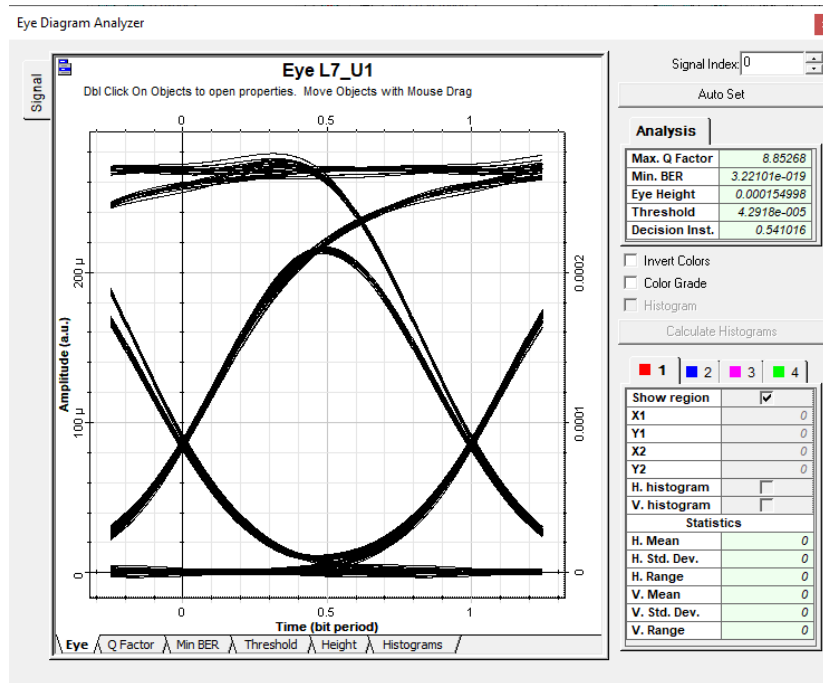


Figura 7. Respuesta de usuario 1 en el canal 7

Fuente: Autor

Así las cosas, las variables se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 7) dado que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 7$ también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 7. Q y BER en el canal 7

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$3,22 \times 10^{-19}$
Factor Q	≥ 8	8,85

Fuente: Autor

8. Canal 8

En la Figura 8 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal $\lambda 8$, donde se observa un diagrama de ojo con un poco de distorsión, pero a pesar de ello manteniendo la forma esperada.

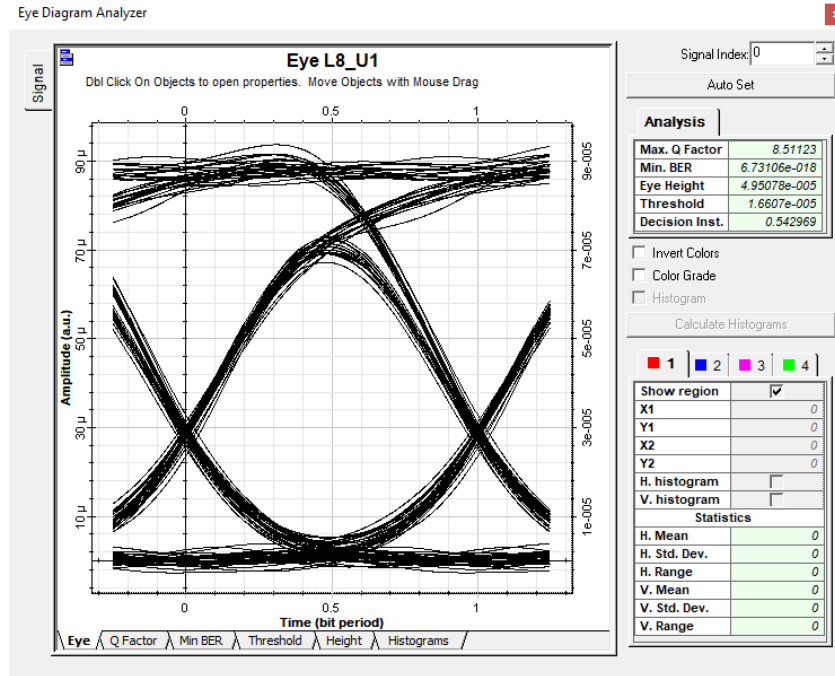


Figura 8. Respuesta de usuario 1 en el canal 8

Fuente: Autor

Aquí las variables al igual que en los casos anteriores se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 8) de este documento, puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 8$ también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 8. Q y BER en el canal 8

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,73 \times 10^{-18}$
Factor Q	≥ 8	8,51

Fuente: Autor

9. Canal 9

En la Figura 9 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal $\lambda 9$, donde se observa un diagrama de ojo definido y con poca distorsión.

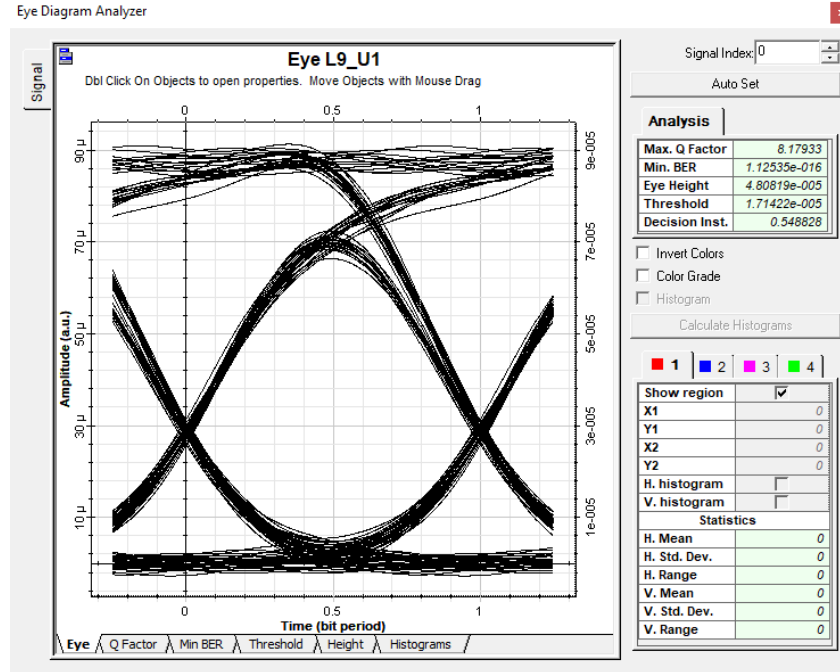


Figura 9. Respuesta de usuario 1 en el canal 9

Fuente: Autor

De acuerdo a lo anterior, se establece que las variables se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 9) debido a que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_9 también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 9. Q y BER en el canal 9

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,73 \times 10^{-18}$
Factor Q	≥ 8	8,51

Fuente: Autor

10. Canal 10

En la Figura 10 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_{10} , donde se observa que es uno de los mejores canales, puesto que su diagrama de ojo está bien definido y sin distorsión.

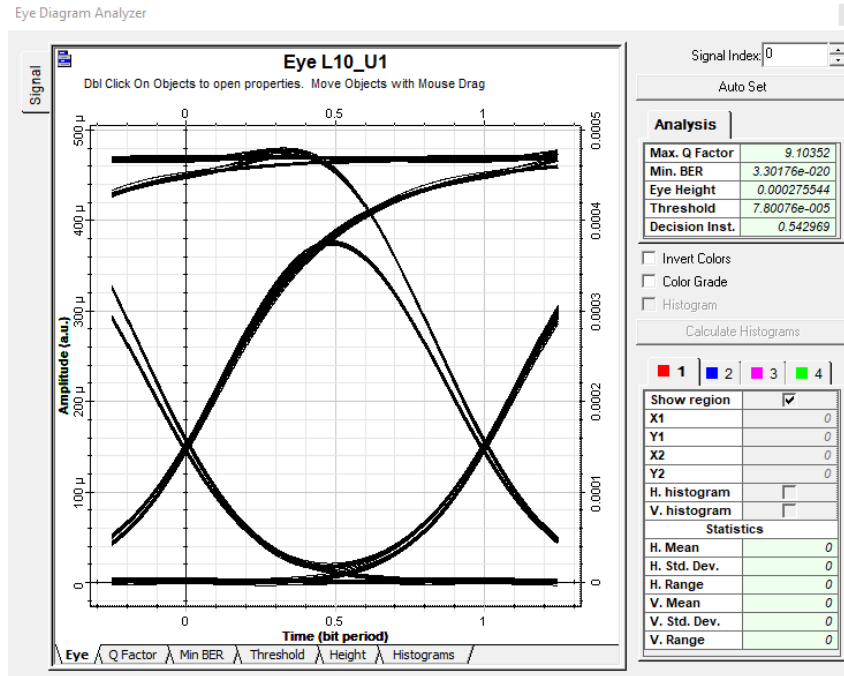


Figura 10. Respuesta de usuario 1 en el canal 10

Fuente: Autor

En este caso, las variables se encuentran dentro de los rangos establecidos puesto que la BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q también está dentro de lo acordado. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_{10} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 10. Q y BER en el canal 10

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$3,3 \times 10^{-20}$
Factor Q	≥ 8	9,10

Fuente: Autor

11. Canal 11

En la Figura 11 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_{11} , donde se observa un diagrama de ojo definido y con un poco de distorsión.

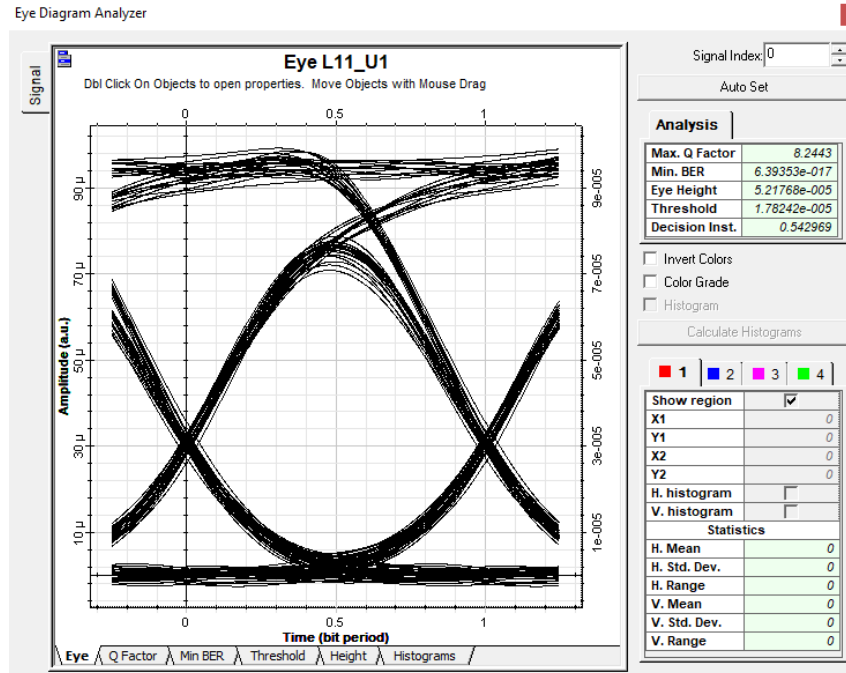


Figura 11. Respuesta de usuario 1 en el canal 11

Fuente: Autor

Como en los casos anteriores, variables se encuentran dentro de los rangos establecidos en la sección 4.1.3 (ver Tabla 11) de este documento puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_{11} también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 11. Q y BER en el canal 11

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,39 \times 10^{-17}$
Factor Q	≥ 8	8,24

Fuente: Autor

12. Canal 12

En la Figura 12 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_{12} , donde se observa un diagrama de ojo apreciable.

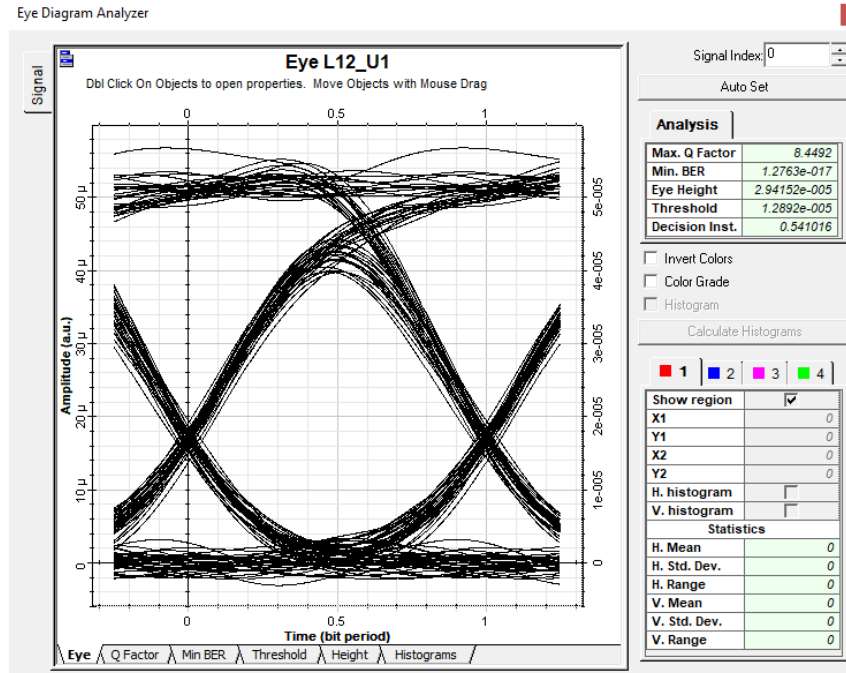


Figura 12. Respuesta de usuario 1 en el canal 12

Fuente: Autor

En este caso, las variables también se encuentran dentro de los rangos establecidos, teniendo en cuenta que la BER continúa siendo menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_{12} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 12. Q y BER en el canal 12

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,39 \times 10^{-17}$
Factor Q	≥ 8	8,24

Fuente: Autor

13. Canal 13

En la Figura 13 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_{13} , donde se observa un diagrama de ojo que nuevamente está muy bien definido y sin distorsión.

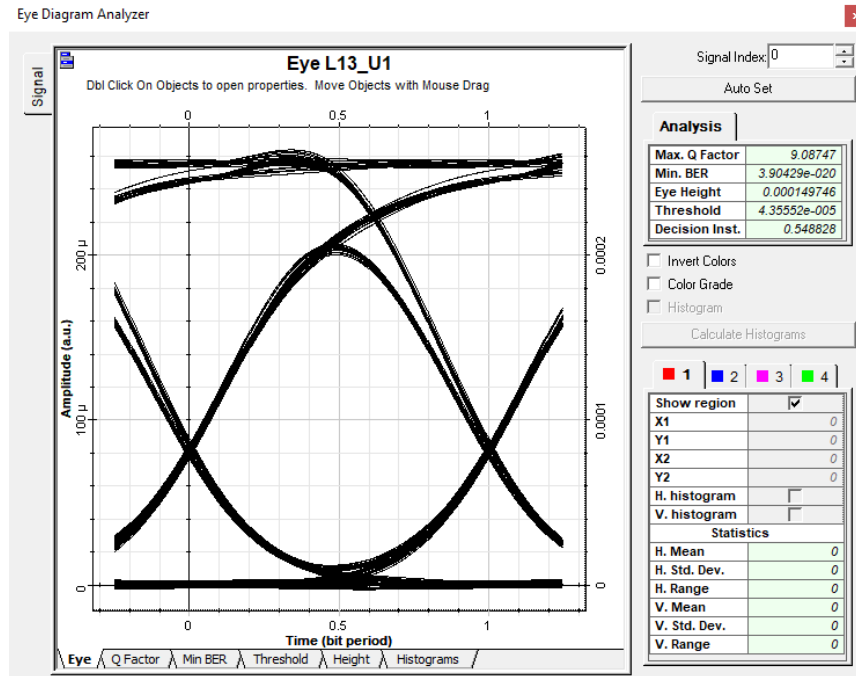


Figura 13. Respuesta de usuario 1 en el canal 13

Fuente: Autor

Para este caso, las variables se encuentran dentro de los rangos establecidos puesto que el factor BER es mucho menor al rango óptimo de operación y el factor Q está dentro de lo establecido. Por este motivo también se puede afirmar que la longitud de onda λ_{13} también opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 13. Q y BER en el canal 13

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$3,90 \times 10^{-20}$
Factor Q	≥ 8	9,09

Fuente: Autor

14. Canal 14

En la Figura 14 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ_{14} , donde se observa un diagrama de ojo no muy bien definido y ello se refleja en las variables evaluadas, puesto que a pesar que la BER está dentro de los rangos establecidos ($2,6 \times 10^{-12}$), el factor de calidad Q está por debajo del mínimo establecido pero contemplado en la gráfica de la sección 4.1.2.2. Los valores encontrados se registran en la Tabla 14.

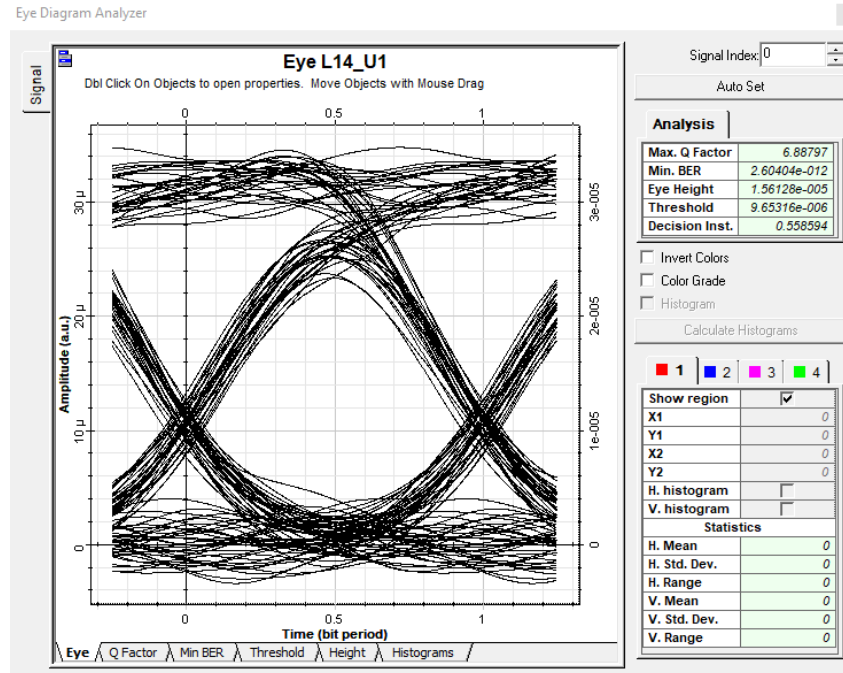


Figura 14. Respuesta de usuario 1 en el canal 14

Fuente: Autor

Tabla 14. Q y BER en el canal 14

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$2,60 \times 10^{-12}$
Factor Q	≥ 8	6,88

Fuente: Autor

15. Canal 15

En la Figura 15 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal $\lambda 15$, donde se observa un diagrama de ojo con pérdidas y ello se refleja en las variables evaluadas, puesto que a pesar que la BER está dentro de los rangos establecidos ($3,55 \times 10^{-14}$), el factor de calidad Q está por debajo del mínimo establecido pero contemplado en la gráfica de la sección 4.1.2.2. Los valores encontrados se registran en la Tabla 15.

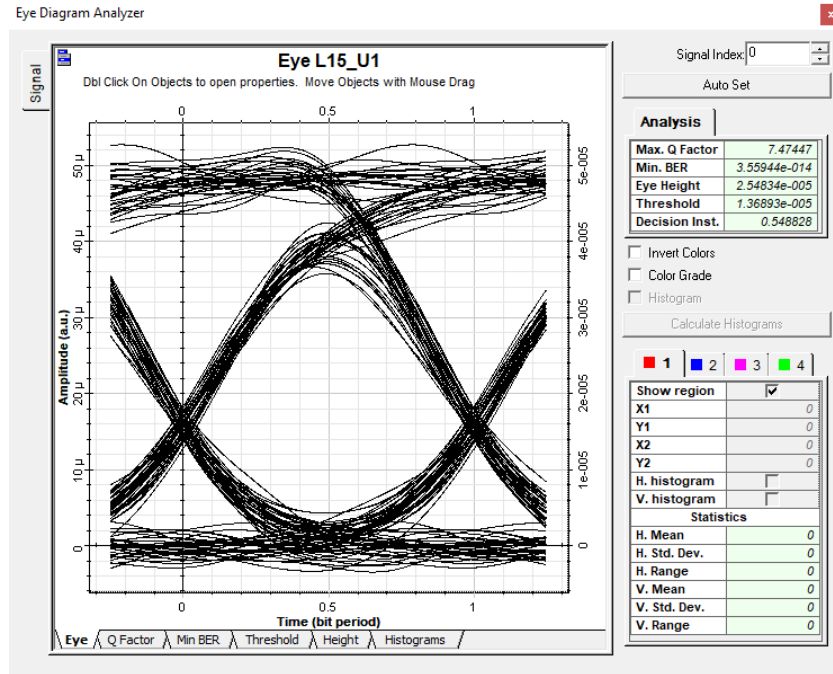


Figura 15. Respuesta de usuario 1 en el canal 15

Fuente: Autor

Tabla 15.Q y BER en el canal 15

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$3,55 \times 10^{-14}$
Factor Q	≥ 8	7,47

Fuente: Autor

16. Canal 16

Como ya se había comentado en el canal 5, la limitación del software genera un error y en consecuencia el último canal se queda sin datos que mostrar. Así las cosas, en la Figura 16 se muestra la respuesta del usuario 1 del canal λ 16, donde se observa que no hay datos que mostrar.

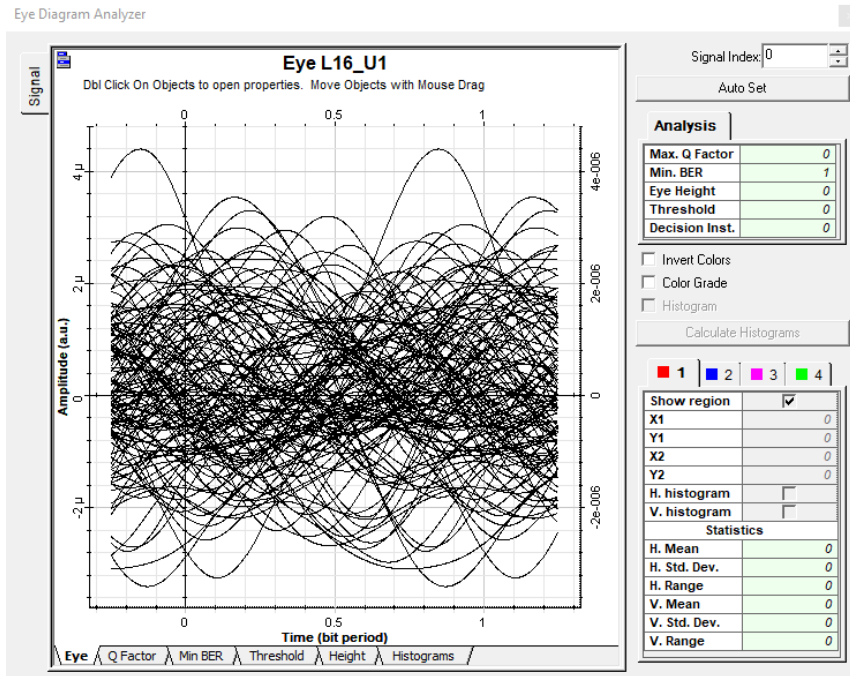


Figura 16. Respuesta de usuario 1 en el canal 16

Fuente: Autor

Los resultados y el análisis realizados se presentan en el capítulo 5 del documento de grado antes mencionado.

Elaborado por:

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Anexo 3. Registro de pruebas realizadas a una red GPON

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Descripción

En el siguiente documento se registran los datos obtenidos en la red GPON utilizando un arreglo de fuentes ópticas tipo láser y un filtro AWG para obtener un número determinado de longitudes de onda. Para el caso particular de este ejercicio se dividirá el espectro en 16 señales sub portadoras.

La estructura de la red se describe en la figura 1.

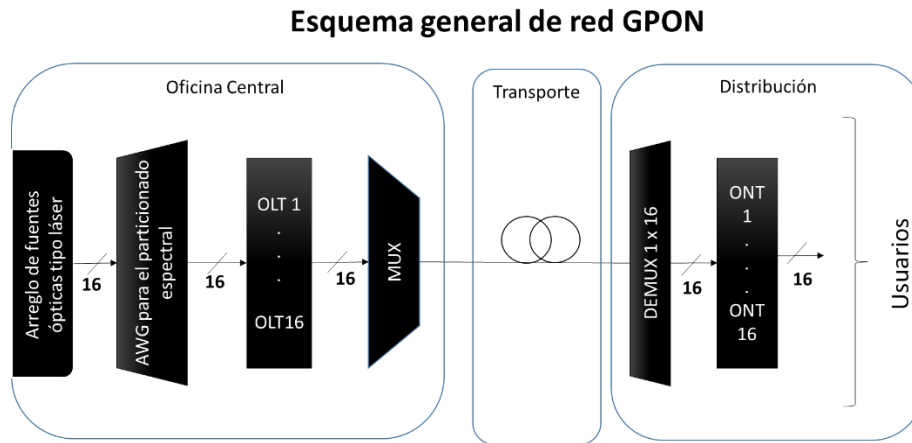


Figura 1. Estructura de la red GPON

Fuente: Autor

Los parámetros a evaluar en la red se definen en la sección 4.1.3 del documento de grado presentado, y la configuración de las condiciones de entrada de la red se definen en la sección 4.4. Es importante establecer que las redes GPON cuentan con una fuente láser para cada usuario, por eso para reproducir la red, sólo se puede tener un usuario por longitud de onda.

A continuación se describen los resultados encontrados en cada caso.

1. Canal 1

En la Figura 2 se muestra la respuesta del canal $\lambda 1$, donde se observa un diagrama de ojo definido y sin distorsión.

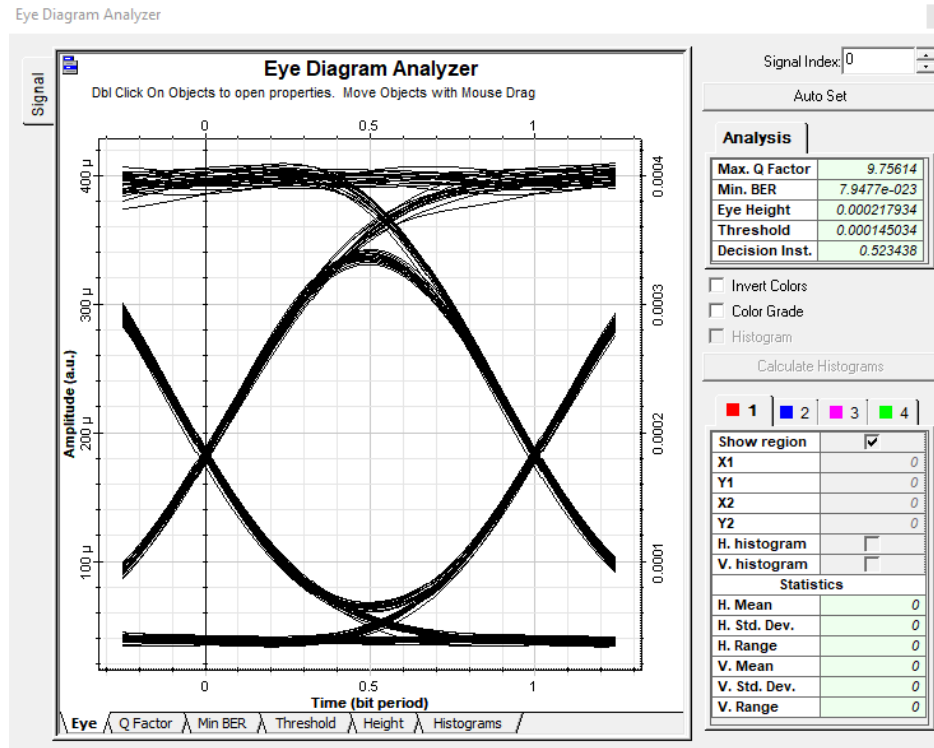


Figura 2. Respuesta de usuario 1 en el canal 1

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 1). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 1$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 1. Q y BER en el canal 1

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$3,67 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,0

Fuente: Autor

2. Canal 2

En la Figura 3 se muestra la respuesta del canal λ_2 , donde se observa un diagrama de ojo con mejor definición que el canal 1 e igualmente sin distorsión.

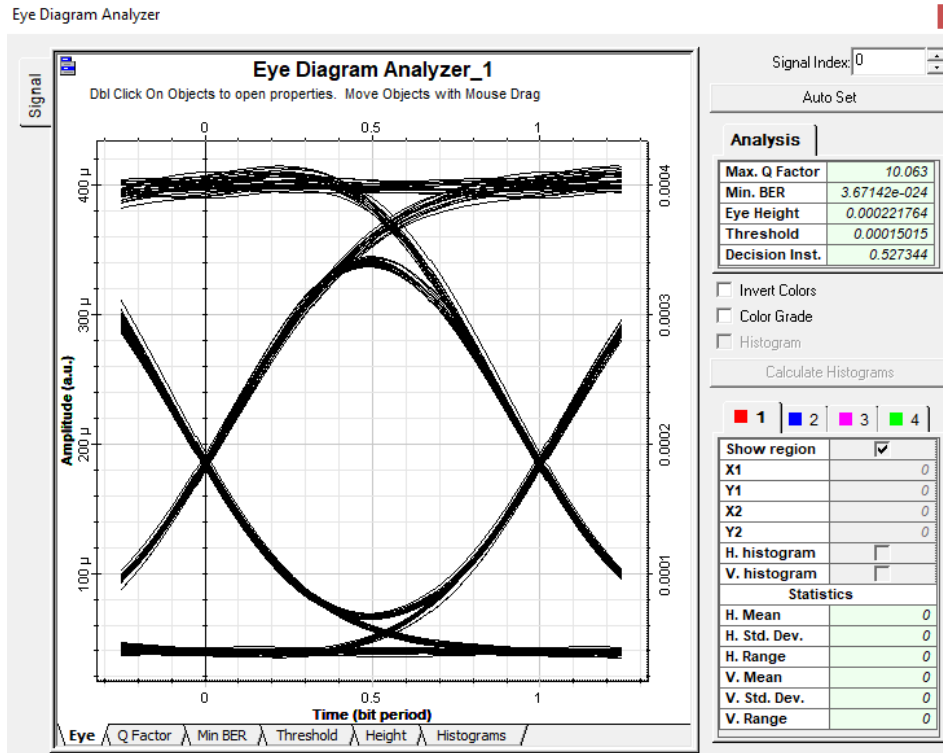


Figura 3. Respuesta de usuario 1 en el canal 2

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 2Tabla 1). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_2 opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 2. Q y BER en el canal 2

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$6,14 \times 10^{-21}$
Factor Q	≥ 8	9,28

Fuente: Autor

3. Canal 3

En la Figura 4 se muestra la respuesta del canal $\lambda 3$, donde se observa un diagrama de ojo no tan definido como el canal dos, pero igualmente sin distorsión.

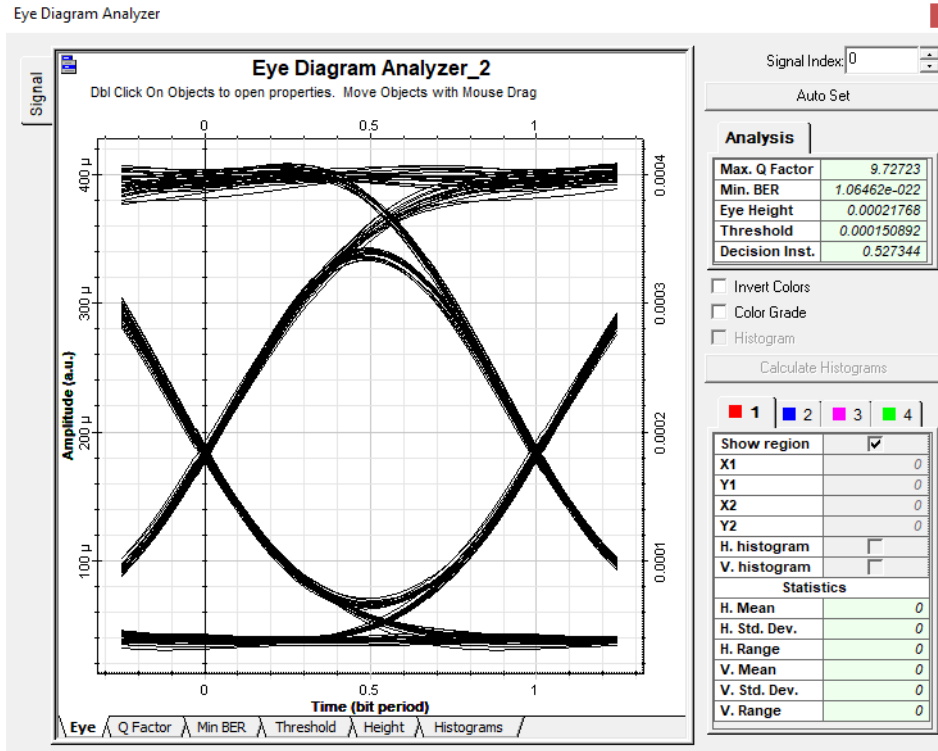


Figura 4. Respuesta de usuario 1 en el canal 3

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 3Tabla 1). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 3$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 3.Q y BER en el canal 3

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$1,06 \times 10^{-22}$
Factor Q	≥ 8	9,72

Fuente: Autor

4. Canal 4

En la Figura 5 se muestra la respuesta del canal $\lambda 4$, donde se observa un diagrama de ojo definido y sin distorsión.

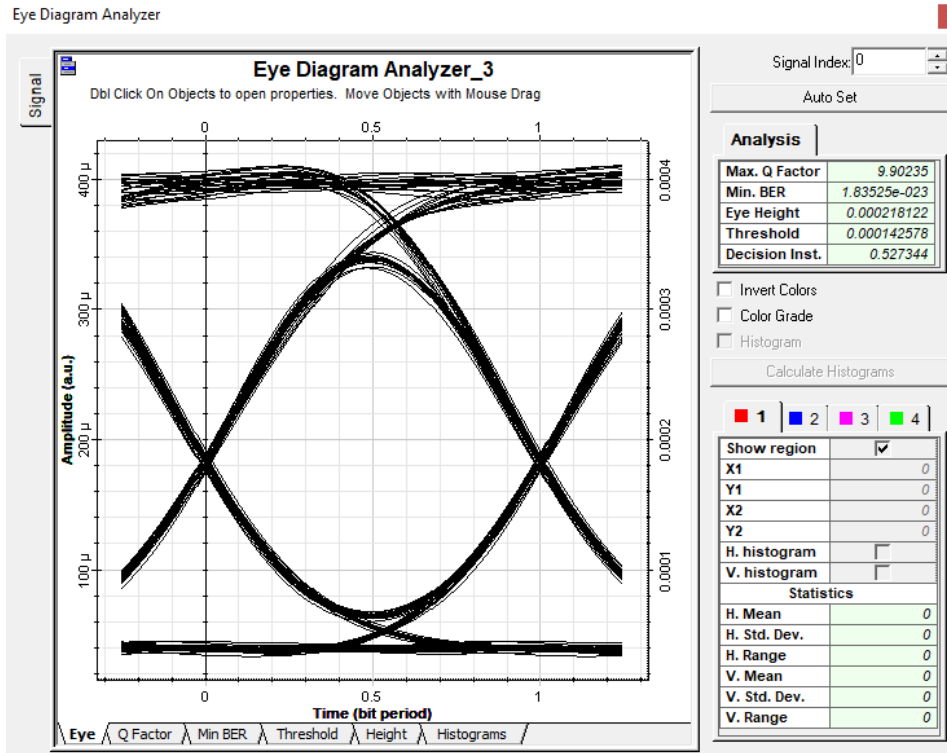


Figura 5. Respuesta de usuario 1 en el canal 4

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 4). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 4$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 4. Q y BER en el canal 4

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$1,83 \times 10^{-23}$
Factor Q	≥ 8	9,90

Fuente: Autor

5. Canal 5

En la Figura 6 se muestra la respuesta del canal $\lambda 5$, donde se observa un diagrama de ojo bien definido y sin distorsión.

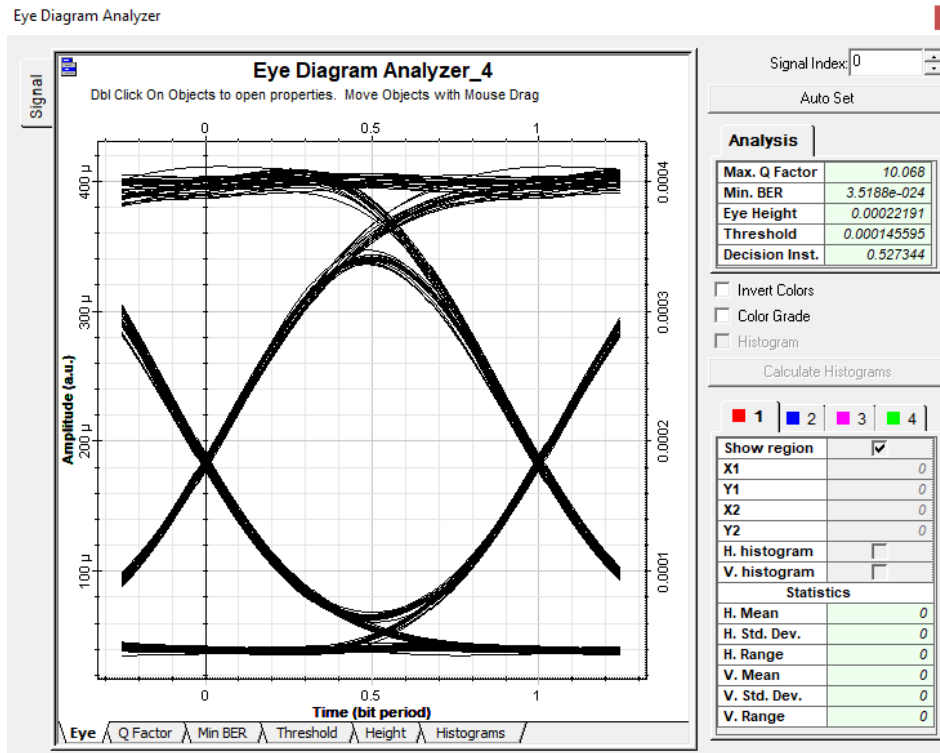


Figura 6. Respuesta de usuario 1 en el canal 5

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 5). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 5$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 5. Q y BER en el canal 5

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$3,51 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,06

Fuente: Autor

6. Canal 6

En la Figura 7 se muestra la respuesta del canal $\lambda 6$, donde se observa un diagrama de ojo definido y sin distorsión.

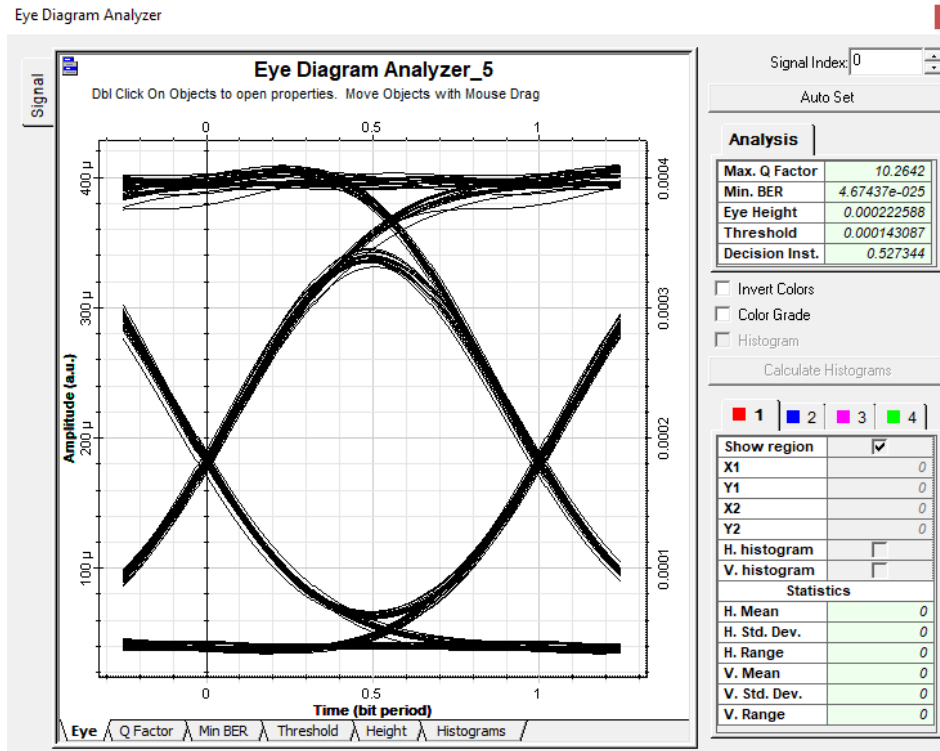


Figura 7. Respuesta de usuario 1 en el canal 6

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 6). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 6$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 6. Q y BER en el canal 6

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$4,67 \times 10^{-25}$
Factor Q	≥ 8	10,26

Fuente: Autor

7. Canal 7

En la Figura 8 se muestra la respuesta del canal $\lambda 7$, donde se observa un diagrama de ojo con una definición mucho mejor al canal anterior.

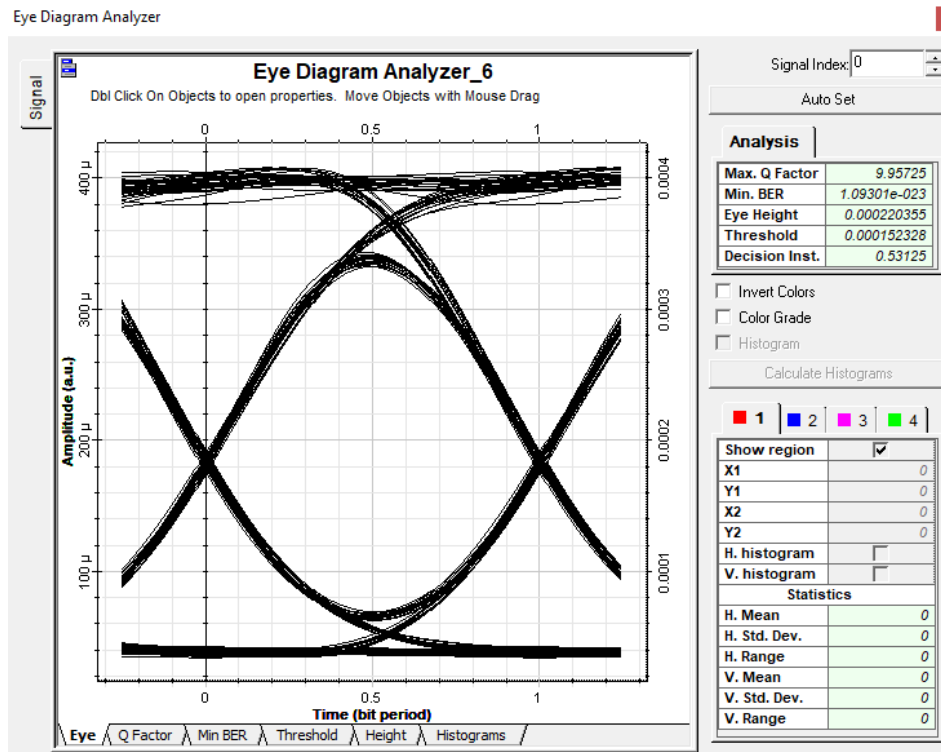


Figura 8. Respuesta de usuario 1 en el canal 7

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 7). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 7$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 7. Q y BER en el canal 7

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$3,22 \times 10^{-19}$
Factor Q	≥ 8	8,85

Fuente: Autor

8. Canal 8

En la Figura 9 se muestra la respuesta del canal $\lambda 8$, donde se observa un diagrama de ojo con un poco de distorsión, pero a pesar de ello manteniendo la forma esperada.

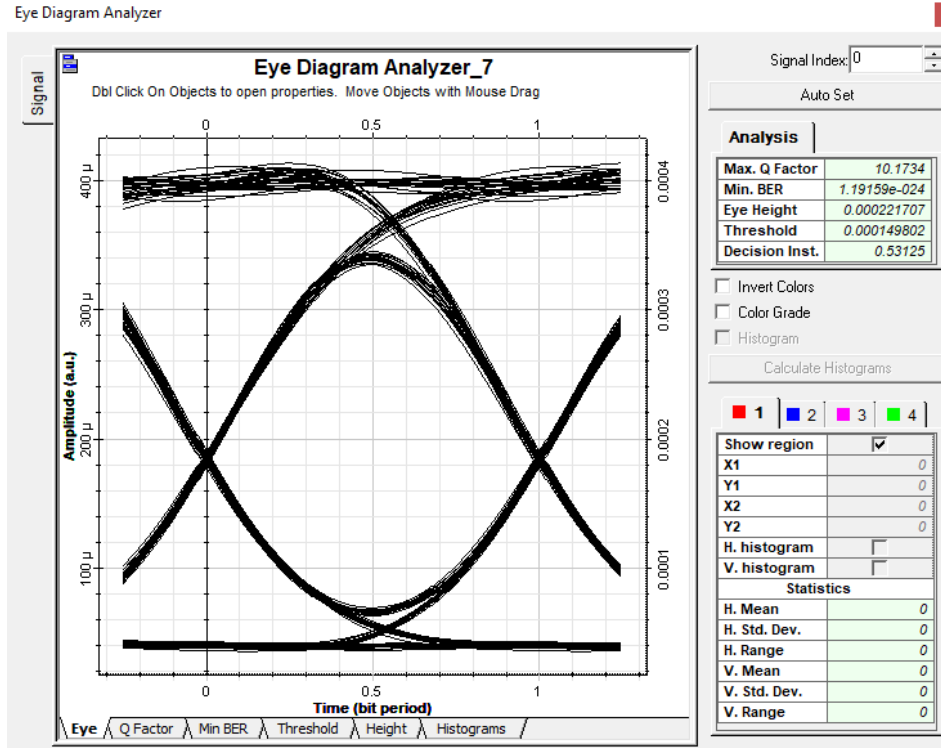


Figura 9. Respuesta de usuario 1 en el canal 8

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 8). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 8$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 8. Q y BER en el canal 8

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$1,19 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,17

Fuente: Autor

9. Canal 9

En la Figura 10 se muestra la respuesta del canal $\lambda 9$, donde se observa un diagrama de ojo definido y con poca distorsión.

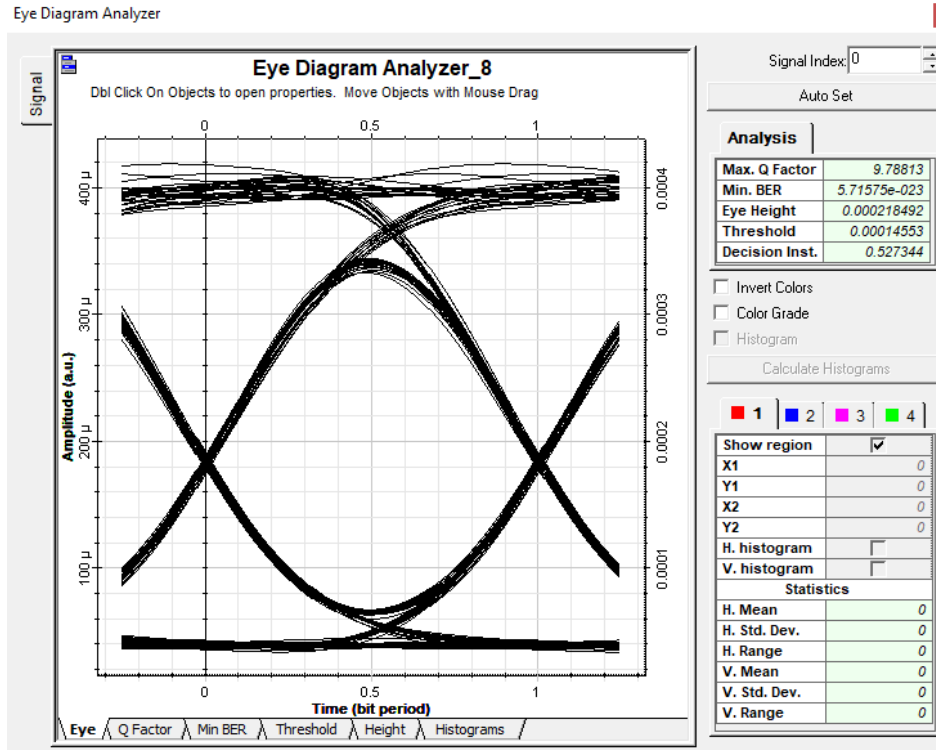


Figura 10. Respuesta de usuario 1 en el canal 9

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 9). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_9 opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 9. Q y BER en el canal 9

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$5,71 \times 10^{-23}$
Factor Q	≥ 8	9,78

Fuente: Autor

10. Canal 10

En la Figura 11 se muestra la respuesta del canal λ_{10} con un diagrama de ojo está bien definido y sin distorsión.

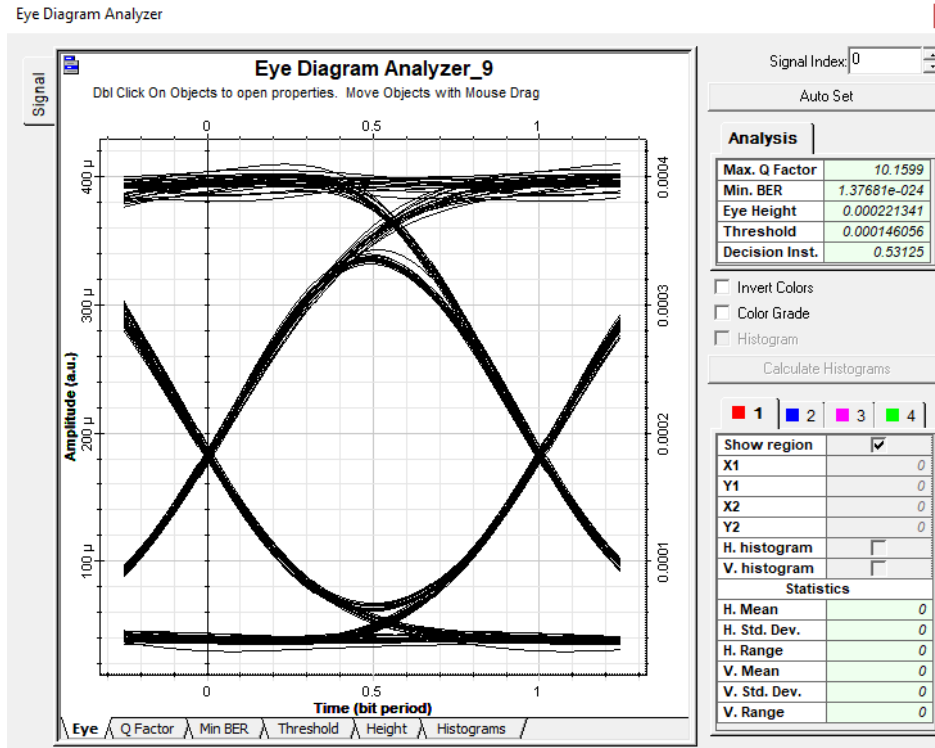


Figura 11. Respuesta de usuario 1 en el canal 10

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 10). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{10} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 10. Q y BER en el canal 10

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$1,37 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,16

Fuente: Autor

11. Canal 11

En la Figura 12 se muestra la respuesta del canal λ_{11} , donde se observa un diagrama de ojo definido y con un poco de distorsión.

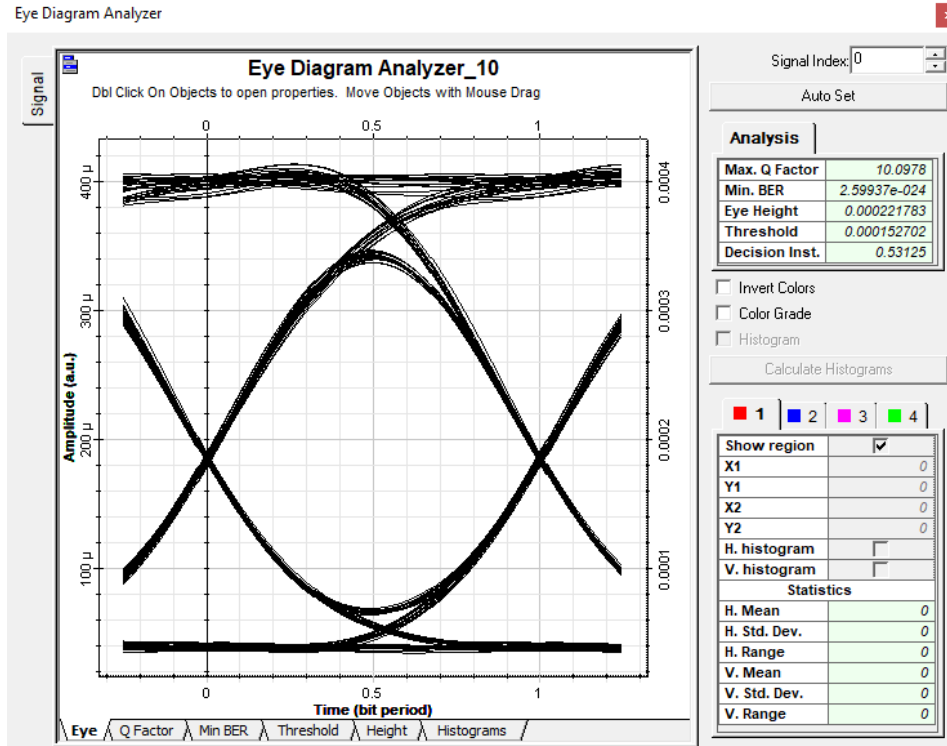


Figura 12. Respuesta de usuario 1 en el canal 11

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 11). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{11} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 11. Q y BER en el canal 11

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$2,59 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,09

Fuente: Autor

12. Canal 12

En la Figura 13 se muestra la respuesta del canal λ_{12} , donde se observa un diagrama de ojo apreciable.

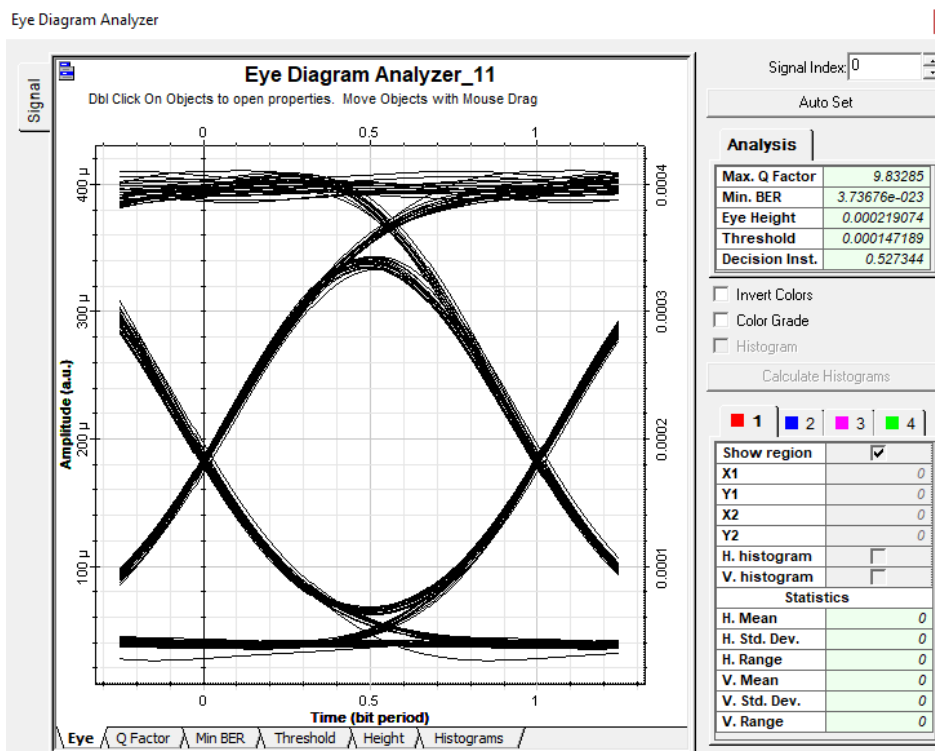


Figura 13. Respuesta de usuario 1 en el canal 12

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 4). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{12} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 12. Q y BER en el canal 12

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$3,73 \times 10^{-23}$
Factor Q	≥ 8	8,24

Fuente: Autor

13. Canal 13

En la Figura 14 se muestra la respuesta del canal λ_{13} , donde se observa un diagrama de ojo que está bien definido y sin distorsión.

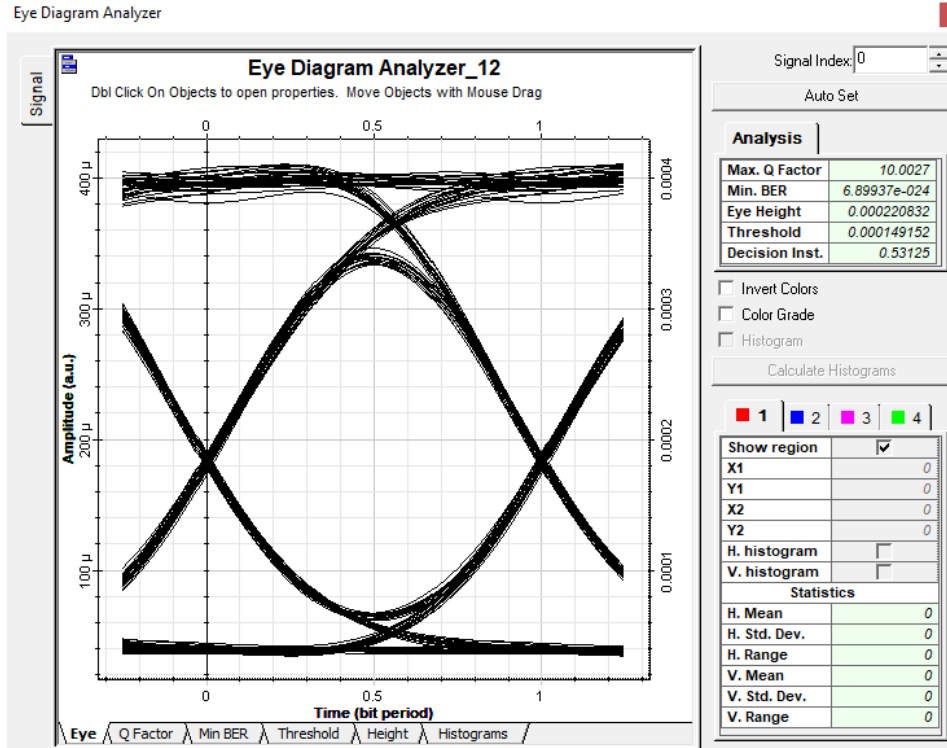


Figura 14. Respuesta de usuario 1 en el canal 13

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 13). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{13} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 13. Q y BER en el canal 13

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$6,89 \times 10^{-24}$
Factor Q	≥ 8	10,0

Fuente: Autor

14. Canal 14

En la Tabla 14 se muestra la respuesta del canal λ_{14} , donde se observa un diagrama de ojo que está bien definido y sin distorsión.

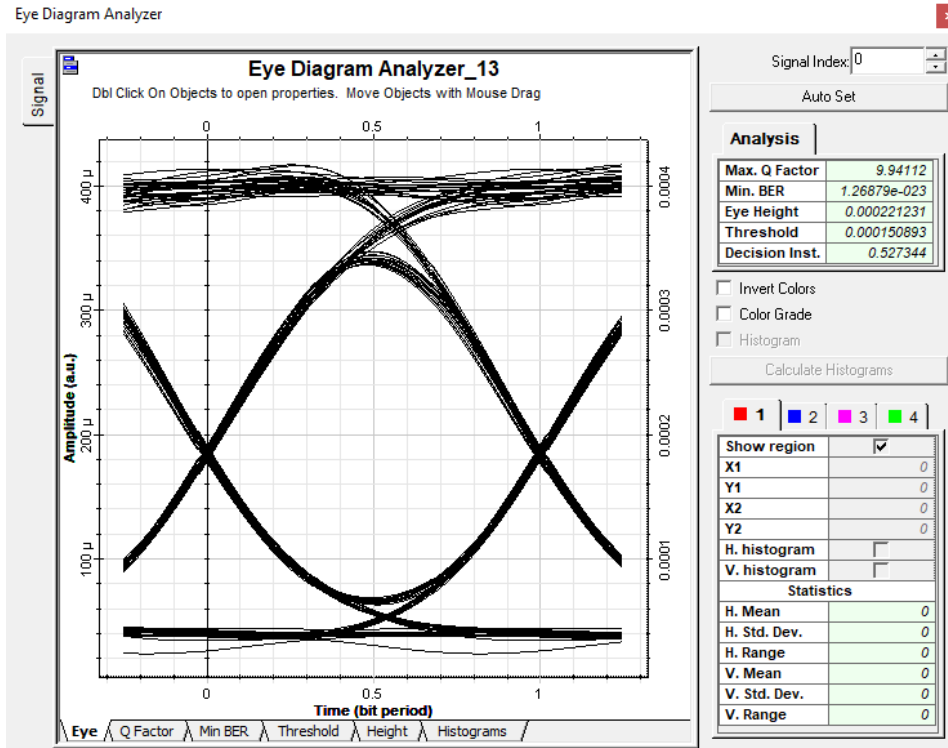


Figura 15. Respuesta de usuario 1 en el canal 14

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 14). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{14} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 14. Q y BER en el canal 14

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < BER < 10^{-12}$	$1,27 \times 10^{-23}$
Factor Q	≥ 8	9,94

Fuente: Autor

15. Canal 15

En la Figura 16 se muestra la respuesta del canal λ_{15} , donde se observa un diagrama de ojo que está bien definido y sin distorsión.

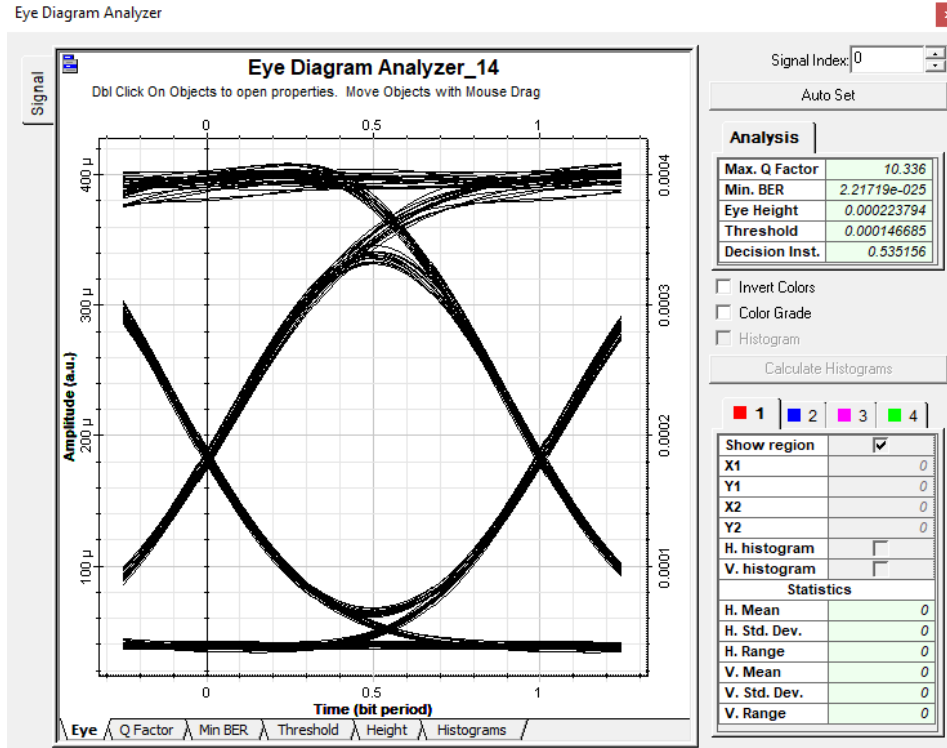


Figura 16. Respuesta de usuario 1 en el canal 15

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 15). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda λ_{15} opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 15. Q y BER en el canal 15

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$2,22 \times 10^{-25}$
Factor Q	≥ 8	10,34

Fuente: Autor

16. Canal 16

En la Figura 17 se muestra la respuesta del canal λ_{16} , donde se observa un diagrama de ojo que está bien definido y sin distorsión.

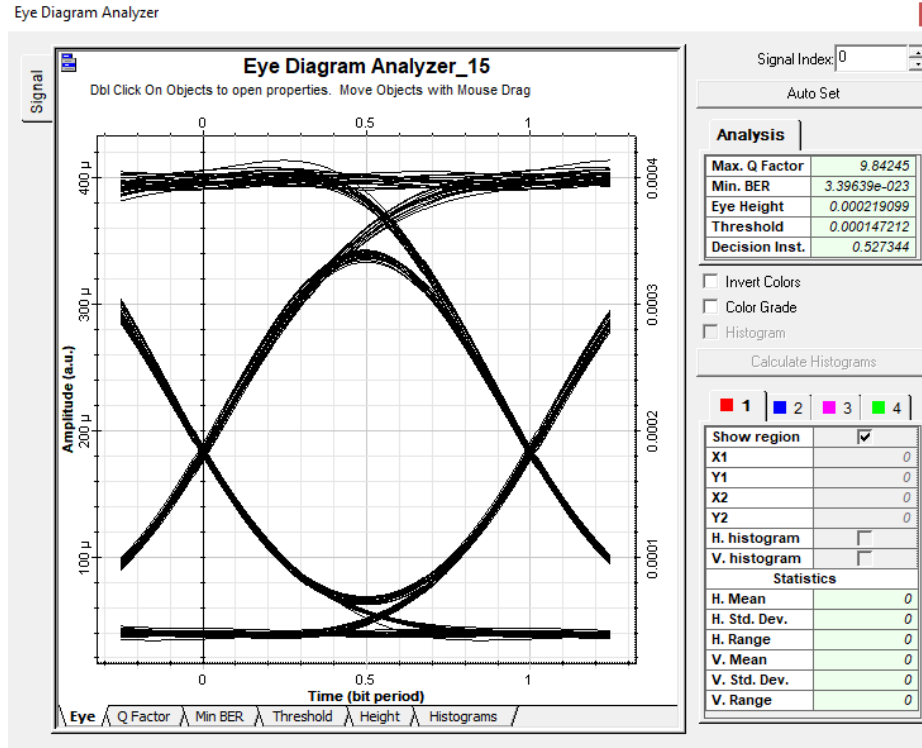


Figura 17. Respuesta de usuario 1 en el canal 16

Fuente: Autor

Los resultados evidencian que los valores de Q y BER se encuentran dentro de lo establecido (ver Tabla 16). Por este motivo se puede afirmar que la longitud de onda $\lambda 16$ opera dentro de los rangos aceptados por el estándar GPON.

Tabla 16. Q y BER en el canal 16

Parámetro	rango	Resultado
BER	$10^{-9} < \text{BER} < 10^{-12}$	$3,55 \times 10^{-14}$
Factor Q	≥ 8	7,47

Fuente: Autor

Los resultados de dicho análisis serán presentados en el capítulo 5 del trabajo de grado presentado.

Elaborado por:

Iván Camilo Nieto Sánchez

Correo: ivan.nieto@mail.escuelaing.edu.co

Anexo 4. Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-Rate, Ancho de línea y Distancia de la fibra para evaluar Potencia, Factor Q y BER

TABLA 1. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHz - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canales	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	1,66 mW	2,20 dBm	313,4 uW	-5,04 dBm	L1_U1	49,53	0	1,83 nW	-57,37 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					528,0 uW	-2,77 dBm	L2_U1	69,37	0	5,35 nW	-52,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,18 uW	-8,89 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					30,14 uW	-15,21 dBm	L3_U1	9,78	6,64 e-23	69,13 pW	-71,60 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					335,5 uW	-4,74 dBm	L4_U1	82,10	0	8,51 nW	-50,70 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 mW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					75,97 uW	-11,19 dBm	L5_U1	45,25	0	1,72 nW	-57,64 dBm
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					231,2 uW	-6,36 dBm	L6_U1	93,79	0	16,18 nW	-47,91 dBm
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,32 dBm					146,9 uW	-8,33 dBm	L7_U1	71,68	0	6,44 nW	-51,91 dBm
λ_8	193,8 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L8_U1	1	0	1	359,4 fW

λ_9	193,9 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	476,6 pW	-93,22 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L9_U 1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,50 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L10_ U1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					3,47 nW	-54,60 dBm	L11_ U1	0	1	373,31 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,72 nW	-57,65 dBm	L12_ U1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,84 pW	-67,13 dBm					2,1 nW	-56,78 dBm	L13_ U1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,57 uW	-7,36 dBm	868,41 pW	-60,61 dBm					5,45 nW	-52,64 dBm	L14_ U1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					7,21 nW	-51,42 dBm	L15_ U1	0	1	438,8 fW	-93,58 dBm
λ_{16}	194,6 THz	738,64 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					13,09 nW	-48,83 dBm	L16_ U1	0	1	393,8 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 2. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	832,6 uW	-0,79 dBm	156,8 uW	-8,04 dBm	L1_U1	25,8 2	2,02 e- 147	458,9 pW	-63,38 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					264,7 uW	-5,77 dBm	L2_U1	42,6 6	0	1,35 nW	-58,71 dBm

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

$\lambda 3$	193,3 THz	129,18 uW	-8,89 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					15,12 uW	-18,20 dBm	L3_U1	5,51	1,71 e-8	17,71 pW	-77,52 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					168,6 uW	-7,73 dBm	L4_U1	48,2 0	0	2,15 nW	-56,67 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	322,2 mW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					38,01 uW	-14,20 dBm	L5_U1	23,8 7	2,49 e- 126	431,6 pW	-63,65 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					115,6 uW	-9,37 dBm	L6_U1	69,6 7	0	4,04 nW	-53,93 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,32 dBm					73,70 uW	-11,33 dBm	L7_U1	40,4 7	0	1,62 nW	-57,90 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	476,6 pW	-93,22 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,50 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,83 fW	-93,73 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					2,14 nW	-56,69 dBm	L11_U 1	0	1	373,31 fW	-94,28 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,59 nW	-57,98 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,84 pW	-67,13 dBm					2,08 nW	-56,81 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 pW	-93,73 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	183,57 uW	-7,36 dBm	868,41 pW	-60,61 dBm					2,56 nW	-55,90 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					3,58 nW	-54,46 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm

λ_{16}	194,6 THz	738,64 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					8,23 nW	-50,48 dBm	L16_U	1	0	1	393,7 fW	-94,05 dBm
----------------	--------------	--------------	--------------	---------	---------------	--	--	--	--	------------	---------------	-------	---	---	---	-------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 3. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida					
Canales	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia		
λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	417,31 uW	-3,79 dBm	78,63 uW	-11,04 dBm	L1_U	13,99	8,70 e-45	115,7 pW	-69,36 dBm	
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					132,67 uW	-8,77 dBm	L2_U	21,77	1,93 e-105	338,56 pW	-64,70 dBm	
λ_3	193,3 THz	129,18 uW	-8,89 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					7,56 uW	-21,21 dBm	L3_U	2,62	4,30 e-3	4,73 pW	-83,25 dBm	
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					84,40 uW	-10,74 dBm	L4_U	25,75	1,30 e-146	539,7 pW	-62,68 dBm	
λ_5	193,5 THz	322,2 mW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					19,13 uW	-17,18 dBm	L5_U	13,57	2,98 e-42	109,6 pW	-69,60 dBm	
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					57,94 uW	-12,37 dBm	L6_U	37,75	2,59 e-312	1,01 nW	-59,93 dBm	
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,32 dBm					36,94 uW	-14,32 dBm	L7_U	24,43	3,57 e-132	407,6 pW	-63,90 dBm	
λ_8	193,8 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L8_U	1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
λ_9	193,9 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	476,6 pW	-93,22 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L9_U	1	0	1	405,62 5 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10,0 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,50 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L10_U	1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm

λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					1,26 nW	-59,0 dBm	L11_ U1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					966,6 pW	-58,87 dBm	L12_ U1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,84 pW	-67,13 dBm					1,29 nW	-58,87 dBm	L13_ U1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,57 uW	-7,36 dBm	868,41 pW	-60,61 dBm					1,40 nW	-58,53 dBm	L14_ U1	0	1	415,8 fW	-93,8 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					2,37 nW	-56,24 dBm	L15_ U1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm
λ_{16}	194,6 THz	738,64 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					4,25 nW	-53,71 dBm	L16_ U1	0	1	393,6 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 4. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	1,13 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm					313,4 uW	-5,04 dBm	L1_U1	49,5 3	0	1,83 nW	-57,37 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					528,0 uW	-2,77 dBm	L2_U1	69,3 7	0	5,35 nW	-52,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,28 uW	-8,88 dBm	59,67 uW	-12,24 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	1,66 mW	2,20 dBm	30,14 uW	-15,21 dBm	L3_U1	9,78	6,64 e- 23	69,13 pW	-71,60 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					335,5 uW	-4,74 dBm	L4_U1	82,1 0	0	8,51 nW	-50,70 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,93 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					75,97 uW	-11,19 dBm	L5_U1	45,2 5	0	1,72 nW	-57,64 dBm

λ6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,42 uW	-3,37 dBm					231,2 uW	-6,36 dBm	L6_U1	93,7 9	0	16,18 nW	-47,91 dBm
λ7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,98 uW	-5,32 dBm					146,96 uW	-8,33 dBm	L7_U1	71,6 8	0	6,44 nW	-51,91 dBm
λ8	193,8 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
λ9	193,9 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
λ10	194,0 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L10_U1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
λ11	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					3,47 nW	-54,60 dBm	L11_U1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ12	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,72 nW	-57,65 dBm	L12_U1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ13	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,10 nW	-56,78 dBm	L13_U1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ14	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					5,45 nW	-52,64 dBm	L14_U1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ15	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					7,21 nW	-51,42 dBm	L15_U1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm
λ16	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					13,09 nW	-48,83 dBm	L16_U1	0	1	393,8 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 5. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	1,13 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	832,6 uW	-0,80 dBm	156,8 uW	-8,04 dBm	L1_U1	25,8 2	2,03 e- 147	4,58,9 pW	-63,38 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					264,7 uW	-5,77 dBm	L2_U1	42,6 6	0	1,34 nW	-58,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,28 uW	-8,88 dBm	59,67 uW	-12,24 dBm					15,12 uW	-18,20 dBm	L3_U1	5,51	1,71 e-8	17,71 pW	-77,52 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					168,6 uW	-7,73 dBm	L4_U1	48,2 0	0	2,15 nW	-56,67 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,93 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					38,01 uW	-14,20 dBm	L5_U1	23,8 7	2,49 e- 126	431,6 pW	-63,65 dBm
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,42 uW	-3,37 dBm					115,6 uW	-9,37 dBm	L6_U1	69,6 7	0	4,04 nW	-53,93 dBm
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,98 uW	-5,32 dBm					73,70 uW	-11,33 dBm	L7_U1	40,4 7	0	1,62 nW	-57,90 dBm
λ_8	193,8 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
λ_9	193,9 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					2,14 nW	-56,68 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,59 nW	-57,98 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,08 nW	-56,81 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,81 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					2,57 nW	-55,90 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,58 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					3,58 nW	-54,46 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,57 dBm

λ_{16}	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					8,23 nW	-50,85 dBm	L16_U 1	0	1	393,7 fW	-94,05 dBm
----------------	--------------	-------------	--------------	---------	---------------	--	--	--	--	------------	---------------	------------	---	---	-------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 6. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida							
Canales	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia				
λ_1	193,1 THz	1,13 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	417,3 uW	-3,79 dBm	78,63 uW	-11,04 dBm	L1_U 1	13, 99	8,70 e- 45	115,y pW	-69,37 dBm			
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,66 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					132,7 uW	-8,77 dBm	L2_U 1	21, 77	1,93 e- 105	338,6 pW	-64,70 dBm			
λ_3	193,3 THz	129,28 uW	-8,88 dBm	59,67 uW	-12,24 dBm					7,56 uW	-21,21 dBm	L3_U 1	2,6 2	4,30 e- 3	4,73 pW	-83,25 dBm			
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					84,40 uW	-10,74 dBm	L4_U 1	25, 75	1,30 e- 146	539,7 pW	-62,68 dBm			
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,93 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					19,13 uW	-17,18 dBm	L5_U 1	13, 57	2,98 e- 42	109,6 pW	-69,60 dBm			
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,42 uW	-3,37 dBm					57,94 uW	-12,37 dBm	L6_U 1	37, 75	2,59 e- 312	1,02 nW	-59,93 dBm			
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,98 uW	-5,32 dBm					36,94 uW	-14,32 dBm	L7_U 1	24, 43	3,57 e- 132	407,6 pW	-63,90 dBm			
λ_8	193,8 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	1,28 pW	-88,92 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L8_U 1				359,4 fW	-94,44 dBm		
λ_9	193,9 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L9_U 1				0	1	405,62 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10,00 nW	-50,0 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L10_U 1				0	1	423,8 fW	-93,73 dBm

λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,81 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					1,26 nW	-59,0 dBm	L11_ U1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					966,6 pW	-60,15 dBm	L12_ U1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					1,30 nW	-58,53 dBm	L13_ U1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					1,40 nW	-58,53 dBm	L14_ U1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					2,37 nW	-56,24 dBm	L15_ U1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm
λ_{16}	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,00 dBm					4,26 nW	-53,71 dBm	L16_ U1	0	1	393,6 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 7. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm					313,4 uW	-5,04 dBm	L1_U1	49,5 3	0	1,83 nW	-57,37 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					528,0 uW	-2,77 dBm	L2_U1	69,3 7	0	5,35 nW	-52,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	1,66 mW	2,20 dBm	30,14 uW	-15,21 dBm	L3_U1	9,78	6,64 e- 23	69,13 pW	-71,60 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					335,5 uW	-4,74 dBm	L4_U1	82,1 0	0	8,51 nW	-50,79 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					75,97 uW	-11,19 dBm	L5_U1	45,2 5	0	17,2 nW	-57,64 dBm

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fíbrea Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

$\lambda 6$	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					231,2 uW	-6,36 dBm	L6_U1	93,7 9	0	16,18 nW	-47,91 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					146,9 uW	-8,33 dBm	L7_U1	71,6 8	0	6,44 nW	-51,91 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L10_U1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					3,47 nW	-54,60 dBm	L11_U1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,72 nW	-57,65 dBm	L12_U1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,10 nW	-56,77 dBm	L13_U1	0	1	424,0 fW	-93,81 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					5,45 nW	-52,64 dBm	L14_U1	0	1	415,8 fW	-93,73 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					7,21 nW	-51,42 dBm	L15_U1	0	1	438,8 fW	-93,58 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					13,09 nW	-48,83 dBm	L16_U1	0	1	393,8 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 8. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	832,6 uW	-0,80 dBm	156,8 uW	-8,04 dBm	L1_U1	25,8 3	2,03 e- 147	458,9 pW	-63,38 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					264,7 uW	-5,77 dBm	L2_U1	42,6 6	0	1,35 nW	-58,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					15,12 uW	-18,20 dBm	L3_U1	5,51	1,72 e-8	17,71 pW	-77,52 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					168,6 uW	-7,73 dBm	L4_U1	48,2 0	0	2,15 nW	-56,67 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					38,02 uW	-14,20 dBm	L5_U1	23,8 7	2,49 e- 126	431,6 pW	-63,65 dBm
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					115,6 uW	-9,37 dBm	L6_U1	69,6 7	0	4,04 nW	-53,93 dBm
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					73,69 uW	-11,33 dBm	L7_U1	40,4 7	0	1,62 nW	-57,90 dBm
λ_8	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
λ_9	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					2,14 nW	-56,69 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,59 nW	-57,98 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,08 nW	-56,81 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					2,57 nW	-55,90 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					3,58 nW	-54,46 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm

$\lambda 16$	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					8,23 nW	-50,85 dBm	L16_U 1	0	1	393,7 fW	-94,04 dBm
--------------	--------------	-------------	--------------	------------	--------------	--	--	--	--	------------	---------------	------------	---	---	-------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 9. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
$\lambda 1$	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	417,3 uW	-3,79 dBm	78,63 uW	-11,04 dBm	L1_U1	13,9 9	8,71 e- 45	115,7 pW	-69,37 dBm
$\lambda 2$	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					132,7 uW	-8,77 dBm	L2_U1	21,7 7	1,94 e- 105	338,6 pW	-64,70 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					7,56 uW	-21,21 dBm	L3_U1	2,62	4,30 e-3	4,73 pW	-83,25 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					84,40 uW	-10,74 dBm	L4_U1	25,7 5	1,31 e- 146	539,7 pW	-62,68 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					19,13 uW	-17,18 dBm	L5_U1	13,5 7	2,98 e- 42	109,6 pW	-69,60 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					57,94 uW	-12,37 dBm	L6_U1	37,7 5	2,59 e- 312	1,02 nW	-59,93 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					36,94 uW	-14,32 dBm	L7_U1	24,4 3	3,57 e- 132	407,6 pW	-63,90 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,83 fW	-93,73 dBm

λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					1,26 nW	-59,00 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					966,6 pW	-60,15 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					1,30 pW	-58,53 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					1,40 nW	-58,43 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					2,37 nW	-56,24 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm
λ_{16}	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					4,26 nW	-53,71 dBm	L16_U 1	0	1	393,6 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 10. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm					313,4 uW	-5,04 dBm	L1_U1	49,5 3	0	1,83 nW	-57,37 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					528,0 uW	-2,77 dBm	L2_U1	69,3 7	0	5,35 nW	-52,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	1,66 mW	2,20 dBm	30,14 uW	-15,21 dBm	L3_U1	9,78	6,64 e- 23	69,13 pW	-71,60 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					335,5 uW	-4,74 dBm	L4_U1	82,1 0	0	8,51 nW	-50,79 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					75,97 uW	-11,19 dBm	L5_U1	45,2 5	0	17,2 nW	-57,64 dBm

$\lambda 6$	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					231,2 uW	-6,36 dBm	L6_U1	93,7 9	0	16,18 nW	-47,91 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					146,9 uW	-8,33 dBm	L7_U1	71,6 8	0	6,44 nW	-51,91 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					166,1 fW	-97,79 dBm	L10_U 1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					3,47 nW	-54,60 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,72 nW	-57,65 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,10 nW	-56,77 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,81 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					5,45 nW	-52,64 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,73 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					7,21 nW	-51,42 dBm	L15_U 1	0	1	438,8 fW	-93,58 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					13,09 nW	-48,83 dBm	L16_U 1	0	1	393,8 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 11. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	832,6 uW	-0,80 dBm	156,8 uW	-8,04 dBm	L1_U1	25,8 3	2,03 e- 147	458,9 pW	-63,38 dBm
λ_2	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					264,7 uW	-5,77 dBm	L2_U1	42,6 6	0	1,35 nW	-58,71 dBm
λ_3	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					15,12 uW	-18,20 dBm	L3_U1	5,51	1,72 e-8	17,71 pW	-77,52 dBm
λ_4	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					168,6 uW	-7,73 dBm	L4_U1	48,2 0	0	2,15 nW	-56,67 dBm
λ_5	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					38,02 uW	-14,20 dBm	L5_U1	23,8 7	2,49 e- 126	431,6 pW	-63,65 dBm
λ_6	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					115,6 uW	-9,37 dBm	L6_U1	69,6 7	0	4,04 nW	-53,93 dBm
λ_7	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					73,69 uW	-11,33 dBm	L7_U1	40,4 7	0	1,62 nW	-57,90 dBm
λ_8	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
λ_9	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
λ_{10}	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					83,26 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,8 fW	-93,73 dBm
λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					2,14 nW	-56,69 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					1,59 nW	-57,98 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					2,08 nW	-56,81 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					2,57 nW	-55,90 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					3,58 nW	-54,46 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm

$\lambda 16$	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					8,23 nW	-50,85 dBm	L16_U 1	0	1	393,7 fW	-94,04 dBm
--------------	--------------	-------------	--------------	------------	--------------	--	--	--	--	------------	---------------	------------	---	---	-------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 12. PRUEBAS CON BIT RATE DE 2,5 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
$\lambda 1$	193,1 THz	1,33 mW	1,24 dBm	624,9 uW	-2,04 dBm	3,31 mW	5,20 dBm	417,3 uW	-3,79 dBm	78,63 uW	-11,04 dBm	L1_U1	13,9 9	8,71 e- 45	115,7 pW	-69,37 dBm
$\lambda 2$	193,2 THz	2,32 mW	3,65 dBm	1,05 mW	0,23 dBm					132,7 uW	-8,77 dBm	L2_U1	21,7 7	1,94 e- 105	338,6 pW	-64,70 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	129,2 uW	-8,88 dBm	59,68 uW	-12,24 dBm					7,56 uW	-21,21 dBm	L3_U1	2,62	4,30 e-3	4,73 pW	-83,25 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	1,45 mW	1,61 dBm	670,1 uW	-1,74 dBm					84,40 uW	-10,74 dBm	L4_U1	25,7 5	1,31 e- 146	539,7 pW	-62,68 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	322,2 uW	-4,92 dBm	151,4 uW	-8,20 dBm					19,13 uW	-17,18 dBm	L5_U1	13,5 7	2,98 e- 42	109,6 pW	-69,60 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	996,5 uW	-0,01 dBm	460,4 uW	-3,37 dBm					57,94 uW	-12,37 dBm	L6_U1	37,7 5	2,59 e- 312	1,02 nW	-59,93 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	625,7 uW	-2,04 dBm	293,9 uW	-5,31 dBm					36,94 uW	-14,32 dBm	L7_U1	24,4 3	3,57 e- 132	407,6 pW	-63,90 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	10 nW	-50 dBm	1,28 pW	-88,9 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L8_U1	0	1	359,4 fW	-94,44 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	10 nW	-50 dBm	476,6 fW	-93,22 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L9_U1	0	1	405,6 fW	-93,92 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	10 nW	-50 dBm	284,5 fW	-95,46 dBm					41,73 fW	-100 dBm	L10_U 1	0	1	423,83 fW	-93,73 dBm

λ_{11}	194,1 THz	522,8 uW	-2,85 dBm	2,39 nW	-56,21 dBm					1,26 nW	-59,00 dBm	L11_U 1	0	1	373,3 fW	-94,28 dBm
λ_{12}	194,2 THz	157,5 uW	-8,03 dBm	757,2 pW	-61,21 dBm					966,6 pW	-60,15 dBm	L12_U 1	0	1	351,9 fW	-94,53 dBm
λ_{13}	194,3 THz	41,63 uW	-13,81 dBm	193,8 pW	-67,13 dBm					1,30 pW	-58,53 dBm	L13_U 1	0	1	424,0 fW	-93,73 dBm
λ_{14}	194,4 THz	183,6 uW	-7,36 dBm	868,4 pW	-60,61 dBm					1,40 nW	-58,43 dBm	L14_U 1	0	1	415,8 fW	-93,81 dBm
λ_{15}	194,5 THz	1,09 mW	0,38 dBm	5,33 nW	-52,73 dBm					2,37 nW	-56,24 dBm	L15_U 1	0	1	438,7 fW	-93,58 dBm
λ_{16}	194,6 THz	738,6 uW	-1,32 dBm	3,97 nW	-54,0 dBm					4,26 nW	-53,71 dBm	L16_U 1	0	1	393,6 fW	-94,05 dBm

Fuente: Autor

TABLA 13. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm					298,2 uW	-5,25 dBm	L1_U1	8	4,99 e- 16	1,68 nW	-57,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,16 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					1,39 mW	1,42 dBm	L2_U1	9,2 8	6,14 e- 21	37,63 nW	-44,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm	8,10 mW	9,08 dBm	4,06 mW	6,08 dBm	375,0 uW	-4,26 dBm	L3_U1	8,8 9	2,2 e- 19	10,82 nW	-49,66 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					350,5 uW	-4,55 dBm	L4_U1	8,7 3	9,78 e- 19	9,46 nW	-50,24 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	42,41 uW	-12,80 dBm					26,39 uW	-15,78 dBm	L5_U1	6,0	9,1 e- 10	212,3 pW	-66,3 dBm

λ6	193,6 THz	802,6 uW	-1 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					150,9 uW	-8,21 dBm	L6_U1	8,4 9	7,54 e- 18	7,01 nW	-51,54 dBm
λ7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					283,2 uW	-5,47 dBm	L7_U1	8,8 5	3,22 e- 19	24,32 nW	-46,14 dBm
λ8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,29 uW	-10,39 dBm	L8_U1	8,5 1	6,73 e- 18	2,56 nW	-55,91 dBm
λ9	193,9 THz	1,04 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,10 uW	-10,40 dBm	L9_U1	8,1 8	1,12 e- 16	2,56 nW	-55,91 dBm
λ10	194,0 THz	2,93 mW	4,61 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					496,7 uW	-3,04 dBm	L10_U1	9,1 0	3,31 e- 20	75,02 nW	-41,25 dBm
λ11	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					95,97 uW	-10,18 dBm	L11_U1	8,2 4	6,39 e- 17	2,86 nW	-55,43 dBm
λ12	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					56,25 uW	-12,50 dBm	L12_U1	8,4 4	1,27 e- 17	947,5 pW	-60,24 dBm
λ13	194,3 THz	1,76 mW	2,45 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					265,6 uW	-5,76 dBm	L13_U1	9,0 8	3,90 e- 20	21,79 nW	-46,17 dBm
λ14	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					33,60 uW	-14,73 dBm	L14_U1	6,8 8	2,60 e- 12	344,2 pW	-64,63 dBm
λ15	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					53,22 uW	-12,74 dBm	L15_U1	7,4 7	3,55 e- 14	832,5 pW	-60,79 dBm
λ16	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,3 uW	-38,75 dBm					61,68 uW	-42,10 dBm	L16_U1	0 0	0 0	0 0	0 0

Fuente: Autor

TABLA 14. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,10 mW	9,08 dBm	2,03 mW	3,08 dBm	149,5 uW	-8,25 dBm	L1_U1	6,6 0	1,83 e- 11	423,6 pW	-63,7 dBm
λ2	193,2 THz	7,52 mW	8,16 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					695,5 uW	-1,58 dBm	L2_U1	8,9 3	1,76 e- 19	9,45 nW	-50,24 dBm
λ3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					188,0 uW	-7,26 dBm	L3_U1	8,4 3	1,39 e- 17	2,71 nW	-55,70 dBm
λ4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					175,1 uW	-7,56 dBm	L4_U1	8,3 3	3,44 e- 17	2,35 nW	-56,28 dBm
λ5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	42,41 uW	-12,80 dBm					13,12 uW	-18,82 dBm	L5_U1	3,7 6	8,20 e- 5	53,52 pW	-72,71 dBm
λ6	193,6 THz	802,6 uW	-1 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					75,65 uW	-11,21 dBm	L6_U1	7,8 0	2,51 e- 15	1,75 nW	-57,58 dBm
λ7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					142,19 uW	-8,47 dBm	L7_U1	8,5 4	5,48 e- 18	6,10 nW	-52,14 dBm
λ8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					46,10 uW	-13,36 dBm	L8_U1	6,9 8	1,31 e- 12	650,4 pW	-61,87 dBm
λ9	193,9 THz	1,04 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					45,76 uW	-13,39 dBm	L9_U1	6,9 9	1,23 e- 12	645,3 pW	-61,90 dBm
λ10	194,0 THz	2,93 mW	4,61 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					247,9 uW	-6,05 dBm	L10_U 1	8,6 4	2,36 e- 18	18,65 nW	-47,29 dBm
λ11	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					48,19 uW	-13,17 dBm	L11_U 1	7,3 6	8,01 e- 14	719,1 pW	-61,43 dBm
λ12	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					28,50 uW	-15,45 dBm	L12_U 1	6,3 9	7,41 e- 11	242,9 pW	-66,14 dBm
λ13	194,3 THz	1,76 mW	2,45 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					133,2 uW	-8,75 dBm	L13_U 1	8,9 5	1,41 e- 19	5,46 nW	-52,63 dBm
λ14	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					16,85 uW	-17,73 dBm	L14_U 1	4,2 6	9,75 e- 6	87,42 pW	-70,58 dBm
λ15	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					26,65 uW	-15,74 dBm	L15_U 1	5,4 8	1,93 e- 8	209,1 pW	-66,80 dBm

λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,3 uW	-38,75 dBm					35,53 uW	-44,50 dBm	L16_U 1	0	0	1,62 pW	-87,90 dBm
----------------	--------------	---------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 15. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,10 mW	9,08 dBm	1,01 mW	0,08 dBm	74,87 uW	-11,26 dBm	L1_U1	5,0 1	2,48 e- 7	106,5 pW	-69,72 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,16 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					348,6 uW	-4,58 dBm	L2_U1	7,7 5	4,04 e- 15	2,36 nW	-56,26 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					94,11 uW	-10,26 dBm	L3_U1	6,5 2	3,16 e- 12	674,9 pW	-61,71 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					87,89 uW	-10,56 dBm	L4_U1	6,6 3	1,51 e- 11	590,6 pW	-62,29 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	42,41 uW	-12,80 dBm					6,57 uW	-21,82 dBm	L5_U1	0 0	1 1	14,50 pW	-78,40 dBm
λ_6	193,6 THz	802,6 uW	-1 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					37,94 uW	-14,21 dBm	L6_U1	5,9 8	9,79 e- 10	438,2 pW	-63,60 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					71,35 uW	-11,47 dBm	L7_U1	6,9 6	1,50 e- 12	1,52 nW	-58,16 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					23,14 uW	-16,36 dBm	L8_U1	5,5 0	1,78 e- 8	163,7 pW	-67,86 dBm
λ_9	193,9 THz	1,04 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					22,91 uW	-16,40 dBm	L9_U1	5,2 7	6,43 e- 8	161,9 pW	-67,91 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,61 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					124,1 uW	-9,06 dBm	L10_U 1	7,3 5	8,32 e- 14	4,64 nW	-53,33 dBm

λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					24,30 uW	-16,14 dBm	L11_U 1	5,4 7	2,12 e- 8	182,0 pW	-67,40 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					14,28 uW	-18,45 dBm	L12_U 1	4,0 9	2,14 e- 5	61,72 pW	-72,10 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,45 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					66,77 uW	-11,75 dBm	L13_U 1	7,0 6	7,09 e- 13	1,36 nW	-58,65 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					8,44 uW	-20,74 dBm	L14_U 1	2,6 9	3,45 e- 3	22,99 pW	-76,38 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					13,36 uW	-18,74 dBm	L15_U 1	3,2 7	532,0 e-6	53,50 pW	-72,72 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,3 uW	-38,75 dBm					19,04 uW	-47,20 dBm	L16_U 1	0 1	1 1	1,57 pW	-88,03 dBm

Fuente: Autor

TABLA 16. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,19 mW	2,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm					298,2 uW	-5,25 dBm	L1_U1	8,0	4,99 e- 16	1,68 nW	-57,27 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					1,38 mW	1,42 dBm	L2_U1	9,2 8	6,14 e- 21	37,63 nW	-44,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	4,06 mW	6,08 dBm	375,0 uW	-4,26 dBm	L3_U1	8,8 9	2,21 e- 19	10,82 nW	-49,66 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	2,25 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					350,5 uW	-4,55 dBm	L4_U1	8,7 3	9,78 e- 19	9,47 nW	-50,24 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	52,4 uW	-12,8 dBm					26,40 uW	-15,78 dBm	L5_U1	6,0	9,10 e- 10	212,3 nW	-66,73 dBm

$\lambda 6$	193,6 THz	0,80 mW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					150,9 uW	-8,21 dBm	L6_U1	8,4 9	7,54 e- 18	7,01 nW	-51,54 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					283,2 uW	-5,48 dBm	L7_U1	8,8 5	3,22 e- 19	24,32 nW	-46,14 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	189,5 uW	-7,39 dBm					91,29 uW	-10,40 dBm	L8_U1	8,5 1	6,73 e- 18	2,56 nW	-55,91 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,10 uW	-10,40 dBm	L9_U1	8,1 7	1,12 e- 16	2,56 nW	-55,91 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					946,7 uW	-3,03 dBm	L10_U1	9,1 0	3,30 e- 20	75,02 nW	-41,25 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					95,97 uW	-10,18 dBm	L11_U1	8,2 4	6,39 e- 17	2,87 nW	-55,43 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					56,25 uW	-12,50 dBm	L12_U1	8,4 4	1,27 e- 17	947,4 nW	-60,23 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					254,6 uW	-5,62 dBm	L13_U1	9,0 8	3,90 e- 20	21,79 nW	-46,62 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					33,60 uW	-14,74 dBm	L14_U1	6,8 8	2,60 e- 12	344,2 pW	-64,63 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					53,22 uW	-12,74 dBm	L15_U1	7,4 7	3,55 e- 14	832,5 pW	-60,80 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,75 dBm					61,68 uW	-42,10 dBm	L16_U1	1 0	1	1,57 pW	-88,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 17. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	2,19 mW	2,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	2,03 mW	3,08 dBm	149,5 uW	-8,25 dBm	L1_U 1	6,6 0	1,83 e-11	423,6 pW	-63,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					695,5 uW	-1,58 dBm	L2_U 1	8,9 3	1,76 e-19	9,45 nW	-50,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					188,0 uW	-7,25 dBm	L3_U 1	8,4 2	1,39 e-17	2,71 nW	-55,67 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	2,25 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					175,1 uW	-7,57 dBm	L4_U 1	8,3 3	3,44 e-17	2,35 nW	-56,28 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	52,4 uW	-12,8 dBm					13,12 uW	-18,82 dBm	L5_U 1	3,7 6	8,20 e-5	53,52 nW	-72,71 dBm
λ_6	193,6 THz	0,80 mW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					75,65 uW	-11,21 dBm	L6_U 1	7,8 0	2,50 e-15	1,75 nW	-57,57 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					142,2 uW	-8,47 dBm	L7_U 1	8,5 4	5,48 e-18	6,10 nW	-52,14 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	189,5 uW	-7,39 dBm					46,10 uW	-13,36 dBm	L8_U 1	6,9 7	1,30 e-12	650,4 nW	-61,69 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					45,76 uW	-13,40 dBm	L9_U 1	6,9 9	1,23 e-12	645,3 nW	-61,90 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					247,9 uW	-6,06 dBm	L10_U 1	8,6 4	2,36 e-18	18,65 nW	-47,29 dBm
λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					48,19 uW	-13,17 dBm	L11_U 1	7,3 6	8,00 e-14	719,1 pW	-61,43 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					28,50 uW	-15,45 dBm	L12_U 1	6,3 9	7,41 e-11	242,9 pW	-66,14 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47dB m	532,1 uW	-2,74 dBm					133,2 uW	-8,75 dBm	L13_U 1	8,9 5	1,41 e-19	5,46 nW	-52,63 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					16,86 uW	-17,73 dBm	L14_U 1	4,2 6	9,75 e-6	87,42 pW	-70,58 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					26,65 uW	-15,74 dBm	L15_U 1	5,4 8	1,93 e-8	209,1 pW	-66,80 dBm

λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,75 dBm					35,53 nW	-44,49 dBm	L16_ U1	0	1	1,57 pW	-88,03 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 18. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,19 mW	2,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	1,01 mW	0,08 dBm	74,87 uW	-11,25 dBm	L1_U1	5,0 1	2,48 e- 7	106,5 pW	-69,72 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					348,6 uW	-4,57 dBm	L2_U1	7,7 5	4,03 e- 15	2,37 nW	-56,26 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					94,11 uW	-10,263 dBm	L3_U1	6,5 2	3,16 e- 11	674,9 pW	-61,71 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	2,25 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					87,89 uW	-10,56 dBm	L4_U1	6,6 3	1,50 e- 11	590,6 pW	-62,29 dBm
λ_5	193,5 THz	1,85 mW	2,66 dBm	52,4 uW	-12,8 dBm					6,57 uW	-21,82 dBm	L5_U1	0 1		14,49 pW	-78,39 dBm
λ_6	193,6 THz	0,80 mW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					37,94 uW	-14,21 dBm	L6_U1	5,9 8	9,79 e- 10	438,2 pW	-63,48 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					71,35 uW	-11,47 dBm	L7_U1	6,9 6	1,50 e- 12	1,53 nW	-58,16 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	189,5 uW	-7,39 dBm					23,14 uW	-16,36 dBm	L8_U1	5,5 0	1,78 e- 8	163,7 pW	-67,86 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					22,91 uW	-16,40 dBm	L9_U1	5,2 7	6,43 e- 6	161,9 pW	-67,91 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					124,1 uW	-9,06 dBm	L10_U1	7,3 1	8,32 e- 5	4,64 nW	-53,33 dBm

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					24,30 uW	-16,14 dBm	L11_U 1	5,4 7	2,12 e- 8	182,0 pW	-67,40 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					14,28 uW	-18,45 dBm	L12_U 1	4,0 9	2,14 e- 5	61,86 pW	-72,01 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					66,77 uW	-11,75 dBm	L13_U 1	7,0 6	7,09 e- 13	1,36 nW	-58,64 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					8,44 uW	-20,74 dBm	L14_U 1	2,6 9	3,45 e- 3	22,99 pW	-76,38 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,3 uW	-9,77 dBm					13,36 uW	-18,74 dBm	L15_U 1	3,2 7	532,0 e-6	53,50 pW	-72,72 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,75 dBm					19,04 nW	-47,20 dBm	L16_U 1	0 1		1,57 pW	-88,03 dBm

Fuente: Autor

TABLA 19. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm					298,2 uW	-5,25 dBm	L1_U 1	8,0 0	4,99 e-16	1,69 nW	-57,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,76 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					1,39 mW	1,42 dBm	L2_U 1	9,2 8	6,14 e-21	37,63 nW	-44,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,35 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	4,06 mW	6,08 dBm	375,0 uW	-4,26 dBm	L3_U 1	8,8 9	2,20 e-19	10,82 nW	-49,65 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					350,5 uW	-4,55 dBm	L4_U 1	9,0 8	3,95 e-20	9,47 nW	-50,24 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					26,40 uW	-15,78 dBm	L5_U 1	6,0 0	9,10 e-10	212,3 pW	-66,73 dBm

λ_6	193,6 THz	802,5 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					150,9 uW	-8,21 dBm	L6_U 1	8,4 9	7,54 e-18	7,01 nW	-51,54 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 uW	-2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					283,2 uW	-5,48 dBm	L7_U 1	8,8 5	3,22 e-19	24,32 nW	-46,14 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,29 uW	-10,40 dBm	L8_U 1	8,5 1	6,73 e-18	2,56 nW	-55,91 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,10 uW	-10,40 dBm	L9_U 1	8,1 7	1,12 e-16	2,56 nW	-55,91 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					496,7 uW	-3,04 dBm	L10_ U1	9,1 0	3,30 e-20	75,02 nW	-41,25 dBm
λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					95,97 uW	-10,18 dBm	L11_ U1	8,2 4	6,39 e-17	2,86 nW	-55,43 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					56,25 uW	-12,50 dBm	L12_ U1	8,4 4	1,27 e-17	947,4 pW	-60,23 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					265,6 uW	-5,76 dBm	L13_ U1	9,0 8	3,90 e-20	21,79 nW	-46,62 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					33,60 uW	-14,74 dBm	L14_ U1	6,8 8	2,60 e-12	344,2 pW	-64,63 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,4 uW	-9,77 dBm					53,22 uW	-12,74 dBm	L15_ U1	7,4 7	3,55 e-14	832,5 pW	-60,80 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,7 dBm					61,68 nW	-42,10 dBm	L16_ U1	0 0	1 1	1,58 pW	-88,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 20. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia
es							o			

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,23 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	2,03 mW	3,08 dBm	149,5 uW	-8,25 dBm	L1_U1	6,6 0	1,83 e- 11	423,6 pW	-63,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,76 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					695,5 uW	-1,58 dBm	L2_U1	8,9 3	1,76 e- 19	9,45 nW	-50,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,35 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					188,0 uW	-7,25 dBm	L3_U1	8,4 2	1,39 e- 17	2,71 nW	-55,67 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					175,1 uW	-7,57 dBm	L4_U1	8,3 3	3,44 e- 17	2,35 nW	-56,28 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					13,12 uW	-18,82 dBm	L5_U1	3,7 6	8,20 e- 5	53,52 pW	-72,71 dBm
λ_6	193,6 THz	802,5 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					75,65 uW	-11,21 dBm	L6_U1	7,8 0	2,50 e- 15	1,75 nW	-57,58 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 uW	-2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					142,2 uW	-8,47 dBm	L7_U1	8,5 4	5,48 e- 18	6,10 nW	-52,14 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					46,09 uW	-13,36 dBm	L8_U1	6,9 7	1,30 e- 12	650,4 pW	-61,69 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					45,76 uW	-13,39 dBm	L9_U1	6,9 9	1,23 e- 12	645,3 pW	-61,90 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					247,9 uW	-6,05 dBm	L10_U 1	8,6 4	2,36 e- 18	18,64 nW	-47,29 dBm
λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					48,19 uW	-13,17 dBm	L11_U 1	7,3 6	8,00 e- 14	719,1 pW	-61,43 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					28,50 uW	-15,45 dBm	L12_U 1	6,3 9	7,41 e- 11	242,9 pW	-66,14 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					133,2 uW	-8,75 dBm	L13_U 1	8,9 5	1,41 e- 19	5,46 nW	-52,63 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					16,86 uW	-17,73 dBm	L14_U 1	4,2 6	9,75 e- 6	87,42 pW	-70,58 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,4 uW	-9,77 dBm					26,65 uW	-15,74 dBm	L15_U 1	5,4 8	1,93 e- 8	209,1 pW	-66,80 dBm

λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,7 dBm					35,53 nW	-44,49 dBm	L16_U 1	0	1	1,57 pW	-88,03 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	--------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 21. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,23 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	1,02 mW	0,08 dBm	74,87 uW	-11,26 dBm	L1_U1	5,0 1	2,48 e- 7	106,5 pW	-69,72 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,76 dBm	2,77 mW	4,43 dBm					348,65 uW	-4,58 dBm	L2_U1	7,7 5	4,03 e- 15	2,37 nW	-56,26 dBm
λ_3	193,3 THz	2,35 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					94,11 uW	-10,26 dBm	L3_U1	6,5 2	3,15 e- 11	674,9 pW	-61,71 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					87,89 uW	-10,56 dBm	L4_U1	6,6 3	1,51 e- 11	590,6 pW	-62,29 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					6,57 uW	-21,82 dBm	L5_U1	0 0	1 1	14,49 pW	-78,39 dBm
λ_6	193,6 THz	802,5 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					37,94 uW	-14,21 dBm	L6_U1	5,9 8	9,79 e- 10	438,2 pW	-63,6 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 uW	-2,14 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					71,35 uW	-11,47 dBm	L7_U1	6,9 6	1,50 e- 12	1,53 nW	-58,16 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					23,14 uW	-16,36 dBm	L8_U1	5,5 0	1,78 e- 8	163,7 pW	-67,86 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					22,91 uW	-16,40 dBm	L9_U1	5,2 7	6,43 e- 8	161,9 pW	-67,91 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,05 dBm					124,1 uW	-9,06 dBm	L10_U 1	7,3 5	8,32 e- 14	4,64 nW	-53,33 dBm

λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					24,30 uW	-16,14 dBm	L11_U 1	5,4 7	2,12 e- 8	182,0 pW	-67,40 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					14,28 uW	-18,45 dBm	L12_U 1	4,0 9	2,15 e- 5	61,72 pW	-72,09 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					66,77 uW	-11,75 dBm	L13_U 1	7,0 6	7,09 e- 13	1,36 nW	-58,65 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					8,43 uW	-20,74 dBm	L14_U 1	2,6 9	3,45 e- 3	22,99 pW	-76,38 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,4 uW	-9,77 dBm					13,36 uW	-18,74 dBm	L15_U 1	3,2 7	532,0 e-6	53,50 pW	-72,72 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 uW	-38,7 dBm					-19,04 nW	-47,20 dBm	L16_U 1	0 0	1 1	1,62 pW	-87,90 dBm

Fuente: Autor

TABLA 22. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm					298,2 uW	-5,25 dBm	L1_U1	8,0 0	4,99 e- 16	1,69 nW	-57,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,42 dBm					1,39 mW	1,42 dBm	L2_U1	9,2 8	6,14 e- 21	37,63 nW	-44,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	4,06 mW	6,08 dBm	375,0 uW	-4,26 dBm	L3_U1	8,8 9	2,21 e- 19	10,82 nW	-49,66 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					350,5 uW	-4,55 dBm	L4_U1	8,7 3	9,78 e- 19	9,47 nW	-50,24 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					26,40 uW	-15,78 dBm	L5_U1	6,0 0	9,10 e- 10	212,3 pW	-66,73 dBm

λ6	193,6 THz	802,6 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					150,9 uW	-8,21 dBm	L6_U1	8,4 9	7,54 e- 18	7,01 nW	-51,54 dBm
λ7	193,7 THz	1,64 mW	2,15 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					283,2 uW	-5,48 dBm	L7_U1	8,8 5	3,22 e- 19	24,32 nW	-46,14 dBm
λ8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,38 dBm					91,29 uW	-10,40 dBm	L8_U1	8,5 1	6,73 e- 18	2,56 nW	-55,91 dBm
λ9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					91,10 uW	-10,40 dBm	L9_U1	8,1 7	1,12 e- 16	2,56 nW	-55,91 dBm
λ10	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,04 dBm					496,7 uW	-3,04 dBm	L10_U1	9,1 0	3,30 e- 20	75,02 nW	-41,25 dBm
λ11	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					95,97 uW	-10,18 dBm	L11_U1	8,2 4	6,39 e- 17	2,86 nW	-55,43 dBm
λ12	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					56,25 uW	-12,50 dBm	L12_U1	8,4 4	1,27 e- 17	947,4 pW	-60,23 dBm
λ13	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					265,6 uW	-5,75 dBm	L13_U1	9,0 8	3,90 e- 20	21,79 nW	-46,62 dBm
λ14	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					33,60 uW	-14,74 dBm	L14_U1	6,8 8	2,60 e- 12	344,2 pW	-64,63 dBm
λ15	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,37 uW	-9,77 dBm					53,22 uW	-12,74 dBm	L15_U1	7,4 7	3,55 e- 14	832,5 pW	-60,80 dBm
λ16	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 nW	-38,75 dBm					61,68 nW	-42,10 dBm	L16_U1	1 0	1	1,58 pW	-88,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 23. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	2,03 mW	3,08 dBm	149,5 uW	-8,25 dBm	L1_U1	6,6 0	1,83 e- 11	423,6 pW	-63,73 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,42 dBm					695,5 uW	-1,58 dBm	L2_U1	8,9 3	1,76 e- 19	9,45 nW	-50,24 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					188,0 uW	-7,56 dBm	L3_U1	8,4 2	1,39 e- 17	2,71 nW	-55,67 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					175,1 uW	-7,57 dBm	L4_U1	8,3 3	3,44 e- 17	2,35 nW	-56,28 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					13,12 uW	-7,57 dBm	L5_U1	3,7 6	8,20 e- 5	53,52 pW	-72,71 dBm
λ_6	193,6 THz	802,6 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					75,65 uW	-11,21 dBm	L6_U1	7,8 0	2,50 e- 15	1,75 nW	-57,58 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,15 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					142,19 uW	-8,47 dBm	L7_U1	8,5 4	5,48 e- 18	6,10 nW	-52,14 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,38 dBm					46,09 uW	-13,36 dBm	L8_U1	6,9 7	1,31 e- 12	650,4 pW	-61,69 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					45,76 uW	-13,39 dBm	L9_U1	6,9 9	1,23 e- 12	645,3 pW	-61,90 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,04 dBm					247,9 uW	-6,05 dBm	L10_U 1	8,6 4	2,36 e- 18	18,65 nW	-47,29 dBm
λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					48,19 uW	-13,17 dBm	L11_U 1	7,3 6	8,0 e- 14	719,1 pW	-61,43 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					28,50 uW	-15,45 dBm	L12_U 1	6,3 9	7,41 e- 11	242,95 pW	-66,14 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					133,24 uW	-8,75 dBm	L13_U 1	8,9 5	1,41 e- 19	5,46 nW	-52,62 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					16,85 uW	-17,73 dBm	L14_U 1	4,2 6	9,75 e- 6	87,42 pW	-70,58 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,37 uW	-9,77 dBm					26,65 uW	-15,74 dBm	L15_U 1	5,4 8	1,93 e- 8	209,1 pW	-66,80 dBm

λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 nW	-38,75 dBm					35,53 nW	-44,49 dBm	L16_U 1	0	1	1,57 pW	-88,03 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	---------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 24. PRUEBAS CON BIT RATE DE 10 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	2,13 mW	3,28 dBm	595,2 uW	-2,25 dBm	8,09 mW	9,08 dBm	1,02 mW	0,08 dBm	74,87 uW	-11,26 dBm	L1_U1	5,0 1	2,48 e- 7	106,5 pW	-69,72 dBm
λ_2	193,2 THz	7,52 mW	8,77 dBm	2,77 mW	4,42 dBm					348,6 uW	-4,58 dBm	L2_U1	7,7 5	4,03 e- 15	2,37 nW	-56,26 dBm
λ_3	193,3 THz	2,36 mW	3,73 dBm	749,7 uW	-1,25 dBm					94,11 uW	-10,26 dBm	L3_U1	6,5 2	3,16 e- 11	674,9 pW	-61,71 dBm
λ_4	193,4 THz	2,16 mW	3,35 dBm	699,1 uW	-1,55 dBm					87,89 uW	-10,56 dBm	L4_U1	6,6 3	1,51 e- 11	590,6 pW	-62,29 dBm
λ_5	193,5 THz	1,84 mW	2,66 dBm	52,41 uW	-12,80 dBm					6,57 uW	-21,82 dBm	L5_U1	0 0	1 1	14,49 pW	-78,39 dBm
λ_6	193,6 THz	802,6 uW	-0,95 dBm	300,9 uW	-5,21 dBm					37,94 uW	-14,21 dBm	L6_U1	5,9 8	9,79 e- 10	438,2 pW	-63,58 dBm
λ_7	193,7 THz	1,64 mW	2,15 dBm	566,1 uW	-2,47 dBm					71,35 uW	-11,46 dBm	L7_U1	6,9 6	1,50 e- 12	1,53 nW	-58,16 dBm
λ_8	193,8 THz	2,85 mW	4,55 dBm	182,5 uW	-7,38 dBm					23,14 uW	-16,36 dBm	L8_U1	5,5 1	1,78 e- 8	163,7 pW	-67,86 dBm
λ_9	193,9 THz	1,05 mW	0,19 dBm	182,5 uW	-7,39 dBm					22,91 uW	-16,40 dBm	L9_U1	5,2 7	6,43 e- 8	161,9 pW	-67,91 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,93 mW	4,67 dBm	989,4 uW	-0,04 dBm					124,1 uW	-9,06 dBm	L10_U 1	7,3 5	8,32 e- 14	4,64 nW	-53,33 dBm

λ_{11}	194,1 THz	1,15 mW	0,63 dBm	191,2 uW	-7,18 dBm					24,30 uW	-16,14 dBm	L11_U 1	5,4 7	2,12 e- 8	182,0 pW	-67,40 dBm
λ_{12}	194,2 THz	1,04 mW	0,19 dBm	113,5 uW	-9,45 dBm					14,28 uW	-18,45 dBm	L12_U 1	4,0 9	2,14 e- 5	61,72 pW	-72,10 dBm
λ_{13}	194,3 THz	1,76 mW	2,47 dBm	532,1 uW	-2,74 dBm					66,77 uW	-11,75 dBm	L13_U 1	7,0 6	7,09 e- 13	1,36 nW	-58,65 dBm
λ_{14}	194,4 THz	1,16 mW	0,65 dBm	67,27 uW	-11,72 dBm					8,44 uW	-20,74 dBm	L14_U 1	2,6 9	3,45 e- 3	22,99 pW	-76,38 dBm
λ_{15}	194,5 THz	5,98 mW	7,77 dBm	105,37 uW	-9,77 dBm					13,36 uW	-18,74 dBm	L15_U 1	3,2 7	5,32 e- 4	53,50 pW	-72,72 dBm
λ_{16}	194,6 THz	4,33 mW	6,36 dBm	133,4 nW	-38,75 dBm					19,04 nW	-47,20 dBm	L16_U 1	0 1		1,57 pW	-88,03 dBm

Fuente: Autor

TABLA 25. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm					1,24 mW	0,95 dBm	L1_U1	3,4 6	259,4 e-6	28,32 nW	-45,48 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					136,7 uW	-8,64 dBm	L2_U1	3,2 7	499,2 e-6	351,6 pW	-64,54 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	7,81 mW	8,93 dBm	1,04 mW	0,19 dBm	L3_U1	3,4 4	277,6 e-6	80,75 nW	-40,93 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					291,4 uW	-5,35 dBm	L4_U1	3,5 1	212,8 e-6	6,31 nW	-52,00 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					957,6 uW	-0,19 dBm	L5_U1	3,4 8	239,5 e-6	268,3 nW	-35,71 dBm

λ6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					1,02 mW	0,09 dBm	L6_U1	3,5 1	209,5 e-6	310,6 nW	-35,08 dBm
λ7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					1,20 mW	0,80 dBm	L7_U1	3,4 5	265,8 e-6	423,78 nW	-33,73 dBm
λ8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					6,98 uW	-21,56 dBm	L8_U1	0 1	1 1	17,36 pW	-77,60 dBm
λ9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					1,09 mW	0,37 dBm	L9_U1	3,4 4	273,1 e-6	353,9 nW	-34,51 dBm
λ10	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					27,24 uW	-15,65 dBm	L10_U1	2,9 7	1,37 e-3	220,9 pW	-66,56 dBm
λ11	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					6,05 uW	-22,18 dBm	L11_U1	1 0	1 1	14,08 pW	-78,51 dBm
λ12	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					265,5 uW	-5,76 dBm	L12_U1	3,3 9	331,9 e-6	20,15 nW	-46,96 dBm
λ13	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					379,8 uW	-4,20 dBm	L13_U1	3,4 6	255,1 e-6	42,82 nW	-43,68 dBm
λ14	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					57,41 uW	-12,41 dBm	L14_U1	3,4 1	319,9 e-6	966,5 pW	-60,15 dBm
λ15	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					69,65 uW	-11,57 dBm	L15_U1	3,2 9	493,1 e-6	1,36 nW	-58,65 dBm
λ16	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					169,16 nW	-37,72 dBm	L16_U1	1 0	1 1	3,16 pW	-85,01 dBm

Fuente: Autor

TABLA 26. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación n	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

$\lambda 1$	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	3,91 mW	5,93 dBm	622,2 uW	-2,06 dBm	L1_U1	4,3 3	7,18 e- 6	6,98 nW	-51,56 dBm
$\lambda 2$	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					68,36 uW	-11,65 dBm	L2_U1	2,6 9	3,20 e- 3	88,72 pW	-70,52 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					525,2 uW	-2,80 dBm	L3_U1	4,2 8	9,03 e- 6	20,05 nW	-46,98 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					146,2 uW	-8,35 dBm	L4_U1	4,4 2	4,83 e- 6	1,56 nW	-58,07 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					481,2 uW	-3,18 dBm	L5_U1	4,3 6	6,32 e- 6	66,73 nW	-41,76 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					511,9 uW	-2,91 dBm	L6_U1	4,4 5	4,10 e- 6	76,73 nW	-41,15 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					603,9 uW	-2,19 dBm	L7_U1	4,3 3	7,31 e- 6	105,2 nW	-39,78 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					3,62 uW	-24,41 dBm	L8_U1	0 0	1 1	6,67 pW	-81,76 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					543,9 uW	-2,64 dBm	L9_U1	4,3 5	6,49 e- 6	87,10 nW	-40,60 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					14,12 uW	-18,50 dBm	L10_U 1	2,2 4	11,01 e-3	60,09 pW	-72,21 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					3,15 uW	-25,01 dBm	L11_U 1	0 0	1 1	5,89 pW	-82,30 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					133,3 uW	-8,75 dBm	L12_U 1	4,1 1	1,91 e- 5	4,98 nW	-53,03 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					190,0 uW	-7,21 dBm	L13_U 1	4,1 8	1,39 e- 5	10,54 nW	-49,77 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					28,58 uW	-15,44 dBm	L14_U 1	3,4 6	261,2 e-6	238,4 pW	-66,23 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					35,06 uW	-14,55 dBm	L15_U 1	3,3 9	339,2 e-6	341,3 pW	-64,67 dBm

λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					94,62 nW	-40,24 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,01 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 27. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 1 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	1,96 mW	2,93 dBm	312,5 uW	-5,05 dBm	L1_U1	4,2 9	8,86 e- 6	1,74 nW	-57,59 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					34,22 uW	-14,66 dBm	L2_U1	0	1	24,29 pW	-76,15 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					262,2 uW	-5,81 dBm	L3_U1	4,0 7	2,24 e- 5	4,95 nW	-53,05 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					73,29 uW	-11,35 dBm	L4_U1	3,6 7	117,1 e-6	389,7 pW	-64,09 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					241,4 uW	-6,17 dBm	L5_U1	4,2 9	8,56 e- 6	16,59 nW	-47,80 dBm
λ_6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					257,4 uW	-5,89 dBm	L6_U1	4,3 4	6,91 e- 6	19,20 nW	-47,17 dBm
λ_7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					302,2 uW	-5,19 dBm	L7_U1	4,3 0	8,17 e- 6	26,11 nW	-45,83 dBm
λ_8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					1,84 uW	-27,36 dBm	L8_U1	0	1	3,85 pW	-84,15 dBm
λ_9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					271,9 uW	-5,65 dBm	L9_U1	4,2 3	1,17 e- 5	21,55 nW	-46,66 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					6,97 uW	-21,56 dBm	L10_U 1	0	1	17,07 pW	-77,68 dBm

λ_{11}	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					1,58 uW	-28,02 dBm	L11_U 1	0	1	3,71 pW	-84,30 dBm
λ_{12}	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					66,97 uW	-11,74 dBm	L12_U 1	3,7 4	8,83 e- 5	1,24 nW	-59,07 dBm
λ_{13}	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					95,47 uW	-10,20 dBm	L13_U 1	4,1 2	1,86 e- 5	2,62 nW	-55,82 dBm
λ_{14}	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					14,32 uW	-18,44 dBm	L14_U 1	3,1 1	884,6 e-6	61,52 pW	-72,11 dBm
λ_{15}	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					17,69 uW	-17,52 dBm	L15_U 1	2,7 5	2,71 e- 3	88,00 pW	-70,55 dBm
λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					51,67 nW	-42,87 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 28. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm					1,24 mW	0,95 dBm	L1_U1	3,4 6	259,4 e-6	28,32 nW	-45,48 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					136,7 uW	-8,64 dBm	L2_U1	3,2 7	499,2 e-6	351,6 pW	-64,54 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	7,81 mW	8,93 dBm	1,04 mW	0,19 dBm	L3_U1	3,4 4	277,6 e-6	80,75 nW	-40,93 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					291,4 uW	-5,35 dBm	L4_U1	3,5 1	212,8 e-6	6,31 nW	-52,00 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					957,6 uW	-0,19 dBm	L5_U1	3,4 8	239,5 e-6	268,3 nW	-35,71 dBm

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fíbrea Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					1,02 mW	0,09 dBm	L6_U1	3,5 1	209,5 e-6	310,6 nW	-35,08 dBm
λ7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					1,20 mW	0,80 dBm	L7_U1	3,4 5	265,8 e-6	423,78 nW	-33,73 dBm
λ8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					6,98 uW	-21,56 dBm	L8_U1	0 1	1 1	17,36 pW	-77,60 dBm
λ9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					1,09 mW	0,37 dBm	L9_U1	3,4 4	273,1 e-6	353,9 nW	-34,51 dBm
λ10	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					27,24 uW	-15,65 dBm	L10_U1	2,9 7	1,37 e-3	220,9 pW	-66,56 dBm
λ11	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					6,05 uW	-22,18 dBm	L11_U1	1 0	1 1	14,08 pW	-78,51 dBm
λ12	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					265,5 uW	-5,76 dBm	L12_U1	3,3 9	331,9 e-6	20,15 nW	-46,96 dBm
λ13	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					379,8 uW	-4,20 dBm	L13_U1	3,4 6	255,1 e-6	42,82 nW	-43,68 dBm
λ14	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					57,41 uW	-12,41 dBm	L14_U1	3,4 1	319,9 e-6	966,5 pW	-60,15 dBm
λ15	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					69,65 uW	-11,57 dBm	L15_U1	3,2 9	493,1 e-6	1,36 nW	-58,65 dBm
λ16	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					169,16 nW	-37,72 dBm	L16_U1	1 0	1 1	3,16 pW	-85,01 dBm

Fuente: Autor

TABLA 29. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación n	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia
es							o			

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

$\lambda 1$	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	3,91 mW	5,93 dBm	622,2 uW	-2,06 dBm	L1_U1	4,3 3	7,18 e- 6	6,98 nW	-51,56 dBm
$\lambda 2$	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					68,36 uW	-11,65 dBm	L2_U1	2,6 9	3,20 e- 3	88,72 pW	-70,52 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					525,2 uW	-2,80 dBm	L3_U1	4,2 8	9,03 e- 6	20,05 nW	-46,98 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					146,2 uW	-8,35 dBm	L4_U1	4,4 2	4,83 e- 6	1,56 nW	-58,07 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					481,2 uW	-3,18 dBm	L5_U1	4,3 6	6,32 e- 6	66,73 nW	-41,76 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					511,9 uW	-2,91 dBm	L6_U1	4,4 5	4,10 e- 6	76,73 nW	-41,15 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					603,9 uW	-2,19 dBm	L7_U1	4,3 3	7,31 e- 6	105,2 nW	-39,78 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					3,62 uW	-24,41 dBm	L8_U1	0 0	1 1	6,67 pW	-81,76 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					543,9 uW	-2,64 dBm	L9_U1	4,3 5	6,49 e- 6	87,10 nW	-40,60 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					14,12 uW	-18,50 dBm	L10_U 1	2,2 4	11,01 e-3	60,09 pW	-72,21 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					3,15 uW	-25,01 dBm	L11_U 1	0 0	1 1	5,89 pW	-82,30 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					133,3 uW	-8,75 dBm	L12_U 1	4,1 1	1,91 e- 5	4,98 nW	-53,03 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					190,0 uW	-7,21 dBm	L13_U 1	4,1 8	1,39 e- 5	10,54 nW	-49,77 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					28,58 uW	-15,44 dBm	L14_U 1	3,4 6	261,2 e-6	238,4 pW	-66,23 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					35,06 uW	-14,55 dBm	L15_U 1	3,3 9	339,2 e-6	341,3 pW	-64,67 dBm

λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					94,62 nW	-40,24 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,01 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 30. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 2 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	1,96 mW	2,93 dBm	312,5 uW	-5,05 dBm	L1_U1	4,2 9	8,86 e- 6	1,74 nW	-57,59 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					34,22 uW	-14,66 dBm	L2_U1	0	1	24,29 pW	-76,15 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					262,2 uW	-5,81 dBm	L3_U1	4,0 7	2,24 e- 5	4,95 nW	-53,05 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					73,29 uW	-11,35 dBm	L4_U1	3,6 7	117,1 e-6	389,7 pW	-64,09 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					241,4 uW	-6,17 dBm	L5_U1	4,2 9	8,56 e- 6	16,59 nW	-47,80 dBm
λ_6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					257,4 uW	-5,89 dBm	L6_U1	4,3 4	6,91 e- 6	19,20 nW	-47,17 dBm
λ_7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					302,2 uW	-5,19 dBm	L7_U1	4,3 0	8,17 e- 6	26,11 nW	-45,83 dBm
λ_8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					1,84 uW	-27,36 dBm	L8_U1	0	1	3,85 pW	-84,15 dBm
λ_9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					271,9 uW	-5,65 dBm	L9_U1	4,2 3	1,17 e- 5	21,55 nW	-46,66 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					6,97 uW	-21,56 dBm	L10_U 1	0	1	17,07 pW	-77,68 dBm

λ_{11}	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					1,58 uW	-28,02 dBm	L11_U 1	0	1	3,71 pW	-84,30 dBm
λ_{12}	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					66,97 uW	-11,74 dBm	L12_U 1	3,7 4	8,83 e- 5	1,24 nW	-59,07 dBm
λ_{13}	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					95,47 uW	-10,20 dBm	L13_U 1	4,1 2	1,86 e- 5	2,62 nW	-55,82 dBm
λ_{14}	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					14,32 uW	-18,44 dBm	L14_U 1	3,1 1	884,6 e-6	61,52 pW	-72,11 dBm
λ_{15}	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					17,69 uW	-17,52 dBm	L15_U 1	2,7 5	2,71 e- 3	88,00 pW	-70,55 dBm
λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					51,67 nW	-42,87 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 31. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canales	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm					1,24 mW	0,95 dBm	L1_U 1	3, 46	259,4 e-6	28,32 nW	-45,48 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					136,7 uW	-8,64 dBm	L2_U 1	3, 27	499,2 e-6	351,6 pW	-64,54 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	7,81 mW	8,93 dBm	1,04 mW	0,19 dBm	L3_U 1	3, 44	277,6 e-6	80,75 nW	-40,93 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					291,4 uW	-5,35 dBm	L4_U 1	3, 51	212,8 e-6	6,31 nW	-52,00 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					957,6 uW	-0,19 dBm	L5_U 1	3, 48	239,5 e-6	268,3 nW	-35,71 dBm

$\lambda 6$	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					1,02 mW	0,09 dBm	L6_U 1	3, 51	209,5 e-6	310,6 nW	-35,08 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					1,20 mW	0,80 dBm	L7_U 1	3, 45	265,8 e-6	423,78 nW	-33,73 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					6,98 uW	-21,56 dBm	L8_U 1	0	1	17,36 pW	-77,60 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					1,09 mW	0,37 dBm	L9_U 1	3, 44	273,1 e-6	353,9 nW	-34,51 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					27,24 uW	-15,65 dBm	L10_ U1	2, 97	1,37 e-3	220,9 pW	-66,56 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					6,05 uW	-22,18 dBm	L11_ U1	0	1	14,08 pW	-78,51 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					265,5 uW	-5,76 dBm	L12_ U1	3, 39	331,9 e-6	20,15 nW	-46,96 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					379,8 uW	-4,20 dBm	L13_ U1	3, 46	255,1 e-6	42,82 nW	-43,68 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					57,41 uW	-12,41 dBm	L14_ U1	3, 40	319,9 e-6	966,5 pW	-60,15 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					69,65 uW	-11,57 dBm	L15_ U1	3, 29	493,1 e-6	1,36 nW	-58,65 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					169,16 nW	-37,72 dBm	L16_ U1	0	1	3,16 pW	-85,01 dBm

Fuente: Autor

TABLA 32. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación n	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia
es							o			

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	3,91 mW	5,93 dBm	622,2 uW	-2,06 dBm	L1_U1	4,3 3	7,18 e- 6	6,98 nW	-51,56 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					68,36 uW	-11,65 dBm	L2_U1	2,6 9	3,20 e- 3	88,72 pW	-70,52 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					525,2 uW	-2,80 dBm	L3_U1	4,2 8	9,03 e- 6	20,05 nW	-46,98 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					146,2 uW	-8,35 dBm	L4_U1	4,4 2	4,83 e- 6	1,56 nW	-58,07 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					481,2 uW	-3,18 dBm	L5_U1	4,3 6	6,32 e- 6	66,73 nW	-41,76 dBm
λ_6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					511,9 uW	-2,91 dBm	L6_U1	4,4 5	4,10 e- 6	76,73 nW	-41,15 dBm
λ_7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					603,9 uW	-2,19 dBm	L7_U1	4,3 3	7,31 e- 6	105,2 nW	-39,78 dBm
λ_8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					3,62 uW	-24,41 dBm	L8_U1	0 0	1 1	6,67 pW	-81,76 dBm
λ_9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					543,9 uW	-2,64 dBm	L9_U1	4,3 5	6,49 e- 6	87,10 nW	-40,60 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					14,12 uW	-18,50 dBm	L10_U 1	2,2 4	11,01 e-3	60,09 pW	-72,21 dBm
λ_{11}	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					3,15 uW	-25,01 dBm	L11_U 1	0 0	1 1	5,89 pW	-82,30 dBm
λ_{12}	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					133,3 uW	-8,75 dBm	L12_U 1	4,1 1	1,91 e- 5	4,98 nW	-53,03 dBm
λ_{13}	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					190,0 uW	-7,21 dBm	L13_U 1	4,1 8	1,39 e- 5	10,54 nW	-49,77 dBm
λ_{14}	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					28,58 uW	-15,44 dBm	L14_U 1	3,4 6	261,2 e-6	238,4 pW	-66,23 dBm
λ_{15}	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					35,06 uW	-14,55 dBm	L15_U 1	3,3 9	339,2 e-6	341,3 pW	-64,67 dBm

λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					94,62 nW	-40,24 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,01 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 33. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 5 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	1,96 mW	2,93 dBm	312,5 uW	-5,05 dBm	L1_U 1	4,2 9	8,86 e-6	1,74 nW	-57,59 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					34,22 uW	-14,66 dBm	L2_U 1	0	1	24,29 pW	-76,15 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					262,2 uW	-5,81 dBm	L3_U 1	4,0 7	2,24 e-5	4,95 nW	-53,05 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					73,29 uW	-11,35 dBm	L4_U 1	3,6 7	117,1 e-6	389,7 pW	-64,09 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					241,4 uW	-6,17 dBm	L5_U 1	4,2 9	8,56 e-6	16,59 nW	-47,80 dBm
λ_6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					257,4 uW	-5,89 dBm	L6_U 1	4,3 4	6,91 e-6	19,20 nW	-47,17 dBm
λ_7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					302,2 uW	-5,19 dBm	L7_U 1	4,3 0	8,17 e-6	26,11 nW	-45,83 dBm
λ_8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					1,84 uW	-27,36 dBm	L8_U 1	0	1	3,85 pW	-84,15 dBm
λ_9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					271,9 uW	-5,65 dBm	L9_U 1	4,2 3	1,17 e-5	21,55 nW	-46,66 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					6,97 uW	-21,56 dBm	L10_U U1	0	1	17,07 pW	-77,68 dBm

λ_{11}	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					1,58 uW	-28,02 dBm	L11_ U1	0	1	3,71 pW	-84,30 dBm
λ_{12}	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					66,97 uW	-11,74 dBm	L12_ U1	3,7 4	8,83 e-5	1,24 nW	-59,07 dBm
λ_{13}	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					95,47 uW	-10,20 dBm	L13_ U1	4,1 2	1,86 e-5	2,62 nW	-55,82 dBm
λ_{14}	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					14,32 uW	-18,44 dBm	L14_ U1	3,1 1	884,6 e-6	61,52 pW	-72,11 dBm
λ_{15}	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					17,69 uW	-17,52 dBm	L15_ U1	2,7 5	2,71 e-3	88,00 pW	-70,55 dBm
λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					51,67 nW	-42,87 dBm	L16_ U1	0	1	3,15 pW	-85,02 dBm

Fuente: Autor

TABLA 34. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 15 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canales	Frecuencia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usuario	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm					1,24 mW	0,95 dBm	L1_U 1	3, 46	259,4 e-6	28,32 nW	-45,48 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					136,7 uW	-8,64 dBm	L2_U 1	3, 27	499,2 e-6	351,6 pW	-64,54 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	7,81 mW	8,93 dBm	1,04 mW	0,19 dBm	L3_U 1	3, 44	277,6 e-6	80,75 nW	-40,93 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					291,4 uW	-5,35 dBm	L4_U 1	3, 51	212,8 e-6	6,31 nW	-52,00 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					957,6 uW	-0,19 dBm	L5_U 1	3, 48	239,5 e-6	268,3 nW	-35,71 dBm

$\lambda 6$	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					1,02 mW	0,09 dBm	L6_U 1	3, 51	209,5 e-6	310,6 nW	-35,08 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					1,20 mW	0,80 dBm	L7_U 1	3, 45	265,8 e-6	423,78 nW	-33,73 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					6,98 uW	-21,56 dBm	L8_U 1	0	1	17,36 pW	-77,60 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					1,09 mW	0,37 dBm	L9_U 1	3, 44	273,1 e-6	353,9 nW	-34,51 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					27,24 uW	-15,65 dBm	L10_ U1	2, 97	1,37 e-3	220,9 pW	-66,56 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					6,05 uW	-22,18 dBm	L11_ U1	0	1	14,08 pW	-78,51 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					265,5 uW	-5,76 dBm	L12_ U1	3, 39	331,9 e-6	20,15 nW	-46,96 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					379,8 uW	-4,20 dBm	L13_ U1	3, 46	255,1 e-6	42,82 nW	-43,68 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					57,41 uW	-12,41 dBm	L14_ U1	3, 40	319,9 e-6	966,5 pW	-60,15 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					69,65 uW	-11,57 dBm	L15_ U1	3, 29	493,1 e-6	1,36 nW	-58,65 dBm
$\lambda 16$	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					169,16 nW	-37,72 dBm	L16_ U1	0	1	3,16 pW	-85,01 dBm

Fuente: Autor

TABLA 35. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 30 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED	Modulación	Multiplexación n	Después de F.O.	Demux	Salida			
Canal	Frecuencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Potencia	Usuario	Q	BER	Potencia
es							o			

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y
 Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
 Maestría en Ingeniería Electrónica

$\lambda 1$	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	3,91 mW	5,93 dBm	622,2 uW	-2,06 dBm	L1_U1	4,3 3	7,18 e- 6	6,98 nW	-51,56 dBm				
$\lambda 2$	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm									68,36 uW	-11,65 dBm	L2_U1	2,6 9	3,20 e- 3	88,72 pW	-70,52 dBm
$\lambda 3$	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm									525,2 uW	-2,80 dBm	L3_U1	4,2 8	9,03 e- 6	20,05 nW	-46,98 dBm
$\lambda 4$	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm									146,2 uW	-8,35 dBm	L4_U1	4,4 2	4,83 e- 6	1,56 nW	-58,07 dBm
$\lambda 5$	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm									481,2 uW	-3,18 dBm	L5_U1	4,3 6	6,32 e- 6	66,73 nW	-41,76 dBm
$\lambda 6$	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm									511,9 uW	-2,91 dBm	L6_U1	4,4 5	4,10 e- 6	76,73 nW	-41,15 dBm
$\lambda 7$	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm									603,9 uW	-2,19 dBm	L7_U1	4,3 3	7,31 e- 6	105,2 nW	-39,78 dBm
$\lambda 8$	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm									3,62 uW	-24,41 dBm	L8_U1	0 0	1 1	6,67 pW	-81,76 dBm
$\lambda 9$	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm									543,9 uW	-2,64 dBm	L9_U1	4,3 5	6,49 e- 6	87,10 nW	-40,60 dBm
$\lambda 10$	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm									14,12 uW	-18,50 dBm	L10_U 1	2,2 4	11,01 e-3	60,09 pW	-72,21 dBm
$\lambda 11$	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm									3,15 uW	-25,01 dBm	L11_U 1	0 0	1 1	5,89 pW	-82,30 dBm
$\lambda 12$	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm									133,3 uW	-8,75 dBm	L12_U 1	4,1 1	1,91 e- 5	4,98 nW	-53,03 dBm
$\lambda 13$	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm									190,0 uW	-7,21 dBm	L13_U 1	4,1 8	1,39 e- 5	10,54 nW	-49,77 dBm
$\lambda 14$	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm									28,58 uW	-15,44 dBm	L14_U 1	3,4 6	261,2 e-6	238,4 pW	-66,23 dBm
$\lambda 15$	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm									35,06 uW	-14,55 dBm	L15_U 1	3,3 9	339,2 e-6	341,3 pW	-64,67 dBm

λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					94,62 nW	-40,24 dBm	L16_U 1	0	1	3,15 pW	-85,01 dBm
----------------	--------------	------------	-------------	-------------	---------------	--	--	--	--	-------------	---------------	------------	---	---	------------	---------------

Fuente: Autor

TABLA 36. PRUEBAS CON BIT RATE DE 20 GBPS - ANCHO DE LÍNEA DE 10 MHZ - 45 KM DE FIBRA ÓPTICA

Datos		Partición del LED		Modulación		Multiplexación		Después de F.O.		Demux		Salida				
Canal es	Frecue ncia	Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Potencia		Usua rio	Q	BER	Potencia	
λ_1	193,1 THz	7,28 mW	8,62 dBm	2,48 mW	3,95 dBm	15,58 mW	11,93 dBm	1,96 mW	2,93 dBm	312,5 uW	-5,05 dBm	L1_U 1	4,2 9	8,86 e-6	1,74 nW	-57,59 dBm
λ_2	193,2 THz	1,40 mW	1,47 dBm	274,5 uW	-5,61 dBm					34,22 uW	-14,66 dBm	L2_U 1	0	1	24,29 pW	-76,15 dBm
λ_3	193,3 THz	7,39 mW	8,69 dBm	2,09 mW	3,20 dBm					262,2 uW	-5,81 dBm	L3_U 1	4,0 7	2,24 e-5	4,95 nW	-53,05 dBm
λ_4	193,4 THz	3,90 mW	5,91 dBm	858,1 uW	-2,33 dBm					73,29 uW	-11,35 dBm	L4_U 1	3,6 7	117,1 e-6	389,7 pW	-64,09 dBm
λ_5	193,5 THz	5,71 mW	7,56 dBm	1,92 mW	2,83 dBm					241,4 uW	-6,17 dBm	L5_U 1	4,2 9	8,56 e-6	16,59 nW	-47,80 dBm
λ_6	193,6 THz	7,80 mW	8,92 dBm	2,05 mW	3,11 dBm					257,4 uW	-5,89 dBm	L6_U 1	4,3 4	6,91 e-6	19,20 nW	-47,17 dBm
λ_7	193,7 THz	11,89 mW	10,75 dBm	2,41 mW	3,82 dBm					302,2 uW	-5,19 dBm	L7_U 1	4,3 0	8,17 e-6	26,11 nW	-45,83 dBm
λ_8	193,8 THz	1,37 mW	1,37 dBm	13,91 uW	-18,57 dBm					1,84 uW	-27,36 dBm	L8_U 1	0	1	3,85 pW	-84,15 dBm
λ_9	193,9 THz	8,38 mW	9,23 dBm	2,18 mW	3,38 dBm					271,9 uW	-5,65 dBm	L9_U 1	4,2 3	1,17 e-5	21,55 nW	-46,66 dBm
λ_{10}	194,0 THz	2,22 mW	3,46 dBm	54,71 uW	-12,62 dBm					6,97 uW	-21,56 dBm	L10_U U1	0	1	17,07 pW	-77,68 dBm

Resultados de las variaciones realizadas al diseño en función de los parámetros Bit-RATE, Ancho de Línea y Distancia de la Fibra Óptica para evaluar Potencia, Factor Q y BER
Maestría en Ingeniería Electrónica

λ_{11}	194,1 THz	4,81 mW	6,82 dBm	12,14 uW	-19,16 dBm					1,58 uW	-28,02 dBm	L11_ U1	0	1	3,71 pW	-84,30 dBm
λ_{12}	194,2 THz	3,99 mW	6,01 dBm	526,2 uW	-2,79 dBm					66,97 uW	-11,74 dBm	L12_ U1	3,7 4	8,83 e-5	1,24 nW	-59,07 dBm
λ_{13}	194,3 THz	2,22 mW	5,09 dBm	761,9 uW	-1,18 dBm					95,47 uW	-10,20 dBm	L13_ U1	4,1 2	1,86 e-5	2,62 nW	-55,82 dBm
λ_{14}	194,4 THz	3,89 mW	5,90 dBm	114,9 uW	-9,39 dBm					14,32 uW	-18,44 dBm	L14_ U1	3,1 1	884,6 e-6	61,52 pW	-72,11 dBm
λ_{15}	194,5 THz	3,68 mW	5,66 dBm	136,1 uW	-8,66 dBm					17,69 uW	-17,52 dBm	L15_ U1	2,7 5	2,71 e-3	88,00 pW	-70,55 dBm
λ_{16}	194,6 THz	8,21 mW	9,14 dBm	346,2 nW	-34,61 dBm					51,67 nW	-42,87 dBm	L16_ U1	0	1	3,15 pW	-85,02 dBm

Fuente: Autor