

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS EN PON Y MACHINE LEARNING EN REDES ÓPTICAS DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED PON UTILIZANDO TECNOLOGÍA UDWDM

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
TELECOMUNICACIONES**

NUBIA MARITZA MANCHAY ROMERO

nubia.manchay@epn.edu.ec

DIRECTOR:

CHRISTIAN TIPANTUÑA, Ph.D.

christian.tipantuna@epn.edu.ec

DMQ, abril 2023

CERTIFICACIONES

Yo, NUBIA MARITZA MANCHAY ROMERO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



NUBIA MARITZA MANCHAY ROMERO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por NUBIA MARITZA MANCHAY ROMERO, bajo mi supervisión.



CHRISTIAN TIPANTUÑA, Ph.D.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

NUBIA MARITZA MANCHAY ROMERO

CHRISTIAN TIPANTUÑA, Ph.D.

DEDICATORIA

A mis padres, Jorge Manchay y Adriana Romero, por todo su apoyo y acompañamiento en los duros momentos de mi vida, por motivarme a seguir adelante, sobre todo por confiar en mi, sin ellos nada hubiera sido posible. Gracias por tanto, no me alcanzará la vida para agradecerles.

A mis hermanos, Jorge Luis y Juan Pablo por animarme en todo momento.

A Mikael, Amy y Patrick, por ser mi mayor inspiración y motivarme a cumplir este sueño.

A mis abuelos que ya partieron de este mundo y a los que aún tengo la dicha de tener, por sus oraciones, consejos y momentos compartidos.

A Dios, dueño de la creación, por guiarme, levantarme en cada tropiezo y sobre todo por cuidar de las personas que más quiero; mis abuelos me enseñaron que para ti nada es imposible.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Jorge Manchay y Adriana Romero, en especial a mi madre por ser mi mayor apoyo en cada momento.

A mis tías y a toda la familia, por siempre estar presentes de una u otra manera sobre todo en esta etapa de mi formación académica.

Mi gratitud a Dios, por darme la vida, la salud y por permitirme llegar a la finalización de mi profesión.

A Christian Tipantuña Ph.D, por su paciencia, consejos, apoyo incondicional y por hacer el seguimiento a esta investigación

A Hernán Barba Ph.D, quién estuvo presente como tutor durante los años de mi formación profesional; gracias por todo el apoyo.

A Jenny Tubón y Aidee Proaño, gracias por acompañarme en los duros momentos vividos. No olvidaré cada palabra de aliento y motivación, hoy se ven reflejadas en la culminación de mi profesión.

A cada uno de mis compañeros y amigos, especialmente a Lorena, Danny, Elvis y Jonathan, con quienes compartí momentos de alegría y también de tristeza, gracias por su amistad, donde quiera que nos encontremos esta amistad perdure por siempre, jamás los olvidaré.

A los docentes, de manera especial a Jorge Carvajal Ph.D, Luis Urquiza Ph.D, y a todos quienes contribuyeron a formarme profesionalmente, siempre dando lo mejor de sí y enseñarme que nada se logra sin esfuerzo y dedicación.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme hacer uso del software de simulación para el desarrollo del presente trabajo y de manera especial a Germán Arévalo Ph.D, y Berenice Arguero M.Sc., por su tiempo, apoyo, orientación y guía en este estudio.

Finalmente, mi agradecimiento especial a la Escuela Politécnica Nacional, por permitirme formarme como una profesional en sus aulas, por darme extraordinarios amigos y compañeros de camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 RED ÓPTICA PASIVA	4
1.4.2 TIPOS DE MULTIPLEXACIÓN	5
1.4.2.1 Multiplexación por división en longitud de onda (WDM)	5
1.4.2.2 Multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM)	6
1.4.2.3 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM)	7
1.4.2.4 Multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (UDWDM)	9
1.4.3 Filtros	12
1.4.3.1 Filtro coseno levantado	12
1.4.3.2 Filtro de gauss	13
2 METODOLOGÍA	15
2.1 Software OptSim	16
2.2 Cálculo del presupuesto del enlace óptico	17
2.3 Requerimientos del sistema	19
2.3.1 Transmisor óptico	19
2.3.2 Receptor óptico	22
2.3.3 Canal de comunicación	24

2.4	Simulaciones	25
2.4.1	Primer escenario: Simulación sin utilizar un filtro	25
2.4.2	Segundo escenario: Simulación utilizando un Filtro coseno levantado	27
2.4.3	Tercer escenario: Simulación utilizando un Filtro de gauss	29
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
3.1	Resultados	33
3.1.1	Resultados del primer escenario: Simulación sin utilizar un filtro . . .	33
3.1.2	Resultados del segundo escenario: Simulación utilizando un filtro co- seno levantado.	37
3.1.3	Resultados del tercer escenario: Simulación utilizando un filtro de gauss	41
3.1.4	Comparación de Filtros	43
3.1.5	Simulación de usuarios	45
3.2	Conclusiones	46
3.3	Recomendaciones	48
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
5	ANEXOS	I

RESUMEN

En el mundo de las comunicaciones ópticas, las redes de acceso son esenciales para la transmisión de datos a largas distancias y altas velocidades, ya que mejoran la capacidad de transmisión. Con la creciente demanda de datos y el aumento del número de usuarios conectados, estas redes se han vuelto cada vez más importantes.

En este sentido, la Multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (UDWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing) es una de las soluciones más recientes para la transmisión de datos; esta tecnología aprovecha la separación estrecha entre canales desde 25 GHz e incluso tan pequeña como 6.25 GHz, con el fin de incrementar la capacidad de transmisión.

En el presente Trabajo de Integración Curricular, se realiza el diseño y simulación de una red PON utilizando UDWDM. Para ello se desarrollan tres escenarios de simulación utilizando el software OptSim, con tres canales y se varía parámetros como: la velocidad de transmisión desde 10 Gbps hasta 17 Gbps, la distancia desde 10 Km a 20 Km y la separación entre canales a 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz. También se compara el desempeño de los filtros: coseno levantado y de gauss, para verificar si su uso mejora el rendimiento de los canales cuando no se usa filtro. Los parámetros de evaluación para los tres escenarios es la tasa de error (BER: Bit Error Rate), que permite medir la calidad de la señal transmitida y el diagrama de ojo.

PALABRAS CLAVE: Comunicaciones ópticas, UDWDM, Redes PON, Multiplexación, OptSim, BER.

ABSTRACT

In the world of optical communications, access networks are essential for data transmission over long distances and high speeds, since they improve transmission capacity. With the increasing demand for data and the increase in the number of connected users, these networks have become increasingly important. In this context, UDWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing is one of the most recent solutions for data transmission; this technology takes advantage of the narrow separation between channels from 25 GHz and even as small as 6.25 GHz, in order to increase the transmission capacity.

In this Curricular Integration Work, the design and simulation of a PON Network using UDWDM is carried out. For this, three simulation scenarios are developed using the Optsim software, with three channels and parameters such as: the transmission speed from 10 Gbps to 17 Gbps, the distance from 10 km to 20 km and the separation between channels at 25 GHz, are varied. 20GHz and 15GHz.

The performance of the filters is also compared: Lifted Cosine and Gauss, to verify if their use improves the performance of the channels when no filter is used. The evaluation parameters for the three scenarios is the error rate (BER: Bit Error Rate), which allows measuring the quality of the transmitted signal and the eye diagram.

Keywords: Optical communications, UDWDM, PON Networks, Multiplexing, OptSim, BER.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años las redes de acceso, han sido el segmento más dinámico e importante del sector de las telecomunicaciones, han evolucionado constantemente debido a la alta demanda de usuarios, que requieren conectividad las 24 horas del día y a altas velocidades. Este tipo de redes se caracterizan por el grado de alcance del terminal de la red óptica al usuario, es por eso que, actualmente, se está experimentando con más longitudes de onda debido al creciente número de usuarios para conseguir envío de información a largas distancias y a altas velocidades, logrando así mejorar la conexión a escala global. Las nuevas tecnologías deben ser capaces de proporcionar servicios de calidad de datos, video y voz, además ser económicos, escalables y con un ancho de banda apropiado para los requerimientos del usuario.

Se han desarrollado varias tecnologías que han contribuido al alto crecimiento y mejora de las redes ópticas, por ejemplo, las redes ópticas pasivas (PON: Passive Optical Network), que emplean tecnologías de transmisión y compartición del canal para enviar señales de manera simultánea. La multiplexación es una técnica utilizada para compartir el ancho de banda en una red PON, la cual permite dividir el ancho de banda de una señal en diferentes canales y que ha evolucionado en diferentes variantes.

Una de las tecnologías que surgieron para estas redes es la multiplexación por división de longitud de onda (WDM: Wavelength Division Multiplexing), que permite enviar diferentes señales a través de una sola fibra utilizando hasta 4 canales. Posterior a WDM apareció la multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing), que permite 18 canales por fibra mejorando evidentemente el ancho de banda [1]. Otra variación de WDM es la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing). La más actual es la multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (UDWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing), que es una tecnología muy prometedora y de gran potencial para las redes de acceso de próxima generación que requieren un mayor ancho de banda.

En el presente Trabajo de Integración Curricular se estudia UDWDM en una red PON, la cual es una tecnología caracterizada por permitir obtener un mayor ancho de banda respecto a las otras tecnologías antes mencionadas, porque logra reducir la separación entre las longitudes de onda de los canales, permitiendo a la red PON utilizar un ancho de banda

aún mayor, dando así solución a los requisitos en tecnologías 5G [2]. La separación entre canales es estrecha, menor que WDM, puede ser tan pequeña como 6.25 GHz, lo cual posibilita enviar hasta 1022 longitudes de onda a través de un mismo medio, aprovechar de mejor forma un solo canal de fibra óptica, lograr ahorrar costos y mejorar la eficiencia espectral.

Para llevar adelante este trabajo se realiza una revisión del fundamento teórico de UDWDM y redes PON, esto incluye conocer los conceptos básicos, espaciamiento entre canales, capacidad de transmisión, efectos de la separación de canales, entre otros. Una vez que se ha revisado el fundamento teórico, se definen los objetivos específicos del estudio. Luego se realiza el cálculo del presupuesto del enlace para determinar si la transmisión de datos será exitosa en el sistema de comunicaciones. Posteriormente se efectúa la simulación de diferentes escenarios en Optsim, usando filtros para limitar el ancho de banda de la señal y reducir la interferencia entre canales adyacentes. Finalmente se presentan las gráficas de los resultados obtenidos en diferentes escenarios para comparar cual de ellos tiene un mejor rendimiento.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular una red PON utilizando tecnología UDWDM considerando diferentes parámetros de transmisión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar los fundamentos teóricos de la tecnología UDWDM en el contexto de una red PON.
2. Diseñar una red PON considerando los parámetros de la tecnología UDWDM.
3. Simular una red PON con tecnología UDWDM utilizando el software Optsim.
4. Analizar los resultados de la simulación variando diferentes parámetros de transmisión y en función de métricas como BER y diagrama de ojo.

1.3 ALCANCE

El presente Trabajo de Integración Curricular, inicia con la revisión de los conceptos relacionados con una red PON, su estructura y funcionamiento. Luego se describen los diferentes

tipos de multiplexación como son: WDM, DWDM, CWDM y finalmente UDWDM, que es la tecnología principal en el desarrollo de este trabajo. Para cada una de ellas se menciona sus características principales respecto a capacidad para transmitir, separación entre canales, ventajas, entre otras. Una vez recopilada la información respecto a los tipos de multiplexación, se extrae la información más relevante para elaborar una tabla comparativa de las cuatro tecnologías, donde se presenta el estándar, longitudes de onda por fibra, distancia, espaciamiento entre canales, capacidad y costo.

Posteriormente se lleva a cabo el diseño de la red PON con tecnología UDWDM tomando en cuenta los estándares vigentes para la transmisión y el análisis de requerimientos respecto a los elementos de red. Una vez finalizado el diseño se procede a realizar la simulación utilizando para este propósito el software Optsim. En la simulación se considera la transmisión de tres canales simultáneos para los cuales se varía la velocidad de transmisión, distancia y separación entre ellos.

Para llevar esto a cabo se desarrolla tres escenarios de simulación utilizando: un filtro coseno levantado, filtro gaussiano y sin filtro. El propósito de este estudio es analizar el desempeño individual de cada canal, considerando fenómenos como la dispersión cromática [1] y la atenuación. El objetivo es determinar la configuración óptima de los tres canales evaluados.

Finalmente, se realiza el análisis de resultados de los distintos escenarios de la simulación para cada canal, donde se presenta las gráficas de BER vs. distancia para las distintas separaciones de canal, variando la distancia y velocidad de transmisión.

La información recopilada del presente estudio pretende ser utilizada como literatura de referencia en cuanto a la transmisión UDWDM, ya que esta tecnología todavía no se encuentra estandarizada y tampoco se ha realizado estudios similares a nivel local.

[1] La dispersión cromática es un fenómeno que ocurre en las comunicaciones ópticas donde las diferentes longitudes de onda de la luz se propagan a diferentes velocidades a través de una fibra óptica, causada por la dependencia del índice de refracción del material dieléctrico en la longitud de onda de la luz. Esto puede causar que el pulso de luz se ensanche a medida que se propaga a lo largo de la fibra, lo que puede llevar a una interferencia entre los símbolos transmitidos y una degradación de la calidad de la señal [3].

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 RED ÓPTICA PASIVA

Una red óptica pasiva (PON: Passive Optical Network), como se muestra en la Figura 1.1 consiste en una red de distribución de fibra óptica que no utiliza componentes activos para distribuir la señal. En una red PON se emplea arquitectura punto a punto y punto a multipunto. Se entiende por pasiva cuando no requiere de una fuente de alimentación para los divisores, fibra y combinadores a diferencia de una Red Óptica Activa (AON: Active Optical Network) que sí lo requiere [4].

Una red PON está compuesta por la terminal de línea óptica (OLT: Optical Line Terminal), divisor óptico y diversas terminales de red óptica (ONT: Optical Network Terminal). En principio, se puede hacer una distinción entre PON punto a punto y punto a multipunto. Con una PON punto a punto, cada suscriptor está conectado a la OLT de la central a través de su propia fibra óptica. Por lo tanto, cada suscriptor necesita su propio puerto de conexión en la central. Con la arquitectura punto a multipunto, la fibra óptica propia del suscriptor solo se extiende desde su ONT hasta el siguiente punto de conmutación. Desde allí, una fibra óptica compartida, de múltiples conexiones, conduce a la OLT del centro de conmutación, para conectar a los usuarios con los centros de operaciones de la red, como es el caso de la fibra hasta el hogar (FTTH: Fiber to the Home).

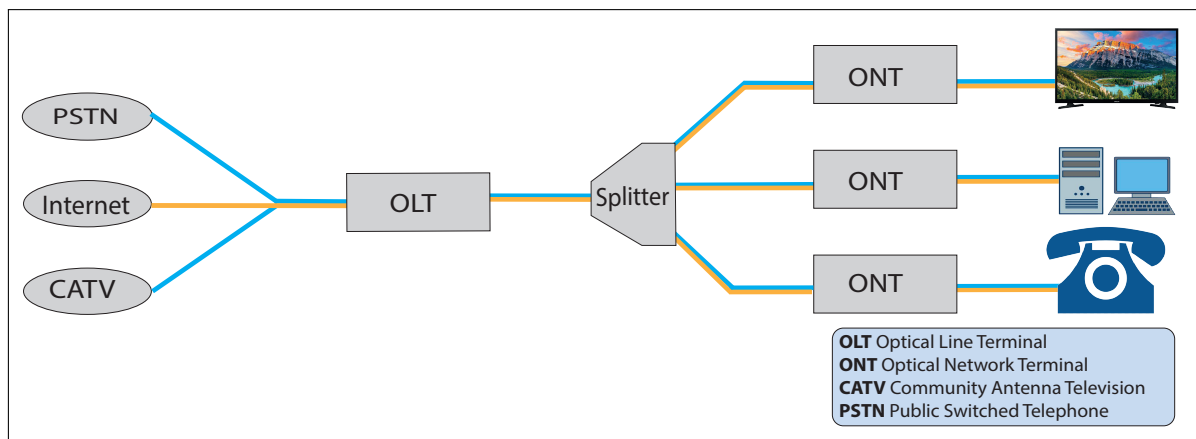


Figura 1.1: Estructura de una red PON, basado en [5].

Los divisores o splitters distribuyen la señal óptica desde la OLT hacia múltiples usuarios en una red PON. La OLT es el equipo de red activo en el extremo central de la red PON que proporciona el punto de terminación para la fibra óptica y gestiona el tráfico de datos entre

los usuarios finales y la red. Los divisores se colocan en diferentes puntos de la red PON para dividir la señal óptica en múltiples caminos que luego se transmiten a los usuarios finales. Al distribuir la señal óptica desde la OLT, los divisores permiten que una sola línea de fibra óptica proporcione conectividad de alta velocidad a múltiples hogares o negocios, por lo cual se reduce los costos y la complejidad de la infraestructura de red [6].

La tecnología PON ha sido objeto de significativos esfuerzos de investigación, estandarización y desarrollo en los últimos años; es una de las tecnologías preferidas y mejor posicionadas para el acceso de banda ancha a futuro, en comparación con otras tecnologías como WDM. Son redes de bajo consumo de energía, además, reducen problemas en la última milla, como limitaciones en el ancho de banda y degradación de la señal, mayor confiabilidad y menor costo de instalación y mantenimiento [7].

1.4.2 TIPOS DE MULTIPLEXACIÓN

1.4.2.1 Multiplexación por división en longitud de onda (WDM)

La multiplexación por división de longitud de onda óptica (WDM: Wavelength Division Multiplexing), es una tecnología que fue propuesta en la década de 1980 y que se empezó a utilizar comercialmente en 1990. Es una técnica de transmisión óptica que permite la combinación de múltiples señales portadoras en una sola fibra óptica mediante el uso de diferentes longitudes de onda, generados por un láser de luz. WDM aprovecha al permitir que se transmitan varias señales en una sola fibra. Por lo tanto, la capacidad de la fibra no se duplica, sino que se multiplica por la cantidad de señales que se pueden transmitir simultáneamente a través de la misma fibra. Usa un multiplexor para combinar diferentes señales ópticas de diferentes transpondedores^[2] en un paquete, pero con diferentes longitudes de onda, y transmitir las a través de una fibra [9] [8].

En la Figura 1.2 se observa el proceso de multiplexación y demultiplexación que se lleva a cabo. En el extremo del receptor, el demultiplexor separa las señales ópticas con diferentes longitudes de onda y las envía a los diversos transpondedores para su posterior procesamiento y restauración de la señal original. Es así como dos o más señales ópticas con

^[2] Un transpondedor es un componente electrónico que recibe una señal óptica en una longitud de onda específica, la convierte en una señal eléctrica y, posteriormente, la transforma en una señal óptica en otra longitud de onda determinada [8].

diferentes longitudes de onda, se transmiten simultáneamente a través de un solo enlace óptico. Cada ONT trabaja en distintas longitudes de onda. En este enfoque, la arquitectura de WDM PON es similar a la arquitectura de PON. La principal diferencia es que múltiples longitudes de onda operan en una sola fibra y las ONTs operan en diferentes longitudes de onda, evitando interferencia entre usuarios y mejor calidad de la señal en cada conexión. Esto se debe a que cada longitud de onda puede transmitir una cantidad específica de información, cuantas más longitudes de onda se utilicen, mayor será la cantidad de datos que se puedan transmitir a través de la red, esto es esencial en redes que manejan gran cantidad de información [10] [11].

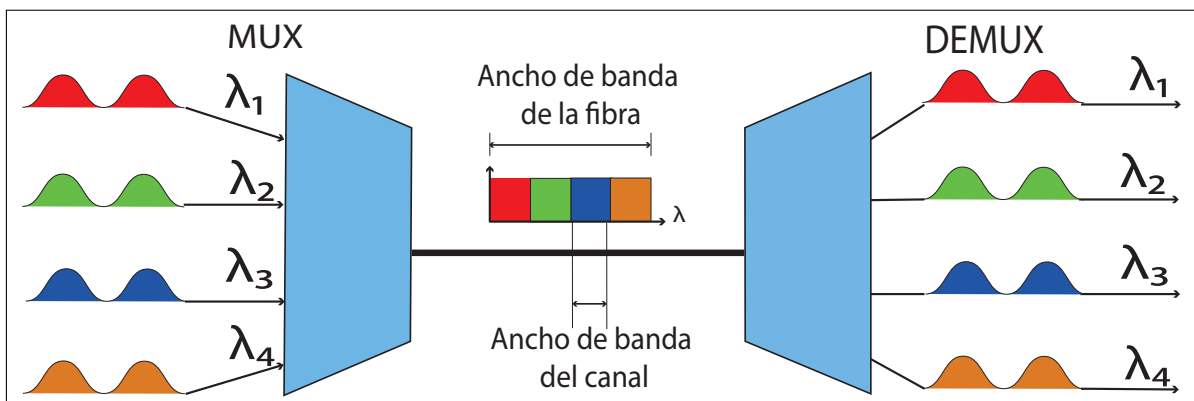


Figura 1.2: Multiplexación y demultiplexación en WDM, basado en [12].

1.4.2.2 Multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM)

La multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing), es un método robusto y relativamente rentable que se utiliza para aumentar el ancho de banda de un cable óptico. Esta tecnología se rige por la normativa de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: International Telecommunication Union) ITU-T G.694.2 [13], que establece una separación de 20 nm. CWDM está limitado en el número de canales que normalmente tiene un máximo de 18 canales y puede alcanzar distancias de hasta 80 km [1].

En la Figura 1.3 se observa que un sistema CWDM se compone de un multiplexor y un demultiplexor, que se utiliza para combinar múltiples canales de longitud de onda en una sola fibra. Esta solución es efectiva para mejorar la capacidad de una fibra desplegada de extremo a extremo. Las señales ópticas se convierten en señales de diferentes frecuencias con diferentes longitudes de onda de portadores ópticos, donde las señales recibidas se combinan durante la transmisión, mientras que, en el lado receptor tiene lugar la transformación inversa [10].

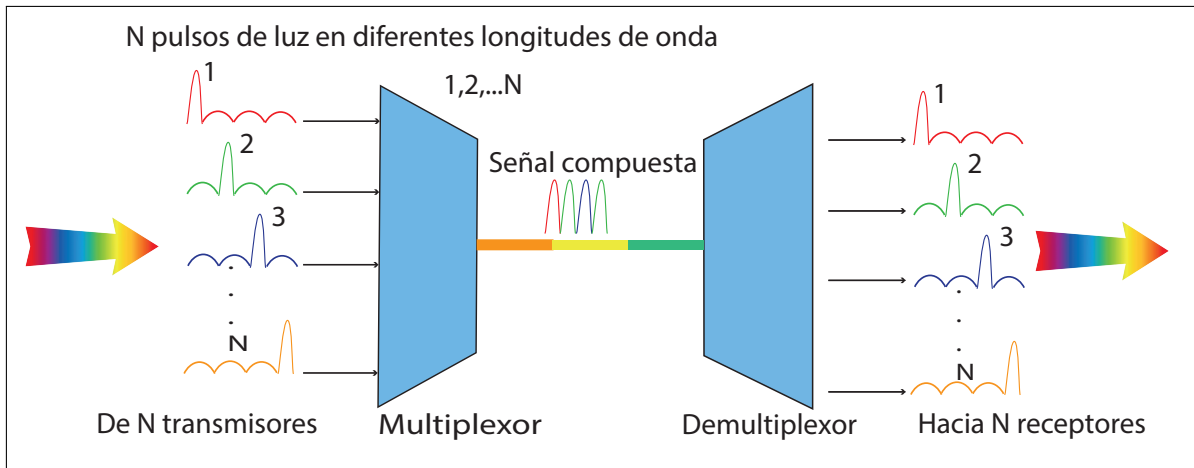


Figura 1.3: Multiplexación y demultiplexación en CWDM, basado en [1].

Una opción comúnmente utilizada en redes empresariales y de acceso a telecomunicaciones son las soluciones CWDM, las cuales emplean principalmente componentes de hardware pasivo en una topología punto a punto [14].

1.4.2.3 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM)

La principal característica de la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing), radica en el hecho de que varios canales de información en diferentes longitudes de onda, se transmiten a través de una fibra óptica. Esta tecnología aumenta el ancho de banda en una red troncal, permitiendo el uso más eficiente de las capacidades de la fibra a distancias muy largas [15].

En la Figura 1.4 se muestra un sistema DWDM, que se basa en la capacidad de la fibra óptica para transmitir simultáneamente luz de diferentes longitudes de onda sin interferencia mutua. Cada longitud de onda representa un canal óptico separado [16].

Esta tecnología mejora el rendimiento de un sistema óptico logrando menor atenuación, ya que su principal ventaja es transmitir a alta velocidad en distancias denominadas ultralargas que pueden alcanzar distancias de hasta 4000 km sin regeneración. Sin embargo, la distancia máxima de transmisión depende de varios factores, como la calidad de la fibra, la calidad de los componentes del sistema DWDM y la cantidad de amplificadores ópticos utilizados en la red. Para mejorar el ancho de banda de las líneas ópticas que se basan en DWDM, es posible agregar progresivamente nuevos canales ópticos a los equipos existentes una vez que se desarrolla la red [15].

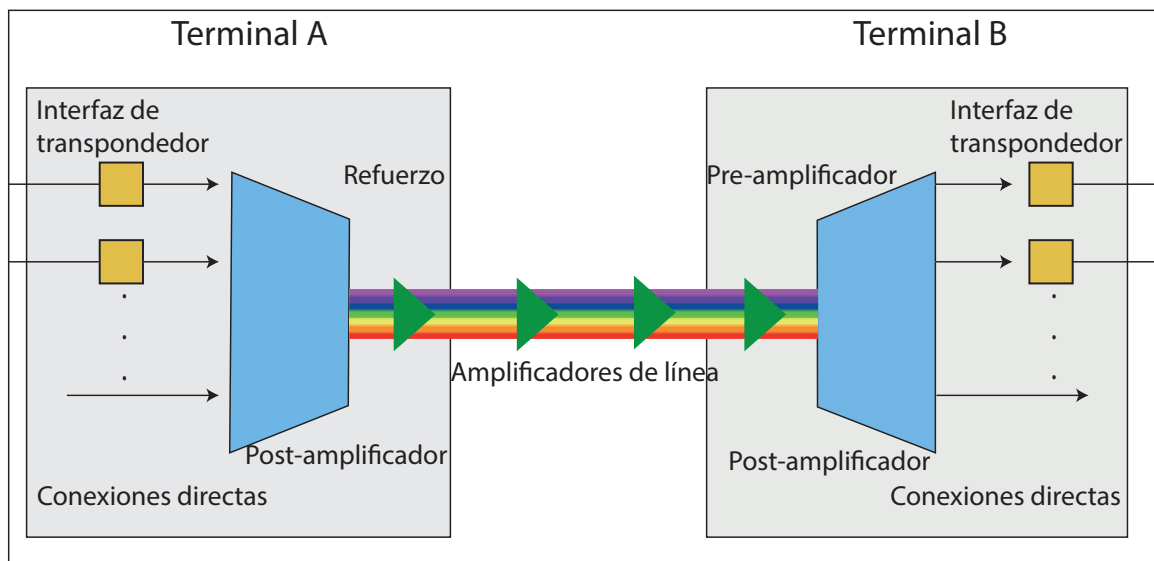


Figura 1.4: Multiplexación y demultiplexación en DWDM, basado en [17].

Un dispositivo importante en DWDM es el transpondedor óptico, que es un componente esencial, puesto que se utilizan para convertir señales de los equipos del cliente a señales compatibles con la tecnología DWDM para su transmisión a través de la fibra óptica principal. Además, los transpondedores se utilizan para la regeneración de señales, esto implica restaurar la amplitud, la forma y la sincronización de la señal. En la mayoría de los casos, se utiliza el procedimiento óptico-eléctrico-óptico para realizar esta tarea, que incluye la conversión de una señal óptica a eléctrica, regeneración 2R o 3R (reamplificación, remodelación y retemporización), y luego la conversión inversa de la señal regenerada de vuelta a una señal óptica [8].

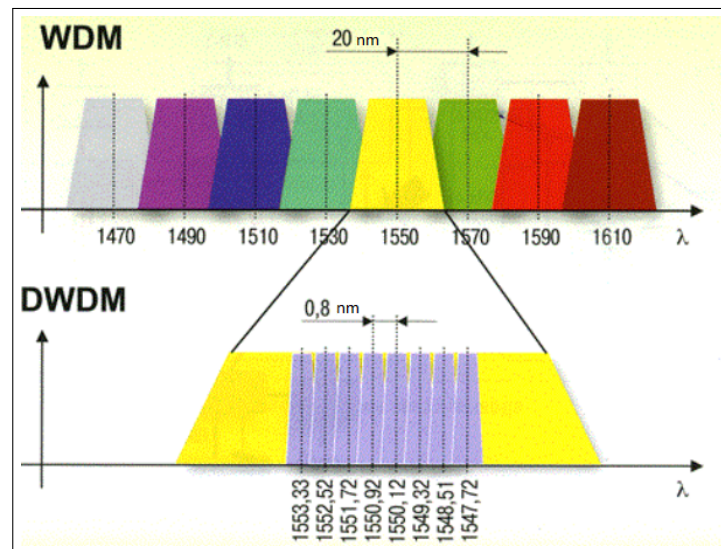


Figura 1.5: Canales WDM vs. DWDM [18].

En la Figura 1.5 se muestra el espaciado entre canales WDM vs. DWDM, que es un factor clave que diferencia a las dos tecnologías. La tecnología WDM generalmente utiliza una separación mayor entre canales, generalmente 20 nm, mientras que la tecnología DWDM usa un espacio mucho más pequeño, generalmente alrededor de 0,8 nm. Esto significa que DWDM puede admitir muchos más canales que WDM en la misma fibra [15].

Se puede comparar DWDM no solo con WDM, sino también con CWDM, hay algunas diferencias clave que deben tenerse en cuenta. En la Figura 1.6 se muestra el espaciado de canales entre CWDM y DWDM. La principal característica es la separación entre canales de 20 nm para CWDM, lo cual permite la multiplexación de hasta 18 canales diferentes en un solo par de fibra óptica, es una buena opción para distancias más cortas y aplicaciones de baja capacidad, mientras que DWDM utiliza una separación mucho más densa, normalmente 0.8 nm, es una buena opción para aplicaciones de alta capacidad y para distancias más largas [14].

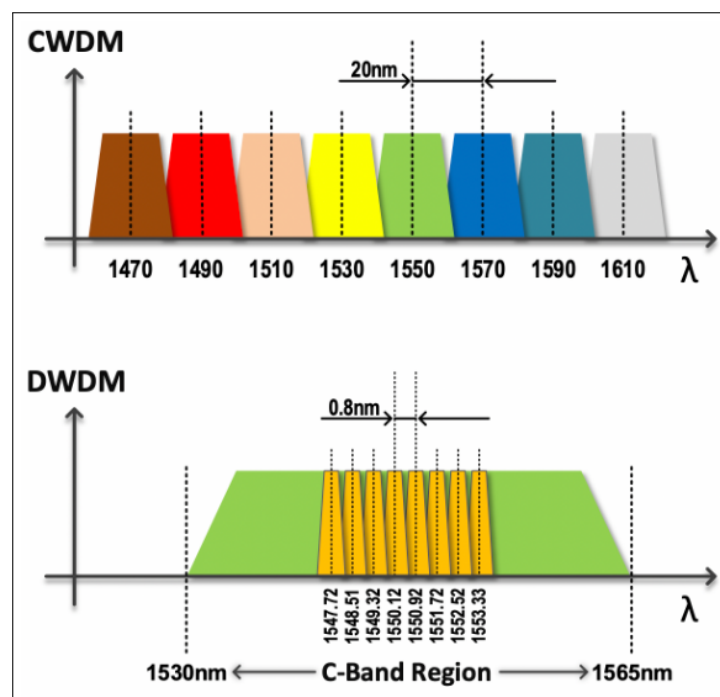


Figura 1.6: Canales CWDM vs. canales DWDM [14].

1.4.2.4 Multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (UDWDM)

La multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (UDWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing), es una de las tecnologías más actuales para redes de acceso y está basada en WDM PON.

El espaciamiento entre canales es mucho más estrecho que DWDM, se caracteriza porque permite obtener mayor ancho de banda respecto a las otras tecnologías antes mencionadas, permite enviar hasta 1022 longitudes de onda a través de un mismo medio, aprovechando de mejor forma un solo canal de fibra óptica, logrando ahorrar costos y mejorando la eficiencia espectral ^[3] en un sistema de comunicación [11][20].

Si se compara UDWDM con WDM, se observa que UDWDM usa un divisor de potencia que consiste en un componente importante en la red de distribución, es importante señalar que gracias a esto, cada ONT tendría la posibilidad de acceso a todas las longitudes de onda que se encuentran disponibles [20].

En UDWDM para obtener una mejor sensibilidad y alta selectividad en los receptores de las OLTs y ONTs, se puede insertar detección coherente ^[4]. En cuanto a la sensibilidad del receptor, hay que resaltar que este aspecto importante permite obtener un alto factor de división en el divisor de potencia, lo cual significa que se va a conseguir que varias ONTs compartan la misma red de distribución. Del mismo modo, una alta selectividad permite conseguir mayor eficiencia espectral en comparación con otras arquitecturas, como por ejemplo WDM que su capacidad de uso puede verse limitada por factores como el ancho de banda disponible de la fibra óptica y la calidad de las fuentes de luz utilizadas para generar las señales ópticas. [20].

En la Figura 1.7 se muestra la separación de 320 canales que son transmitidos por una fibra óptica. Inicialmente se observa un dispositivo con 16 canales UDWDM que están separados a 6.25 GHz, donde cada grupo posee una capacidad de 100 GBits/s. Del canal 1 al canal 16 se tiene distintas salidas, mientras que el canal 17 va encaminado a la misma salida del canal 1, esto se realiza de forma consecutiva. Cada conjunto de 16 canales tiene una capacidad de 100 Gbps. Después de esto, se utilizan sistemas convencionales DWDM para separar múltiples canales que ingresan a cada una de las 16 salidas ultra densas, resultando en 20 salidas separadas en sus propios canales a 100 GHz.[22].

^[3] La eficiencia espectral se refiere a la cantidad de información que se puede transmitir por unidad de ancho de banda en un sistema de comunicación específico. A medida que este valor aumenta, se está utilizando de manera más efectiva la banda de frecuencia o rango de longitud de onda, lo que resulta en una mayor capacidad de transmisión de datos [19].

^[4] La detección coherente es una técnica de recepción que implica la combinación de la señal óptica recibida con una señal generada por un oscilador local en una frecuencia específica [21].

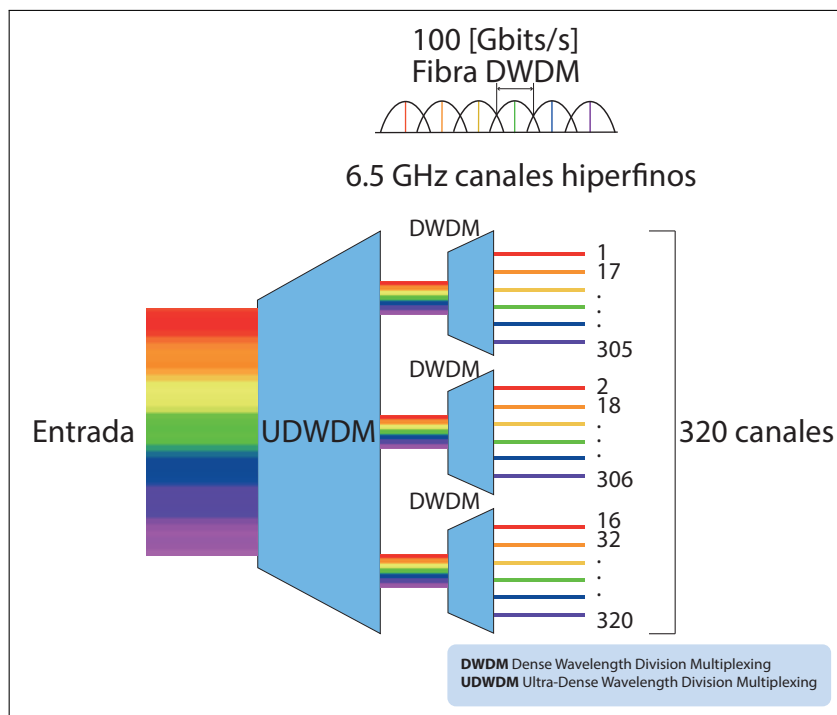


Figura 1.7: Transmisión UDWDM de 320 canales, basado en [17].

UDWDM se rige por los mismos principios fundamentales que WDM. La capacidad máxima de información que puede ser transmitida en un canal óptico está limitada por la modulación del ancho de banda del transmisor y el ancho del canal óptico.

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de la tecnologías WDM, CWDM, DWDM y UDWM. Las diferencias más notables entre estas son: espaciamento entre canales, longitudes de onda por fibra, capacidad de transmisión y distancia.

Tabla 1.1: Comparación de tecnologías WDM.

Tecnología	WDM	CWDM	DWDM	UDWDM
Estándar	UIT-T. G.692.	ITU G.694.2	ITU G 694.1	En progreso
Longitudes de onda por fibra	4	18	64-160	1022
Distancia	<a 80 km	80 km	Miles de km	Miles de km
Espectro	O, C	O, E, S, C, L	C, L, S	C, L
Espaciamento entre canales	200 GHz	2500 GHz	50-100GHz	1.25,1.5,2.5,2.8,3.12.5, 5,6.25,10,15,25 GHz
Capacidad	2.5 Gbps	Hasta 2.5 Gbps	10 Gbps - 40 Gbps	>a 40 Gbps
Costo	Bajo	Bajo	Medio	Alto

1.4.3 Filtros

1.4.3.1 Filtro coseno levantado

El filtro coseno levantado es un filtro utilizado para modificar la forma de onda de una señal antes de su transmisión. Esta herramienta es comúnmente aplicada en sistemas de modulación digital, donde su función principal es evitar el efecto de la interferencia entre símbolos (ISI: Inter Symbol Interference) al limitar el ancho de banda de la señal transmitida.

La respuesta en frecuencia y de impulso del filtro coseno levantado son características importante de este tipo de filtro, en este sentido, resulta necesario comprender cómo se comporta este tipo en las diferentes frecuencias y cómo afecta la amplitud y la fase de la señal que se está procesando.

La Figura 1.8 muestra la respuesta de impulso (izq.) y la respuesta de frecuencia (dcha.) de un filtro de coseno levantado. En cuanto a la respuesta de frecuencia del filtro es más ancha que la del filtro de paso bajo ideal debido a la banda de transición presente en el filtro. Este exceso de ancho de banda está controlado por un parámetro conocido como factor de desvanecimiento o roll off ^[5]. La respuesta en frecuencia se puede visualizar gráficamente para distintos valores del factor de roll off: 0.3, 0.5 y 1 [24].

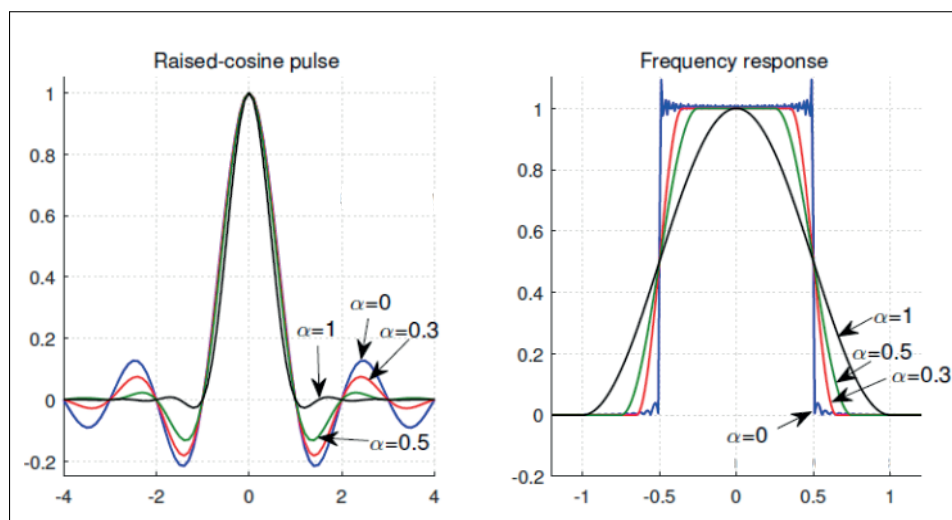


Figura 1.8: Respuesta de impulso (izq.) y respuesta de frecuencia (dcha.) del filtro coseno levantado [25].

^[5] El factor de roll off es un parámetro que se utiliza en la teoría de la modulación digital para describir la disminución de la amplitud de los símbolos en el espectro de una señal transmitida. El valor del factor de caída puede variar en un rango de 0 a 1 [23].

Además, se observa una ampliación de los lóbulos del impulso de filtro para varios factores de roll off. Es importante mencionar que esta respuesta de impulso tiene características similares a la respuesta del impulso de la función sinc, en la cual se presentan cruces por cero en intervalos de tiempo de T [24].

También se puede observar que conforme se reduce el exceso de ancho de banda para acercarse a la respuesta de frecuencia ideal del filtro paso bajo, los lóbulos presentes en la respuesta al impulso se incrementan, aproximándose a la respuesta impulsiva de la función sinc. Es decir, la señal con lóbulos de menor amplitud tiene un exceso de ancho de banda mayor o un espectro más amplio [24].

1.4.3.2 Filtro de gauss

El filtro de gauss se emplea en el procesamiento de señales y en la teoría de la información y la codificación de señales, ya que la función gaussiana es una solución óptima para el problema de maximizar la información transmitida a través de un canal de comunicaciones con ruido aditivo gaussiano. En la figura 1.9 se observa la respuesta de impulso (izq.) y respuesta de frecuencia (dcha.) del filtro de gauss. La respuesta al impulso del filtro de gauss se aproxima a una función gaussiana.

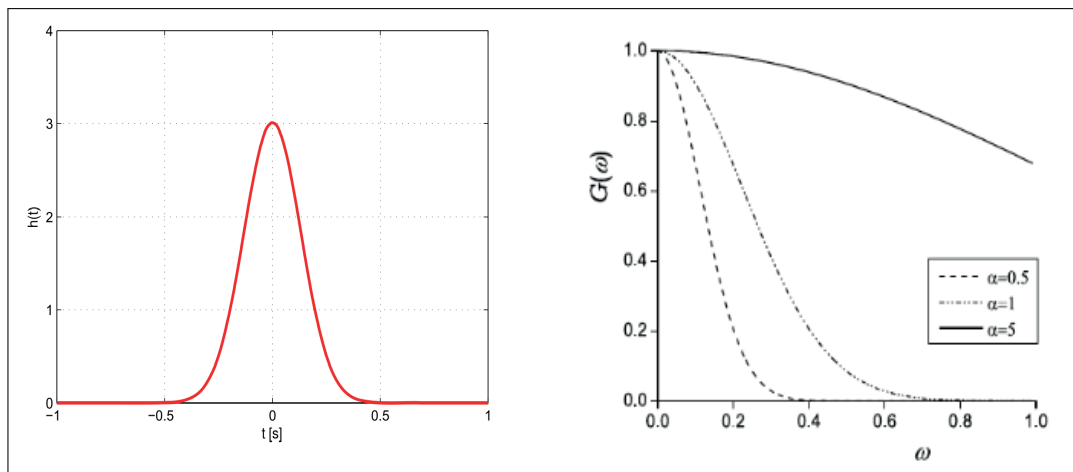


Figura 1.9: Respuesta de impulso (izq.) y respuesta de frecuencia (dcha.) del filtro de gauss [26].

Estos filtros tienen la propiedad de reducir el efecto de overflow ^[6] o desbordamiento en una entrada de función de paso, al tiempo que minimizan el tiempo de subida y bajada.

^[6] En un filtro de gauss, el overflow ocurre si el valor de la desviación estándar es demasiado grande en relación con el ancho de banda del filtro [27].

Este comportamiento se debe en gran medida al hecho que el filtro gauss tiene el mínimo retardo de grupo posible. El retardo de grupo es el tiempo que tarda una onda de cierta frecuencia en propagarse a través del filtro. La respuesta en frecuencia, por otro lado, es la respuesta que produce el filtro cuando se le aplica una señal de entrada sinusoidal en el dominio de la frecuencia. La respuesta en frecuencia se mide típicamente en términos de la amplitud y la fase de la señal de salida en función de la frecuencia de entrada [27].

Una de las características del filtro de gauss es su desviación estándar, representada por el símbolo sigma σ que permite determinar la forma de la respuesta de impulso del filtro y su respuesta en frecuencia. Una desviación estándar más grande produce una respuesta de impulso más ancha y una respuesta en frecuencia más suave, mientras que una desviación estándar más pequeña produce una respuesta de impulso más estrecha y una respuesta en frecuencia con una mayor atenuación de las frecuencias más altas [27].

2 METODOLOGÍA

En esta sección se muestra el proceso que se realiza en el diseño y simulación de una red PON utilizando tecnología UDWDM. Para implementar la simulación se usa el software Optsim, el cual se tiene a disposición debido a un trabajo de investigación conjunta con la Universidad Politécnica Salesiana. A partir de los datos obtenidos con Optsim las gráficas han sido realizadas utilizando Matlab 2022a.

UDWDM es una tecnología que se encuentra aún en investigación, por lo tanto, no cuenta con un estándar de la ITU, o de alguna otra organización, es por esto que para este trabajo se ha tomado en cuenta la recomendación ITU G. 694.1 que estandariza a DWDM.

La recomendación ITU G. 694.1 estandariza todos los requerimientos para la interoperatividad de las redes DWDM como son: requisitos técnicos que incluye parámetros de potencia de transmisión, márgenes de longitud de onda, espectro de la señal, atenuación y el nivel de ruido óptico. Esta recomendación también proporciona líneas directrices para el diseño de redes DWDM, incluyendo los parámetros de los enlaces de fibra óptica, requisitos de seguridad y las frecuencias centrales nominales. Esta recomendación garantiza el desempeño de los sistemas DWDM [28].

Es importante mencionar que en este Trabajo de Integración Curricular, se considera estudios realizados previamente sobre sistemas UDWDM a velocidades de transmisión de 2.5 Gbps, 5 Gbps y 10 Gbps, separación entre canales de 25 GHz y distancias de 40 a 60 km.

Para diseñar la red PON primero se realiza el cálculo del presupuesto del enlace óptico, lo que implica analizar diversos factores como la distancia de transmisión, el tipo de fibra óptica y su atenuación, la potencia del transmisor, las pérdidas de conectores, splitters entre otros. Este cálculo permite determinar la cantidad de energía óptica que llega al receptor y asegurar que esta sea suficiente para una transmisión de alta calidad.

También se describe los requerimientos del sistema, considerando tanto el transmisor como el receptor, así como el canal de comunicación. Para facilitar la comprensión, se presentan tablas con los parámetros de configuración de los elementos.

Finalmente, se realiza las simulaciones de la red; la Figura 2.1, permite comprender cómo se encuentran desarrollados los distintos escenarios. El primer escenario corresponde a la simulación de la red PON sin filtrar la señal a nivel óptico. Para los escenarios dos y tres

y con el fin de optimizar los resultados del primero, se utiliza un filtro coseno levantado y un filtro de gauss, los mismos que están ubicados a nivel óptico. Los canales para este estudio están separados a 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz. Para cada separación se configura la velocidad de transmisión de 10 Gbps a 17 Gbps a diferentes distancias de van desde 10 km a 20 km.

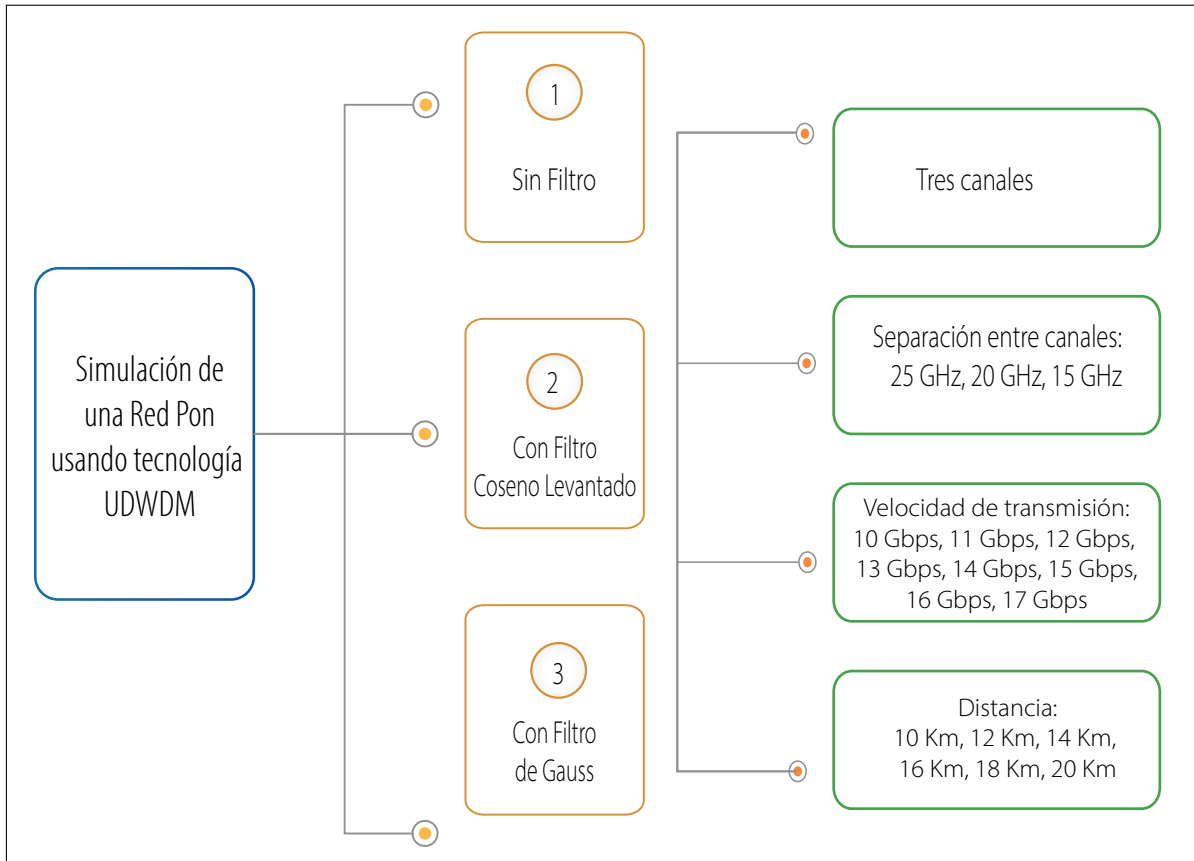


Figura 2.1: Estructura de los escenarios simulados.

En la siguiente sección, se describe el software OptSim el cual es utilizado para llevar a cabo las simulaciones necesarias en este estudio. OptSim es un software de simulación de sistemas ópticos que se utiliza para modelar el comportamiento de los componentes de una red óptica.

2.1 SOFTWARE OPTSIM

Optsim es un software desarrollado por RSoft en 1998, se ubica entre los simuladores más importantes y más usados para las comunicaciones ópticas en todo el mundo, tanto por instituciones educativas como en la industria. Su avanzado funcionamiento, su amigable interfaz gráfica, le permite al usuario interactuar de forma fácil, segura y precisa en el de-

sarrollo de proyectos permitiendo determinar el rendimiento de un sistema a través de la configuración de los parámetros en los componentes. Se encuentra disponible tanto para Windows como para UNIX [29]. Entre sus principales características se puede destacar las siguientes:

- ❑ Incorpora una lista variada de librerías con componentes ópticos, eléctricos y digitales que facilita la simulación de aplicaciones de ingeniería.
- ❑ Permite trabajar con herramientas como Matlab y Luna Optical Vector Analyzer para combinar simulaciones.
- ❑ Cuenta con modelos de modulaciones avanzadas como m-QAM, DQPSK, m-PAM, BPSK, etc.
- ❑ Se puede realizar implementación de redes de FTTx, BPON, G(E)PON, WDM-PON, DWDM, CWDM, OCDMA, OTDM, entre otros.
- ❑ Contiene una interfaz de programación para el desarrollo de modelos personalizados de aplicaciones para lenguajes como C y C++.

2.2 CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DEL ENLACE ÓPTICO

El presupuesto óptico se considera como el valor máximo de atenuación del enlace desde la OLT hasta la ONT más lejana, este indicador es fundamental a la hora de diseñar la red PON porque permite determinar la longitud máxima posible de la línea óptica en la sección transmisor - receptor en la etapa de diseño. El presupuesto de potencia óptica consiste en la diferencia entre la potencia que hay entre el transmisor y la sensibilidad del receptor en la ONT [30].

Es necesario mencionar que el cálculo del presupuesto óptico está realizado para un único caso, donde la distancia es de 10 km y que para una distancia mayor se debe tomar en cuenta el número de empalmes multiplicado por un valor que puede ir desde 0.1 dB a 0.5 dB, siendo 0.3 dB un valor promedio aceptable. Esto significa que, si hay más empalmes en la transmisión, se debe agregar un valor adicional al cálculo del presupuesto óptico para tener en cuenta la atenuación adicional que pueden producir. En la Figura 2.2 se presenta un esquema donde se indica las pérdidas de cada componente de la red, como los conectores, los splitters y los moduladores, que contribuyen a la atenuación de la señal.

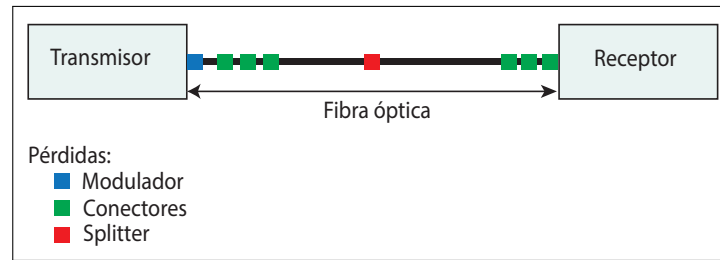


Figura 2.2: Esquema de pérdidas del enlace.

Para el cálculo del presupuesto óptico se presenta la Tabla 2.1 que muestra los elementos y los valores de pérdida para cada elemento que causan la atenuación de la señal en la red óptica; estos valores son obtenidos de la hoja de datos del fabricante [31] [32].

Tabla 2.1: Pérdidas del enlace hasta ONTs.

Elemento	Atenuación	Cantidad Total	Atenuación total [dB]
Fibra G.652D	0.25 dB/km	10 km	2.5
Modulador	6 dB	1	6
Splitter	3.5 dB	2	7
Conector SC	0.25 dB	14	3.5

La Ecuación 2.1 corresponde a la fórmula que se utiliza para realizar el cálculo, en la que sumamos todas las pérdidas predeterminadas. Para obtener las pérdidas de la fibra se realiza el producto de la atenuación por la longitud de la fibra óptica [33]. Además, se toma en cuenta las pérdidas que introducen elementos como el modulador, splitters y conectores.

El margen operativo es algún incremento que presupuestamos con antelación, anticipándonos a la aparición de posibles pérdidas adicionales que puede ser por degradación de fibra, deterioro de conectores, por accidentes en el cable, etc.

$$P_{Tx} - L_t + G = M + S \quad (2.1)$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia del transmisor

L_t = Pérdidas totales del enlace

G = Ganancia

M = Margen

S = Sensibilidad del receptor

Despejando y reemplazando los valores en la Ecuación 2.1 se obtiene la sensibilidad del receptor S .

$$P_{Tx} - L_t + G = M + S$$

$$S = P_{Tx} - L_t + G - M$$

$$S = 0dBm - 19dB + 0dB - 3dB = -22dBm$$

Según la recomendación ITU G.984.2 la sensibilidad estándar en PON es de -30 dBm o 0,001 mW para OLT y de -26 dBm o 0,0025 mW para ONT [34], bajo esta aclaración se observa que el receptor se encuentra dentro de los límites de estandarización con un valor calculado de $-22dBm$.

2.3 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En la actualidad los sistemas de comunicación óptica, son requeridos en cualquier área que implique la transferencia de información, principalmente a largas distancias con capacidad para trabajar a velocidades altas de varios gigabits por segundo (Gbps) o incluso terabits por segundo (Tbps), donde es necesario regenerar la señal usando repetidores. Un sistema de comunicación óptica está compuesto por un transmisor, un receptor, un canal de comunicación, el mismo se encuentra representado en la Figura 2.3.

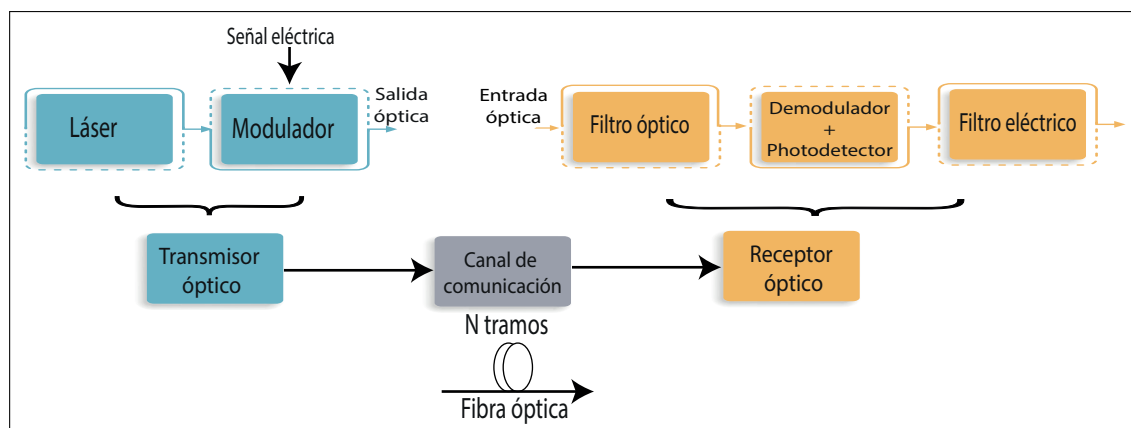


Figura 2.3: Esquema de un sistema de comunicaciones ópticas, basado en [35].

2.3.1 Transmisor óptico

Un transmisor óptico tiene como función principal convertir señales eléctricas en señales ópticas, luego a partir de la salida, la señal óptica alimenta a la fibra óptica. Está compuesto

por un láser, un acoplador de canal [1] y un modulador [36]. En la Figura 2.4 se presenta la implementación del transmisor en OptSim. Se utiliza un osciloscopio que es una herramienta de medición utilizada para visualizar y analizar señales eléctricas y un analizador de espectro óptico (OSA: Optical Spectrum Analyzer) para obtener información detallada sobre la distribución espectral de la señal óptica, incluyendo la amplitud y frecuencia de sus componentes espectrales. También un generador de pulsos NRZ (Non-Return-to-Zero) que es un dispositivo que se utiliza para crear pulsos de señal digital en el formato NRZ. La señal NRZ es una forma de codificación donde un valor de bit 1 representa como un nivel de voltaje alto constante y un valor de bit 0 representa como un nivel de voltaje bajo constante. Por otro lado, el generador de bits puede generar secuencias de bits en diferentes patrones, como patrones de pseudo-aleatorios o patrones de bits predefinidos [37][38].

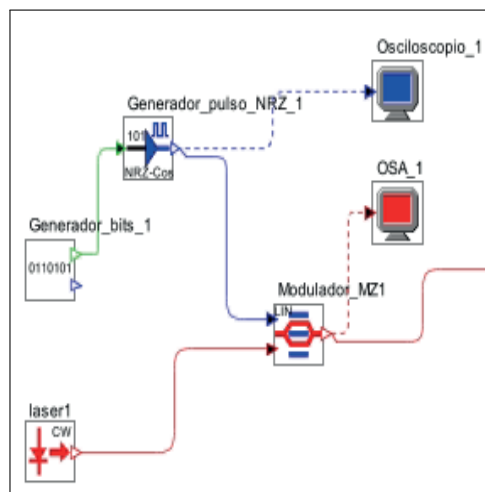


Figura 2.4: Transmisor.

- ❑ **Láser de onda continua (CW: Constant Wave):** Lo más significativo de un transmisor óptico es una fuente de radiación que está compuesta por un diodo emisor de luz o un láser semiconductor con una longitud de onda de radiación correspondiente a la atenuación mínima de la fibra utilizada. El láser funciona como fuente óptica por ser compatible con el canal de comunicación, donde se genera la señal óptica a través de la modulación de la portadora óptica [8].

La Figura 2.5 representa el láser de onda continua que es uno de los tipos de láser más comunes, está diseñado para emitir una señal continua de luz. Esta luz es cohe-

[1] El acoplador es un componente óptico que utiliza un microlente para enfocar la señal óptica con la máxima eficiencia en el plano de entrada de la fibra. [8].

rente, es decir los fotones emitidos tienen la misma longitud de onda, fase y dirección, esto resulta en un haz de luz coherente.

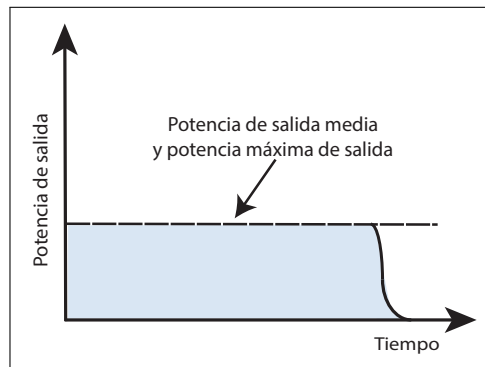


Figura 2.5: Láser de onda continua (CW) [39].

En la Tabla 2.2 se observan los parámetros de configuración del láser según el canal que corresponde. Es importante señalar que la frecuencia central y por consiguiente la longitud de onda cambia según la separación entre canales; los parámetros potencia y estado de la fuente se mantienen. En este caso se presenta únicamente para una separación de 25 GHz. Configurar el transmisor óptico a 0 dBm es una práctica común porque proporciona una potencia de referencia estándar y asegura una buena calidad de la señal.

Tabla 2.2: Parámetros de configuración del láser para una separación de 25 GHz.

Parámetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Unidad
Frecuencia central	193.100	193.125	193.150	THz
Longitud de onda	1552.52	1552.32	1552.12	nm
Potencia	0			dBm

- **Modulador Mach-Zehnder:** Un modulador Mach-Zehnder es un tipo frecuente de modulador óptico que se usa en comunicaciones, realiza la modulación de diferentes bandas laterales controlando su voltaje de polarización [36]. Observando la Figura 2.6 su estructura; está compuesta por una entrada óptica, que se divide en 2 brazos, superior e inferior, los cuales se modulan en fase, cada uno de ellos puede contener una sección activa que, con la ayuda de un voltaje aplicado V_t y $-V_t$, cambia ligeramente la velocidad de propagación de la luz en el brazo. Como resultado, se obtiene la combinación de dos brazos con diferente modulación de fase convierte la modulación de fase en modulación de intensidad [40].

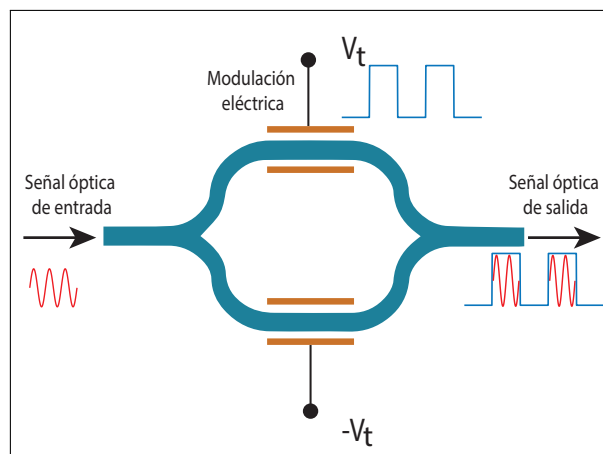


Figura 2.6: Modulador de Mach-Zehnder basado en [40].

Los parámetros de configuración del modulador se encuentran disponibles en la Tabla 2.3, las pérdidas excesivas y reducción de potencia media por modulación, se deben tomar en cuenta para el cálculo del presupuesto óptico debido a que producen atenuación en el enlace, estos valores son obtenidos de las hojas de datos del fabricante [41]. Para el presente trabajo los valores de configuración del modulador se mantienen en todos los escenarios.

Tabla 2.3: Parámetros de configuración del modulador.

Parámetro	Valor	Unidad
Pérdidas excesivas	3	dB
Reducción de potencia media por modulación	3	dB

2.3.2 Receptor óptico

El receptor óptico tiene como función principal transformar la señal óptica que recibe en la salida de la fibra y convertirla en la señal eléctrica original. La Figura 2.7 muestra la implementación en OptSim. Está compuesto por un filtro óptico coseno levantado, un fotodetector PIN más un demodulador y un filtro eléctrico de Bessel [36].

También se observa elementos como el medidor de potencia óptica (OPM: Optical Power Meter) que se emplea para medir la potencia óptica de un equipo de fibra óptica o la potencia de una señal óptica que se transmite a través de un cable de fibra e identificar posibles problemas en la transmisión de la señal. Por otra parte el analizador de BER permite medir la calidad de la señal en diferentes etapas del proceso de transmisión, desde la fuente de la señal hasta el receptor.

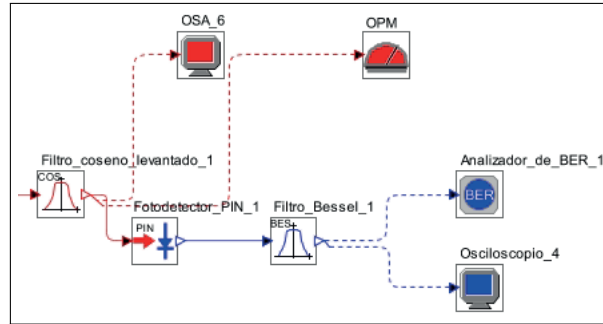


Figura 2.7: Receptor óptico.

- Fotodetector PIN:** Un diodo PIN, como se aprecia en la Figura 2.8 es una estructura semiconductor que consta de regiones p^+ y n^+ fuertemente dopadas y una capa ligeramente dopada que las separa y una capa de conductividad intrínseca. Esta región tiene un exceso de electrones y se utiliza para conectarse con un terminal de contacto eléctrico externo. Con un voltaje de polarización inversa, se forma una región i empobrecida en la capa ligeramente dopada. El campo eléctrico se concentra principalmente en esta zona, porque su resistencia es mucho mayor que la resistencia de las capas p^+ y n^+ . La región p^+ es una zona altamente dopada con impurezas tipo p que se encuentra en un extremo del diodo PIN. Esta región tiene un exceso de huecos o falta de electrones y se llama zona de agotamiento porque crea una barrera eléctrica que evita que los electrones y los huecos fluyan a través del diodo. La región n^+ es una zona altamente dopada con impurezas tipo n que se encuentra en el otro extremo del diodo PIN. [42].

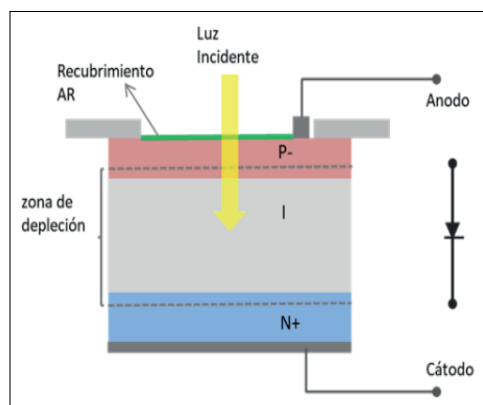


Figura 2.8: Esquema del fotodetector PIN [43].

Entre los parámetros de configuración que se muestran en la Tabla 2.4 se incluye la corriente oscura que es la corriente que fluye a través de la carga en ausencia de radiación óptica. Esta corriente provoca ruido de disparo y limita la sensibilidad del

receptor óptico. Mientras que la eficiencia cuántica es un factor que tiene en cuenta que, por regla general, no todos los cuantos de luz absorbidos conducen a la aparición de pulsos de corriente [42].

Tabla 2.4: Parámetros de configuración del Fotodetector PIN.

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia de referencia	193.150	THz
Ancho de banda	20	GHz
Corriente de oscuridad	0.1	nA
Eficiencia cuántica	0.7	-

- ❑ **Filtro Eléctrico de Bessel:** Este componente se encuentra antes del analizador de BER. Es un dispositivo selectivo de frecuencia que pasa señales en una banda de frecuencia deseada, llamada banda de paso, y bloquea señales de otras frecuencias relacionadas con la banda de parada, que es la zona en la cual la señal de entrada es totalmente suprimida. Permite asegurar la linealidad de la característica de frecuencia de fase dentro del ancho de banda. Entre las principales ventajas está la forma plana y proporcional a la frecuencia de la respuesta de fase en la región de transmisión, por cuanto baja distorsión de señales con componentes a distintas frecuencias [44]. Sus parámetros de configuración se especifican en la Tabla 2.5

Tabla 2.5: Parámetros del Filtro Eléctrico de Bessel.

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo	Pasa bajo	THz
Ancho de banda	0.75*Bit rate	GHz

2.3.3 Canal de comunicación

Un canal de comunicación óptico es un medio de comunicación que utiliza luz para transmitir información como voz, datos y video. Su principal función es transmitir la señal óptica desde el transmisor al receptor sin que esta sea alterada. Los canales ópticos se caracterizan por altas tasas de transferencia de datos, una seguridad mejorada y una mayor resistencia a los ruidos eléctricos. Esto se debe a que la luz no puede ser afectada por los campos eléctricos, por tal razón los canales ópticos son confiables y seguros para la transmisión de datos a alta velocidad y a largas distancias [45]. En la Figura 2.9 se muestra la implementación del canal de comunicación óptico en el simulador OptSim. El canal está compuesto por la fibra óptica y una rejilla de Bragg, a continuación se describe cada elemento.

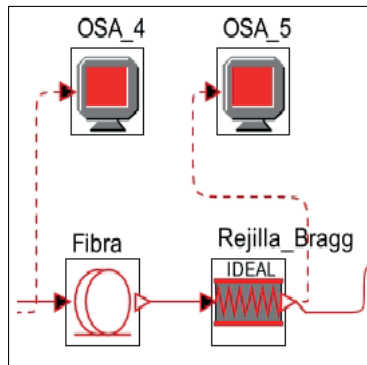


Figura 2.9: Canal de comunicación óptico.

- Fibra óptica:** La fibra óptica es un hilo delgado de vidrio o plástico que se utiliza para transmitir señales de luz a largas distancias. En la Tabla 2.6 se presenta los parámetros más importantes de configuración de la fibra óptica monomodo que cumple con la recomendación ITU-T G.652D. Este tipo de fibra permite un rendimiento mejorado en aplicaciones de gran ancho de banda y larga distancia además de la transmisión en un rango de longitud de onda extendida de 1310-1550 nm [45].

Tabla 2.6: Parámetros de configuración de la fibra.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de fibra	10-20	km
Atenuación	0.25	dB/km
Dispersión	17	ps/nm/km

- Rejilla de Bragg:** Actualmente se utilizan ampliamente en la multiplexación de canales a lo largo de la longitud de onda, permiten compensar la dispersión cromática en el canal de comunicación, obteniendo una mayor eficiencia, ahorro de recursos, mejor precisión de medición, etc [46].

2.4 SIMULACIONES

En el presente Trabajo de Integración Curricular, se presentan tres escenarios de simulación que fueron expuestos anteriormente en la Figura 2.1. A continuación se describe la vista esquemática en un diagrama de bloques y en el simulador para cada uno de ellos.

2.4.1 Primer escenario: Simulación sin utilizar un filtro

El primer escenario es representado en la Figura 2.10 mediante un diagrama de bloques y en la Figura 2.13 en el simulador, donde se muestra la vista esquemática de la red PON

usando tecnología UDWDM. En el transmisor se incorpora un láser CW con diferente frecuencia central según corresponda la separación entre canales, los parámetros de configuración se encuentran especificados en la Tabla 2.2. La señal es modulada con un modulador Mach-Zehnder, se utiliza un generador de secuencia de bits pseudo aleatoria (PRBS: Pseudo Random Bit Sequence) a una velocidad de datos de 10 Gbps según corresponda la tasa de bits (entre 10 Gbps y 17 Gbps) y el pulso NRZ generador para la técnica de codificación. A continuación, se realiza el proceso de multiplexación con una pérdida de inserción de 3.5 dB, donde la señal es transmitida por medio del canal de comunicación que está compuesto por la fibra óptica y la rejilla de Bragg, con una longitud de 10 km según corresponda (entre 10 km y 20 km). Luego se realiza el proceso de demultiplexación para recuperar las señales originales de una señal mixta a través de varios canales de transmisión de información. Mientras en la sección del receptor se filtra con un filtro coseno levantado y la señal se detecta utilizando el fotodetector PIN que se encarga de obtener la señal óptica. La señal resultante es filtrada nuevamente con un filtro de Bessel de paso bajo que está conectado al analizador de BER, para finalmente verificar la calidad de la señal a través del valor del BER y de la forma del diagrama del ojo [2].

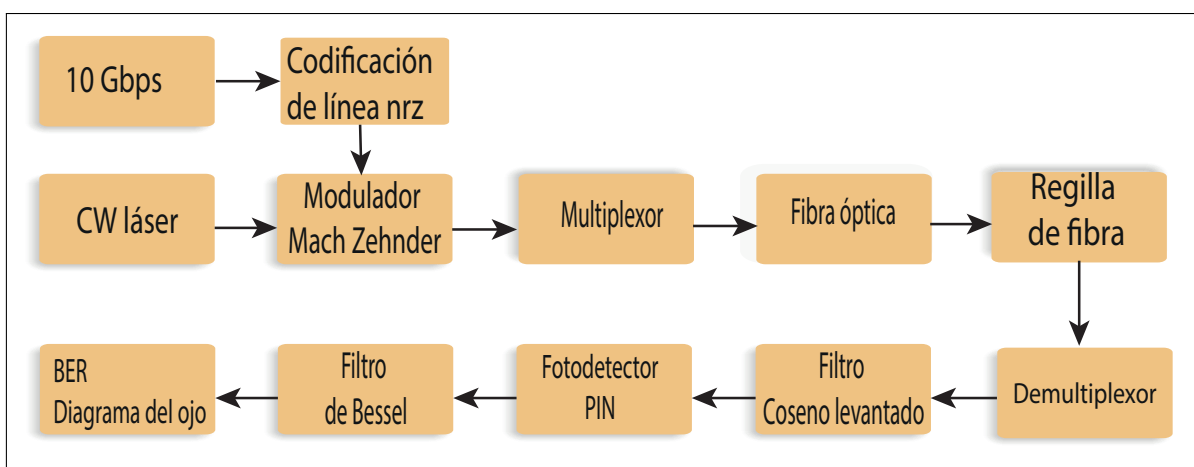


Figura 2.10: Vista esquemática para la simulación de la red PON con tecnología UDWDM.

En referencia a la Tabla 2.7 se considera separaciones de 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz, además 3 canales donde se envía longitudes de onda diferentes. Por ejemplo, para una

[2] El diagrama del ojo es una herramienta de análisis utilizado en las comunicaciones ópticas para evaluar la calidad de la señal recibida. Es una representación gráfica del perfil de voltaje de una señal óptica a medida que se transmite a través de un canal de fibra óptica. Si la apertura del ojo es grande, esto indica una señal de alta calidad con poco ruido y poca interferencia. Si la apertura del ojo es pequeña o si las formas de onda se superponen, esto indica una señal de baja calidad con errores de bit y una mayor tasa de error de transmisión [47]

separación de 25 GHz la frecuencia central de emisión de cada láser CW se configura de la siguiente manera: $\lambda_1 = 193.100$ THz, $\lambda_2 = 193.125$ THz y $\lambda_3 = 193.150$ THz; donde λ_1 , λ_2 y λ_3 son las longitudes de onda en terahercios para el canal 1, canal 2 y canal 3 respectivamente. El mismo proceso se realiza para un espaciado de frecuencia de 20 GHz y 15 GHz.

Tabla 2.7: Longitudes de onda a diferentes separaciones entre canales para los tres escenarios.

Separación	λ_1 [THz]	λ_2 [THz]	λ_3 [THz]
25 GHz	193.100	193.125	193.150
20 GHz	193.100	193.120	193.140
15 GHz	193.100	193.115	193.130

2.4.2 Segundo escenario: Simulación utilizando un Filtro coseno levantado

De igual forma que en el anterior caso, el segundo escenario es representado en la Figura 2.11 mediante un diagrama de bloques y en la Figura 2.14 en el simulador. Con el fin de mejorar los resultados del anterior caso se coloca un filtro coseno levantado a nivel óptico antes de realizar el proceso de multiplexación, el mismo que se usa para dar forma a los pulsos en la modulación digital debido a su capacidad para minimizar la interferencia entre símbolos (ISI: Inter Symbol Interference)^[3], se llama así porque su respuesta en frecuencia es una función coseno elevado al cuadrado, que se eleva o levanta para compensar la atenuación del filtro. La constante de elevación se ajusta según la tasa de símbolos y la relación de amplitud de la señal.

En la sección del canal de comunicación no se realiza cambios, mientras que en el receptor se configura el segundo filtro coseno levantado que está ubicado antes del fotodetector PIN con la misma frecuencia central para cada canal. Si el segundo filtro tiene la misma característica, entonces la señal que está presente en su entrada repetirá su respuesta de impulso, esto significa que el filtro se adaptará a la señal dada.

^[3] La interferencia entre símbolos, es un fenómeno que ocurre en las comunicaciones digitales donde los símbolos transmitidos en un canal de comunicación se superponen y se afectan mutuamente debido a la distorsión del canal y otros factores [48].

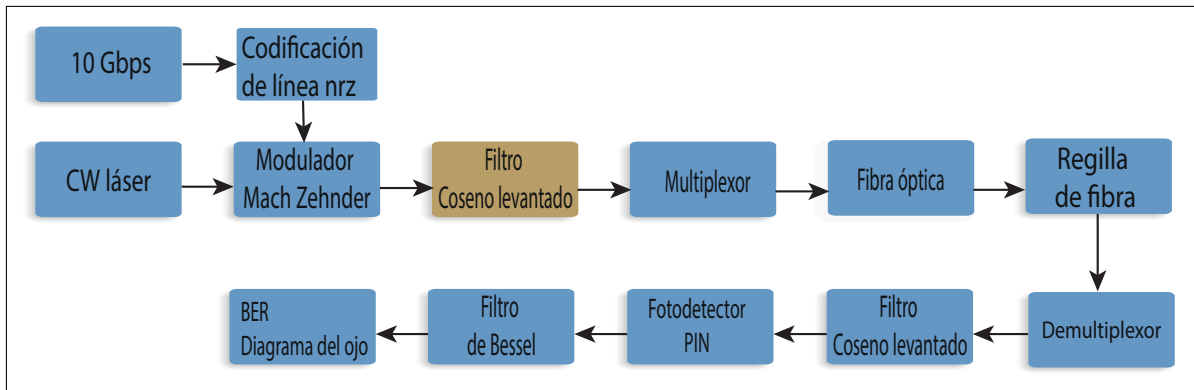


Figura 2.11: Vista esquemática modificada para la simulación de la red PON con tecnología UDWDM usando filtro óptico coseno levantado.

En la Tabla 2.8 se muestran los parámetros de configuración del filtro, el factor de roll-off es de 0.5, este valor permite controlar el grado de suavizado respecto a la respuesta de frecuencia de un filtro ideal, que corresponde al nivel de los lóbulos laterales de la respuesta de impulso. También hay que tener en cuenta que el ancho de banda de la señal se concentra en un cierto rango de frecuencia; esto es importante para los sistemas de comunicación porque la limitación del ancho del canal es necesaria para eliminar la interferencia entre canales adyacentes. Finalmente se verifica si el uso del filtro fue conveniente, comprobando la calidad de la señal a través del BER y del diagrama del ojo, utilizando el analizador de BER. Para configurar la separación entre canales se lo debe realizar de la misma manera que el primer escenario.

Tabla 2.8: Parámetros del Filtro coseno levantado.

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia Central	193.100	THz
Roll-off	0.5	-
Ancho de banda	2*Bit rate	GHz

Para simular el número de usuarios que se conectan a la red se utiliza un atenuador óptico en el canal 1 a una velocidad de transmisión de 10 Gbps, a una distancia de 10 km y a una separación de 25 GHz. Este elemento permite analizar el comportamiento del canal mientras se varía la atenuación entre un valor de 1 dB a 47 dB. Es importante mencionar que el atenuador se ubicó únicamente para la simulación con el filtro coseno levantado; los resultados y el análisis respectivo se realiza en el capítulo 3.

2.4.3 Tercer escenario: Simulación utilizando un Filtro de gauss

Para el tercer escenario también se muestra un diagrama de bloques representado en la Figura 2.12 y en el simulador mediante la Figura 2.15. Para este caso se usa un filtro de Gauss que es un filtro eléctrico cuya función transitoria de pulso es una función gaussiana [4] utilizada para modelar la respuesta espectral de los filtros que se utilizan para eliminar el ruido y otras interferencias en la señal óptica, está diseñado para no tener sobreimpulso en la función transitoria y para maximizar la constante de tiempo, es decir no habrá un aumento temporal en la respuesta del filtro que supere el nivel de la señal de entrada, esto garantiza una mayor calidad en la señal de salida [49].

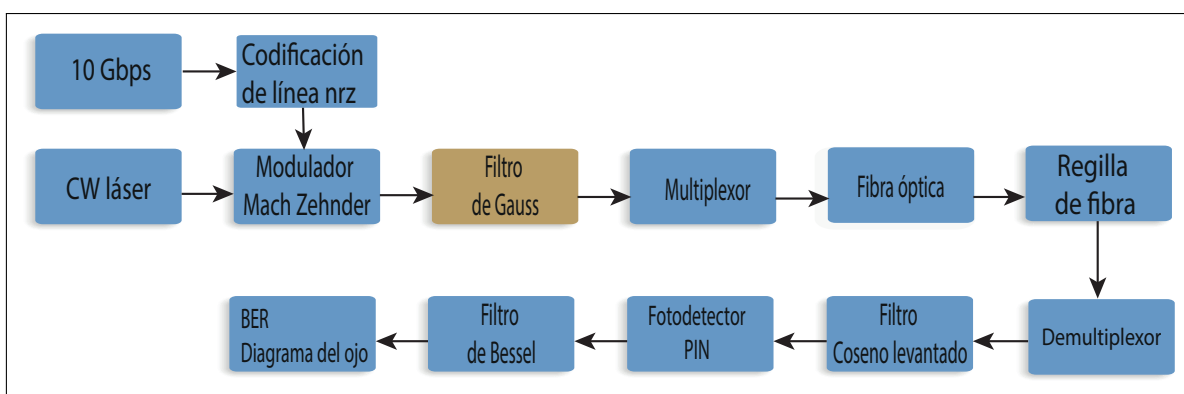


Figura 2.12: Vista esquemática modificada para la simulación de la red PON con tecnología UDWDM usando filtro óptico de Gauss.

El filtro está configurado con los parámetros de la Tabla 2.9 y con la con la misma frecuencia central según corresponda a cada canal (Tabla 2.7). En el canal de comunicación y en el receptor la configuración es la misma que en el caso de los escenarios uno y dos. Finalmente también se utiliza el analizador BER que se encarga de calcular automáticamente su valor y muestra el diagrama de ojo.

Tabla 2.9: Parámetros del Filtro gaussiano para el canal 1.

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia Central	193.100	THz
Ancho de banda	2*Bit rate	GHz
Orden Super Gaussiano	1	-

[4] La función gaussiana es una función matemática que describe la forma en que se distribuye la energía de la señal alrededor de su frecuencia central [49].

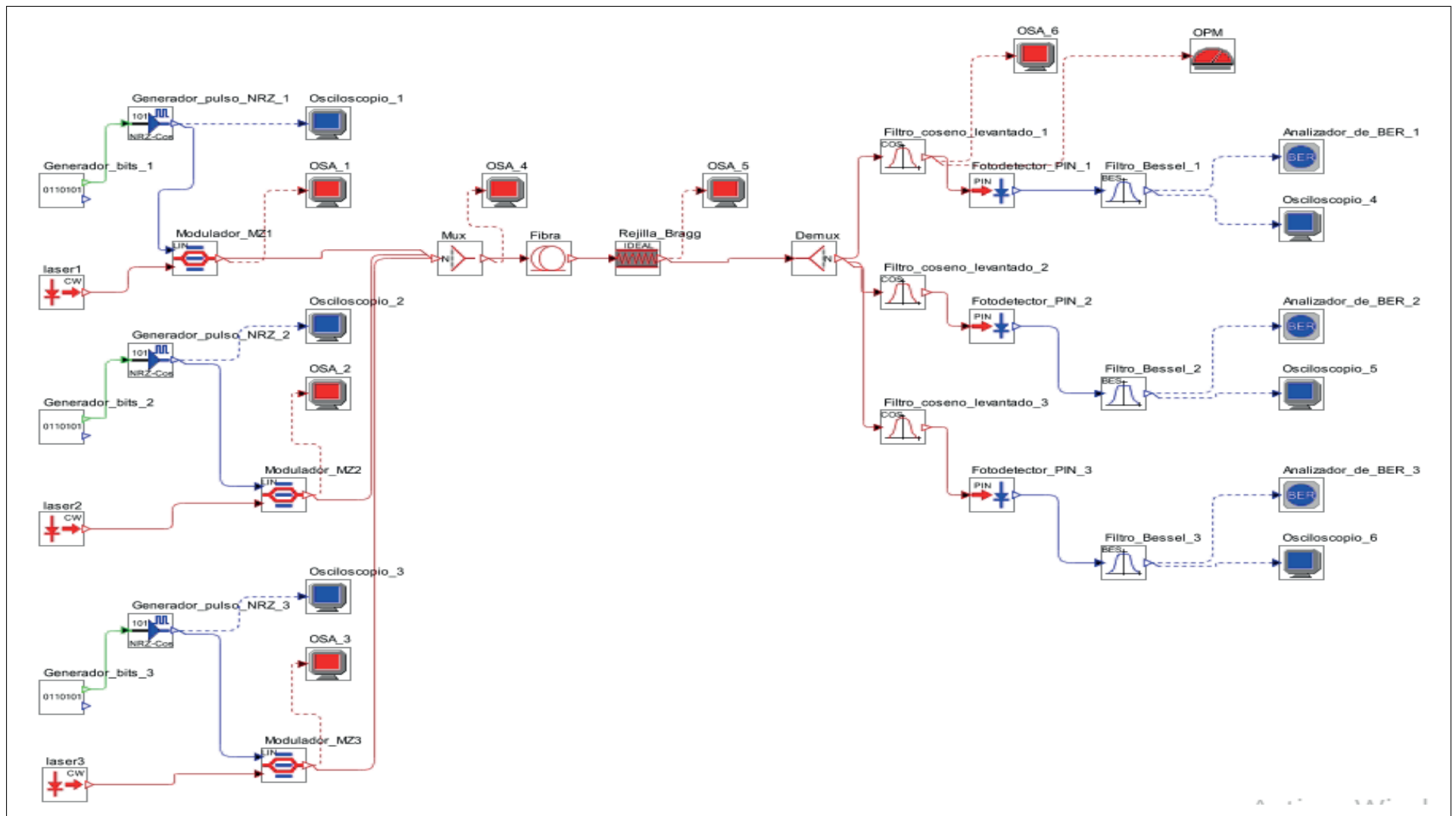


Figura 2.13: Simulación sin utilizar un filtro.

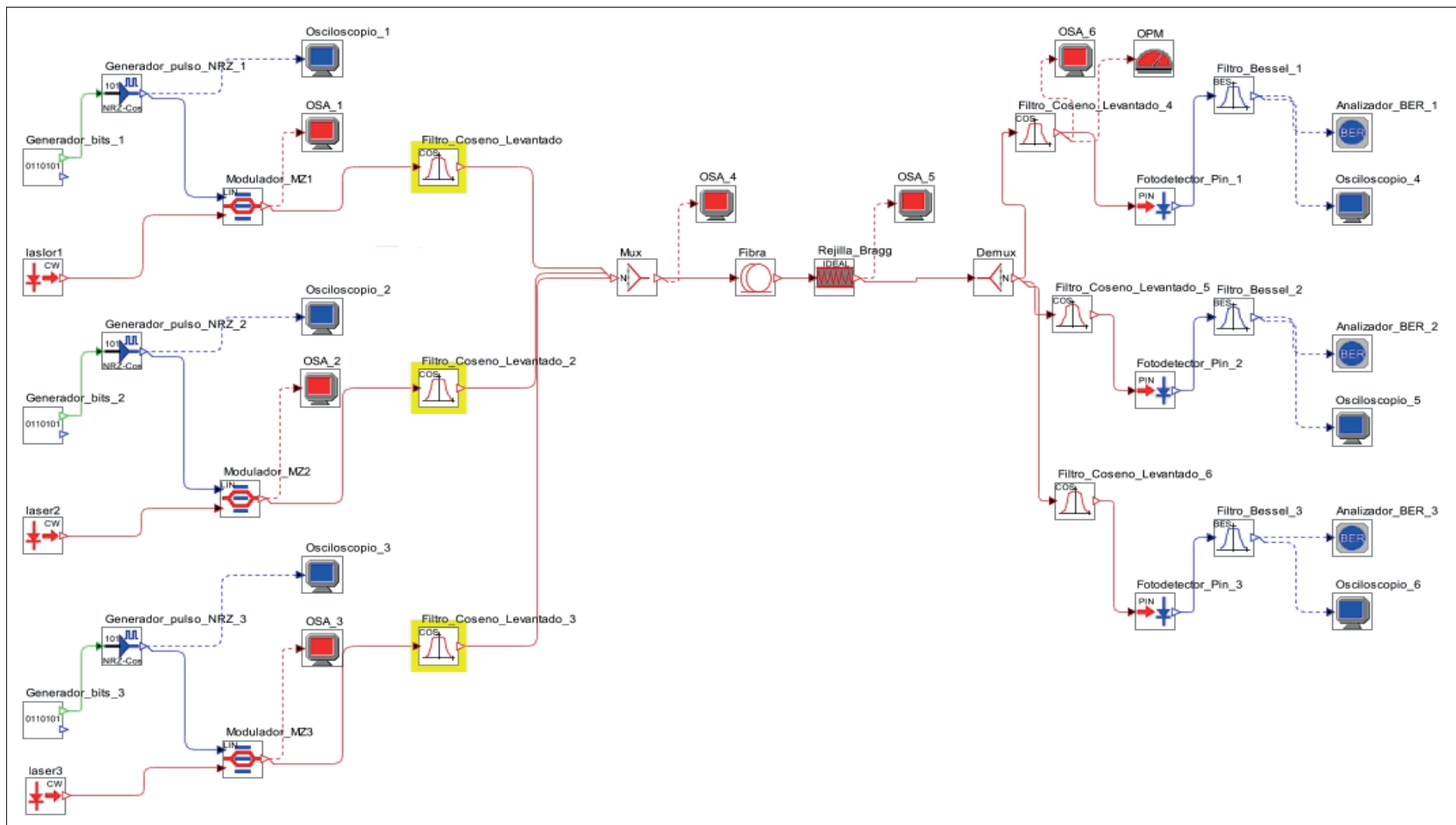


Figura 2.14: Simulación utilizando un Filtro coseno levantado.

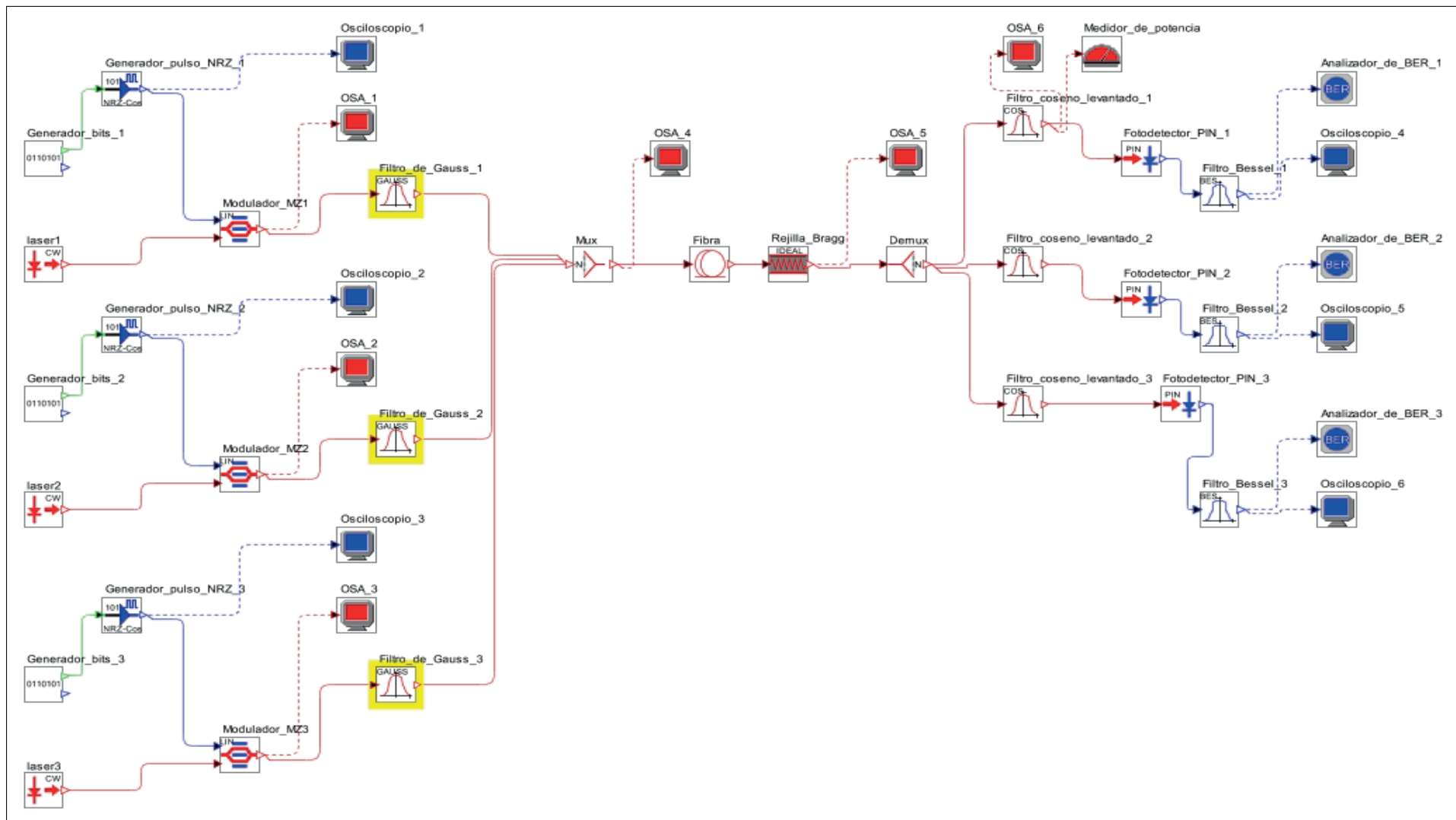


Figura 2.15: Simulación utilizando un Filtro de gauss.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en Optsim para una red PON usando tecnología UDWDM. Donde se evalúa la calidad de la señal en recepción para cada canal, variando en tres escenarios parámetros como la velocidad de transmisión de 10 Gbps a 17 Gbps, distancias desde 10 km a 20 km y separación entre canales de 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz, además, se compara el uso de los filtros: coseno levantado y de gauss. Cada canal es una longitud de onda de luz que se transmiten simultáneamente a través de la fibra óptica.

3.1.1 Resultados del primer escenario: Simulación sin utilizar un filtro

- **Separación entre canales de 25 GHz:** En la Figura 3.1 se observa el desempeño de los tres canales en términos de BER, en donde la curva más baja de BER indica la mejor calidad de señal y la mayor capacidad de transmisión. Es importante aclarar que para el presente trabajo se ha considerado valores de BER de 10^{-9} , el mismo que es recomendado por la ITU cuando no se utiliza corrección de errores hacia adelante (FEC: Forward Error Correction) [1]

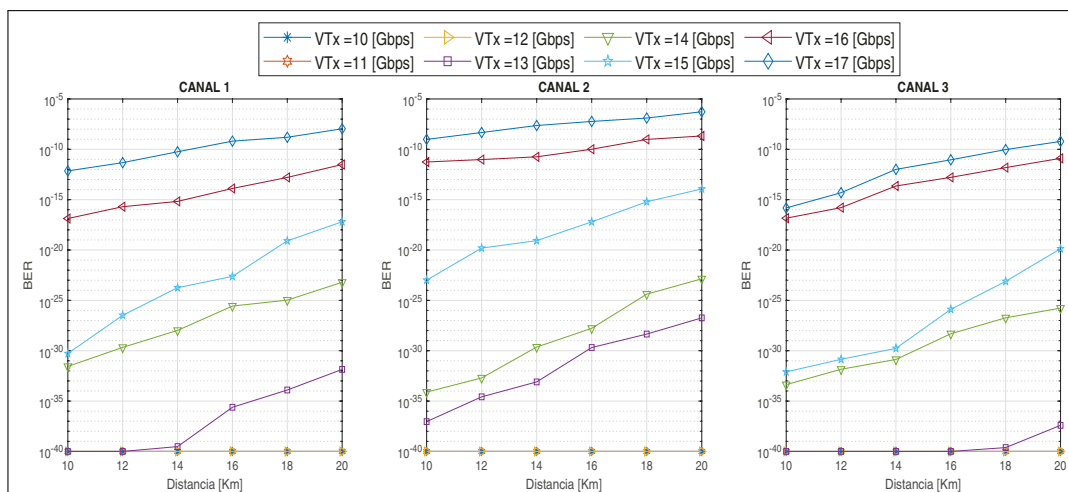


Figura 3.1: BER vs. distancia para una separación entre canales de 25 GHz.

[1] FEC es una técnica de codificación que utiliza información redundante en la transmisión de datos para permitir al receptor detectar y corregir errores en la recepción de los datos [50].

A continuación se describen los resultados obtenidos para el primer escenario en cada uno de los canales.

- ✧ **Canal 1:** Para una distancia de 10 km a 12 km a una velocidad de transmisión de 10 Gbps a 12 Gbps se obtiene un BER constante de 10^{-40} mientras que para una distancia de 14 km a 20 km a una velocidad de transmisión de 13 Gbps el BER empieza a aumentar de 10^{-40} a 10^{-32} . A partir de una velocidad de transmisión de 14 Gbps a 17 Gbps a medida que esta incrementa la tasa de error crece; sin embargo hasta los 18 km aún existe transmisión considerando que 10^{-9} es un valor de BER admisible, es decir están alcanzando los límites de transmisión. La atenuación y el ruido presentes en el medio de transmisión empiezan a afectar significativamente la calidad de la señal a distancias mayores a 20 km y velocidades superiores a 17 Gbps, por tanto conduce a un aumento del BER.
- ✧ **Canal 2:** En el caso del segundo canal se puede observar que de los tres canales el canal 2 es el que mayor sufre las consecuencias de fenómenos como la atenuación, la cual aumenta con la longitud de la fibra óptica y la distancia, afectando la transmisión, es decir, disminuye la intensidad de la señal a medida que se propaga a través de la fibra óptica, por esta razón, la señal se vuelve más débil. Por ejemplo, a 16 Gbps a una distancia de 10 km a 12 km se obtiene un BER de 10^{-23} que aumenta progresivamente a 10^{-20} , mientras que a una distancia más larga como 20 km el BER sigue aumentando hasta 10^{-14} .
- ✧ **Canal 3:** En este canal para velocidades de transmisión de 10 Gbps a 13 Gbps de 10 km a 18 km el BER es de 10^{-40} con una variación de 10^{-40} a 10^{-37} cuando la distancia aumenta a 20 km, debido a fenómenos ópticos que empiezan a presentarse en el canal. Mientras que para 14 Gbps y 15 Gbps el BER a pesar que aumenta de 10^{-33} y 10^{-20} , se encuentra dentro del valor permitido, es decir, el BER es menor a 10^{-9} . Los valores de BER en el canal 3, indican que tiene un mejor rendimiento comparado con el canal 1 y 2. En los sistemas de comunicaciones ópticas, un BER alto de 10^{-8} significa que hay errores en la transmisión, es decir, la señal recibida no es exactamente la misma que la señal transmitida, lo que puede resultar en errores de decodificación, retraso en la transmisión y pérdida de información.

❑ **Separación entre canales de 20GHz:** Con el fin de verificar el comportamiento de los canales se reduce su separación de 25 GHz a 20 GHz. En la Figura 3.2 se observan los resultados del BER vs. distancia para los 3 canales y a continuación se describen cada uno.

❖ **Canal 1:** Al comparar los valores de la Figura 3.2 con los valores de la Figura 3.1, el BER permanece constante a 10^{-40} a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 11 Gbps. De igual modo, se observa que a 20 GHz de separación a partir de 12 Gbps hasta 17 Gbps la tasa de error aumenta progresivamente con la distancia y la velocidad de transmisión. Cuanto mayor sea la distancia entre el emisor y el receptor, más ruido habrá en la señal. Esto afecta la calidad de la señal, es decir, el BER aumentó de 10^{-33} a 10^{-3} , donde 10^{-3} ya no se considera un BER aceptable. Por otro lado, a medida que la velocidad de transmisión aumenta, la dispersión cromática de la señal se vuelve más pronunciada, esto significa que el efecto de la dispersión cromática en la señal se vuelve más fuerte a medida que aumenta la velocidad de transmisión, lo que también resulta en un mayor BER.

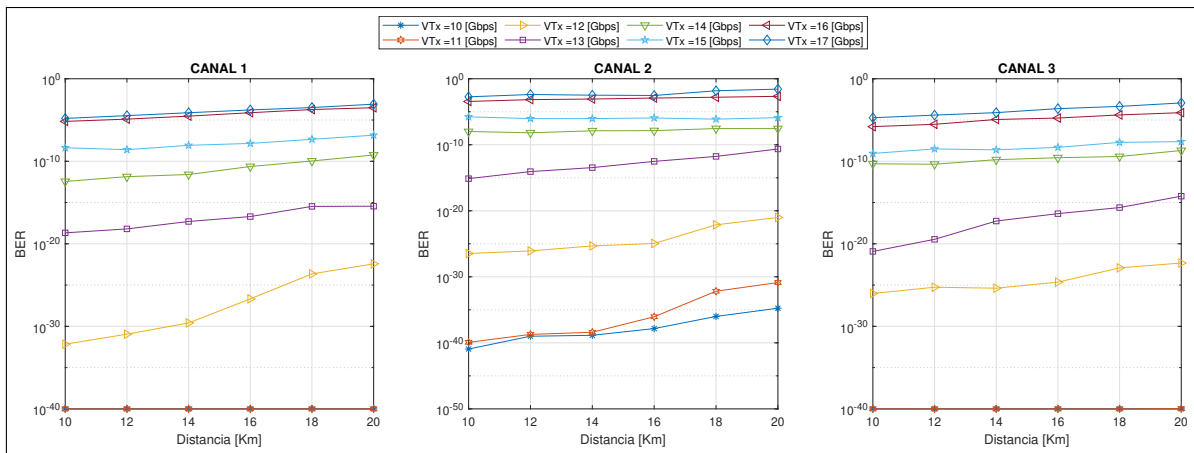


Figura 3.2: BER vs. distancia para una separación entre canales de 20GHz.

❖ **Canal 2:** Como se mencionó previamente, el canal 2 es el más afectado por los fenómenos de atenuación y dispersión cromática. Si bien anteriormente a 25 GHz de separación entre canales el BER se mantenía constante a 10^{-40} a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 11 Gbps esto ya no sucede a 20 GHz y se debe a la degradación de la señal a medida que se propaga a través del canal de transmisión, esto contribuye al aumento del BER. Para velocidades de 12 Gbps y 13 Gbps el BER es aceptable en un rango de 10^{-27} a 10^{-10} a distancias de 10 km a 20 km. Mientras que a partir de 14 Gbps hasta 17 Gbps incluso a

distancias cortas como 10 km la tasa de error es significativamente alta de 10^{-8} a 10^{-3} , esto significa que la transmisión no cumple con el límite máximo de BER de 10^{-9} .

✧ **Canal 3:** Con respecto a este canal, para una tasa de bit de 10 Gbps a 15 Gbps, a distancias de 10 km hasta 20 km el sistema UDWDM es fiable porque el BER se encuentra en el rango de 10^{-40} a 10^{-9} y permite una transmisión estable, es decir, que el canal tiene la capacidad de mantener la calidad de la señal sin ser afectado por perturbaciones o ruido. Por otro lado, para una tasa de bit de 16 Gbps y 17 Gbps existe una transmisión deficiente porque a distancias de 10 km a 20 km el BER es alto, es decir, se encuentra en un rango de 10^{-6} a 10^{-4} . También es conveniente mencionar que existe similitud en los valores de BER a 10 Gbps y 11 Gbps del canal 1 y 3 con un BER DE 10^{-40} .

□ **Separación entre canales de 15 GHz:** En este caso la separación entre canales es mucho más corta que en los anteriores. Analizando los valores de BER en la Figura 3.3 se observa que para los tres canales en la mayor parte la transmisión es deficiente, es decir, los valores son mayores a 10^{-9} , hay ciertas excepciones que se describen a continuación para cada canal.

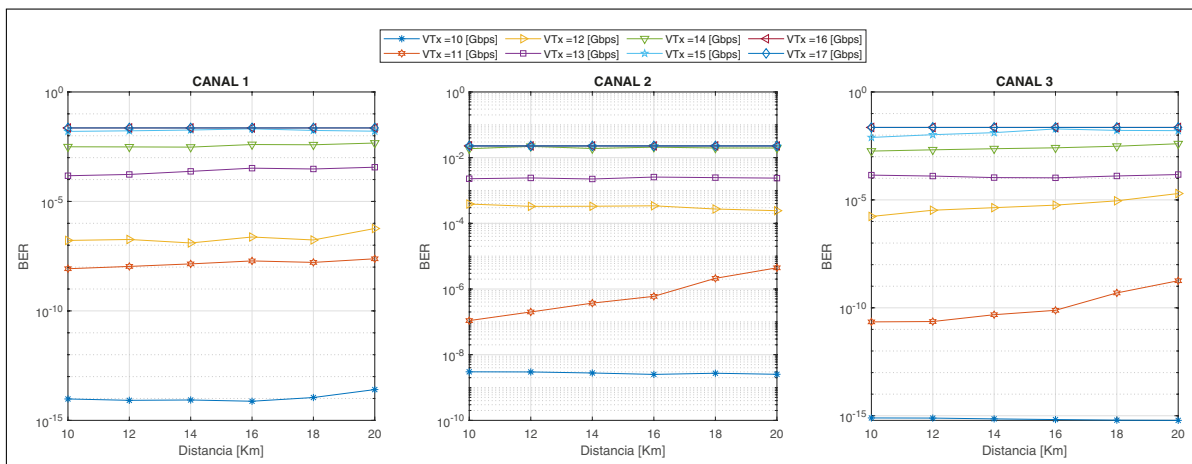


Figura 3.3: BER vs. distancia para una separación entre canales de 15GHz.

✧ **Canal 1:** Se observa que solo es posible lograr una transmisión efectiva a una tasa de 10 Gbps en un rango de distancias comprendido entre 10 km y 20 km con un valor de BER aproximado de 10^{-15} . Sin embargo, para tasas de bits más altas, entre 11 Gbps y 17 Gbps, la transmisión se ve comprometida porque la calidad de la señal deteriora debido a los fenómenos ópticos que afectan al canal, esto

se ve reflejado en los valores de BER que aumentan a 10^{-8} . Esta separación de 15 GHz tiene impacto en los tres canales, esto se debe a que la longitud de onda de cada canal es ligeramente diferente y puede causar una distorsión en la señal que se transmite, porque los canales están relativamente cerca uno del otro en términos de frecuencia. Esta separación de 15 GHz demuestra que el acercamiento de los canales tiene un impacto importante en la calidad de la transmisión, es decir, la distorsión o interferencia en una señal puede extenderse a los canales adyacentes y afectar la calidad de la señal que se transmite en ellos. En otras palabras, la separación entre canales es crítica para mantener una alta calidad de transmisión. Si los canales están demasiado cerca entre sí se puede tener dificultades para separar y decodificar correctamente las señales transmitidas en cada canal, esto aumentaría el BER y reduciría la calidad de la transmisión en general.

- ✧ **Canal 2:** De la misma manera, luego de realizar la simulación para este canal, se puede apreciar que no se logra una transmisión eficiente para ninguna de las velocidades de transmisión (10 Gbps a 17 Gbps), porque la señal se atenúa y el BER es de 10^{-8} , este es un valor elevado. Estos resultados es debido a la interferencia de canales adyacentes, atenuación, dispersión cromática, entre otros. En el caso de los canales adyacentes en un sistema de multiplexación como UDWDM, la separación entre ellos es crítica para minimizar la interferencia y asegurar la transmisión, por eso se recomienda seguir la línea de investigación para mejorar la transmisión especialmente a altas velocidades.
- ✧ **Canal 3:** Tras el análisis del canal, el mejor valor de BER obtenido para este caso es 10^{-15} a 10 Gbps, incrementándose progresivamente desde 10^{-11} hasta 10^{-9} al alcanzar 11 Gbps. Para las velocidades de transmisión restantes (12 Gbps a 17 Gbps) no hay una transmisión confiable de datos, esto quiere decir que la tasa de error de bits es alta (10^{-8} a 10^{-2}), esto significa que una gran cantidad de los bits transmitidos no se reciben correctamente en el receptor; debido a estos valores el canal no es válido para dichas velocidades.

3.1.2 Resultados del segundo escenario: Simulación utilizando un filtro coseno levantado.

Después de presentar los resultados del primer escenario donde se muestra las curvas del BER vs. distancia sin usar filtros, en esta sección se presenta la misma simulación

incorporando un filtro coseno levantado (Figura 2.14). La utilización de este filtro permite verificar si el rendimiento es el adecuado para optimizar los resultados del primer escenario. Se realiza la configuración para separaciones de 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz.

En la Figura 3.4 se presenta el valor de BER vs. distancia con filtro coseno levantado y separación entre canales de 25 GHz. Si se compara los resultados del valor de BER de la Figura 3.1 con la misma separación, se observa que el rendimiento del canal mejoró para todas las tasas de bits, logrando así en el **canal 1** obtener un BER de 10^{-40} para una velocidad de transmisión de 10 Gbps hasta 14 Gbps para distancias de 10 km a 20 km, luego aumenta gradualmente donde finalmente a 17 Gbps se alcanza un BER permitido de 10^{-10} .

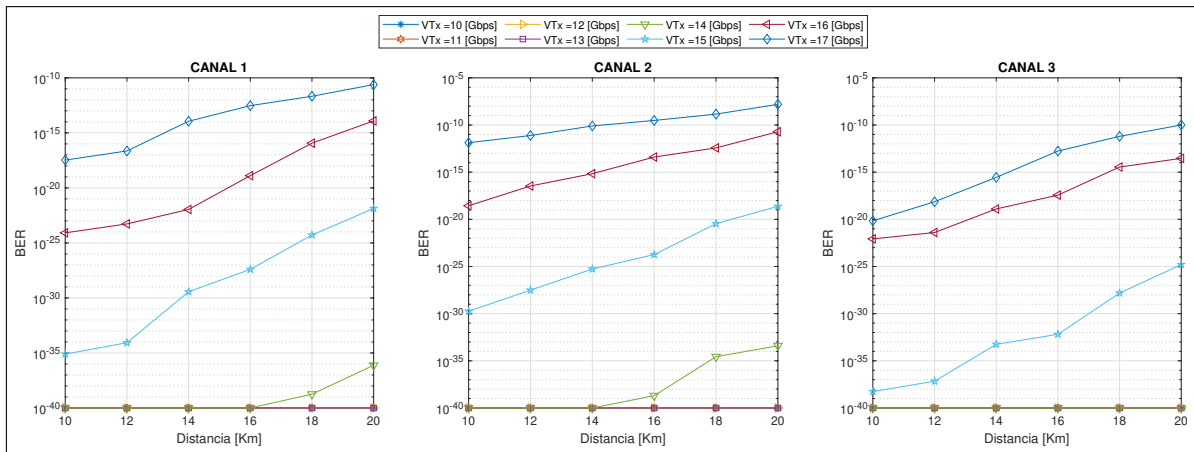


Figura 3.4: BER vs. distancia con filtro coseno levantado y separación entre canales de 25 GHz.

Asimismo para tasas de transmisión de 10 Gbps hasta 15 Gbps en el **canal 2** se logra mejorar el valor del BER en un rango de 10^{-40} a 10^{-18} comparado con los resultados del valor de BER de la Figura 3.1 donde no se usa filtro y se obtiene el valor del BER en el rango de 10^{-40} a 10^{-14} . Mientras que en el tramo de 10 km hasta 18 km, a 17 Gbps utilizando el filtro el BER alcanza valores en el rango de 10^{-12} a 10^{-9} a diferencia de los resultados sin filtro que el valor de BER es mayor a 10^{-8} a partir de los 12 km y a 20 km se pierde la calidad de la señal transmitida debido a la propagación de la señal a distancias más largas a través de la fibra óptica, que experimenta atenuación y distorsión. Por último para el **canal 3** se constata el adecuado funcionamiento, mucho mejor que el canal 1 y 2, por cuanto para este canal se obtienen mejores valores de BER para todas las tasas de transmisión (10 Gbps a 17 Gbps) en el rango de 10^{-40} hasta 10^{-10} , por estos valores se puede decir que hay menos bit errados en el canal 3.

En la Figura 3.5 se observa el valor del BER vs. distancia utilizando el filtro coseno levantado y separación entre canales a 20 GHz. Al comparar los valores de BER de la Figura 3.2 con los valores de la Figura 3.5 se observa que en los **canales 1 y 2**, las tasas de transmisión de datos para las cuales el filtro es más eficiente es desde 10 Gbps hasta 14 Gbps en un rango de valores de BER de 10^{-40} a 10^{-10} , mientras que en el **canal 3** es hasta 15 Gbps porque se obtiene valores de BER hasta 10^{-9} respecto a la simulación sin filtro. Para las restantes tasas de transmisión (16 Gbps y 17 Gbps) el BER es similar a no utilizar el filtro, estos valores se encuentran en un rango de 10^{-6} a 10^{-3} . Por lo tanto, cuanto más cerca estén los canales en términos de longitud de onda, se evidencian los fenómenos ópticos indeseados como: la atenuación y la dispersión cromática afectan la calidad de la señal transmitida.

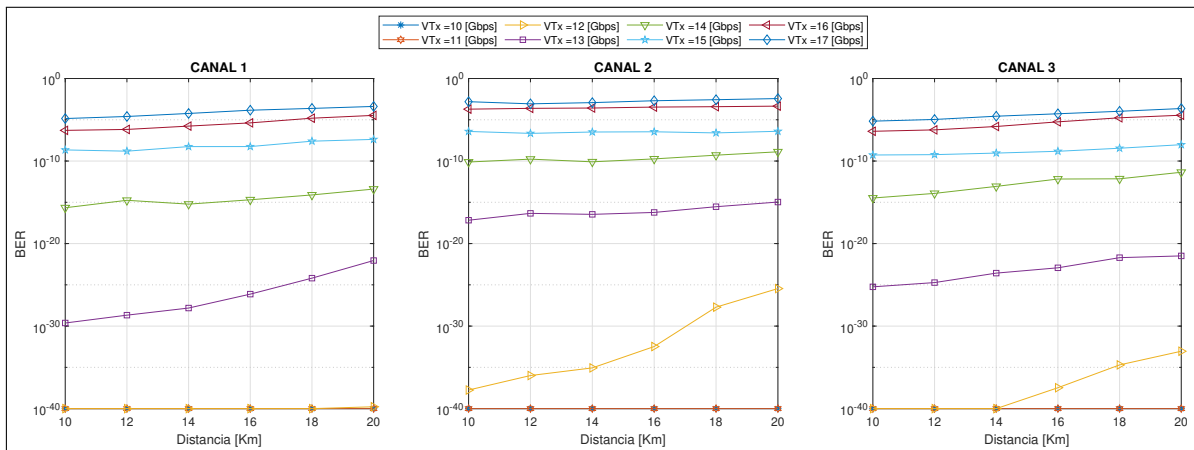


Figura 3.5: BER vs. distancia con filtro coseno levantado y separación entre canales de 20 GHz.

Al comparar los resultados de la Figura 3.3 con los resultados de la Figura 3.6 se observa que al usar el filtro coseno levantado y con separación entre canales de 15 GHz los tres canales mejoran el valor del BER a 10 Gbps, en el caso del **canal 1** también se logra un buen desempeño a 11 Gbps, el rango de los valores de BER es de 10^{-22} a 10^{-9} . Por otro lado, en el **canal 2** cuando no se usa el filtro no hay transmisión para ninguna tasa de bits, mientras que al usar el filtro a distancias de 10 km a 20 km se logra únicamente para 10 Gbps, obteniendo un BER de 10^{-14} hasta 10^{-12} . Por último, a una velocidad de transmisión de 11 Gbps, en el **canal 3** el valor de BER mejoró de 10^{-15} cuando no se utiliza filtro a 10^{-22} cuando se usa el filtro coseno levantado.

De los resultados obtenidos de la simulación para las diferentes separaciones de canal (25 GHz, 20 GHz y 15 GHz) y para ciertas tasas de transmisión se aprecia que el uso del filtro coseno levantado se obtiene mejores valores de BER respecto al primer escenario, ya que

optimiza el rendimiento del canal óptico en parámetros como la eficiencia del sistema y la calidad de la señal transmitida, esto se demuestra cuando los valores de BER se encuentran dentro del rango de 10^{-40} a 10^{-9} . Sin embargo, no siempre será útil el uso del filtro debido a que como se observó los resultados a tasas de transmisión superiores a 15 Gbps y separación entre canales de menores a 15 GHz el BER aumenta.

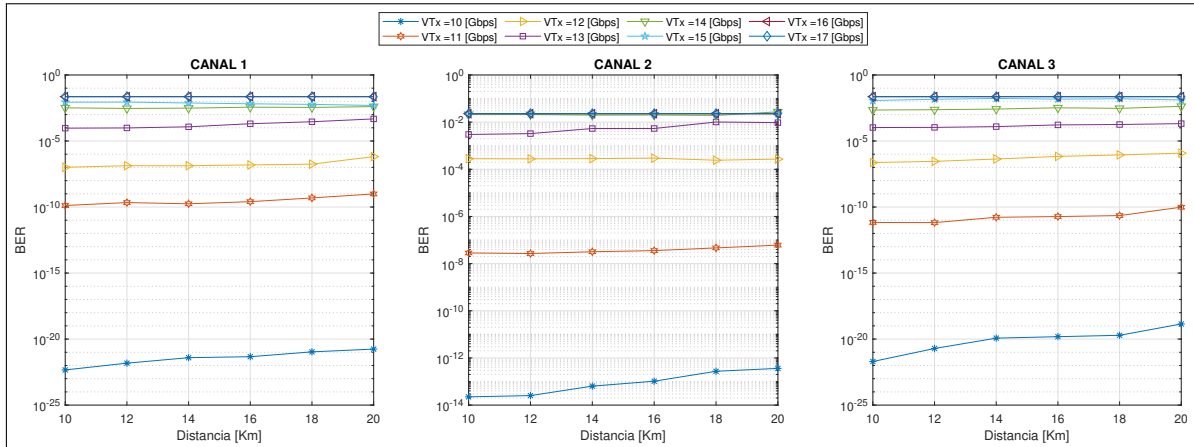


Figura 3.6: BER vs. distancia con filtro coseno levantado y con separación entre canales de 15 GHz.

Hay varias razones por las cuales el filtro coseno levantado puede ser insuficiente. En primer lugar, la respuesta en frecuencia del filtro puede ser afectada por la dispersión de la señal en el medio óptico, especialmente a altas tasas de transmisión mayores a 17 Gbps. Otra razón es el largo recorrido de fibra, es decir, si la señal recorre una larga distancia de fibra óptica (superior a 20 km), el filtro coseno levantado puede no ser suficiente para compensar la dispersión cromática.

Además, la alta velocidad de la señal óptica y la presencia de ruido en el medio óptico pueden afectar la eficacia del filtro coseno levantado, porque a medida que la velocidad de la señal aumenta, la duración de cada bit de la señal disminuye. Esto puede provocar un solapamiento entre bits adyacentes o también conocido como ISI, causando distorsión en la forma de onda de la señal. En estas condiciones, la señal puede sufrir una atenuación significativa y el BER también aumentaría, por lo tanto, la calidad de la transmisión se ve afectada.

3.1.3 Resultados del tercer escenario: Simulación utilizando un filtro de gauss

En esta sección se compara los resultados usando el filtro de gauss (Figura 3.7) y sin filtro (Figura 3.1). El objetivo es analizar la eficiencia dentro del canal óptico con respecto al primer escenario. La simulación se la puede observar en la (Figura 2.15) y en el siguiente apartado se realiza la comparación de filtros.

Al analizar la calidad de la transmisión en los **canales 1, 2 y 3** que están separados 25 GHz, que aunque los valores del BER se encuentren dentro de los rangos permitidos se observa que el uso del filtro de gauss produce aumento en el BER en comparación a cuando no se usa, especialmente para velocidades de transmisión entre 10 Gbps y 15 Gbps, debido a que el filtro de gauss tiene un ancho de banda más amplio que el de otros filtros, como el filtro coseno levantado podría causar mayor ISI entre los canales cercanos y reducir la calidad de la señal. Sin embargo, para velocidades de 16 Gbps y 17 Gbps, el BER mejora ligeramente utilizando el filtro. En definitiva el filtro no siempre es muy eficiente en estas condiciones y su uso dependerá de las características específicas de la aplicación y del sistema de transmisión óptica.

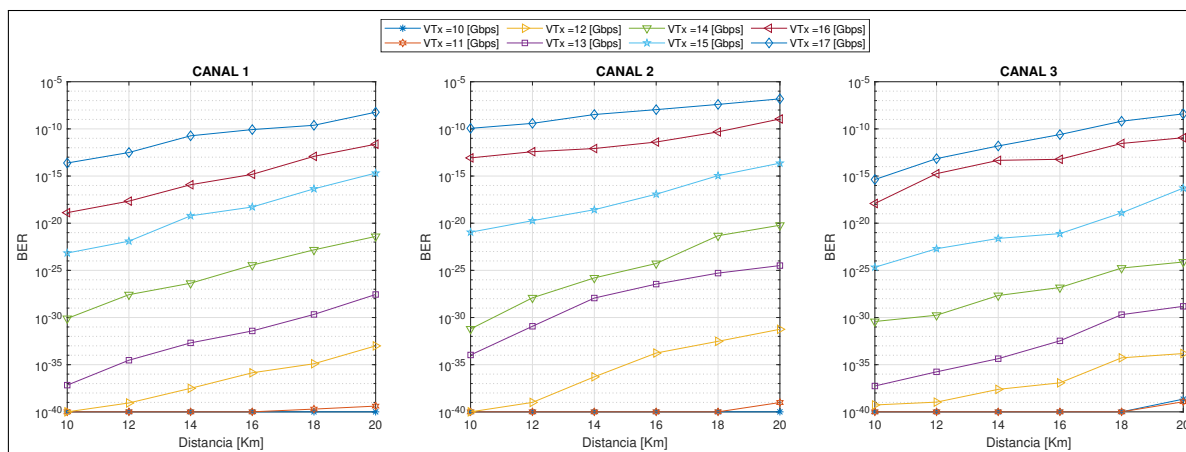


Figura 3.7: BER vs. distancia con filtro de gauss y separación entre canales de 25 GHz.

En la Figura 3.8 se observa los valores de BER vs. distancia con filtro de gauss y separación entre canales de 20 GHz. Los valores de BER de los canales **canales 1 y 2** aumentan respecto a los valores de BER de la Figura 3.2 sin utilizar filtro, por ejemplo, en la Figura 3.8 en canal 1, a una velocidad de transmisión de 12 Gbps y a una distancia de 10 km, el valor de BER es de 10^{-30} , mientras que para la misma velocidad de transmisión y distancia

cuando no se usa el filtro (Figura 3.2) el valor de BER es 10^{-32} , al comparar estos dos valores se observa que el BER aumenta cuando se usa el filtro, lo mismo sucede para el canal 2 y el resto de tasas de transmisión.

En el **canal 3**, a una velocidad de transmisión de 11 Gbps sin utilizar el filtro, conforme varía la distancia de 10 km a 14 km los valores de BER aumentaron de 10^{-40} sin filtro a 10^{-35} con filtro; el análisis para las otras distancias y velocidades de transmisión es igual. Entonces, el uso del filtro en lugar de disminuir los bit errados los aumenta, mientras que a velocidades de transmisión de 15 Gbps a 17 Gbps los valores de BER son similares.

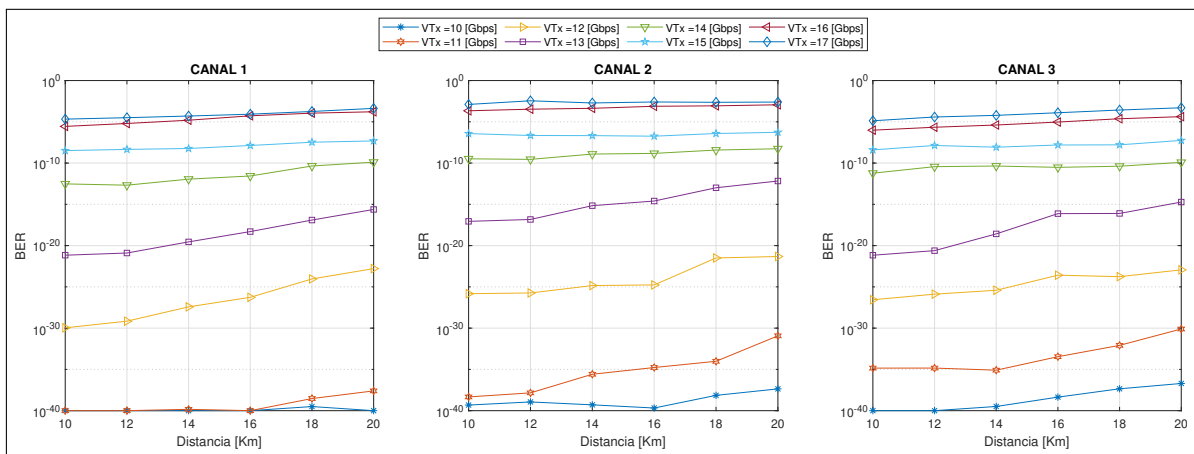


Figura 3.8: BER vs. distancia con filtro de gauss y separación entre canales de 20 GHz.

La última prueba con el filtro se realiza a una separación de 15 GHz (Figura 3.9). En el **canal 1** los valores de BER de la Figura 3.3 donde no se utiliza filtro en comparación con los valores de BER de la Figura 3.9 utilizando el filtro de gauss, se observa que a una velocidad de transmisión de 10 Gbps a una distancia de 10 km, los valores de BER disminuyen de 10^{-16} a 10^{-14} en comparación a cuando no se usa el filtro. En el **canal 2**, aunque el valor de BER disminuye ligeramente cuando se transmite a 11 Gbps, no alcanza el umbral recomendado por la ITU de 10^{-9} , lo mismo pasa para el resto de tasas de transmisión. En referencia al **canal 3** de la Figura 3.9 para tasas de transmisión de 10 Gbps y 11 Gbps obtienen el mejor BER, es decir, este valor es menor a de 10^{-9} , mientras que para el resto de tasas de transmisión el valor de BER es mayor a de 10^{-9} , es decir, hay más errores en la transmisión de datos y, por lo tanto, una disminución en la calidad de la señal transmitida.

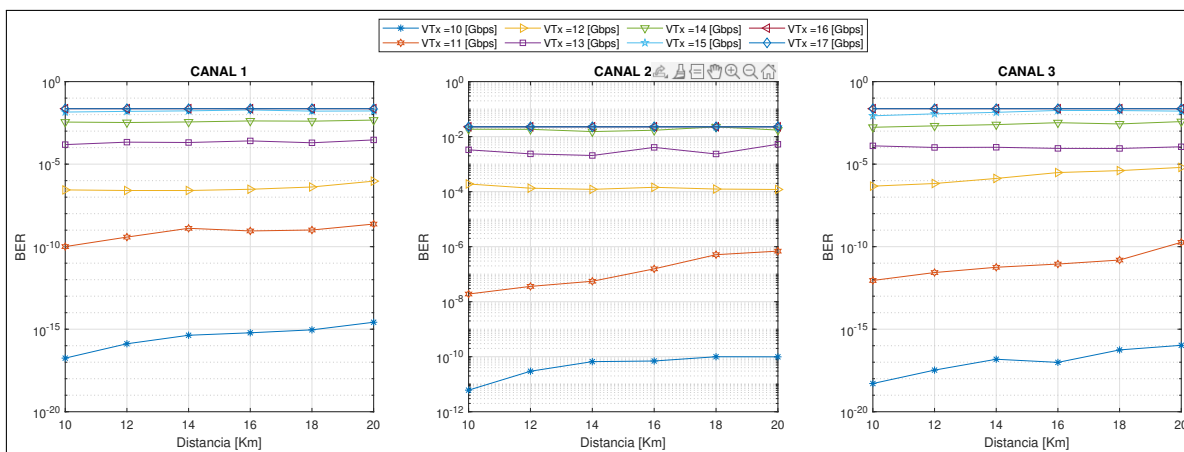


Figura 3.9: BER vs Distancia con filtro de gauss y separación entre canales de 15 GHz.

3.1.4 Comparación de Filtros

A continuación se evalúa el rendimiento del filtro de gauss, filtro coseno levantado y sin filtro mediante la estimación del BER para determinar cuál es más adecuado para esta aplicación específica en un sistema UDWDM.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos del BER a una distancia de 10 km, velocidad de transmisión de 10 Gbps y separación de 25 GHz entre los canales. El color verde resalta que los valores de BER obtenidos para los tres canales y tres escenarios es aceptable, es decir, son menores a 10^{-9} . En cuanto a los valores de BER del escenario con filtro coseno levantado, se observa que los bits errados son menores en comparación con los valores del escenario sin filtro y del escenario con filtro de gauss. Mientras que utilizando el filtro de gauss los valores de BER aumentan con respecto al escenario sin filtro y al escenario con filtro coseno levantado. Si bien los valores de BER para los tres canales se encuentran en un rango permitido, en el caso del canal 1 es mejor obtener un de BER de 10^{-36} respecto a un BER de 10^{-31} o 10^{-24} , porque para el primero se obtiene menos bits errados en recepción, mientras que un BER de 10^{-24} significa que los bits errados aumentan en comparación con los otros dos valores de BER.

Tabla 3.1: Valores de BER para comparación de filtros a velocidad de transmisión de 15 Gbps, a una separación entre canales de 25 GHz.

BER			
Tipos de escenarios	Canal 1	Canal 2	Canal 3
Sin filtro	5E-31	1E-23	8E-33
Filtro Gaussiano	7E-24	1E-21	2E-25
Filtro coseno levantado	8E-36	2E-30	6E-39

Adicionalmente, se realizó una evaluación del rendimiento de los filtros, variando la separación entre canales. La Tabla 3.2 muestra los resultados del BER a una distancia de 10 km, separación de 20 GHz entre canales y se mantiene la tasa de transmisión en 15 Gbps. Los datos resaltados en verde representan los valores de BER permitidos, es decir, se considera que la transmisión es de buena calidad. Por otro lado, los valores resaltados de color rojo, específicamente en el canal 2, muestran que existe más bits errados respecto a los valores de BER en los canales 1 y 3, sobre todo no cumplen con el valor de BER aceptable de 10^{-9} .

Tabla 3.2: Valores de BER para comparación de filtros a velocidad de transmisión de 15 Gbps, a una separación entre canales de 20 GHz.

BER			
Tipos de escenarios	Canal 1	Canal 2	Canal 3
Sin filtro	4E-09	2E-06	9E-10
Filtro Gaussiano	3E-09	4E-05	4E-09
Filtro coseno levantado	2E-09	4E-07	5E-10

Entre las posibles causas de los resultados anteriores están: la interferencia entre canales adyacentes debido a la estrecha separación entre ellos y la atenuación de la señal debido a la distancia de transmisión. También hay que considerar que el filtro de gauss tiene una respuesta de frecuencia más suave y más ancha que el filtro coseno levantado, por cuanto permite más energía en frecuencias más altas, pero también puede causar una mayor interferencia entre canales cercanos. En comparación con el filtro de gauss, el filtro coseno levantado tiene una respuesta de frecuencia más ajustada y mayor atenuación fuera del ancho de banda del canal, por consiguiente reduce la interferencia con los canales adyacentes, pero también puede causar una mayor distorsión de la señal.

En consecuencia, la elección del filtro adecuado dependerá de las necesidades específicas del sistema de comunicaciones en términos de ancho de banda, separación entre canales, tasa de transmisión, sensibilidad del receptor y otros factores. Por lo tanto, es importante realizar pruebas y evaluaciones para determinar el filtro más adecuado para un sistema de comunicaciones específico.

3.1.5 Simulación de usuarios

Después de analizar los resultados obtenidos, se observó que el filtro coseno levantado tiene un mejor rendimiento; para caracterizar el desempeño de la red se emplea un atenuador óptico variable como usuarios conectados a la red en el canal 1, configurado a 1 dB, este valor puede ser otro y no significa que 1 dB represente a un usuario; el valor del atenuador no representa directamente el número de usuarios conectados a la red, sino que es una forma de ajustar la carga en la red para evaluar su desempeño, la simulación se puede observar en el ANEXO II.

La simulación de usuarios es una herramienta que se utiliza para evaluar el desempeño de la red. Al simular diferentes niveles de tráfico conectados, se puede determinar cómo se comporta bajo diferentes condiciones y qué tan eficiente es en términos de capacidad y calidad de servicio.

Para simular una mayor carga a la red, se configura el atenuador al valor que se requiera, verificando la potencia recepción y del BER. Es necesario mencionar que cuando se configuró el atenuador entre 1 dB y 14 dB, no se presentó ninguna variación en el BER; por lo tanto, los resultados que se muestran en la Figura 3.10 simulan la presencia a partir 15 dB, y luego se varía progresivamente en incrementos de 2 dB hasta 47 dB para simular la presencia de más usuarios.

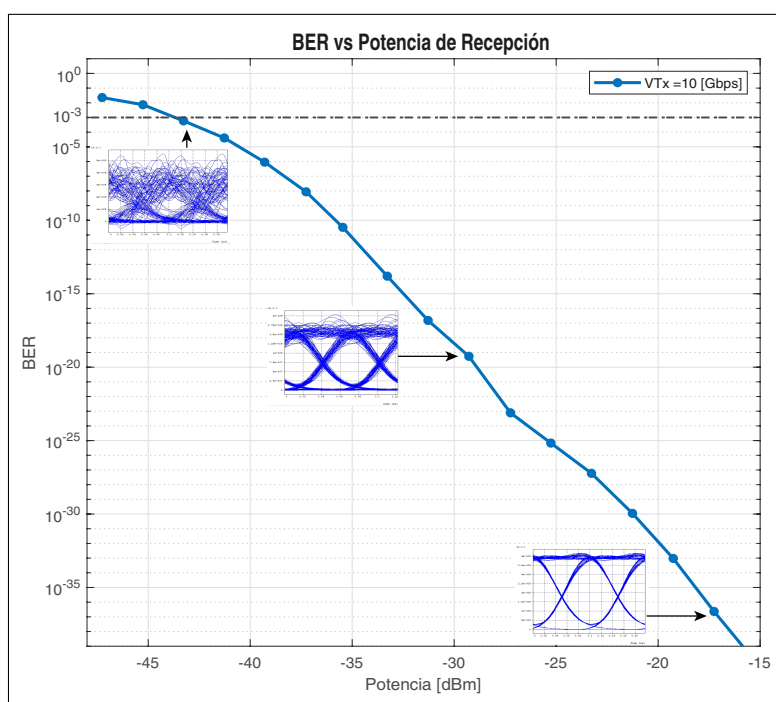


Figura 3.10: BER vs. potencia de recepción y separación entre canales de 25 GHz.

Al analizar la curva BER vs. potencia de recepción, en la Figura 3.10 se observa cómo el BER varía a medida que se modifica la potencia de recepción. El objetivo es determinar el nivel de potencia de recepción que minimiza el BER en el canal 1 del sistema UDWDM.

Al observar los resultados obtenidos en la simulación, cuando la potencia de recepción de -17 dBm, se observa un diagrama de ojo de alta calidad y un de BER bajo de 10^{-37} , este valor indica una tasa mínima de errores en la transmisión. En consecuencia, se puede afirmar que la configuración de la red UDWDM con el filtro coseno levantado y la potencia de recepción es efectiva para garantizar una transmisión confiable de datos a través del canal.

Por otro lado, para un valor de BER de 10^{-19} y potencia de recepción de -29 dBm, el diagrama de ojo ya presenta ciertas interferencias, por tal motivo hay una mayor cantidad de errores en la transmisión. El ojo no está completamente abierto, lo que sugiere que la señal tiene un margen de error más grande y es más susceptible al ruido y otras interferencias. En general, un BER de 10^{-19} es aún aceptable para muchos sistemas de comunicación, pero se considera menos robusto que un BER de 10^{-37} mencionado anteriormente.

Finalmente, para un BER de 10^{-3} , y potencia de recepción de -43 dBm, el diagrama de ojo está casi cerrado, lo que quiere decir que hay errores importantes en la transmisión y la calidad de la señal es deficiente. Esto no es deseable para los sistemas de comunicación digital de alta velocidad como UDWDM.

A medida que se agregan más usuarios, el nivel de señal disponible para cada uno disminuye, dicho de otro modo, provocar una reducción en la calidad de la señal recibida y una disminución en la potencia de recepción; esto puede afectar la capacidad del sistema para transmitir información de manera efectiva.

3.2 CONCLUSIONES

- A lo largo de este trabajo se han explorado los conceptos clave de la tecnología PON, incluyendo la arquitectura, los componentes y tipos de multiplexación, así como los beneficios de la tecnología UDWDM en términos de capacidad y eficiencia. Se ha realizado simulaciones de la red PON con tecnología UDWDM utilizando el software OptSim, en el que se desarrollan tres escenarios; para cada uno de ellos, se varió la distancia de transmisión de 10 km hasta 20 km, usuarios conectados a la red, la velocidad de transmisión de 10 Gbps a 17 Gbps y la separación entre canales a 25

GHz, 20 GHz y 15 GHz. Los resultados de la simulación indican que la tecnología UDWDM puede mejorar significativamente la capacidad y eficiencia de la red PON, permitiendo una mayor cantidad de usuarios y una mayor tasa de datos, siempre y cuando se tome en cuenta la separación adecuada de los canales.

- ❑ Al analizar los resultados obtenidos de la simulación se puede observar que existen ciertos parámetros de transmisión que influyen significativamente en el rendimiento de los sistemas UDWDM. Cuando la distancia entre los canales aumenta, se presentan varios fenómenos que puede provocar que el rendimiento del sistema de comunicación óptico no sea el adecuado, como son: i) la interferencia óptica entre los canales, lo que a su vez causa un aumento de la tasa de error y que se ve afectada por el nivel de potencia óptica de los canales, ii) la longitud de onda, iii) la relación de señal a ruido, iv) la dispersión modal y v) la dispersión cromática.
- ❑ Los tres escenarios de simulación proporcionan información valiosa sobre cómo la distancia, la velocidad de transmisión y la separación entre canales pueden alterar el BER y en mayor parte al canal 2 que es el más afectado por los fenómenos de atenuación y dispersión cromática de los canales adyacentes, mientras que el uso de los filtros coseno levantado y de gauss permiten mitigar hasta cierto punto estos efectos y mejorar la calidad de la señal sin embargo, a tasas de transmisión superiores a 15 Gbps y distancias mayores a 16 km el uso de los filtros ya no es muy efectivo porque el valor de BER es igual o menor a cuando no se utiliza filtros.
- ❑ El acercamiento de canales en UDWDM puede ofrecer beneficios como una mayor capacidad de transmisión de datos y la posibilidad de aumentar la velocidad de transmisión utilizando más ancho de banda. Sin embargo, también es importante tener en cuenta que este acercamiento puede producir fenómenos ópticos no deseados, como la interferencia entre canales y el aumento del ruido óptico. Por lo tanto, es importante considerar cuidadosamente configuración y diseño del sistema de transmisión para garantizar un rendimiento óptimo. En referencia a lo dicho anteriormente un separación entre canales a 25 GHz y distancias entre 10 km y 20 km el rendimiento del canal es el más adecuado en todos los escenarios, mientras que a 20 GHz y en especial a 15 GHz el BER aumenta en mayor medida.
- ❑ En el cálculo del presupuesto óptico en el enlace PON con UDWDM se obtuvo sensibilidad en el receptor de -22 dBm, el cual cumple con los estándares de sensibilidad

establecidos por la recomendación ITU G.984.2, para determinar en la etapa de diseño, la longitud máxima posible de la línea óptica en la sección transmisor-receptor. Por eso importante considerar los diferentes elementos que causan atenuación como conectores, splitters etc, que pueden afectar el rendimiento del sistema y tomar medidas para optimizar la transmisión.

- ❑ Los resultados de la simulación mostraron que la elección del filtro es un factor importante que afecta o mejora el rendimiento de un sistema UDWDM. En particular, se encontró que el filtro coseno levantado proporciona mejores resultados en general en comparación con el filtro gaussiano y sin filtro.
- ❑ La cantidad de usuarios que se utilizan en un canal específico también tiene un impacto significativo en la calidad de la señal y, por lo tanto, en el BER. A medida que se agregan más usuarios, la potencia de recepción varía y el diagrama del ojo presenta interferencias, lo que indica que la señal es más susceptible al ruido y otras interferencias, esto se puede observar específicamente cuando el valor BER es de 10^{-3} y la potencia de recepción es de -43 dBm.

3.3 RECOMENDACIONES

- ❑ Se recomienda realizar otros estudios primero a nivel de simulación y luego prácticos para identificar y mitigar efectos de la dispersión cromática en cada canal y asegurar que la transmisión se realice de manera confiable, especialmente a altas tasas de transmisión y mayores distancias. Esto puede incluir el uso de técnicas de compensación de dispersiones con el fin de determinar las mejores estrategias de transmisión en el sistema UDWDM.
- ❑ En aplicaciones ópticas a tasas de transmisión elevadas y a largas distancias, es posible que sea necesario utilizar otros tipos de filtros, como filtros de banda ancha o filtros adaptativos, para asegurar una transmisión efectiva y confiable de la señal, es decir, que la señal transmitida llegue al receptor, sin pérdida de información ni interferencias que puedan afectar su calidad. Estos filtros pueden ofrecer una respuesta en frecuencia más controlada y uniforme en condiciones adversas, lo que los hace más adecuados para estas aplicaciones.
- ❑ Considerar el uso de técnicas de corrección de errores, como FEC y la codificación de canal. Estas técnicas ayudan a reducir el BER en la transmisión de datos y mejorar

la calidad de la señal recibida por en el receptor; sobre cuando la separación entre canales es mas estrecha como 15 GHz donde la señal se degrada a distancias y velocidades de transmisión mas grandes.

- ❑ En general, es importante que todos los canales en un sistema UDWDM estén diseñados para manejar los efectos de transmisión y se hagan pruebas para asegurarse que cada canal esté funcionando correctamente, de esta manera, se pueden tomar decisiones acertadas sobre la configuración óptima de la red PON y mejorar su eficiencia y confiabilidad, con el objetivo de encontrar la mejor manera de distribuir y conectar los componentes de la red para garantizarla calidad de la señal en el receptor.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *CWDM, Cost Effective Alternative to Expand Network Capacity*. dirección: <https://www.3coptics.com/News/14.html> (visitado 01-01-2023).
- [2] A. Paradisi, R. Carvalho y A. Chiuchiarelli, *Optical Communications*. Brazil, 2019, ISBN: ISBN 978-3-319-97186-5. dirección: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97187-2>.
- [3] S. Gallardo Vázquez, *Elementos de sistemas de telecomunicaciones*. Ediciones Paraninfo, S.A, 2019, ISBN: 8413666236. (visitado 27-11-2022).
- [4] V. Solutions, *Red óptica pasiva (PON)*, eng. dirección: <https://www.viavisolutions.com/es-es/red-optica-pasiva-pon> (visitado 18-09-2022).
- [5] V. Khosia, «A Comprehensive Review of Recent Advancement in Optical Communication Networks,» *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 6, págs. 617-626, sep. de 2018. DOI: 10.26438/ijcse/v6i9.617626.
- [6] R. Kaur y G. Singh, «A Review of PON: Splitters and OLT,» *International Journal of Scientific Engineering Research*, vol. 5, págs. 372-376, 10 2014. dirección: <https://www.ijser.org/researchpaper/A-Review-of-PON-Splitters-and-OLT.pdf>.
- [7] K. Yuksel, V. Moeyaert, M. Wuilpart y P. Mégret, *Optical Layer Monitoring in Passive Optical Networks (PONs)*, 2008. dirección: <https://openaccess.iyte.edu.tr/bitstream/11147/2601/1/2601.pdf> (visitado 17-09-2022).
- [8] G. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*, Fourth Edition. The Institute of Optics University of Rochester Rochester, New York: A JOHN WILEY & SONS, ISBN: 978-0-470-50511-3. dirección: https://sv.20file.org/up1/169_1.pdf (visitado 03-12-2022).
- [9] L. Chen e Y. Liu, «Research on WDM Technology Applied in Optical Fiber Communication,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 365, n.º 1, pág. 012 104, 2018. dirección: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1094/1/012114>.
- [10] Y. Hernández, «Diseño de una red de fibra metropolitana para servicios avanzados s-Health en Smart Cities,» Tesis doct., Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona. dirección: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/90445/7/yolihernandezTFM0119memoria.pdf> (visitado 17-09-2022).

- [11] S. Delgado, «Simulación de la Arquitectura FTTH en una Red Óptica Pasiva sobre la plataforma OptiSystem,» Tesis doct., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2015. dirección: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/4465/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-120.pdf> (visitado 17-09-2022).
- [12] S. Networks, *Wavelength Division Multiplexing: Taking Dark Fibre Capacity to the Next Level*, en-GB, jun. de 2016. dirección: <https://www.sorrentonet.com/wavelength-division-multiplexing-taking-dark-fibre-capacity-to-the-next-level/> (visitado 01-01-2023).
- [13] International Telecommunication Union, «ITU-T Recommendation G.694.2: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,» ITU-T, inf. téc. G.694.2, 2012. dirección: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en>.
- [14] W. W. Technology, *CWDM or DWDM*, en-US. dirección: <https://www.wwt.com/article/cw-dm-or-dw-dm-which-should-you-use-and-when> (visitado 19-02-2023).
- [15] J. Astudillo y E. Ramirez, «Manual para la caracterización de la fibra óptica en DWDM,» Tesis doct., Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, abr. de 2014. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7119/1/UPS-CT003888.pdf>.
- [16] K. Song, «Long-distance transmission of DWDM signals,» *Optical Fiber Technology*, vol. 8, n.º 3, págs. 163-174, 2002.
- [17] D. Montero Hidalgo, «Ventajas de la nueva tecnología de comunicaciones UDWDM,» Tesis doct., Universidad de Costa Rica, dic. de 2004. dirección: <https://docplayer.es/11462039-Universidad-de-costa-rica-facultad-de-ingenieria-escuela-de-ingenieria-electrica-ventajas-de-la-nueva-tecnologia-de-comunicaciones-udwdm.html> (visitado 01-01-2023).
- [18] M. Ali, A. M. Almufti y S. Saber, «Experimental Investigation Between WDM-PON and DWDM-PON Using Different Channel Spacing Experimental Investigation Between WDM-PON and DWDM-PON Using Different Channel Spacing,» vol. 745, mar. de 2020. dirección: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/745/1/012037>.
- [19] J. G. Proakis y M. Salehi, «Digital Communications,» 2014.
- [20] V. Sales Zaragoza, «Redes de acceso UDWDM operadas con láseres aleatorios de sintonía limitada.,» Tesis doct., Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2017. dirección: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/>

114015 / TVSZ1de1 . pdf ; jsessionid = 3D1C654042DE29C02C255D8A8A421AE9 ? sequence=1 (visitado 19-09-2022).

- [21] A. T. Tovar, J. G. L. Perafán y G. L. A. Méndez, «Análisis del efecto del ruido en recepción de redes WDM con detección coherente,» es, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 7, n.º 14, págs. 17-23, 2013, Number: 14, ISSN: 2539-4169. dirección: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/592> (visitado 19-02-2023).
- [22] D. Montero, *Ventajas de la nueva tecnología de comunicaciones UDWDM*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica, 2004. dirección: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UCR.000196700>.
- [23] O. S. Roig, J. L. V. González y R. A. Comes, *Principios de comunicaciones móviles*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2003.
- [24] M. Parker y S. Dhanani, *Digital video processing for engineers: A foundation for embedded systems design*. Newnes, 2012.
- [25] Mathuranathan, *Raised cosine pulse shaping*, en-US, oct. de 2018. dirección: <https://www.gaussianwaves.com/2018/10/raised-cosine-pulse-shaping/> (visitado 25-02-2023).
- [26] G. Li, H. Liu y S. Yang, «Gaussian filter to process tracer breakthrough curves,» *Acta Carsologica*, vol. 48, dic. de 2019. DOI: 10.3986/ac.v48i2.7269.
- [27] E. Onieva, I. Santos, E. Osaba, H. Quintián y E. Corchado, *Hybrid Artificial Intelligent Systems: 10th International Conference, HAIS 2015, Bilbao, Spain, June 22-24, 2015, Proceedings*. Springer, 2015, vol. 9121.
- [28] ITU-T, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. dirección: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-l/es> (visitado 26-01-2023).
- [29] I. Synopsys, *OptSim para comunicación óptica | Soluciones fotónicas de Synopsis*. dirección: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html> (visitado 27-11-2022).
- [30] FOA, *Presupuesto de potencia y de pérdida óptica*. dirección: <https://www.thefoa.org/ESP-Design/Ch9.htm> (visitado 26-01-2023).
- [31] *Conectores de fibra óptica SC/APC*, Excel Networking. dirección: <https://documents.excel-networking.com/datasheets/200-564> (visitado 27-11-2022).

- [32] C. Comunicaciones, *Fibra óptica G652D*, 2019. dirección: <https://www.c3comunicaciones.es/Documentacion/Alcance%5C%20fo.pdf>.
- [33] CISCO, *Atenuación máxima para enlaces de fibra óptica - Cisco*. dirección: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-platform-mspp/27042-max-att-27042.html (visitado 26-01-2023).
- [34] ITU-T, *Gigabit-capable passive optical networks*, ago. de 2019. dirección: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2/es> (visitado 26-01-2023).
- [35] H. Elgamal, A. Haggag, M. Eltokhy y A. Elnaser, «Bit Rate Maximizing by Optimizing Repeater Spacing Product for Optical Communication Systems,» vol. 21, págs. 1-10, jul. de 2021. dirección: https://www.researchgate.net/publication/353346174_Bit_Rate_Maximizing_by_Optimizing_Repeater_Spacing_Product_for_Optical_Communication_Systems (visitado 03-12-2022).
- [36] M. Cvijetic, *Optical Transmission Systems Engineering*, Inglés. Boston: Artech House Print on Demand, dic. de 2003, ISBN: 978-1-58053-636-3. dirección: https://books.google.com.ec/books?id=H9Y6Z5Be21wC&printsec=frontcover&dq=related:ISBN0471358320&output=html_text&source=gbs_book_other_versions_r&cad=2 (visitado 26-01-2023).
- [37] U. C. “ A. de Las Villas, *Formatos de modulación ante efectos no lineales en sistemas ópticos monocanales*, en. dirección: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8231/Aniel%20Lopez%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (visitado 30-01-2023).
- [38] U. A. del Estado de Hidalgo, *Técnicas de Codificación*. dirección: http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/371_tcnicas_de_codificacin.html (visitado 21-02-2023).
- [39] J. Coroado, S. Ganguly, S. Williams, W. Suder, S. Meco y G. Pardal, «Comparison of continuous and pulsed wave lasers in keyhole welding of stainless-steel to aluminium,» en, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n.º 1, págs. 367-387, mar. de 2022, ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-021-08226-5. dirección: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08226-5> (visitado 30-01-2023).

- [40] I. Synopsys, *What is a Mach-Zehnder Modulator and How Does it Work?* | Synopsys. dirección: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-mach-zehnder-modulator.html> (visitado 05-12-2022).
- [41] Thorlabs, *Thorlabs Modulator Mach-Zehnder*, en. dirección: <https://www.thorlabs.com/drawings/76fd6c473f930042-95C911E7-D2FB-2849-C916630FD9B3CF37/LNP4216-SpecSheet.pdf> (visitado 21-02-2023).
- [42] D. Martínez De La Cruz, «Diseño de un Sistema de Adquisición de datos para un Fotodiodo deAvalancha APD con aplicaciones en Experimentos de Óptica,» Tesis doct., Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, nov. de 2018. dirección: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/7947> (visitado 27-01-2023).
- [43] M. Petriella, *Fotodiodos semiconductores: comparativa entre fotodiodos de juntura PN, PIN, APD*. dirección: <http://materias.df.uba.ar/instru2018c2/files/2012/07/Fotodiodos.pdf> (visitado 27-01-2023).
- [44] N. Pashtoon, «IIR digital filters,» 1987. dirección: https://www-sciencedirect-com.translate.goog/topics/engineering/bessel-filter?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc (visitado 27-01-2023).
- [45] M. C. España, *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos, 2005, ISBN: 84-7978-685-X. dirección: https://www.academia.edu/33300228/MAR%5C%C3%5C%8DA_CARMEN_ESPA%5C%C3%5C%91A_BOQUERA_COMUNICACIONES_%5C%C3%5C%93PTICAS_Conceptos_esenciales_y_resoluci%5C%C3%5C%B3n_de_ejercicios.
- [46] D. A. Vásquez Uribe, «Multiplexor óptico reconfigurable mediante rejillas de Bragg,» spa, 2015, Accepted: 2020-09-18T14:51:27Z Artwork Medium: Recurso electrónico Interview Medium: Recurso electrónico Publisher: Instituto Tecnológico Metropolitano. dirección: http://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/4045/Rep_ltm_pre_Vasquez.pdf?sequence=1&isAllowed=y (visitado 27-01-2023).
- [47] A. Bateman, *Comunicaciones Digitales*, 1a ed. Madrid: Pearson Educación, 2005.
- [48] Hmong.es, *Intersymbol Interference*, https://hmong.es/wiki/Intersymbol_interference, accedido el 21 de febrero de 2023. (visitado 27-11-2022).

- [49] H. Zumbahlen, *Linear Circuit Design Handbook*, 1st Edition. USA, 2008, ISBN: 978-0-08-055915-5. dirección: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gaussian-filter> (visitado 21-02-2023).
- [50] D. Tobón Rodríguez y V. A. Macea Ortega, «Corrector de errores hacia adelante,» 2013.

5 ANEXOS

ANEXO I: Valores de BER para el canal 1, 2 y 3 para los tres escenarios de simulación.

ANEXO II: Simulación de usuarios.

ANEXO III: Link de acceso a las simulaciones en Optsim.

ANEXO I

Tabla 1: Valores de Ber para el canal 1 a una separación entre canales de 20 GHz sin utilizar filtro.

BER en el canal 1 con separación 20 GHz sin filtro								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	7E-33	2E-19	4E-13	4E-09	7E-06	2E-05
12	1E-40	1E-40	1E-31	6E-19	1E-12	3E-09	1E-05	3E-05
14	1E-40	1E-40	3E-30	5E-18	2E-12	9E-09	3E-05	8E-05
16	1E-40	1E-40	2E-27	2E-17	2E-11	1E-08	8E-05	2E-04
18	1E-40	1E-40	2E-24	3E-16	1E-10	5E-08	2E-04	3E-04
20	1E-40	1E-40	4E-23	4E-16	6E-10	1E-07	3E-04	8E-04

Tabla 2: Valores de BER para canal 1 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro de gauss.

BER en canal 1 con separación de 20 GHz con filtro de gauss								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	1E-30	7E-22	3E-13	3E-09	3E-06	2E-05
12	1E-40	1E-40	7E-30	1E-21	2E-13	5E-09	6E-06	3E-05
14	1E-40	1E-40	4E-28	3E-20	1E-12	6E-09	2E-05	5E-05
16	1E-40	1E-40	5E-27	5E-19	3E-12	1E-08	5E-05	8E-05
18	3E-40	3E-39	9E-25	1E-17	4E-11	3E-08	1E-04	2E-04
20	1E-40	2E-38	2E-23	2E-16	1E-10	5E-08	2E-04	4E-04

Tabla 3: Valores de BER para canal 1 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro coseno levantado.

BER en el canal 1 con separación de 20 GHz con filtro coseno levantado								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	1E-40	2E-30	2E-16	2E-09	5E-07	1E-05
12	1E-40	1E-40	1E-40	2E-29	2E-15	2E-09	7E-07	3E-05
14	1E-40	1E-40	1E-40	2E-28	6E-16	6E-09	2E-06	6E-05
16	1E-40	1E-40	1E-40	7E-27	2E-15	6E-09	4E-06	1E-04
18	1E-40	1E-40	1E-40	6E-25	8E-15	3E-08	2E-05	2E-04
20	1E-40	1E-40	2E-40	9E-23	4E-14	4E-08	3E-05	4E-04

Tabla 4: Valores de BER para canal 2 a una separación entre canales de 20 GHz sin filtro.

BER en el canal 2 con separación 20 GHz sin filtro								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-41	1E-40	3E-27	7E-16	1E-08	2E-06	4E-04	2E-03
12	1E-39	2E-39	8E-27	9E-15	7E-09	9E-07	7E-04	4E-03
14	1E-39	4E-39	5E-26	3E-14	1E-08	9E-07	8E-04	3E-03
16	1E-38	9E-37	1E-25	3E-13	1E-08	1E-06	1E-03	3E-03
18	1E-36	7E-33	7E-23	2E-12	3E-08	8E-07	2E-03	2E-02
20	2E-35	1E-31	1E-21	2E-11	3E-08	1E-06	2E-03	3E-02

Tabla 5: Valores de BER para canal 2 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro de gauss.

BER en el canal 2 con separación 20 GHz con filtro de gauss								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	5E-40	5E-39	1E-26	9E-18	3E-10	4E-07	2E-04	1E-03
12	1E-39	1E-38	2E-26	1E-17	3E-10	2E-07	3E-04	4E-03
14	5E-40	3E-36	1E-25	7E-16	1E-09	2E-07	4E-04	2E-03
16	2E-40	2E-35	2E-25	3E-15	1E-09	2E-07	8E-04	3E-03
18	7E-39	1E-34	3E-22	1E-13	4E-09	4E-07	9E-04	2E-03
20	4E-38	1E-31	5E-22	7E-13	5E-09	5E-07	1E-03	2E-03

Tabla 6: Valores de BER para canal 2 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro coseno levantado.

BER en el canal 2 con separación 20 GHz con filtro coseno levantado								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	2E-38	7E-18	8E-11	4E-07	2E-04	2E-03
12	1E-40	1E-40	1E-36	5E-17	2E-10	2E-07	2E-04	9E-04
14	1E-40	1E-40	9E-36	3E-17	8E-11	3E-07	3E-04	1E-03
16	1E-40	1E-40	3E-33	6E-17	2E-10	4E-07	3E-04	2E-03
18	1E-40	1E-40	2E-28	3E-16	5E-10	3E-07	4E-04	3E-03
20	1E-40	1E-40	4E-26	1E-15	1E-09	4E-07	4E-04	4E-03

Tabla 7: Valores de BER para canal 3 a una separación entre canales de 20 GHz sin filtro.

BER en el canal 3 con separación 20 GHz sin filtro								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	1E-26	1E-21	5E-11	9E-10	2E-06	2E-05
12	1E-40	1E-40	5E-26	3E-20	4E-11	3E-09	3E-06	4E-05
14	1E-40	1E-40	4E-26	6E-18	2E-10	2E-09	1E-05	8E-05
16	1E-40	1E-40	2E-25	5E-17	3E-10	5E-09	2E-05	2E-04
18	1E-40	1E-40	1E-23	2E-16	4E-10	2E-08	4E-05	4E-04
20	1E-40	1E-40	5E-23	6E-15	2E-09	2E-08	8E-05	1E-03

Tabla 8: Valores de BER para canal 3 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro de gauss.

BER en el canal 3 con separación 20 GHz con filtro de gauss								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-35	3E-27	7E-22	6E-12	4E-09	1E-06	1E-05
12	1E-40	1E-35	1E-26	2E-21	4E-11	1E-08	2E-06	4E-05
14	3E-40	8E-36	4E-26	3E-19	4E-11	8E-09	4E-06	6E-05
16	4E-39	3E-34	3E-24	7E-17	3E-11	2E-08	9E-06	1E-04
18	4E-38	8E-33	2E-24	8E-17	4E-11	2E-08	2E-05	3E-04
20	2E-37	8E-31	1E-23	2E-15	1E-10	6E-08	4E-05	5E-04

Tabla 9: Valores de BER para canal 3 a una separación entre canales de 20 GHz con filtro coseno levantado.

BER en el canal 3 con 20 GHz con filtro coseno levantado								
Distancia [km]	Vtx 10 Gbps	Vtx 11 Gbps	Vtx 12 Gbps	Vtx 13 Gbps	Vtx 14 Gbps	Vtx 15 Gbps	Vtx 16 Gbps	Vtx 17 Gbps
10	1E-40	1E-40	1E-40	6E-26	3E-15	5E-10	4E-07	7E-06
12	1E-40	1E-40	1E-40	2E-25	1E-14	6E-10	6E-07	1E-05
14	1E-40	1E-40	1E-40	3E-24	8E-14	9E-10	2E-06	3E-05
16	1E-40	1E-40	3E-38	1E-23	7E-13	2E-09	6E-06	5E-05
18	1E-40	1E-40	2E-35	2E-22	7E-13	4E-09	2E-05	1E-04
20	1E-40	1E-40	9E-34	3E-22	4E-12	1E-08	4E-05	2E-04

ANEXO II

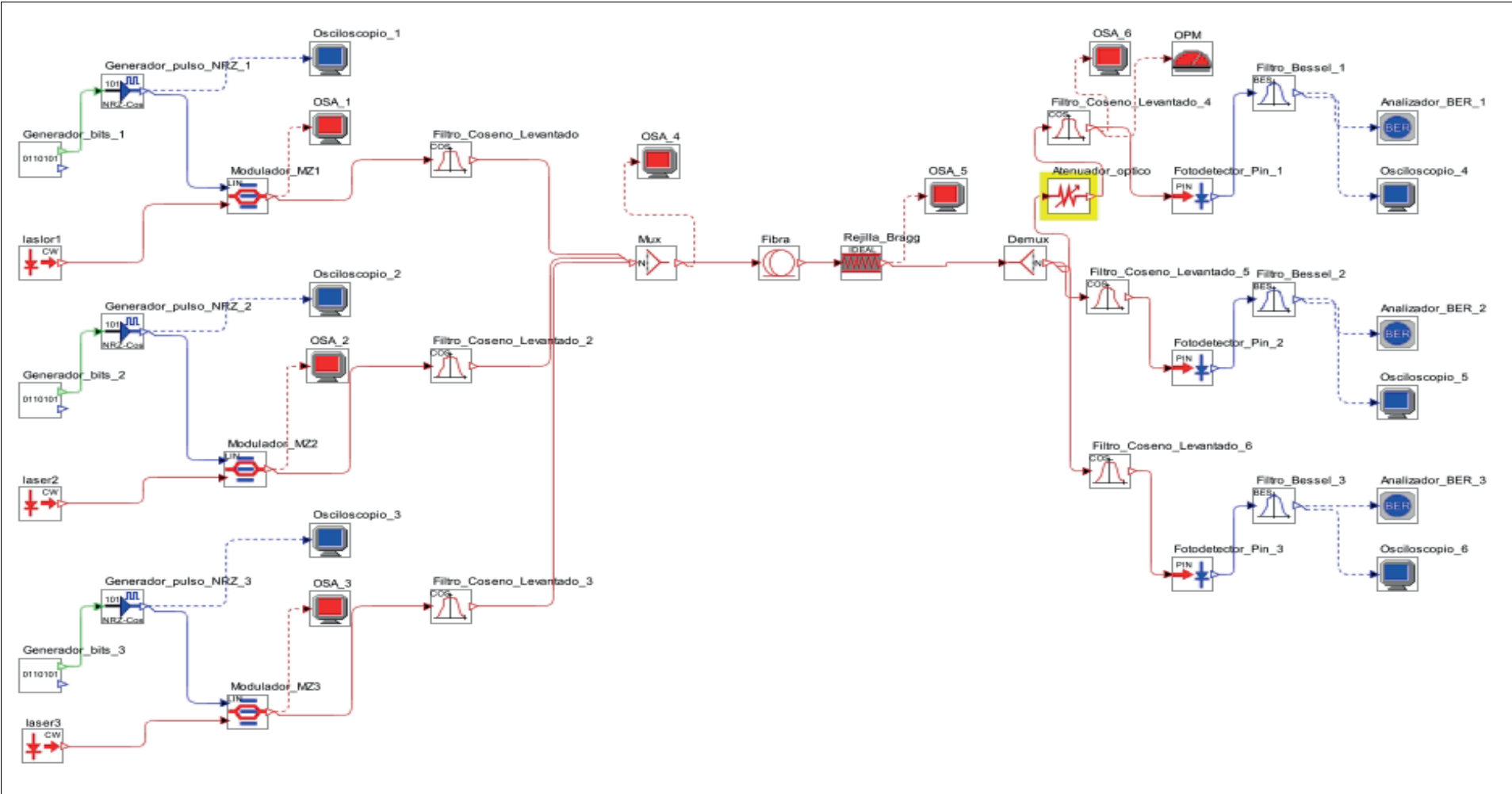


Figura 1: Simulación de usuarios.

ANEXO III

https://github.com/NubiaManchay/TIC_SIMULACIONES.git