

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

SIMULACIÓN DE UN ENLACE PTP QUE UTILIZA FIBRAS QUE CUMPLEN ESTÁNDARES ITU-T

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO
SUPERIOR EN REDES Y TELECOMUNICACIONES**

DAVID SANTIAGO AROTINGO BONILLA

DIRECTOR: ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA

DMQ, marzo 2023

CERTIFICACIONES

Yo, DAVID SANTIAGO AROTINGO BONILLA 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.



David Santiago Arotingo Bonilla

david.arotingo@epn.edu.ec

davidarotingo@gmail.com

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID SANTIAGO AROTINGO BONILLA, bajo mi supervisión.



ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA
DIRECTOR

Italo.carreno@epn.edu.ec

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.

David Santiago Arotingo Bonilla

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi mamá María que siempre me ha apoyado y me ha sabido alentar en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi papá Carlos quien me ha enseñado el valor del trabajo duro y honrado.

A mis hermanos Esteban y Tatiana con quienes hemos jugado, reído y apoyado todos estos años.

A mi enamorada Andrea quien me ha acompañado y ha sido un pilar fundamental en mi vida.

A mi abuelita María quien me ha querido como a un hijo más.

A mi tío Raúl con el que jugábamos cuando éramos niños.

A mis mascotas Oso y Chispa por darle alegría a mi vida.

David Arotingo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y a la Escuela de Formación de Tecnólogos por la oportunidad de estudio.

A mi familia por ser mi apoyo durante todo mi trayecto estudiantil.

A mis profesores por compartirme su conocimiento.

David Arotingo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcance.....	1
1.4 Marco teórico.....	2
Fibra óptica.....	2
Conexión punto a punto (PTP).....	2
Sistema de módulo de transporte síncrono (STM).....	3
Pérdidas por absorción	3
Dispersión Cromática.....	4
Optisystem.....	4
2 Metodología.....	4
2.1 Simulación en <i>Optisystem</i>	5
2.2 Componentes esenciales para simular un enlace PTP	5
<i>User-Defined Bit Sequence Generator</i>	6
<i>NRZ pulse generator</i>	6
<i>CW Laser</i>	7
<i>MZ Modulator Analytical</i>	7

<i>Optical Fiber</i>	8
<i>Amplificador Óptico</i>	9
<i>PIN Photodiode</i>	9
<i>Low Pass Bessel Filter</i>	10
<i>3R Regenerator</i>	10
Diagrama para la simulación.....	10
3 Resultados.....	11
3.1 Estándares ITU-T	11
Estándar de la ITU-T G.652	11
ITU-T G.652 categoría A.....	12
ITU-T G.652 categoría D	13
Estándar ITU-T G.653.....	13
ITU-T G.653 categoría B.....	14
Estándar ITU-T G.655.....	14
ITU-T G.655 C	15
3.2 Características de las bandas de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U).....	16
3.3 Parámetros necesarios para la simulación del enlace PTP.....	17
Atenuación en la fibra	17
Coeficiente de dispersión en base a los estándares solicitados	18
Datos para la simulación de cada estándar.	23
3.4 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría A para la longitud de 25 (km).....	25
Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	25
Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	27
Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	29
Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	30
Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	30
Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	30

3.5	Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría D para la longitud de 25 (km).....	31
	Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	31
	Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	33
	Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	35
	Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	36
	Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	37
	Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	37
3.6	Resultados obtenidos para el estándar G.653 categoría B para la longitud de 25 km	38
	Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	38
	Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	40
	Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	40
	Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	41
	Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	41
	Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	42
3.7	Resultados obtenidos para el estándar G.655 categoría C para la longitud de 25 (km).....	42
	Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	42
	Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	44
	Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	45
	Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	45
	Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	46
	Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	47
3.8	Resumen de potencias obtenidas para el enlace de 25 km	47
3.9	Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría A para la longitud de 50 (km).....	48
	Simulación Correspondiente a 1 270 (nm).	49
	Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	49

Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	50
Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	50
Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	50
Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	51
3.10 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría D para la longitud de 50 km	51
Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	52
Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	52
Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	52
Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	53
Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	53
Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	54
3.11 Resultados obtenidos para el estándar G.653 categoría B para la longitud de 50 km	55
Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	55
Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	56
Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	56
Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	57
Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	57
Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	58
3.12 Resultados obtenidos para el estándar G.655 categoría C para la longitud de 50 (km).....	58
Simulación correspondiente a 1 270 (nm).....	58
Simulación correspondiente a 1 390 (nm).....	59
Simulación correspondiente a 1 490 (nm).....	59
Simulación correspondiente a 1 545 (nm).....	60
Simulación correspondiente a 1 600 (nm).....	60
Simulación correspondiente a 1 650 (nm).....	61
3.13 Resumen de potencias obtenidas para el enlace de 50 (km)	61

4	CONCLUSIONES	63
5	RECOMENDACIONES.....	65
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
7	ANEXOS.....	i

RESUMEN

El siguiente trabajo de titulación, se simulan los estándares ITU-T G.652A, G.652D, G.653B y G.655C para fibras ópticas monomodo variando múltiples parámetros de la fibra, tales como: la longitud de onda de referencia, longitud del enlace, coeficiente de atenuación, dispersión cromática y coeficiente de dispersión por modo de polarización (PMD), para conocer el rendimiento de los estándares ITU-T antes mencionados con las bandas de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U) utilizando el simulador *OptiSystem*.

El documento se encuentra organizado en cinco secciones comenzando por la descripción del proyecto donde se abordan aspectos teóricos de la fibra óptica monomodo, los estándares ITU-T, las bandas de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U), enlaces punto a punto y dispersión cromática.

La segunda sección corresponde a la metodología mostrando detalles de la simulación, además de cálculos necesarios para la obtención de parámetros que serán usados en el proyecto.

La tercera sección muestra los resultados de la simulación en el simulador *OptiSystem* donde se comparará el rendimiento de cada estándar con las diferentes frecuencias ópticas mencionadas con anterioridad.

Y finalmente se tiene la sección de conclusiones obtenidas de la simulación y recomendaciones para futuras pruebas en el simulador *OptiSystem*.

PALABRAS CLAVE: estándar, fibra, coeficiente, *OptiSystem*, simulación, parámetros.

ABSTRACT

In the following thesis work, a simulation of the ITU-T G.652A, G.652D, G.653B, and G.655C standards for single-mode optical fibers is carried out by varying different parameters of the optical fiber such as reference wavelength, link length, attenuation coefficient, chromatic dispersion, and polarization mode dispersion (PMD) coefficient, to assess the performance of the aforementioned ITU-T standards in conjunction with the optical frequency bands (O, E, S, C, L, U) using the OptiSystem simulator.

The document is structured into five sections, beginning with the project description that covers theoretical aspects of single-mode optical fibers, ITU-T standards, the optical frequency bands (O, E, S, C, L, U), point-to-point links, and chromatic dispersion.

The second section outlines the methodology and details of the simulation, including calculations required for obtaining parameters used in the project.

The third section presents the simulation results using the OptiSystem simulator, comparing the performance of each standard with the different optical frequencies mentioned earlier.

Finally, the document ends with a conclusion section that summarizes the results of the simulation and provides recommendations for future OptiSystem simulator tests.

KEYWORDS: *standard, fiber, coefficient, OptiSystem, simulation, parameter.*

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El enfoque principal del proyecto es la simulación de estándares ITU-T, a través de la manipulación de parámetros como la longitud de onda de referencia, longitud de enlace, coeficiente de atenuación y dispersión por modo de polarización proporcionando una visión detallada del rendimiento en cada banda de frecuencia óptica.

El análisis de los estándares resulta fundamental ya que garantizan que la propagación de la información por medio de la fibra óptica sea lo más confiable y eficiente posible, debido a que las fibras ópticas monomodo juegan un papel importante en las comunicaciones modernas.

1.1 Objetivo general

Simular un enlace PTP que utiliza fibras que cumplen estándares ITU-T.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar las características de cada estándar ITU-T solicitado.
- Identificar las características de cada banda de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U).
- Establecer los parámetros del enlace PTP con el que se realizará la comparación.
- Simular el enlace PTP variando frecuencia de trabajo y características de la fibra óptica según el estándar.
- Interpretar los resultados.

1.3 Alcance

El presente estudio técnico tiene la finalidad de comparar el desempeño de una red PTP trabajando a diferentes bandas de frecuencia ópticas (O, E, S, C, L, U). Adicionalmente, se trabajará con distintos estándares de fibra óptica para poder observar cómo se acopla cada tipo de fibra óptica a las bandas ópticas definidas. Los estándares con los que se trabajará son: G652A (SMF), G652D (*Low Water Peak*), G653A o G653B (DSF), G655A o G655B o G655C (NZDSF). Se realizará la simulación del enlace en *OptiSystem* para poder observar los resultados en cada banda con cada estándar. Con el fin de llevar a cabo el proyecto, en primer lugar, se deberá identificar los aspectos relevantes de cada estándar ITU-T solicitado, por ejemplo, la longitud de onda con máxima atenuación, las bandas de operación y el tipo de fibra que define el estándar. Luego, se deberá

identificar las características de cada banda de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U), por ejemplo, la absorción del ion hidroxilo, absorción ultravioleta y absorción infrarroja. El establecimiento de parámetros del enlace PTP consistirá en definir características como la potencia óptica de trabajo, tipo de fuente y longitud del enlace. La simulación abarcará cada una de las frecuencias ópticas de trabajo y se deberá variar las características de la fibra, como la dispersión cromática, PMD. La interpretación de resultados consistirá en comparar el rendimiento de la fibra de cada estándar.

1.4 Marco teórico

Fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión de información guiado el cual consta de un núcleo de vidrio con índice de refracción n_1 y de una capa recubierta con un índice de refracción n_2 , siendo n_1 mayor que n_2 . Esto permite la reflexión de la luz en el interior del núcleo de la fibra óptica. Existen dos tipos de fibra óptica: monomodo y multimodo. Estas fibras se diferencian por el tamaño de su núcleo, el radio del núcleo de una fibra multimodo oscila en $25\text{ }\mu\text{m}$ a $30\text{ }\mu\text{m}$, mientras que la fibra monomodo tiene un radio de longitud menor a $5\text{ }\mu\text{m}$ [1]. Además, la fibra óptica monomodo permite el paso de un solo modo pudiendo así reducir la dispersión por pulsos y aumenta el ancho de banda, permitiendo velocidades [2].

Conexión punto a punto (PTP)

Un enlace punto a punto es una conexión entre dos redes remotas que se comportan como una sola red mediante un canal que puede ser inalámbrico o un cable de fibra óptica, este enlace debe tener un ancho de banda fijo el cual debe estar disponible en todo momento con velocidades de descarga y carga simétricas. La Figura 1.1 ilustra un diagrama que representa una conexión punto a punto [3].



Figura 1.1 Representación de una conexión PTP de fibra [3].

Sistema de módulo de transporte síncrono (STM)

El STM es un estándar de transmisión en una red de óptica que define una tasa de 155.52 (Mbps) en su primer nivel, este sistema aumenta su capacidad con respecto al nivel asignado en el estándar STM, por ejemplo: STM-1: 155.52 (Mbps); STM-4: 622.08 (Mbps); STM-16: 9953.28 (Mbps); STM-64: 10 (Gbps) y STM-256: 40 (Gbps) [4].

Pérdidas por absorción

Es un tipo de pérdida intrínseca, es decir, un tipo de pérdida que no se puede eliminar de la fibra óptica, esto se debe a su construcción, la presencia de impurezas, entre otros. Las pérdidas por absorción se dan por la presencia de iones hidroxilo, rayos infrarrojos y ultravioleta.

Las pérdidas por el ion hidroxilo son ocasionadas por el vapor de agua que se encuentra apresado dentro de la fibra óptica durante su fabricación. Este tipo de pérdida afecta en mayor medida a las longitudes de onda próximas a 1 400 (nm). El efecto del ion hidroxilo se ha podido disminuir debido al uso de la fibra óptica *Zero Water Peak* (ZPW) el cual es un tipo de fibra que reduce en gran medida los efectos del ion hidroxilo [5].

Las pérdidas en la fibra debido a la absorción de rayos ultravioleta y rayos infrarrojos se producen por la interacción de fotones con las moléculas de la fibra. Las pérdidas por absorción ultravioleta disminuyen exponencialmente a medida que aumenta la longitud de la onda, después de los 1 000 (nm) la absorción ultravioleta es despreciable. En cambio, la pérdida por absorción de rayos infrarrojos aumenta exponencialmente con la longitud de onda, se lo toma en cuenta a partir de los 1 400 (nm). La Figura 1.2 muestra la relación entre la atenuación de la señal óptica (dB/km) y la longitud de onda (μm) [6].

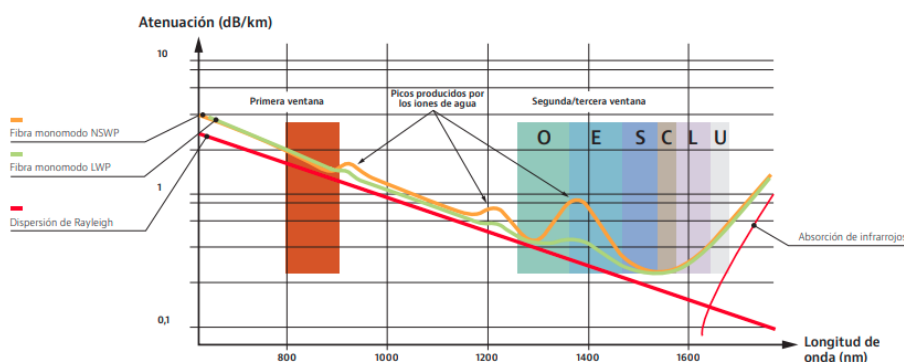


Figura 1.2 Espectro de pérdidas en una fibra óptica monomodo [6].

Dispersión Cromática

Se refiere a un fenómeno conocido como dispersión en el cual los diferentes componentes del pulso óptico viajan a velocidades distintas a lo largo de la fibra óptica, lo que causa que el pulso sufra distorsiones y llegue al receptor en momentos diferentes. [7].

OptiSystem

OptiSystem es un *software* de simulación de comunicaciones ópticas de nivel físico, pudiendo simular sistemas de vídeo, troncales e incluso enlaces intercontinentales basándose en sistemas realistas. *OptiSystem* usa el esquema de bloques donde cada bloque puede ser modificado dependiendo del parámetro necesario. Los datos que serán usados como señal pasan de bloque en bloque como lo haría un sistema real de comunicaciones ópticas. El uso del *software* trae consigo varias ventajas como son: la presentación gráfica de los enlaces, reducción del riesgo de inversión y el tiempo de implementación, así como también la creación de prototipos de bajo costo. *OptiSystem* es un *software* de simulación pagado, pero cuenta con el uso de prueba durante treinta días de manera gratuita [8].

2 METODOLOGÍA

Se realizó una investigación para identificar las características de cada estándar ITU-T de cada fibra óptica solicitado que en este caso fueron: G.652A (SMF), G.652D (*Low Water Peak*), G.653B (*Dispersion-shifted fiber*) y G.655C (NZDSF).

La simulación del enlace se realizó en *OptiSystem* para poder observar los resultados en cada banda de cada estándar. Para ello el primer paso consistió en investigar las características más relevantes de cada estándar ITU-T solicitado de este modo se obtuvieron los parámetros más importantes para la simulación como lo son: la longitud de onda máxima de atenuación, las bandas de operación y el tipo de fibra que describe el estándar.

Después de obtener información de cada estándar solicitado se tuvo que identificar las características de cada banda de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U) como lo fueron la absorción del ion hidroxilo, absorción ultravioleta y absorción infrarroja.

Luego, se establecerán los parámetros necesarios para la simulación del enlace PTP, tomando en cuenta la potencia óptica de trabajo el cual será usado en todos los sistemas a simular, el tipo de fuente a usar es una láser, debido a que los estándares ya

mencionados son para fibras ópticas monomodo. Este tipo de fibra requiere de una luz direccional, también porque son usadas para enlaces de gran capacidad y son capaces de llegar a grandes distancias en comparación con una fuente diodo y dos longitudes de enlace diferentes [9].

La simulación abarcó cada una de las frecuencias ópticas de trabajo establecidas y se tuvo que variar diferentes características, como la dispersión, PDM. La interpretación de los resultados consistió en comparar el rendimiento de la fibra de cada estándar.

2.1 Simulación en *Optisystem*

OptiSystem es un programa de simulación que proporciona al usuario una gran comodidad gracias a su interfaz gráfica intuitiva y fácil de utilizar, el *software* permite obtener resultados muy parecidos a la realidad. Para esta simulación será de gran ayuda, gracias a las librerías que posee porque contienen una serie de bloques necesarios para la simulación de diferentes sistemas, en este caso una conexión PTP [10].

El sistema realizado en la aplicación de *OptiSystem* fue desarrollado usando las librerías necesarias para los estándares ITU-T, la Figura 2.1 presenta un esquema de bloques para una conexión PTP.

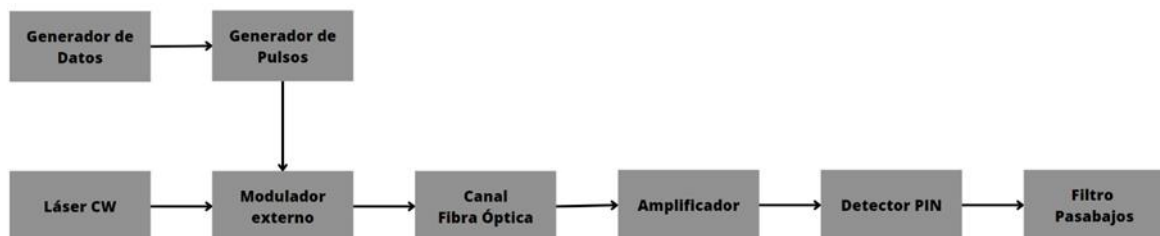


Figura 2.1 Esquema de un sistema PTP.

La simulación contiene una etapa de transmisión en el cual se establece la potencia óptica y la longitud de onda de trabajo, una etapa de canal donde se realizaron los cambios en los parámetros para los estándares G.652A, G.652D, G.653B y G.655C y finalmente una etapa de recepción donde se puede apreciar los resultados de la transmisión los cuales son: potencia de recepción y señal recibida.

2.2 Componentes esenciales para simular un enlace PTP

Para simular el enlace, es necesario utilizar múltiples componentes, de modo que es necesario conocer su función dentro del sistema óptico requerido, también se debe

tomar en cuenta los parámetros que serán modificados dentro de cada uno de los bloques.

User-Defined Bit Sequence Generator

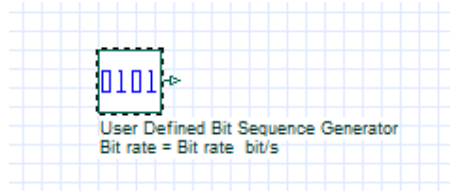


Figura 2.2 Bloque Generador de datos de usuario [11].

Este bloque se refiere a un generador de bits personalizable por el usuario, es decir, que el usuario es quien elige la secuencia de bits a transmitir mediante la configuración directa en el bloque o mediante un archivo con extensión “dat”. Los parámetros que serán configurados para la simulación son:

- *Bit rate*: la velocidad de bits por segundo.
- *Bit sequence*: el usuario puede definir la secuencia de bits deseada y si esta es menor al número de bits requeridos por el sistema, el software completará con ceros la cantidad necesaria para cumplir con el requisito del sistema.

En la Figura 2.3 Bloque Generador de datos de usuario .se puede observar los parámetros que se han modificado, este bloque tendrá la misma configuración para todos los demás estándares y longitudes de onda, la secuencia está definida por 00101101 que tiene una longitud de 8 bits.

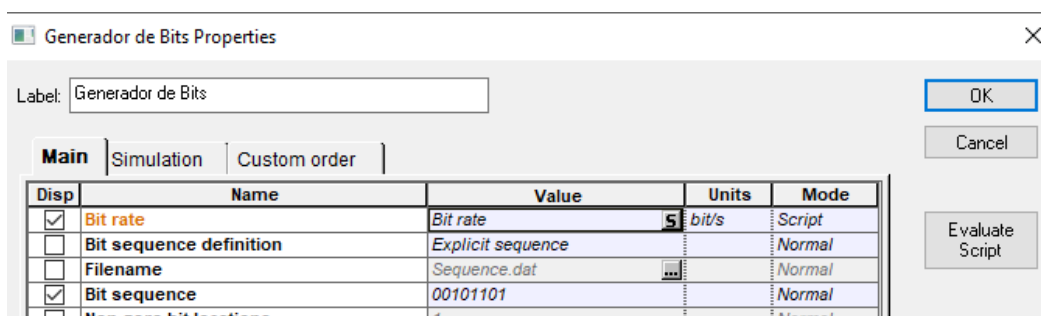


Figura 2.3 Parámetros configurados en el bloque *User Defined Bit Sequence* [11].

NRZ pulse generator

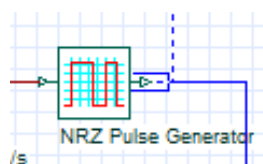


Figura 2.4 Bloque *NRZ pulse generator* [11].

Este bloque permitirá crear pulsos eléctricos no retorno a cero dependiendo de los datos que reciba del bloque *User-defined bit sequence*, se usó este bloque debido a que es sencillo de interpretar en los visualizadores de tiempo. Este bloque no será configurado.

CW Laser

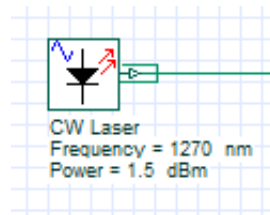


Figura 2.5 Bloque *CW laser*.

Este bloque trabaja como la fuente de luz dentro del transmisor, genera una señal óptica de onda continua. En este bloque se ajustarán los parámetros de la longitud de onda óptica del sistema dependiendo del estándar y se establecerá una potencia constante de 1.5 dBm en todas las simulaciones. En la Figura 2.6 se presentan los parámetros modificados correspondientes al ejemplo de 1 270 (nm).

CW Laser Properties

Label:

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1270	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	1.5	dBm	Normal

Figura 2.6 Parámetros del bloque *CW Laser* [2].

MZ Modulator Analytical

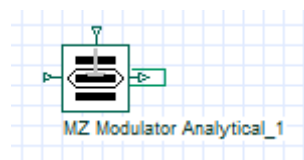


Figura 2.7 *MZ Modulator Analytical*.

El bloque *MZ Modulator Analytical* permite la modulación entre la señal eléctrica que proviene del generador de pulsos NRZ y de la señal óptica entregada por el *CW laser*

mostrando a la salida la señal óptica modulada que será enviada por la fibra óptica. Este bloque tendrá sus parámetros por *default*.

Optical Fiber

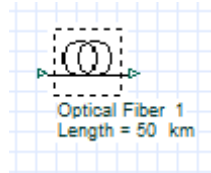


Figura 2.8 Bloque *Optical Fiber*.

En el bloque *Optical fiber*, se modificarán los parámetros definidos por los estándares, como la distancia de enlace, los distintos coeficientes ya mencionados, la longitud de referencia, la dispersión cromática y el PMD. Este bloque actuará como el medio a través del cual la señal óptica generada por el *MZ Modulator Analytical* será transmitida, en la Figura 2.9, Figura 2.10 y Figura 2.11 se pueden observar los parámetros necesarios para la simulación de cada estándar ITU-T.

Optical Fiber Properties

Label:

☒ Main
 ☐ Dispersion
 ☐ PMD
 ☐ Nonlineari...
 ☐ Numerical
 ☐ Graphs
 ☐ Simulation
 ☐ Noise
 ☐ Random nu...
 ☐ Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	User defined reference wavelength	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1310	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	50	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.35	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelength	Attenuation.dat		Normal

Figura 2.9 Parámetros ópticos.

Label:

☐ Main
 ☒ Dispersion
 ☐ PMD
 ☐ Nonlineari...
 ☐ Numerical
 ☐ Graphs
 ☐ Simulation
 ☐ Noise
 ☐ Random nu...
 ☐ Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain parameters	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	-4.25	ps/nm/km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.092	ps/nm ² /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 2	0.05	ps ² /km	Normal

Figura 2.10 Parámetros: Dispersión cromática.

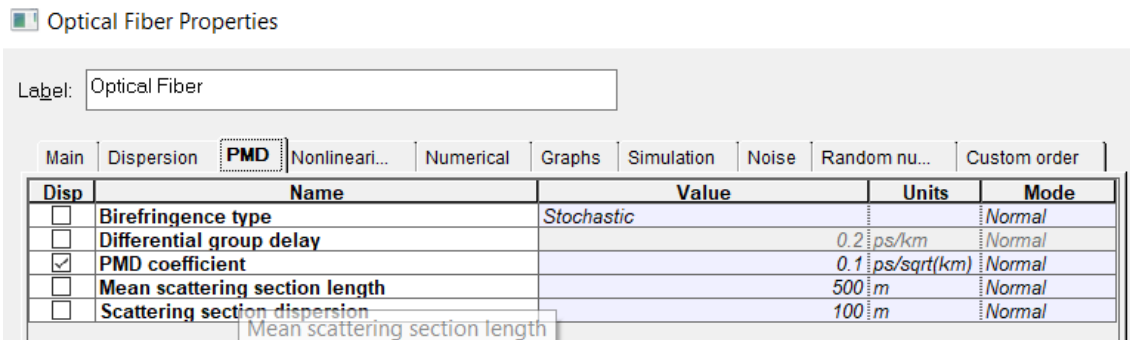


Figura 2.11 Parámetros: PMD.

Amplificador Óptico

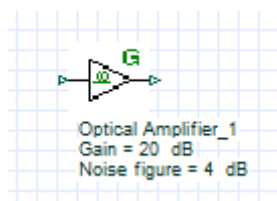


Figura 2.12 Bloque amplificador óptico.

Se optó por usar un amplificador óptico para poder tener una mejor visualización de la señal recibida. El amplificador óptico es necesario para un enlace óptico puesto que la atenuación total de la fibra es directamente proporcional a la distancia, por ello entre mayor distancia mayor será la atenuación total, de este modo se requiere el uso de un amplificador óptico para aumentar los niveles de potencia de la señal [10]. En este caso se calculó la ganancia del amplificador tomando en cuenta solo la atenuación total de la fibra óptica con la siguiente ecuación:

$$G = \alpha_t$$

Ecuación 2.1 Ganancia del amplificador óptico [12].

Donde:

G : ganancia del amplificador medida en dB.

α_t : atenuación total de la fibra óptica

PIN Photodiode

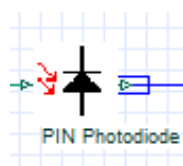


Figura 2.13 Bloque PIN Photodiode.

El bloque *PIN Photodiode* es un detector PIN el cual tiene la función de recibir la señal de luz en su entrada y la transforma en una señal eléctrica a su salida. Sus parámetros no serán configurados, es decir, su configuración será por defecto debido a su responsividad ideal de 1 (A/W) [2].

Low Pass Bessel Filter

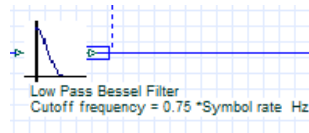


Figura 2.14 Bloque Filtro pasa-bajos: *Low Pass Bessel Filter*.

El filtro pasa-bajos bloquea el paso de frecuencias no deseadas, tiene la configuración por defecto debido a que la frecuencia de corte es de $\frac{3}{4}$ la velocidad de símbolo.

3R Regenerator

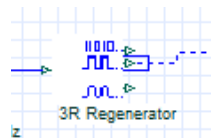


Figura 2.15 Bloque regenerador: *3R Regenerator*.

El bloque regenerador *3R Regenerator* permite obtener la secuencia de bits original a partir de la señal eléctrica recibida del filtro pasa-bajos.

Diagrama para la simulación

La Figura 2.16 presenta el esquema usado para la simulación, donde el *User-Defined Bit Generator* entregará los bits al *NRZ pulse generator* de modo que este genere pulsos eléctricos en función de los bits a enviar. El modulador *MZ Modulator Analytical* se encargará de crear una señal óptica en función de la señal eléctrica que reciba por una de sus entradas y a su salida entregar dicha señal a la fibra óptica que será el medio de propagación de la luz.

Se utilizará un amplificador óptico al final de la fibra con el fin de mejorar la visualización de la señal en un osciloscopio. A la salida del amplificador se tendrá el detector PIN el cual se encargará de convertir la señal óptica a una señal eléctrica de modo que los dispositivos electrónicos puedan trabajar con ella. El filtro pasa-bajos eliminará el ruido que haya ingresado a la señal a su paso por la fibra óptica y este finalmente entregará la señal al regenerador óptico para visualizar la señal recibida. En cada salida de los

bloques se colocarán bloques de medición como son los *Time Domain Analyzer*, *Oscilloscope*, *Visualizer*, *Optical Spectrum Analyzer* y *Optical Power Meter*.

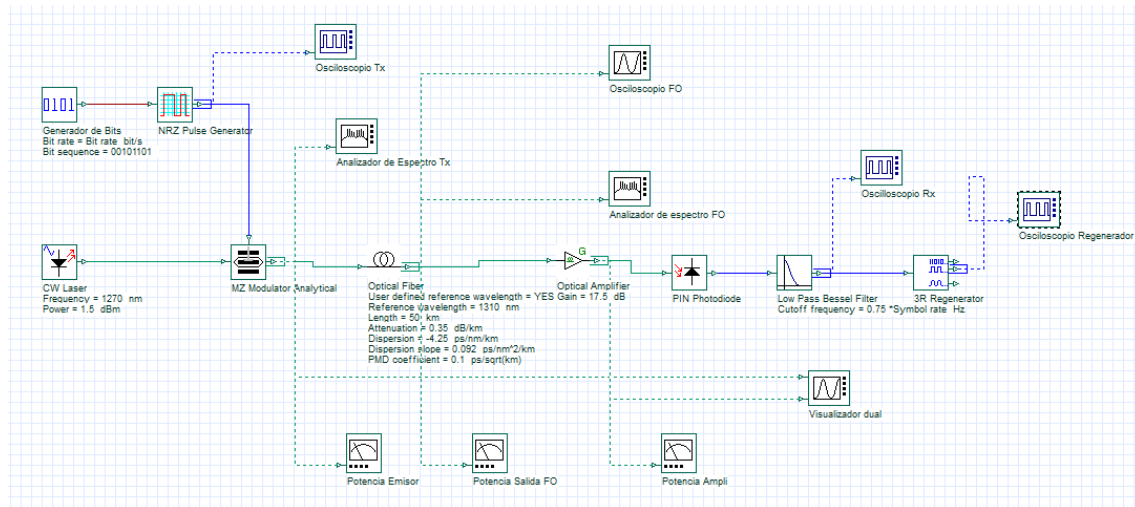


Figura 2.16 Esquema para la simulación del enlace.

3 RESULTADOS

3.1 Estándares ITU-T

Estándar de la ITU-T G.652

El estándar ITU-T G.652 describe distintas propiedades físicas de un hilo fibra óptica monomodo de longitud de onda central no desplazada que es un tipo de fibra donde la longitud de operación se encuentra en el medio de la banda de longitud de onda permitida de la fibra, es decir, que está cerca de la longitud de onda de 1 330nm, así como también las características de transmisión en torno a 1 310 (nm) a 1 550 (nm). El estándar además define el tipo de señales permitidas por la fibra óptica, las cuales son señales analógicas y digitales. El estándar G.652, G.653 y G.655 muestran diferentes características geométricas, mecánicas, de transmisión y ópticos en tres diferentes categorías.

- Las características de la fibra óptica durante la instalación y cableado se mantienen.
- Las características del cable son recomendadas durante el suministro del cable.
- La característica del enlace debe describir diferentes métodos de estimación para que una interfaz de un sistema óptico pueda ser calculado y modelado

El estándar G.652 tiene cuatro diferentes categorías las cuales va de la categoría A hasta la categoría D, las categorías G.652 A y G.652 B fueron las primeras en entrar al mercado, pero fueron descontinuadas debido a una atenuación elevada dada por los iones de hidroxilo, esto se resolvió en las siguientes dos categorías G.652 C y G.652 D los cuales permiten un aumento del ancho de banda ideales para sistemas *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM) el cual es una tecnología óptica que permite la combinación de varias longitudes de onda de onda para que viajen en un solo cable de fibra óptica [13] [14].

A continuación, se presentan las características del estándar G.652 categoría A y D.

ITU-T G.652 categoría A

El estándar G.652 categoría A describe todas las propiedades necesarias de un cable de fibra para soportar distintas aplicaciones descritas en el estándar ITU-T G.957 y G.691 con velocidades de 10 Gbps a distancias no mayores a 40 (km) para sistemas STM-16 y para STM-256 recomendada en el estándar G.693.

La Tabla 3.1 contiene los valores recomendados para la atenuación, la longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx}}$), mínima ($\lambda_{\text{mín}}$) y el máximo valor permitido para la dispersión cromática ($S_{\text{omáx}}$).

Tabla 3.1 Resumen estándar G.652 categoría A [14].

Propiedades de la fibra		
Parámetro	Detalle	Constante
Diámetro de campo de modo	Longitud de onda	1 310 (nm)
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{\text{mín}}$	1 300 (nm)
	$\lambda_{\text{máx}}$	1 324 (nm)
	$S_{\text{omáx}}$	0.092 (ps/nm ² * km)
Propiedades del cable		
Coeficiente de atenuación y PMQ	A 1 310 (nm)	0.5 (dB/km)
	A 1 550 (nm)	0.4 (dB/km)
	Máximo PMDq	0.5 (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)

ITU-T G.652 categoría D

En el estándar G.652 categoría D el ancho de banda aumentó con respecto al recomendado en el estándar G.652 categoría A y B. El rango va desde los 1 310 (nm) hasta los 1 625 (nm) los cuales son ideales para los sistemas CWDM. En la Tabla 3.2 se muestran detalles de la categoría, en esta se pueda observar un nuevo valor, la dispersión cromática mínima $S_{0\min}$ [13].

Tabla 3.2 Resumen estándar G.652 categoría D [13].

Propiedades de la fibra		
Parámetro	Detalle	Constante
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1 310 (nm)
Coeficiente de dispersión cromática	λ_{\min}	1300 (nm)
	λ_{\max}	1324 (nm)
	$S_{0\max}$	0.092 (ps/nm ² * km)
	$S_{0\min}$	0.073 (ps/nm ² * km)
Propiedades del cable		
Coeficiente de atenuación y dispersión de polarización.	Máximo a 1 310 (nm) hasta 1625 (nm)	0.4 (dB/km)
	Máximo a 1383 (nm)	0.4 (dB/km)
	Máximo a 1530 (nm) hasta 1565 (nm)	0.4 (dB/km)
	Máximo PMDq	0.2 (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)

Estándar ITU-T G.653

El estándar ITU-T G.653 establece cualidades de una fibra monomodo con dispersión de onda desplazada en la región de 1 550 (nm). Diseñada específicamente para su uso en la longitud de onda de 1 550 (nm), además puede ser usado en la región de 1 310 (nm), aunque puede contener una serie de limitaciones las cuales están descritas en el estándar ITU-T G.653. Cuando es usado este estándar en la región de 1300 (nm) la atenuación de la señal óptica debe estar por debajo de los 0.55 (dB/km) y no debe ser excedido. Este estándar contiene dos categorías: A y B.

ITU-T G.653 categoría B

El estándar G.653 de categoría A es muy riguroso en cuanto a la dispersión de polarización modal (PMD, por sus siglas en inglés) en las fibras ópticas monomodo. El PMD es un fenómeno en el que la polarización de la luz se dispersa a diferentes velocidades a medida que se transmite a través de la fibra, lo que puede causar distorsiones en la onda de luz. Esto es especialmente crítico en sistemas de alta velocidad y se vuelve más evidente en enlaces de larga distancia. La categoría A se utiliza en sistemas STM-64 que no superan los 400 (km) de distancia, y debe ser compatible con las aplicaciones descritas en el estándar G.959.1, incluyendo los sistemas STM-256. [15].

Tabla 3.3 muestra las especificaciones y propiedades de esta categoría.

Tabla 3.3 Resumen del estándar G.653 categoría B [15].

Parámetros de la fibra		
Característica	Detalle	Constante
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1 550 (nm)
Coeficiente de dispersión cromática (ps/nm ² * km)	D _{mín} (λ): 1 460 – 1 525 (nm)	0.085 (λ - 1525) – 3.5
	D _{mín} (λ): 1 525 – 1 625 (nm)	3.5/75 (λ - 1 600)
	D _{máx} (λ): 1 460 -1 575 (nm)	3.5/75 (λ – 1 500)
	D _{máx} (λ): 1 575 – 1 625 (nm)	0.085 (λ – 1 525) - 3.5
Propiedades del cable		
Coeficiente de atenuación	Hasta 1 550 (nm)	0.35 (dB/km)
Coeficiente de dispersión de polarización	PMD _Q	0.2 (ps/ √km)

Estándar ITU-T G.655

Este estándar define un valor absoluto para el coeficiente de dispersión cromática en el rango de longitudes que va de 1 530 (nm) a 1 565 (nm). Esto ayuda a reducir los efectos

no lineales que surgen en sistemas CWDM. Este estándar cuenta con cinco categorías, que van desde la categoría A hasta la E. las categorías D y E establecen límites en el coeficiente de dispersión cromática en el rango de longitudes que va desde los 1 460 (nm) a 1 625 (nm) [16].

ITU-T G.655 C

La categoría C del estándar G.655 soporta recomendaciones del interfaz óptico, las cuales están descritas en el estándar G.691, G.959.1 y G.693. Además, los requerimientos del PDM entrega la posibilidad de funcionamiento de sistemas STM-64 a distancias de 2000 (km).

La Tabla 3.4 resume las propiedades del estándar G.655 categoría C [16].

Tabla 3.4 Resumen del estándar G.655 categoría C [16].

Propiedades de la fibra		
Características	Detalle	Constante
Diámetro del campo modal	Longitud de referencia	1 550 (nm)
Coeficiente de dispersión cromática Para el rango de longitudes de 1 530 - 1 565 (nm).	$\lambda_{\min} / \lambda_{\max}$	1 530 (nm) / 1 565 (nm)
	$D_{\min} (\lambda)$	1 (ps/nm*km)
	$D_{\max} (\lambda)$	10 (ps/nm*km)
	$D_{\max} (\lambda) - D_{\min} (\lambda)$	≤ 5 (ps/nm*km)
Coeficiente de dispersión cromática En las longitudes de onda de 1565-1625 (nm).	$\lambda_{\min} / \lambda_{\max}$	Se tiene que establecer
	$D_{\min} (\lambda)$	Se tiene que establecer
	$D_{\max} (\lambda)$	Se tiene que establecer
Propiedades del cable		
Coeficiente de atenuación y PMD	Máximo a 1 550 (nm)	0.35 (dB/km)
	Máximo a 1 625 (nm)	0.4 (dB/km)
	Máximo PMDq	0.2 (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas por cada estándar. Se comparará la potencia óptica de recepción gracias al bloque *Optical*

Power Meter y los bits recibidos de cada estándar simulado en *OptiSystem* obtenidas mediante el bloque *Optical Time Domain Visualizer*, además de la respuesta en frecuencia las cuales fueron obtenidas mediante el bloque *Optical Spectrum Analyzer* disponible en el *software*, los resultados de las potencias obtenidas a la salida de la fibra se mostrarán en la Tabla 3.14 para el enlace de 25 (km) y en la Tabla 3.15 para el enlace de 50 (km).

3.2 Características de las bandas de frecuencia óptica (O, E, S, C, L, U)

La ITU-T dividió al sistema de transmisión en seis diferentes bandas, las llamadas: *Original* (O), *Extended* (E), *Short* (S), *Conventional* (C), *Long* (L), *Ultra-Long* (U). En la Tabla 3.5 se muestra el nombre y su longitud de onda respectiva [17].

Tabla 3.5 Bandas de longitud de onda [17].

Banda	Descripción	Longitud de onda (nm)
O	Original	1 260 – 1 360
E	Extendida	1 360 – 1 460
S	Corta	1 460 – 1 530
C	Convencional	1 530 – 1 560
L	Larga	1 565 – 1 625
U	Ultra-larga	1 625 – 1 675

- Banda Original (O): esta banda tiene un rango entre 1 260 (nm) a 1 360 (nm), se llama original debido a que esta era usada en comunicaciones ópticas en la década de los 70s. Esto fue así debido a que tenía una atenuación menor en comparación a otras bandas. La atenuación en esta banda con respecto al ion hidroxilo es de 0.34 (dB/km) [17].
- Banda Extendida (E): se encuentra en un rango de 1 360 (nm) a 1 460 (nm), las pérdidas por el fenómeno ion hidroxilo son de un 0.31 (dB/km) alcanzando distancias no mayores a 100 (km).
- Banda Corta (S): Va de un rango entre 1 460 (nm) a 1 530 (nm) con pérdidas por el ion hidroxilo de 0.25 (dB/km) alcanzando distancias no mayores a 160 (km).
- Banda Convencional (C): esta es la banda más usada, tiene un rango de 1530 (nm) a 1565 (nm) con pérdidas por el ion hidroxilo de 0.2 (dB/km) alcanzando distancias no mayores a 160 (km).

- Banda Larga (L): esta banda tiene un rango entre 1565 (nm) a 1625 (nm) con una atenuación por absorción de ion hidroxilo de 0.22 (dB/km), alcanzando distancias no mayores a 160 (km).
- Banda Ultra-larga (U): tiene un rango de 1625 (nm) a 1675 (nm), la ITU-T define esta banda como una región que no se procura usar, pero si como una zona de mantenimiento [17].

3.3 Parámetros necesarios para la simulación del enlace PTP.

Atenuación en la fibra

La atenuación de la fibra es causada por factores intrínsecos como las impurezas y la absorción, lo que se traduce en una pérdida de potencia por kilómetro. Los fabricantes establecen límites de pérdida de potencia para cumplir con los estándares.

En este caso, se utilizó la atenuación máxima de acuerdo con el estándar para calcular la pérdida total del enlace óptico. Esta se obtiene a través de la Ecuación 3.1 que tiene en cuenta la longitud de onda y el tipo de fibra utilizada. Además, se debe considerar que las pérdidas por absorción pueden representar entre un 3% y un 5% de las pérdidas totales. Para poder visualizar correctamente la señal en un osciloscopio, se utiliza un amplificador óptico en la salida de la fibra óptica.

$$\alpha_t = \alpha_{fo} * L$$

Ecuación 3.1 Atenuación total [12].

Donde

- α_t : Atenuación total de la fibra (dB).
 α_{fo} : Coeficiente de atenuación (dB/km).
 L : Longitud del enlace (km).

La Ecuación 3.1 será necesaria para calcular la ganancia del amplificador óptico, como ejemplo se tomará el coeficiente de atenuación del estándar ITU-T G.652 categoría A máximo a 1 310 (nm) y una longitud de enlace de 50 (km).

De la Ecuación 3.1:

$$\alpha_t = 0.5 \text{ (dB/km)} * 50 \text{ (km)}$$

$$\alpha_t = 25 \text{ dB}$$

La variable α_t tendrá un valor negativo puesto que reducirá la potencia de la señal óptica de entrada.

Donde α_t es reemplazado en la que corresponde a la ganancia del amplificador óptico.

$$G = \alpha_t$$

$$G = 25 \text{ dB}$$

Esto presenta un inconveniente ya que el aumento de la potencia de la información también implica un aumento en la potencia del ruido. Por ello es necesario el uso de un filtro pasa-bajos que permita el paso de aquellas frecuencias necesarias e imposibilite el paso de ruido al sistema. La ganancia de la fibra está definida en la Tabla 3.10,

Tabla **3.11**, Tabla 3.12 y

Tabla **3.13** que corresponden a los datos necesarios para la simulación.

Coeficiente de dispersión en base a los estándares solicitados

Los estándares de simulación incluyen una especificación del coeficiente de dispersión cromática, donde se indica un rango de valores válidos para la longitud de onda de trabajo. Esto se logra a través de una inecuación que se utiliza junto con las longitudes de onda máxima y mínima establecidas por el estándar. Para obtener el valor del coeficiente de dispersión cromática para cada estándar, se emplean las ecuaciones correspondientes.

Para el estándar ITU-T G.652 categoría A:

$$\frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_{0 \text{ máx}}}{\lambda} \right)^4 \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_{0 \text{ mín}}}{\lambda} \right)^4 \right)$$

Ecuación 3.2 Cálculo del coeficiente de dispersión cromática para el estándar G.652 [16].

Donde:

- λ : Longitud de trabajo establecido.
- $S_{0 \text{ máx}}$: Valor máximo de pendiente de dispersión cero
- $\lambda_{0 \text{ máx}}$: Máxima longitud de dispersión cero.
- $\lambda_{0 \text{ mín}}$: Mínima longitud de dispersión cero.
- $D(\lambda)$: Dispersión cromática.

Una aplicación práctica de lo anterior sería el uso de la Ecuación 3.2 para una longitud de trabajo de 1 270 (nm):

$$\begin{aligned}\lambda &: 1\,270 \text{ (nm)} \\ S_{0\text{máx}} &: 0.092 \text{ (ps/nm}^2 \cdot \text{km)} \\ \lambda_{0\text{máx}} &: 1\,324 \text{ (nm)} \\ \lambda_{0\text{mín}} &: 1\,300 \text{ (nm)}\end{aligned}$$

$$\frac{1\,270 \text{ (nm)} \cdot 0.092 \text{ (ps/nm}^2 \cdot \text{km)}}{4} \left(1 - \left(\frac{1\,324 \text{ (nm)}}{1\,270 \text{ (nm)}} \right)^4 \right) \leq D(1\,270 \text{ (nm)})$$

$$D(1\,270 \text{ (nm)}) \leq \frac{1\,270 \text{ (nm)} \cdot 0.092 \text{ (ps/nm}^2 \cdot \text{km)}}{4} \left(1 - \left(\frac{1\,300 \text{ (nm)}}{1\,270 \text{ (nm)}} \right)^4 \right)$$

Por lo tanto:

$$-5.29 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \leq D(1\,270 \text{ (nm)}) \leq -2.86 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$$

De esta desigualdad se selecciona un valor de acuerdo con el máximo y mínimo calculados, en este caso el coeficiente de dispersión $D(1\,270 \text{ (nm)})$ es de -2.85 (ps/nm km). La Tabla 3.6 presenta las longitudes de onda de trabajo de cada banda y sus correspondientes valores máximos y mínimos del coeficiente calculados.

Tabla 3.6 Rango de la dispersión calculados para G.652A.

Longitud de trabajo (nm)	$D_{\text{mín}}$ (ps/nm * km)	$D_{\text{máx}}$ (ps/nm * km)
1 270	-5,29	-2,86
1 390	5,65	7,51
1 490	12,9	14,41
1 545	16,37	17,725
1 600	19,54	20,76
1 650	22,22	23,33

De este rango de valores se selecciona uno en específico los cuales se encuentran establecidos dentro de la Tabla 3.10.

Para el estándar G.652 categoría D se tienen 3 ecuaciones similares al estándar G.652 categoría A donde se tiene un nuevo parámetro el cual es la pendiente máxima de dispersión cero ($S_{0\text{mín}}$). Las ecuaciones serán las siguientes:

$$\frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ máx}}{\lambda} \right)^4 \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \text{ mín}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ mín}}{\lambda} \right)^4 \right) \quad (\lambda \leq \lambda_0 \text{ mín})$$

Ecuación 3.3 Para longitudes de trabajo por debajo de la longitud mínima de dispersión cero [13].

$$\frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ máx}}{\lambda} \right)^4 \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ mín}}{\lambda} \right)^4 \right) \quad (\lambda_0 \text{ mín} \leq \lambda \leq \lambda_0 \text{ máx})$$

Ecuación 3.4 Para longitudes de trabajo entre las longitudes de dispersión cero mínimo y máximo [13].

$$\frac{\lambda S_{0 \text{ máx}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ máx}}{\lambda} \right)^4 \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \text{ mín}}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0 \text{ mín}}{\lambda} \right)^4 \right) \quad (\lambda_0 \text{ máx} \leq \lambda)$$

Ecuación 3.5 Para longitudes de trabajo por encima de la longitud de dispersión cero [13].

Se elige una de estas ecuaciones según la longitud de trabajo. Por ejemplo, para la longitud de 1 390 (nm), que es mayor que la longitud máxima de dispersión de 1 324 (nm), se utiliza la Ecuación 3.5 el cual arrojó el siguiente resultado:

$$\frac{1\,390 \text{ (nm)} * 0.092 \text{ (ps/nm}^2 * \text{km)}}{4} \left(1 - \left(\frac{1\,324 \text{ (nm)}}{1\,390 \text{ (nm)}} \right)^4 \right) \leq D(1\,390 \text{ (nm)})$$

$$D(1\,390 \text{ (nm)}) \leq \frac{1\,390 \text{ (nm)} * 0.073 \text{ (ps/nm}^2 * \text{km)}}{4} \left(1 - \left(\frac{1\,300 \text{ (nm)}}{1\,390 \text{ (nm)}} \right)^4 \right)$$

Por lo tanto:

$$4.42 \text{ (ps/nm} * \text{km)} \leq D(1\,390 \text{ (nm)}) \leq 7.51 \text{ (ps/nm} * \text{km)}$$

De esta desigualdad el coeficiente de dispersión cromático seleccionado es 5.42 ps/nm*km, del mismo modo, cada longitud de onda de trabajo definida tiene sus respectivos valores máximos y mínimos del coeficiente de dispersión en la

Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Rango de dispersión calculados para G.652D.

Longitud de trabajo (nm)	D_{\min} (ps/nm * km)	D_{\max} (ps/nm * km)
1 270	-5,29	-2,27
1 390	4,42	7,51
1 490	10,10	14,41
1 545	12,81	17,72
1 600	15,30	20,76
1 650	17,39	23,33

Igualmente, de la anterior tabla se seleccionan un valor específico para cada longitud de onda los cuales están descritos en los parámetros necesarios para la simulación en la

Tabla 3.11.

Para el estándar ITU-T G.653 se tienen varias ecuaciones para la obtención del coeficiente de dispersión cromática dependiendo del rango en el que se encuentra la longitud de onda de trabajo, para la categoría B del estándar se definen las siguientes ecuaciones con los coeficientes de dispersión máximos y mínimos:

$$D_{\min}(\lambda) = 0.085(\lambda - 1525) - 3.5$$

Ecuación 3.6 Coeficiente de dispersión mínima para las longitudes entre 1 460 (nm) y 1 525 (nm).

$$D_{\max}(\lambda) = 3.5/75 (\lambda - 1500)$$

Ecuación 3.7 Coeficiente de dispersión máxima para el rango de 1 460 (nm) a 1 575 (nm).

Por ejemplo, para determinar el valor mínimo del coeficiente de dispersión para la longitud de trabajo de 1 490 (nm) se hace uso de la Ecuación 3.6 y Ecuación 3.7:

$$D_{\min}(1\,490\text{ (nm)}) = 0.085(1\,490\text{ (nm)} - 1525) - 3.5$$

$$D_{\min}(1\,490) = -6.475\text{ (ps/nm * km)}$$

$$D_{\max}(1\,490\text{ (nm)}) = 3.5/75(1\,490\text{ (nm)} - 1\,600)$$

$$D_{\text{máx}}(1\,490) = -0.0467 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)}$$

Por lo tanto:

$$-6.475 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \leq D_{\text{min}}(1\,490 \text{ (nm)}) \leq -0.0467 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$$

Además, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$D_{\text{min}}(\lambda) = 3.5/75(\lambda - 1\,600)$$

Ecuación 3.8 Coeficiente de dispersión mínima para el rango de 1 525 (nm) a 1 625 (nm).

$$D_{\text{máx}}(\lambda) = 0.085(\lambda - 1575) + 3.5$$

Ecuación 3.9 Coeficiente de dispersión máxima para el rango de 1 575 (nm) y 1 625 (nm).

De la Ecuación 3.8 y Ecuación 3.9 se pueden calcular los valores correspondientes a la longitud de trabajo de 1 600 (nm), obteniéndose los siguientes resultados:

$$D_{\text{min}}(1\,600 \text{ (nm)}) = 3.5/75(1\,600 \text{ (nm)} - 1\,600)$$

$$D_{\text{min}}(1\,600 \text{ (nm)}) = 0 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)}$$

$$D_{\text{máx}}(1\,600 \text{ (nm)}) = 0.085(1\,600 \text{ (nm)} - 1575) + 3.5$$

$$D_{\text{máx}}(1\,600 \text{ (nm)}) = 5.625 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)}$$

Por lo tanto:

$$0 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)} \leq D(1\,600 \text{ (nm)}) \leq 5.625 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)}$$

La información recolectada para la dispersión se presenta en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Coeficientes de dispersión máximo y mínimo para el estándar G.653 categoría B.

Longitud de trabajo (nm)	D_{min} (ps/nm · km)	$D_{\text{máx}}$ (ps/nm · km)
1 270	-	-
1 390	-	-
1 490	-6,48	-0,47
1 545	-2,57	2,1
1 600	0	5,625
1 650	2,33	9,875

Se elige un valor dentro del rango obtenido anteriormente y la

Tabla **3.12** presenta los coeficientes de dispersión cromática elegidos. Sin embargo, para las longitudes de onda de 1 270 (nm) y 1 390 (nm), el estándar no proporciona una ecuación para calcular el coeficiente de dispersión cromática.

El estándar G.655 categoría C establece que el coeficiente de dispersión cromática debe estar comprendido entre 1 (ps/nm * km) y 10 (ps/nm * km) para las longitudes de onda entre 1 530 (nm) y 1 565 (nm). Sin embargo, para el rango de 1 565 (nm) a 1 625 (nm), se deben utilizar las siguientes ecuaciones para calcular el valor correspondiente.

$$D_{\min} = 3.30/75(\lambda - 1\,550) + 6.06$$

Ecuación 3.10 Coeficiente de dispersión mínima para el rango de 1 565 (nm) a 1 625 (nm).

$$D_{\max} = 4.12/75(\lambda - 1\,550) + 9.31$$

Ecuación 3.11 Coeficiente de dispersión máxima el rango comprendido entre 1 565 (nm) a 1 625 (nm).

A partir de la Ecuación 3.10 y Ecuación 3.11 se obtienen los siguientes resultados:

$$D(1\,600\text{ (nm)})_{\min} = 3.30/75 (1\,600\text{ (nm)} - 1\,550) + 6.06$$

$$D(1\,600\text{ (nm)})_{\min} = 8.26\text{ (ps/nm * km)}$$

$$D(1\,600\text{ (nm)})_{\max} = 4.12/75 (1\,600\text{ (nm)} - 1\,550) + 9.31$$

$$D(1\,600\text{ (nm)})_{\max} = 12.057\text{ (ps/nm * km)}$$

Por lo tanto:

$$8.26\text{ (ps/nm * km)} \leq D(1\,600\text{ (nm)}) \leq 12.057\text{ (ps/nm * km)}$$

Se presenta en la Tabla 3.9 los coeficientes máximos y mínimos permitidos por el estándar. Para la longitud de 1 490 (nm) se eligieron los mismos coeficientes a los establecidos en la longitud de 1 545 (nm), ya que el estándar no establece una ecuación para el cálculo del coeficiente, pero si permite su uso.

Tabla 3.9 Coeficiente de dispersión cromática máxima y mínima del estándar G.655 categoría C.

λ de transmisión (nm)	D_{\min} (ps/nm * km)	D_{\max} (ps/nm * km)
1 270	-	-
1 390	-	-

1 490	1	10
1 545	1	10
1 600	8,26	12,057
1 650	10,46	14,803

Los coeficientes de dispersión cromática seleccionados para este estándar se encuentran especificados en la

Tabla 3.13.

Datos para la simulación de cada estándar.

De los cálculos realizados en los anteriores puntos, se organizaron los resultados en tablas para cada estándar, de modo que sea sencilla la visualización de los parámetros que se usarán en las simulaciones.

Tabla 3.10 Datos para la simulación estándar G.652 categoría A.

Parámetros de transmisor			Parámetros de Canal					Receptor
Ventana Óptica	PTx (dBm)	λ (nm)	λ de referencia (nm)	Atenuación (dB/km)	D(λ) (ps/nm*km)	Distancia de enlace (km)	PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	Amplificador óptico (dB) Para 50 (km)/25 (km)
O	1.5	1 270	1 310	0.50	-4.45	50/25	0.5	25/12.5
E	1.5	1 390		0.4	6.35		0.5	20/10
S	1.5	1 490			12.99		0.5	
C	1.5	1 545			17.69		0.5	
L	1.5	1 600			20.42		0.5	
U	1.5	1 650			22.73		0.5	

Tabla 3.11 Datos para la simulación estándar G.652 categoría D.

Parámetros de transmisor			Parámetros de Canal					Receptor
Ventana Óptica	PTx (dBm)	λ (nm)	λ de referencia (nm)	Atenuación (dB/km)	D(λ) (ps/nm*km)	Distancia de enlace (km)	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Amplificador óptico (dB) Para 50 (km)/25 (km)
O	1.5	1 270	1 310	0.35	-4.44	50/25	0.1	17.5/8.75
E	1.5	1 390		0.24	5.42			12/6

S	1.5	1 490			10.72		0.2	
C	1.5	1 545			13.76			
L	1.5	1 600			18.22			
U	1.5	1 650			19.745			

Tabla 3.12 Datos para la simulación del estándar G.653 categoría B.

Parámetros de transmisor			Parámetros de Canal					Receptor
Ventana Óptica	PTx (dBm)	λ (nm)	λ de referencia (nm)	Atenuación (dB/km)	D(λ) (ps/nm*km)	Distancia de enlace (km)	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Amplificador óptico (dB) Para 50 (km)/25 (km)
O	1.5	1 270	1 550	0.35	-	50/25	0.2	17.5/8.75
E	1.5	1 390			-		0.2	
S	1.5	1 490			-3.42		0.2	
C	1.5	1 545			0.12		0.2	
L	1.5	1 600			2.97		0.2	
U	1.5	1 650			2.35		0.2	

Tabla 3.13 Datos para la simulación del estándar G.655 categoría C.

Parámetros de transmisor			Parámetros de Canal					Receptor
Ventana Óptica	PTx (dBm)	λ (nm)	λ de referencia (nm)	Atenuación (dB/km)	D(λ) (ps/nm*km)	Distancia de enlace (km)	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Amplificador óptico (dB) Para 50 (km)/25 (km)
O	1.5	1 270	1 550	0.35	-	50/25	0.1	17.5/8.75
E	1.5	1 390			-		0.2	
S	1.5	1 490			3		0.2	
C	1.5	1 545			1		0.2	
L	1.5	1 600		0.4	10.64		0.2	20/10
U	1.5	1 650			12.64		0.2	

3.4 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría A para la longitud de 25 (km).

Se mostrarán los resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría A y las diferentes longitudes de onda de trabajo, dado que el coeficiente de atenuación desde la banda E es la misma para las siguientes bandas, se presentarán las mediciones obtenidas por *Optical Power Meter* en el Anexo III.

Simulación correspondiente a 1 270 (nm)

El resultado obtenido muestra la señal digital a la salida del transmisor en el osciloscopio Tx y la salida del filtro pasa-bajo en el osciloscopio Rx. De este modo se puede observar que la señal llegó con ruido debido los picos que se registran en su punto más alto. La Figura 3.1 muestra a las dos señales siendo comparadas.

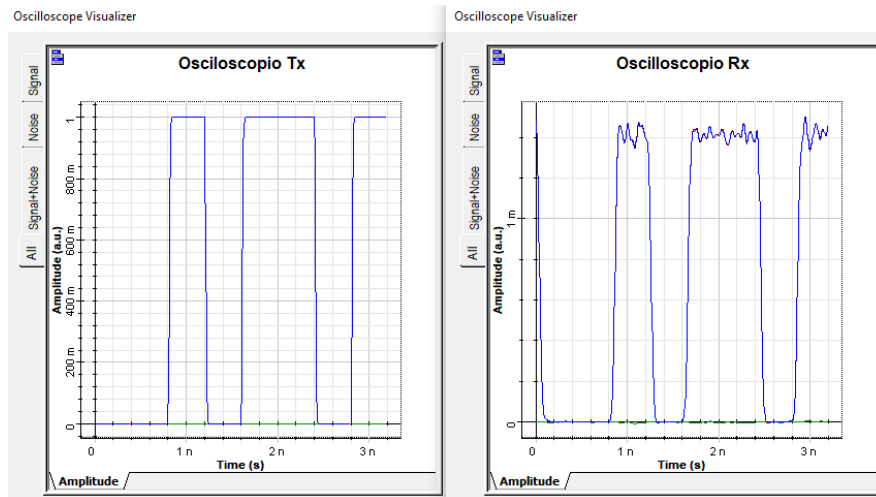


Figura 3.1 Señal transmitida y recibida.

Se puede observar en la Figura 3.2 la señal enviada por el transmisor y la señal regenerada en el receptor, la información de la señal recibida es similar a la señal transmitida.

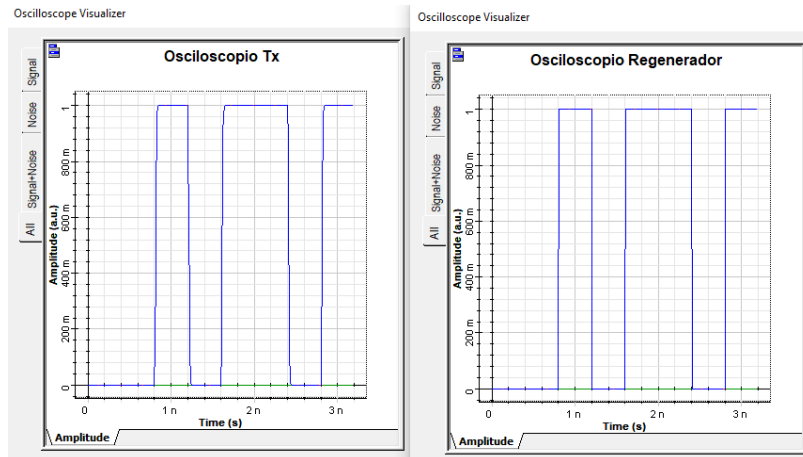


Figura 3.2 Señal de transmisor y señal regenerada.

A continuación, se presenta la potencia que fueron medidas en cada etapa del sistema, este mostró una disminución en la potencia a la salida del bloque *MZ Modulator Analytical* de 3.058 (dB), es decir, perdió la mitad de su potencia. Se puede notar en la salida de la fibra que la señal ha sufrido una atenuación y tiene una potencia de -14.057 (dBm), el amplificador óptico tuvo una ganancia de 12.5 (dB) y la señal recibida tuvo una potencia de -1.129 (dBm). En la Figura 3.3 se puede observar el bloque *Optical Power Meter* con las mediciones registradas en las salidas del bloque *MZ Modulator*, *Optical Fiber* y *Optical Amplifier* respectivamente.

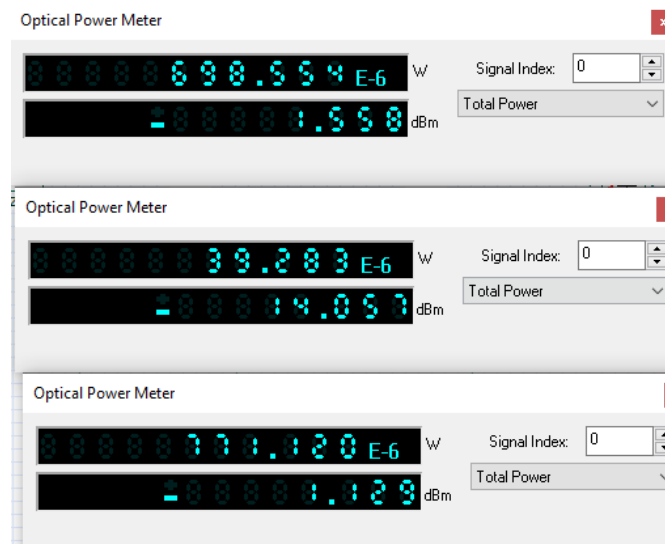


Figura 3.3 Potencia a la salida del bloque *MZ Modulator*, *Optical Fiber* y *Optical Amplifier* respectivamente.

En la Figura 3.4 presenta la potencia medida por el bloque *Optical Spectrum Analyzer* que presenta el espectro de frecuencias en la que fueron usadas, en este caso se puede observar que la potencia de la señal está por encima de los -20 dBm el cual es un valor de referencia, y la potencia del espectro a la salida de la fibra óptica está un poco por

encima de esta referencia, además, es posible notar que la potencia se encuentra enfocada en proximidad a la longitud de onda utilizada por el sistema, que en este caso fue de 1 270 (nm), se optó por usar las unidades en metros para una mejor visualización de los resultados.

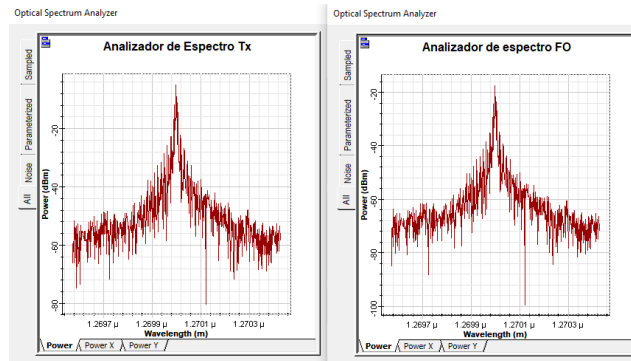


Figura 3.4 Resultado del analizador de espectros a la salida del transmisor y a la salida de la fibra óptica.

Simulación correspondiente a 1 390 (nm)

Se pudo notar que el nivel de ruido generado por el sistema aumentó al utilizar una longitud de onda de 1 390 (nm), debido a la presencia de picos más grandes que los observados en la longitud de onda de 1 270 (nm). La Figura 3.5 muestra una comparación entre la señal enviada por el transmisor y la señal recibida por el receptor.

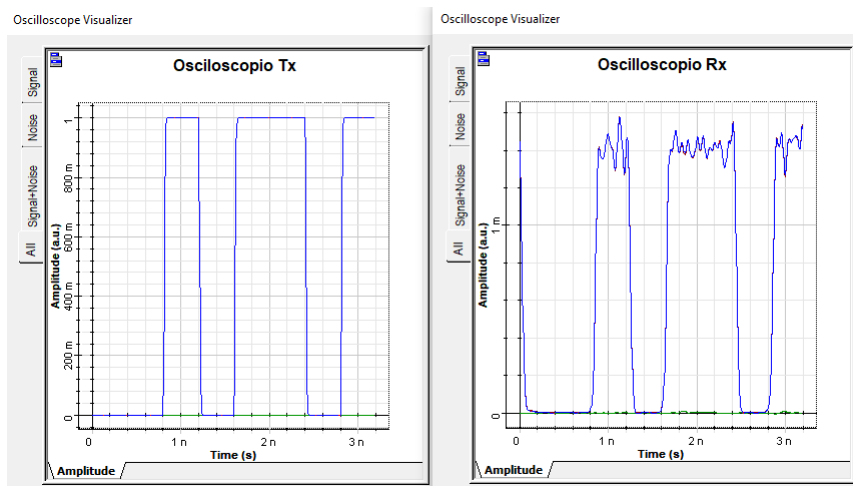


Figura 3.5 Señal de salida del transmisor y señal recibida en el receptor.

Al igual que en la simulación anterior se puede determinar que existe una atenuación por parte del bloque *MZ Modulator Analytical* alrededor de 3.058 (dB), la fibra tiene una potencia de -11.558 dBm. El amplificador óptico tuvo una ganancia de 10 dB por lo que a su salida entregó una potencia de -1.316 (dBm). En la Figura 3.6 se puede observar

las mediciones obtenidas por el medidor de potencia óptico a la salida del modulador, fibra y amplificador ópticos.



Figura 3.6 Potencia óptica a la salida del Modulador, fibra óptica y amplificador para 1390 (nm).

El analizador de espectros de la Figura 3.7 mostró que la potencia más alta estaba en la región de 1390 (nm) en la muestra del transmisor y receptor, además como referencia se toma los -20 dBm. Se puede observar que la potencia fuera de la fibra óptica disminuyó y está cercana a la referencia.

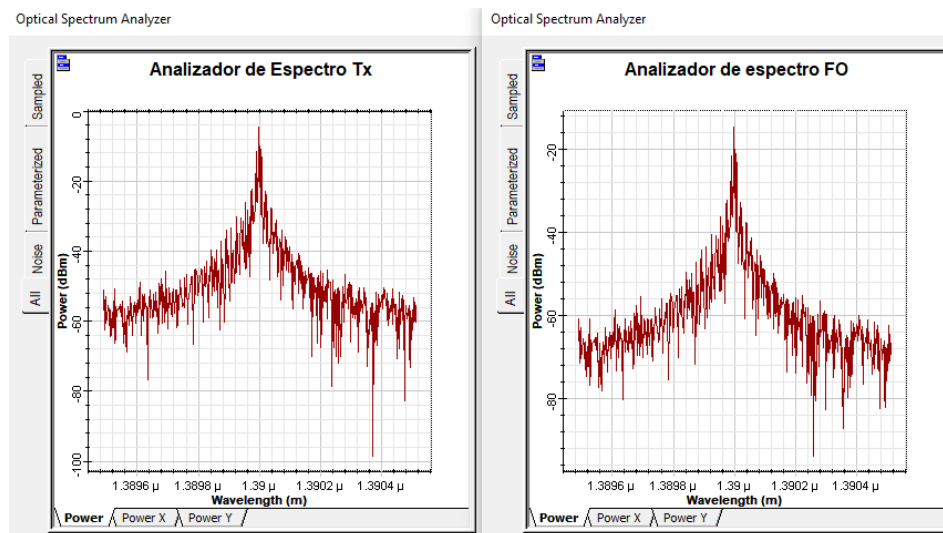


Figura 3.7 Muestras del espectro en la salida del modulador y a la salida de la fibra óptica.

Simulación correspondiente a 1490 (nm)

La señal transmitida por el transmisor y la recibida por el receptor se muestran en la Figura 3.8. Aunque la señal en el osciloscopio de recepción presenta una cantidad significativa de ruido, el sistema aún es capaz de detectar el flujo de bits transmitidos

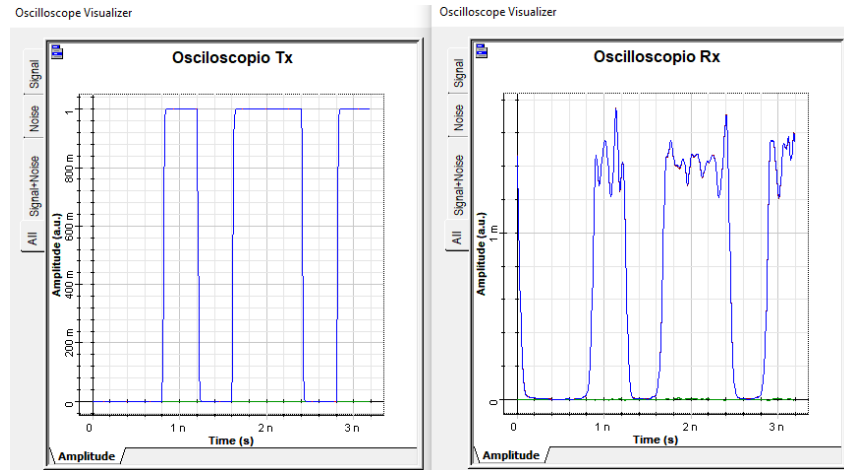


Figura 3.8 Señal enviada y recibida correspondiente a 1 490 (nm).

Del mismo modo, el espectro de frecuencias de esta y las siguientes simulaciones se presentarán en el Anexo III debido a que las muestras que se obtienen tienen la mayor concentración en la región de trabajo establecidas en la Tabla 3.10,

Tabla 3.11, Tabla 3.12 y

Tabla 3.13 y porque el coeficiente de atenuación es el mismo desde la banda E hasta la banda U.

Simulación correspondiente a 1 545 (nm)

En la Figura 3.9 se observa a la señal transmitida y recibida, donde se puede observar que la señal en el receptor tiene un mayor grado de ruido introducido, aun así, el sistema es capaz de reconstruir la información original.

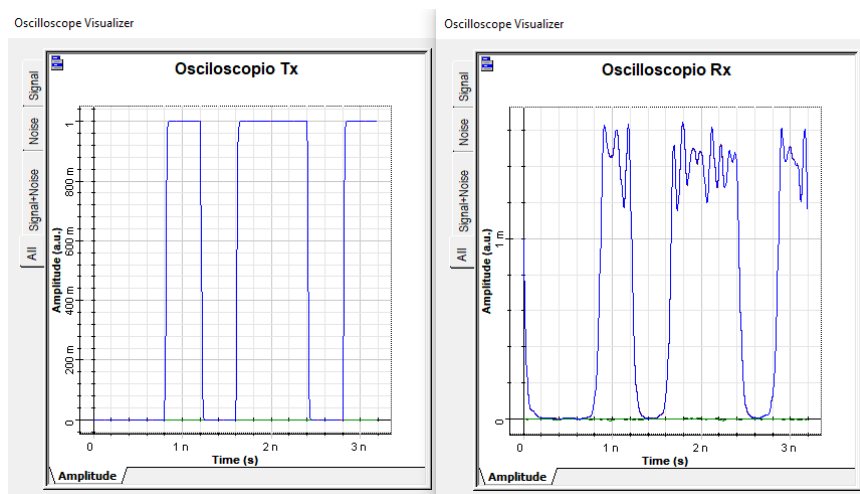


Figura 3.9 Señal enviada por el transmisor y señal recibida correspondiente a 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm)

La Figura 3.10 ilustra la señal transmitida y recibida en el transmisor, y se nota que la señal es más susceptible al ruido del sistema debido a la presencia de picos en el osciloscopio.

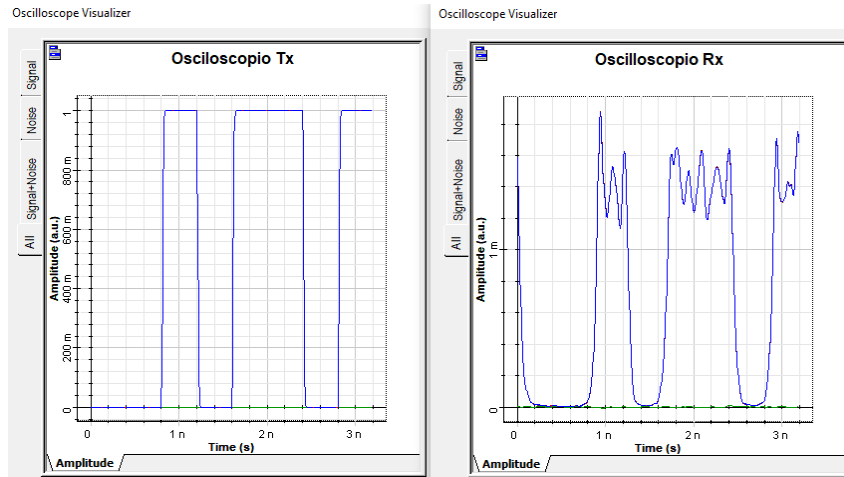


Figura 3.10 Señal enviada por el transmisor y señal recibida para 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm)

La señal transmitida y recibida se muestra en la Figura 3.11, donde se observa que el ruido afecta más la señal a partir de la región de 1 600 nm debido a la presencia de picos en la señal recibida. A pesar de esto, el sistema logra reconstruir la señal, como se observa en la Figura 3.12.

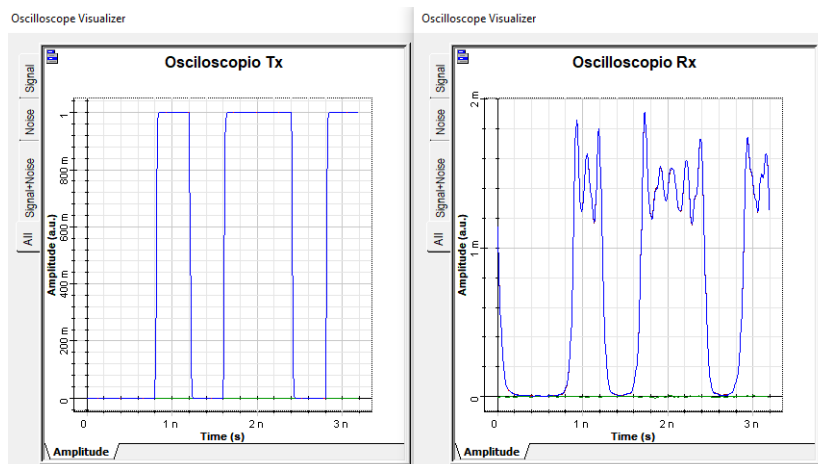


Figura 3.11 Señal enviada por el transmisor y señal recibida para 1 650 (nm).

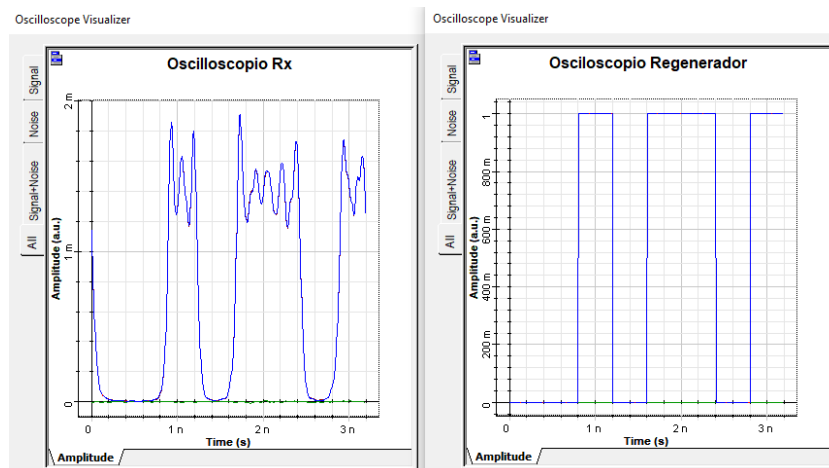


Figura 3.12 Señal recibida en el receptor y señal reconstruida.

3.5 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría D para la longitud de 25 (km).

Simulación correspondiente a 1 270 (nm)

Se presentan los resultados obtenidos para la simulación del estándar G.652 categoría D en un enlace de 25 (km), como se puede ver en la Figura 3.13 donde la señal recibida tiene introducido ruido del sistema y se evidencia en la Figura 3.14 que la recuperación de la información original no se ve afectada.

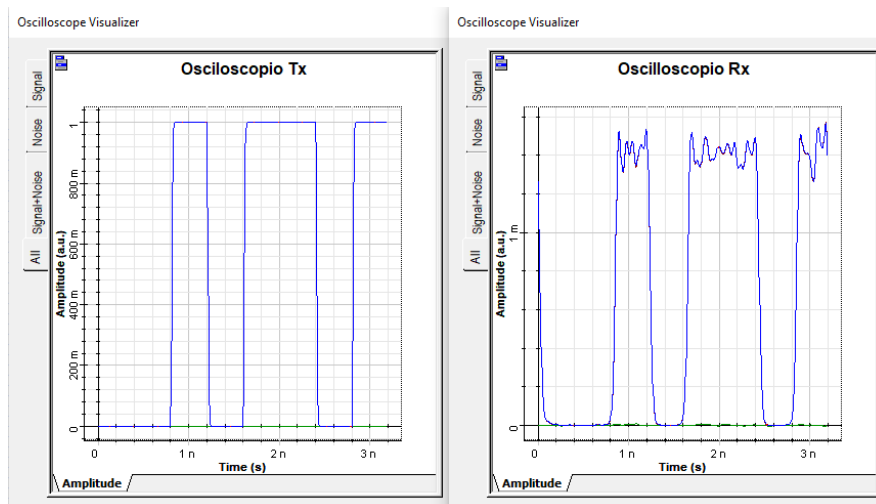


Figura 3.13 Señal enviada por el transmisor y señal recibida del receptor para 1 270 (nm).

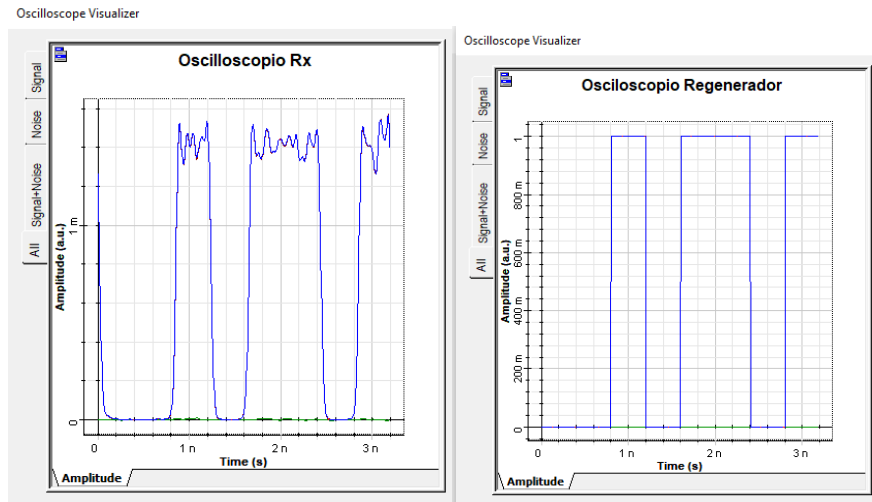


Figura 3.14 Señal entregada al receptor y señal regenerada.

Los datos obtenidos de la potencia se presentan en la Figura 3.15, donde se observa que la potencia de la señal disminuyó en 3.058 (dB), la potencia fuera de la fibra decayó en 8.75 (dB). Para compensar esta pérdida de potencia, el amplificador óptico debió tener el mismo valor para la ganancia. En última instancia, la potencia que recibe el transmisor es de -1.377 (dBm).

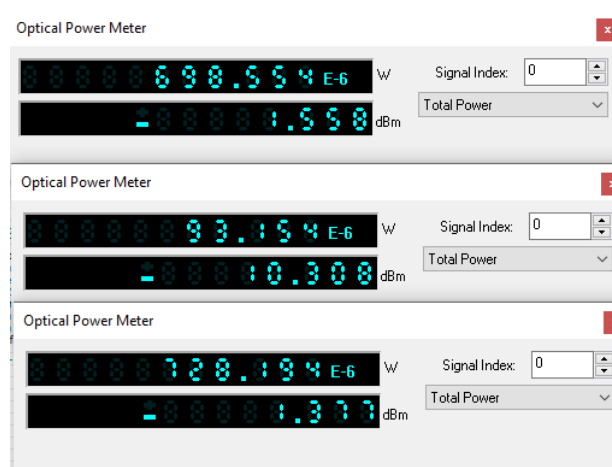


Figura 3.15 Potencia a la salida del modulador, fibra y amplificador ópticos para 1 270 (nm).

En la Figura 3.16 se puede observar el espectro de potencia obtenido a la salida del modulador y de la fibra. Este espectro permite identificar la región en la que se concentra la mayor potencia de la señal, que en este caso corresponde a 1 270 (nm). También se puede observar que la potencia de la señal a la salida de la fibra es menor que la obtenida a la salida del modulador.

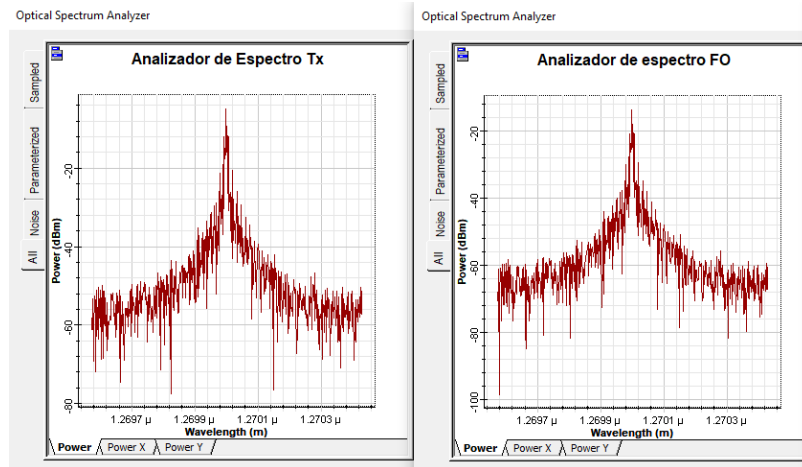


Figura 3.16 Espectro de las señales de transmisor y receptor para 1 270 (nm).

Simulación correspondiente a 1 390 (nm)

La Figura 3.17 presenta una señal similar que la Figura 3.13, el ruido en esta longitud de onda no afectó en gran medida a la información que se requería.

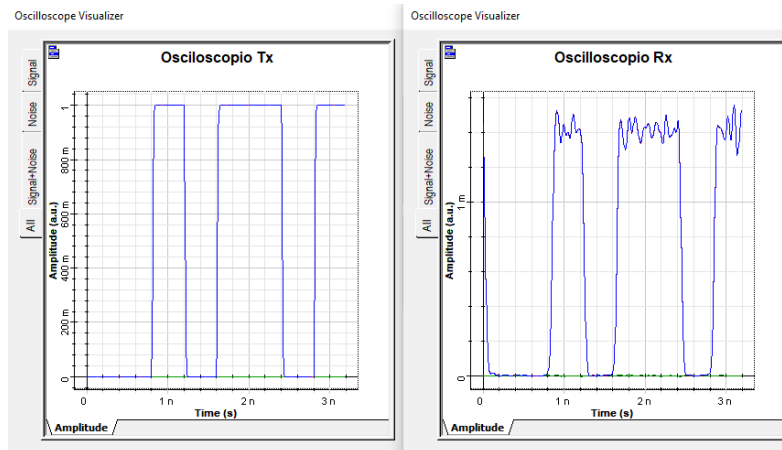


Figura 3.17 Señal entregada por el transmisor y señal que recibe el receptor para la longitud de 1 390 (nm).

Los datos obtenidos en la simulación de 1 390 (nm) se asemejan a los arrojados para la simulación de 1 270 (nm) tal como se observa en la Figura 3.18



Figura 3.18 Potencia en la salida del modulador, fibra y amplificador ópticos para 1 390 (nm).

En la Figura 3.19 se presentan los resultados del espectro obtenido a la salida del modulador y la fibra. Al tener los mismos resultados que 1 270 (nm) se verá que la mayor potencia se concentra en la región de 1390 (nm).

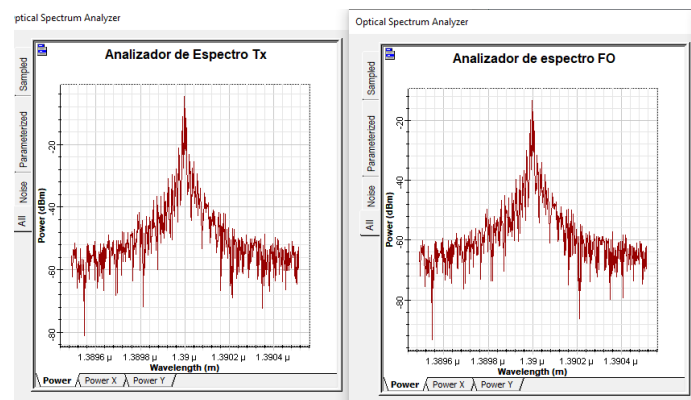


Figura 3.19 Espectro de la señal enviada y recibida para 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm)

Se obtuvieron los datos para la simulación de 1 490 (nm), donde se puede observar la señal enviada siendo comparada con la señal tomada por el receptor, en la Figura 3.20 la señal del Osciloscopio Rx tiene un mayor grado de ruido añadido que la señal mostrada en la Figura 3.17.

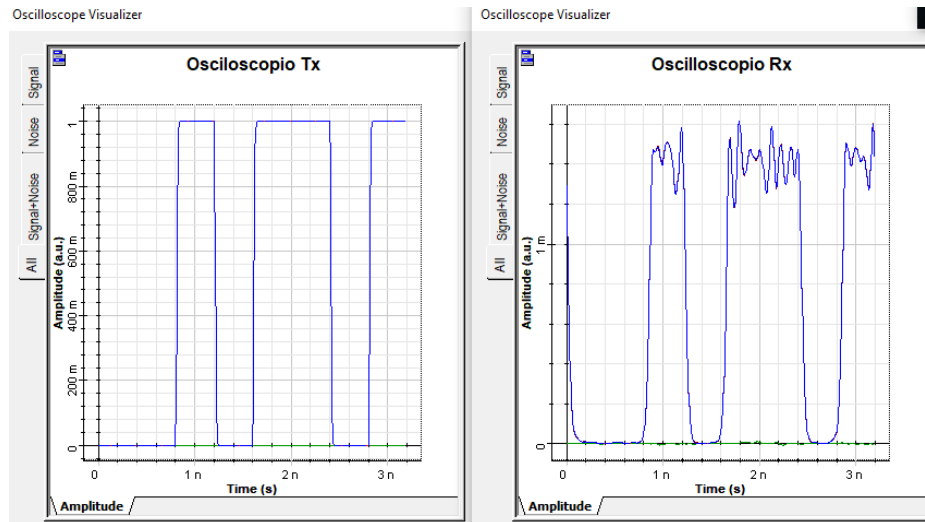


Figura 3.20 Señal original y señal en el receptor para 1 490 (nm).

La Figura 3.21 ilustra como el bloque *Optical Power Meter* muestra la potencia de la señal al salir de la fibra. Para el resto de las simulaciones de esta categoría el coeficiente de atenuación será el mismo, por ello las mediciones de potencia a la salida de la fibra óptica serán las mismas que en la Figura 3.21 no serán presentadas en esta sección en el Anexo IV.



Figura 3.21 Mediciones obtenidas a la salida del modulador, fibra y amplificador ópticos.

El analizador de espectros mostrará la región donde trabaja la señal, en la Figura 3.22 se observa que la señal trabaja en la región de 1 490 (nm).

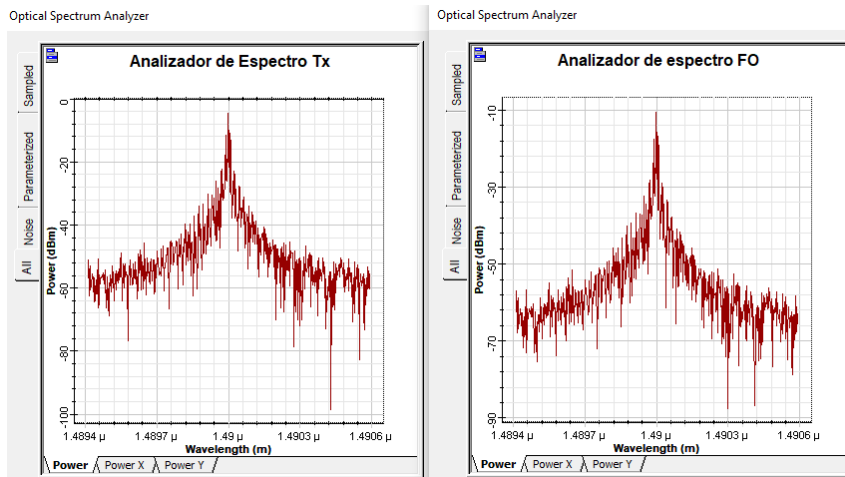


Figura 3.22 Resultados obtenidos por el analizador de espectros óptico para 1 490 (nm).

Simulación correspondiente a 1 545 (nm)

La Figura 3.23 compara la señal enviada por el transmisor y la señal que recibe el receptor, De esta manera, se puede notar que la señal alcanza un nivel de ruido comparable al presentado en la Figura 3.20.

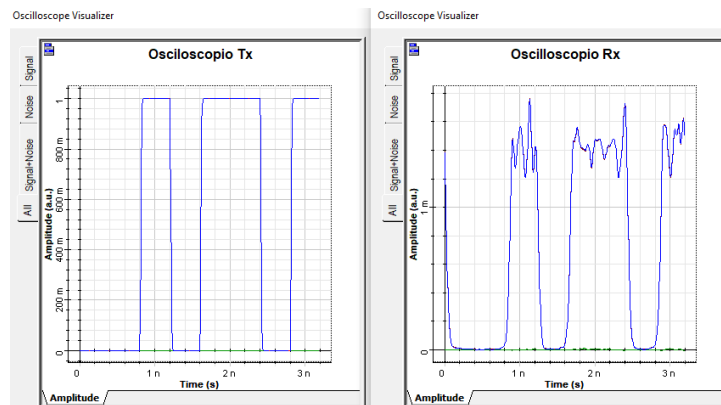


Figura 3.23 Señal enviada y recibida para 1 545 (nm).

Simulación correspondiente 1 600 (nm)

En la Figura 3.24 se puede comparar la señal enviada y la señal recibida. La señal recibida tiene un mayor grado de ruido introducido en comparación a la región de 1 545 (nm) presentada en la Figura 3.23, esto se debe a que el estándar establece una longitud referencial de trabajo de 1 310 (nm).

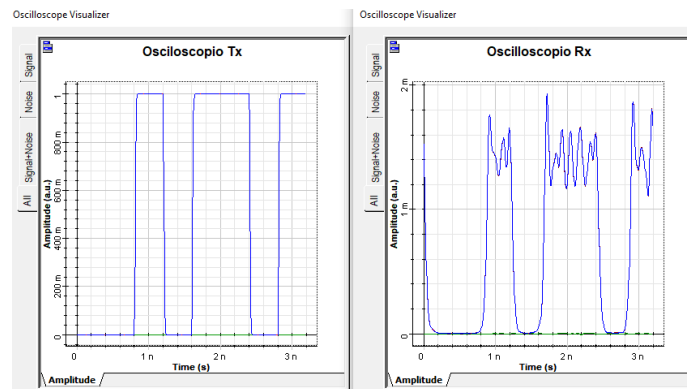


Figura 3.24 Comparación de la señal enviada y señal recibida para 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm)

La Figura 3.25 ilustra a la señal de receptor donde el primer bit en comparación con la Figura 3.23 un nivel de ruido más alto.

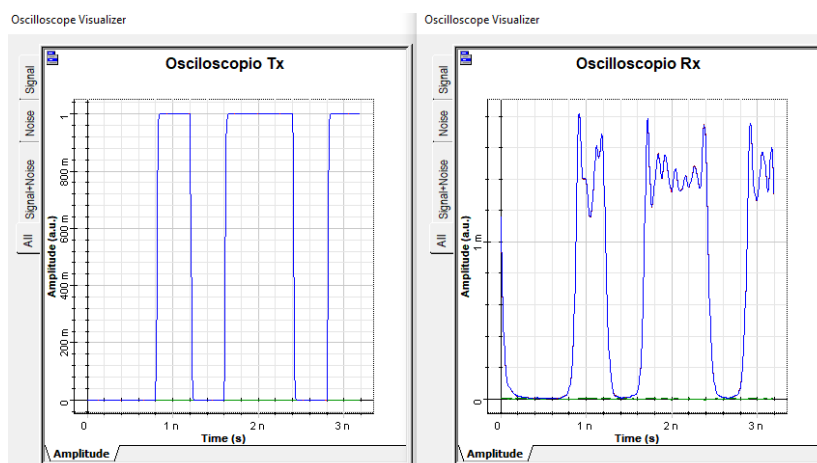


Figura 3.25 Señal enviada y recibida para 1 650 (nm).

3.6 Resultados obtenidos para el estándar G.653 categoría B para la longitud de 25 km

El estándar G.653 categoría B no define un coeficiente de dispersión en longitudes de onda inferiores a 1 460 (nm) porque el estándar establece que no está destinado a ser usado en dichas longitudes [15], por ello se omitió este parámetro en la simulación hasta la banda E, es decir la longitud de onda de trabajo de 1 390 (nm).

Además, el coeficiente de atenuación será el mismo para todas las simulaciones y para las longitudes de onda superiores a 1 550 (nm) también será el mismo, debido a que el estándar no define uno en específico para las longitudes mayores a 1 550 (nm). De este

modo las mediciones de las potencias a la salida de la fibra y la respuesta en frecuencia a partir de la longitud de onda de 1 390 (nm) se presentarán en el Anexo V.

Simulación correspondiente a 1 270 (nm)

En la Figura 3.26 la señal que recibe el receptor llega desplazada de modo que el receptor interpreta de diferente manera la información recibida como arroja el resultado en la Figura 3.27. Además, la señal recibida tiene un nivel de ruido mayor a las presentadas en el estándar G.652 categoría A y D para la misma longitud de onda.

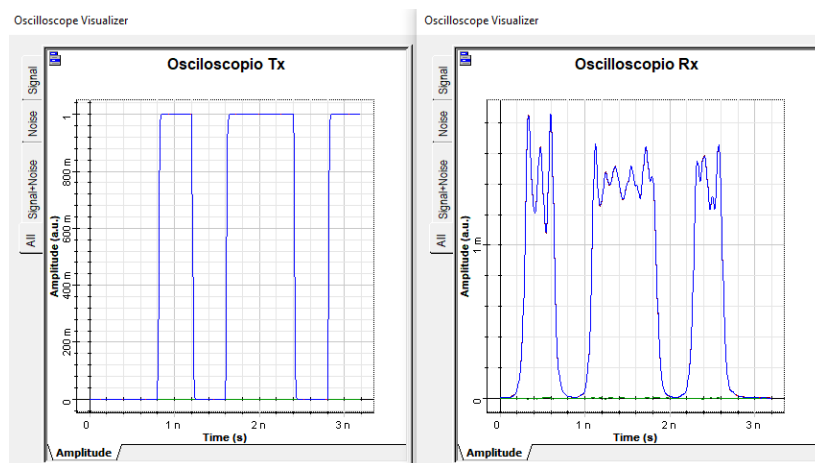


Figura 3.26 Señal enviada por el transmisor y señal que llega al receptor.

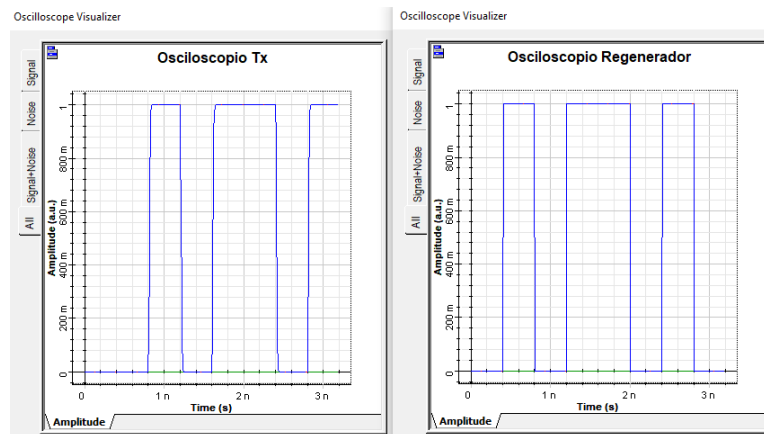


Figura 3.27 Señal enviada y señal reconstruida para 1 270 (nm).

La Figura 3.28 muestra la potencia registrada por el bloque *Optical Power Meter* a la salida del modulador, fibra óptica y amplificador.

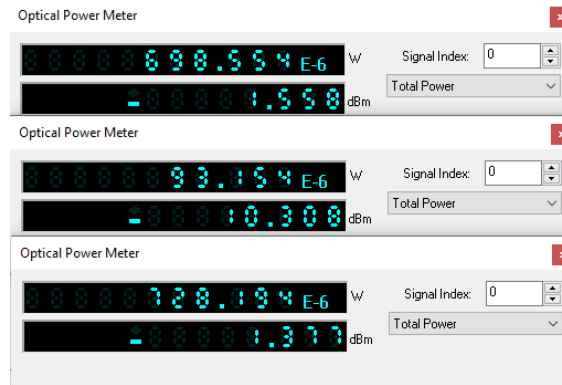


Figura 3.28 Potencia medida a la salida del modulador, fibra óptica y amplificador.

La Figura 3.29 muestra el espectro de frecuencias de la señal enviada y recibida donde se puede evidenciar que la potencia se agrupa en la región 1 270 (nm).

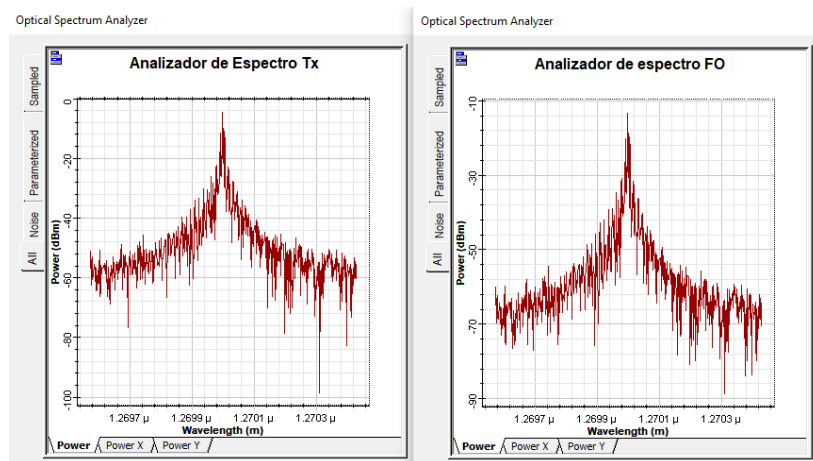


Figura 3.29 Analizador de espectros a la salida del modulador y de la fibra óptica.

Simulación correspondiente a 1 390 (nm)

Al igual que la Figura 3.26, la Figura 3.30 también tiene un desplazamiento en el dominio del tiempo.

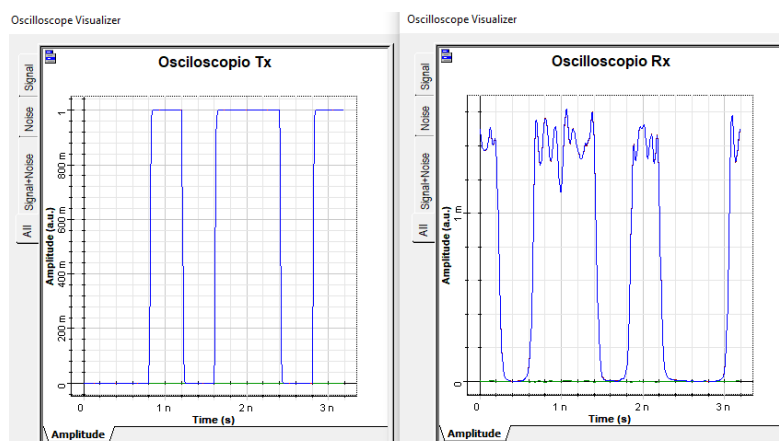


Figura 3.30 Señal enviada y señal en el receptor para 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm)

La Figura 3.31 muestra a la señal recibida similar a la señal enviada, se puede añadir que el ruido del sistema ha disminuido en comparación con los dos anteriores resultados. En esta prueba, mediante las ecuaciones establecidas en el estándar G.653, se usó el coeficiente de dispersión cromática.

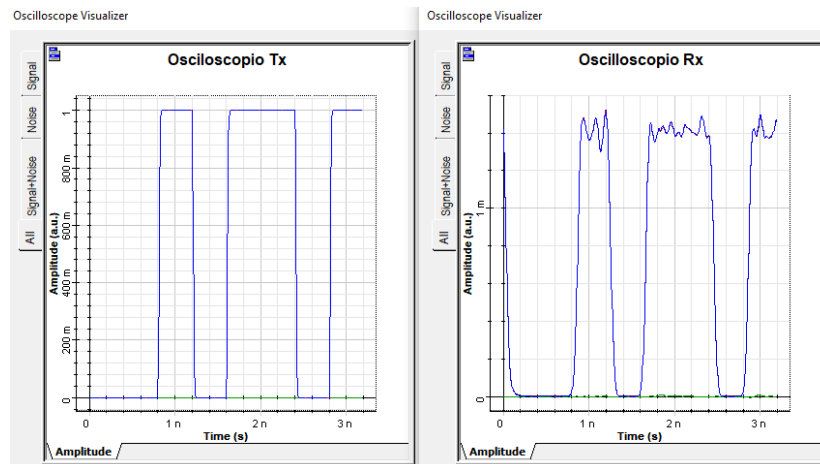


Figura 3.31 Señal enviada y recibida para 1 490 (nm).

Simulación correspondiente a 1 545 (nm)

En el resultado de esta simulación se puede observar a la señal en el receptor muy similar a la señal original, el nivel de ruido ha disminuido considerablemente para esta longitud de onda. La Figura 3.32 compara la señal original con la señal recibida.

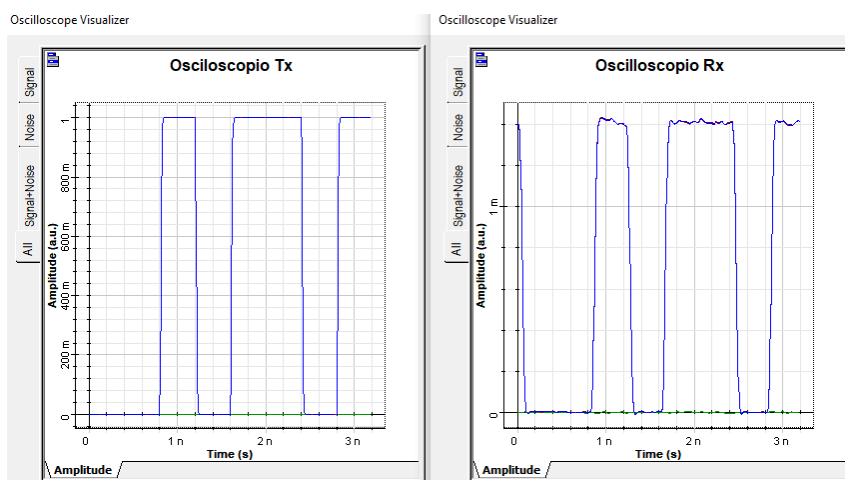


Figura 3.32 Señal enviada y recibida para 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm)

Para esta simulación se obtuvo una señal con un nivel de ruido mayor que la presentada por la Figura 3.32. Se ha ilustrado en la Figura 3.33 la señal original y a la señal en el receptor.

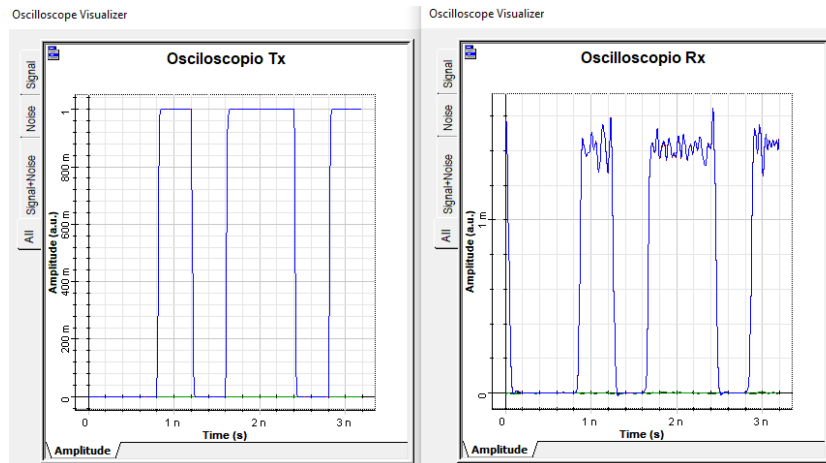


Figura 3.33 Señal enviada y señal recibida para 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm)

La Figura 3.34 tiene una forma similar con la señal recibida de la Figura 3.33. De modo que su nivel de ruido es el mismo.

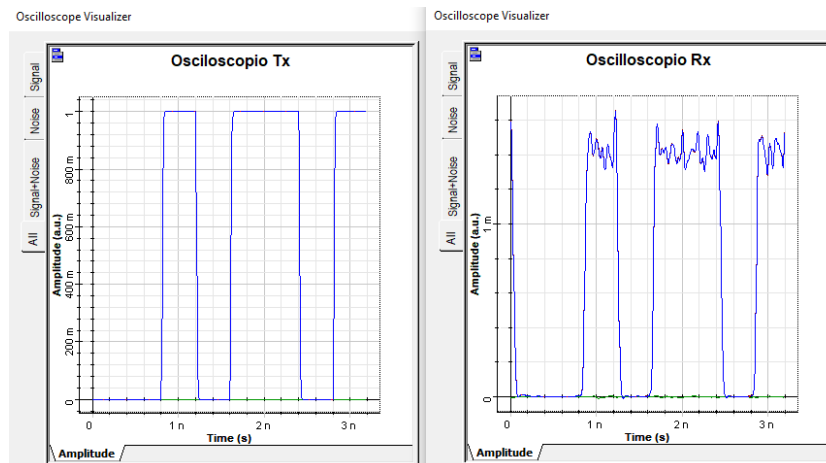


Figura 3.34 Señal original y señal recibida en el receptor para 1 650 (nm).

3.7 Resultados obtenidos para el estándar G.655 categoría C para la longitud de 25 (km)

El estándar no especifica un coeficiente de dispersión cromática por debajo de la región de 1 470 (nm). Por eso no se toma en cuenta este coeficiente hasta la banda E.

Simulación correspondiente a 1 270 (nm)

La Figura 3.35 muestra a la señal recibida similar a la señal original pese a que se haya omitido el coeficiente de dispersión cromática, el nivel de ruido es moderado por lo que el sistema puede recuperar la señal original que ilustra la Figura 3.36.

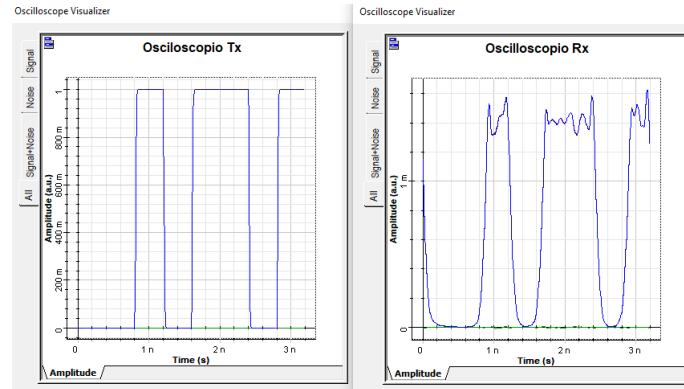


Figura 3.35 Señal original y señal en receptor para 1270 (nm).

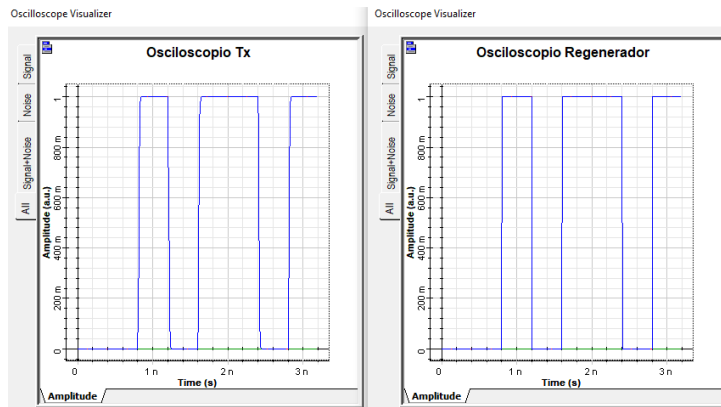


Figura 3.36 Señal original y señal regenerada para 1270 (nm).

La potencia a la salida del modulador se atenúa en 3.058 (dB), mientras que al salir de la fibra la potencia es de -10.308 (dBm) reduciéndose en un 8.75 dB, por lo que el amplificador debe tener la misma ganancia. Se pueden observar los resultados obtenidos en la Figura 3.37. Cabe destacar que hasta la región de 1 545 (nm) el coeficiente de atenuación es el mismo, por lo que esos resultados serán presentados en el Anexo VI.

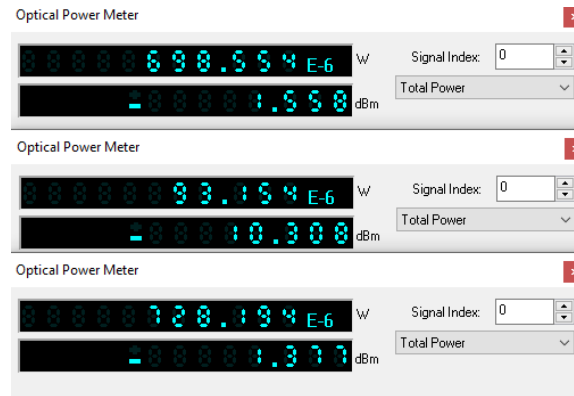


Figura 3.37 Potencia a la salida del modulador, fibra y amplificador óptico para de 1 270 (nm)

La Figura 3.38 muestra donde se encuentra situada la concentración de potencia, en este caso se posiciona en la región 1 270 (nm), También se puede observar que la intensidad del espectro de la señal recibida decrece en contraste con el espectro generado por el modulador. Hasta la región de 1 545 (nm) la potencia fuera de la fibra será la misma por lo que el espectro tendrá la misma forma, pero desplazada hacia la región de trabajo correspondiente a la simulación, los resultados obtenidos se presentarán en el Anexo VI.

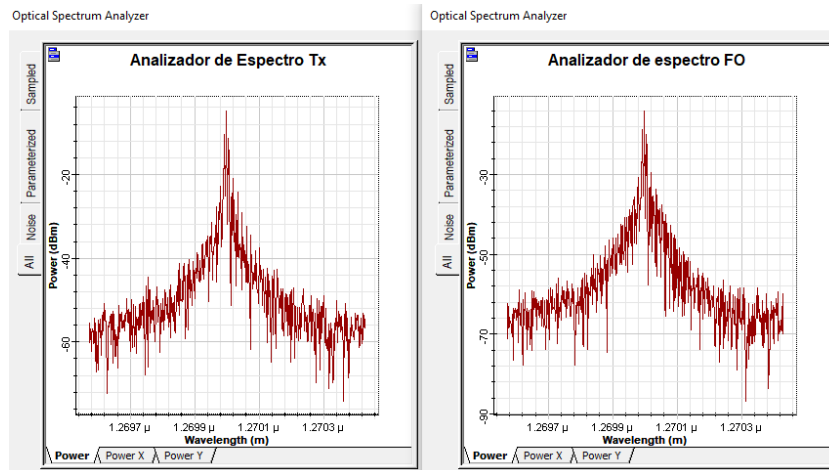


Figura 3.38 Espectro de frecuencias obtenidas a la salida del modulador y a la salida de la fibra óptica.

Simulación correspondiente a 1 390 (nm)

El resultado de esta simulación mostró un desplazamiento en la señal del receptor como se lo puede apreciar en la Figura 3.39, pero el regenerador es capaz de reconstruir la señal que se ilustra en la Figura 3.40. El ruido resulta ser similar a la Figura 3.36.

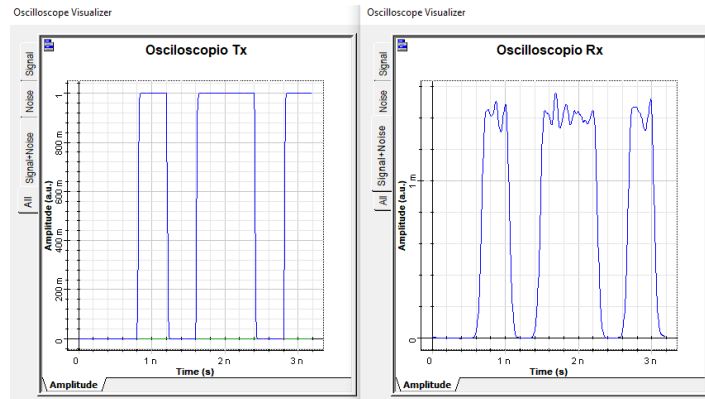


Figura 3.39 Señal original y señal recibida por el receptor para 1 390 (nm).

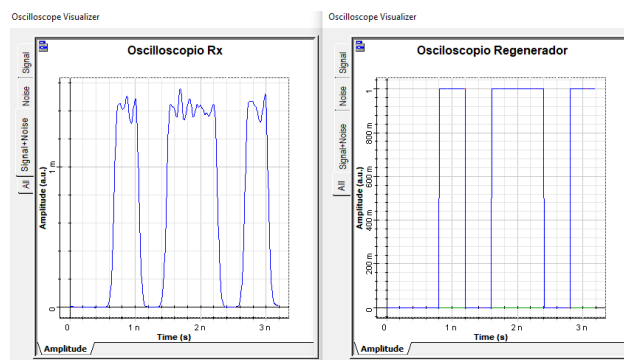


Figura 3.40 Señal reconstruida a partir de la señal recibida para 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm)

Aunque el estándar no especifica el coeficiente de dispersión cromática para la longitud de onda empleada, en esta simulación se tomó en cuenta este factor. Como resultado, se logró reducir el nivel de ruido del sistema en comparación con la Figura 3.40. La Figura 3.41 muestra los resultados de la simulación, donde se puede observar el efecto de la inclusión del coeficiente de dispersión cromática.

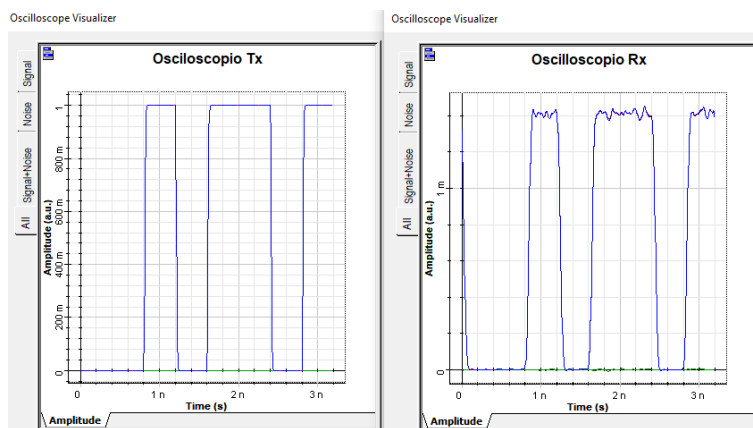


Figura 3.41 Señal original y señal en el receptor para 1 490 (nm).

Simulación correspondiente a 1 545 (nm)

La Figura 3.42 muestra a la señal recibida similar a la señal original, además el ruido del sistema no afectó en gran medida a la señal.

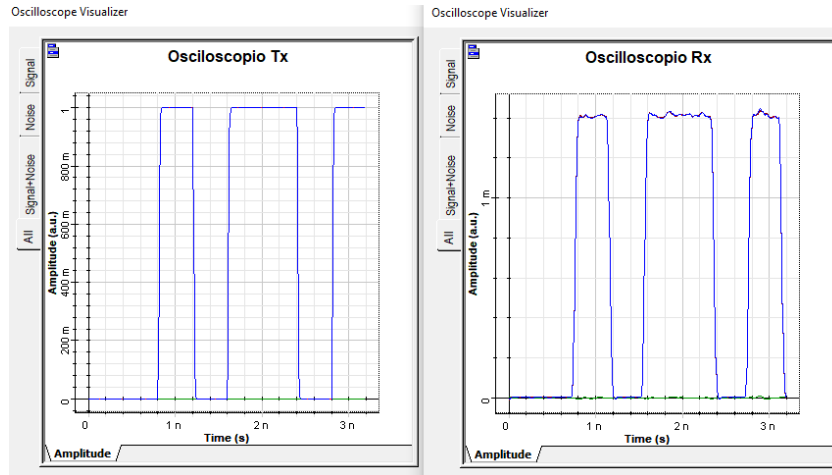


Figura 3.42 Señal enviada y señal recibida para 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm)

El resultado de esta simulación mostró una señal afectada en gran medida por el ruido. En la Figura 3.43 se puede ver una señal similar en forma a la señal original, mientras que el nivel de ruido es considerable. El regenerador es capaz de reconstruirlo.

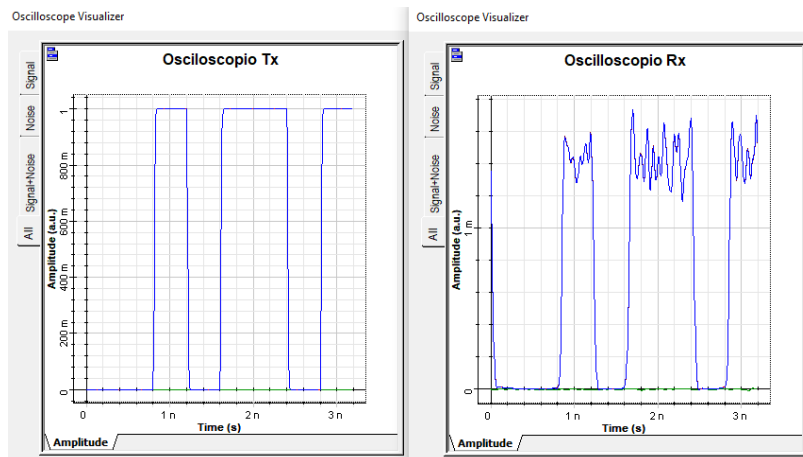


Figura 3.43 Señal enviada por el transmisor y señal recibida para 1 600 (nm).

La potencia obtenida para esta simulación se muestra en la Figura 3.44 donde se evidencia que la potencia a la salida del modulador es -11.558 dBm, esto cambió debido a la longitud de onda usada para esta simulación.

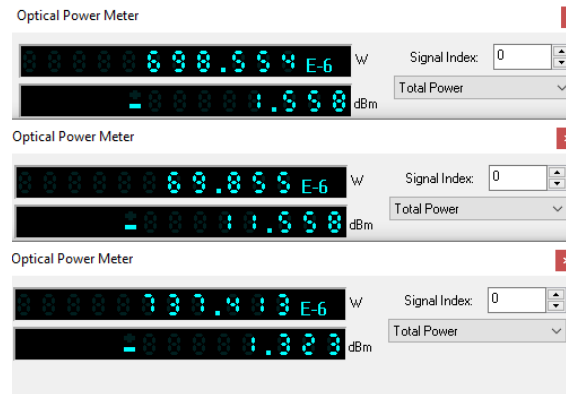


Figura 3.44 Potencia obtenida a la salida del modulador, fibra y amplificador óptico.

Simulación correspondiente a 1 650 (nm)

La Figura 3.45 exhibe el resultado de la simulación en la cual se observa que la señal recibida presenta el nivel más alto de ruido introducido. La potencia fuera de la fibra fue la misma que la obtenida en la simulación de la señal en la región de 1 600 (nm).

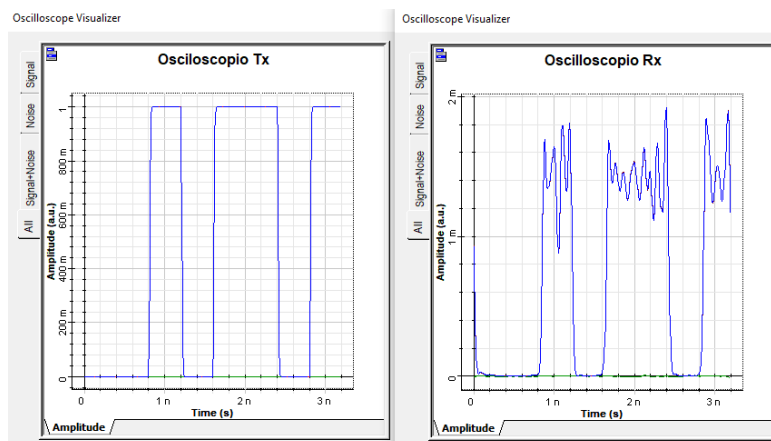


Figura 3.45 Señal original y señal en el receptor para 1 650 (nm).

3.8 Resumen de potencias obtenidas para el enlace de 25 km

La Tabla 3.14 resume las potencias obtenidas en la salida de la fibra y permite observar que para la región de 1 270 (nm) la mejor opción son las fibras que cumplan con los estándares G.652 categoría D y G.653 categoría B, pero el estándar G.653 no recomienda el uso de longitudes de onda menores a 1 460 (nm), entonces la mejor opción para la longitud de onda es el estándar G.652 categoría D.

Del mismo modo en la región de 1 390 (nm) las mejores opciones son los estándares G.652 categoría D y G.653 categoría B, pero como se sabe acerca del estándar G.653 entonces, en este caso la mejor opción es el estándar G.652 categoría D.

En la región de 1 490 (nm) se perfilan los estándares G.652 categoría D y G.653 categoría B y G.655 categoría C, pero comparando las señales el estándar que es menos propenso al ruido es el estándar G.655 categoría C.

Para la señal en la región de 1 545 (nm) las mejores opciones son las mismas antes descritas para la longitud de 1 490 (nm), en este caso también se toma en cuenta el menor nivel de ruido obtenido el cual fue el estándar G.655 categoría C.

Para la simulación de 1 600 (nm) se tienen los estándares G.652 categoría D y G.653 categoría B, del mismo modo se tomó en cuenta el menor nivel de ruido, obtenido por el estándar G.653 categoría B.

Finalmente, la simulación de 1 650 (nm) se tienen como mejores opciones las mismas descritas en la longitud de onda de 1 600 (nm), pero para ello también se toma en cuenta el menor nivel de ruido el cual lo obtuvo el estándar G.653 categoría B.

Tabla 3.14 Potencia óptica de recepción del cable de fibra de los estándares G.652A, G.652D, G.653B y G.655C.

Potencia óptica de recepción (dBm) a 25 (km)				
Longitud de onda de trabajo (nm)	G.652A	G.652D	G.653B	G.655C
1 270	-14.057	-10.308	-10.308	-10.308
1 390	-11.558	-10.308	-10.308	-10.308
1 490	-11.558	-7.558	-10.308	-10.308
1 545	-11.558	-7.558	-10.308	-10.308
1 600	-11.558	-7.558	-10.308	-11.558
1 650	-11.558	-7.558	-10.308	-11.558

3.9 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría A para la longitud de 50 (km)

Para la muestra de los siguientes resultados solo se mostrarán las señales obtenidas por el receptor, esto porque el cálculo de las potencias fuera de la fibra óptica será similares al enlace de 25 (km). Los resultados de las potencias y de la respuesta en frecuencia ser mostrarán en el Anexo VII.

Simulación Correspondiente a 1 270 (nm).

Para esta simulación se comparó la señal recibida para el enlace de 50 (km) con el obtenido en el enlace de 25 (km) mostrado en la Figura 3.1 y se puede mostrar que la Figura 3.46 tiene un nivel de ruido introducido mayor, debido a la distancia que recorrió la señal.

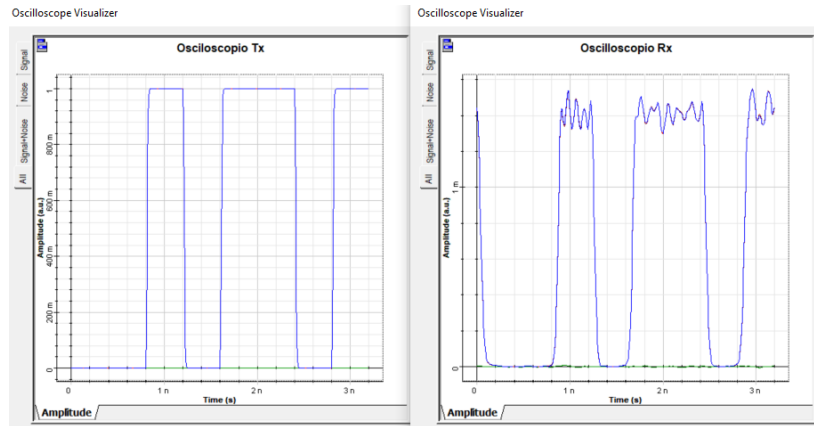


Figura 3.46 Señal enviada y recibida para la longitud de onda de 1 270 (nm).

Simulación correspondiente a 1 390 (nm).

El ruido introducido es mayor en relación con la simulación de 1 270 (nm), además comparándola con la Figura 3.5 este al igual que con la anterior longitud simulada para 50 (km) tiene un mayor grado de ruido. La Figura 3.47 se presenta la señal obtenida en el receptor.

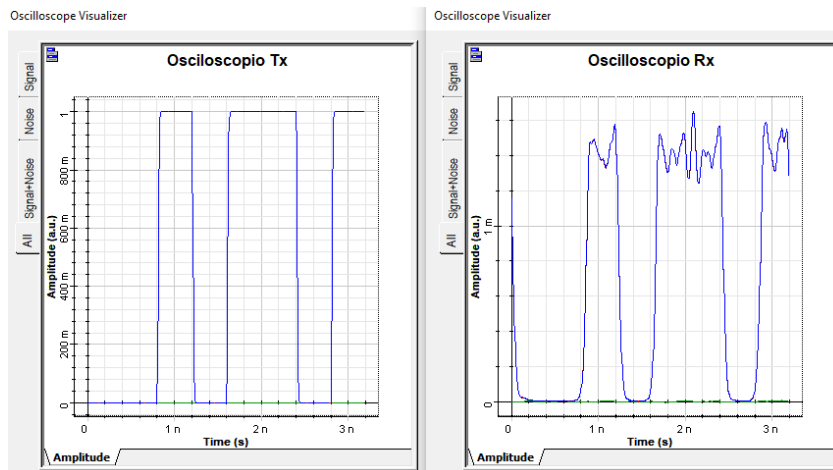


Figura 3.47 Señal enviada y señal recibida para 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm).

La Figura 3.48 muestra a la señal recibida con un nivel muy alto de ruido, en comparación con todas las anteriores simulaciones esta es la que mayor deformación tuvo, además de su dispersión cromática.

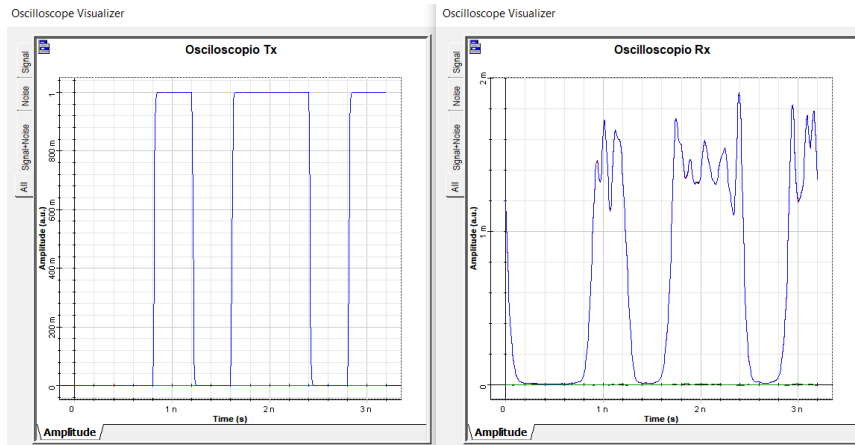


Figura 3.48 Señal enviada y señal recibida para la longitud de onda de 1 490 (nm).

Simulación correspondiente a 1 545 (nm).

La Figura 3.49 muestra a la señal de 1 545 (nm) con un nivel alto de ruido introducido. La dispersión cromática afectó en gran medida a la señal de recibida en el receptor.

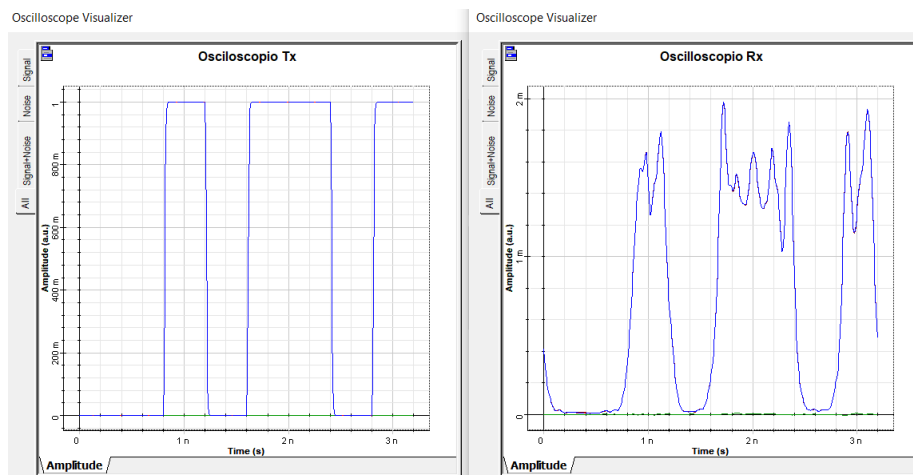


Figura 3.49 Señal enviada y señal recibida para la longitud de onda de 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm).

La Figura 3.50 exhibe a la señal de llegada con una longitud de onda de 1 600 (nm), la cual se ve afectada en gran medida por el ruido del sistema. Comparando el resultado de la Figura 3.50 con la Figura 3.49 se puede observar que ambas tienen el mismo nivel de ruido.

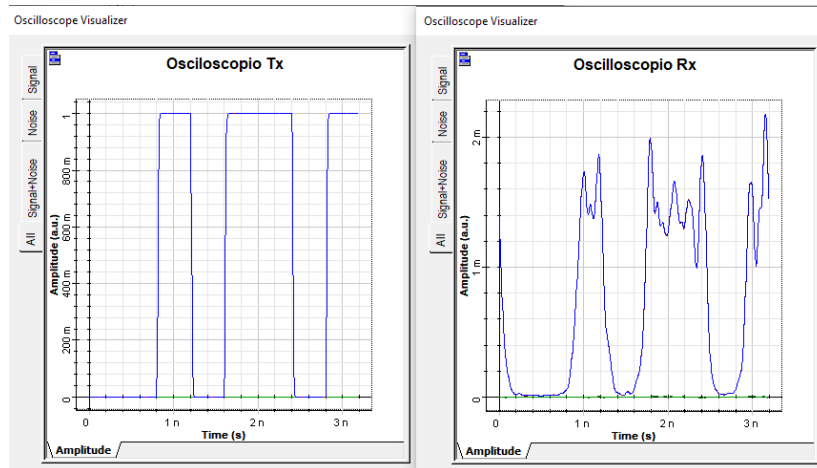


Figura 3.50 señal transmitida y recibida correspondiente a la longitud de onda de trabajo de 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm).

La Figura 3.51 corresponde a una señal en receptor cuya señal tuvo un importante impacto por el ruido del sistema.

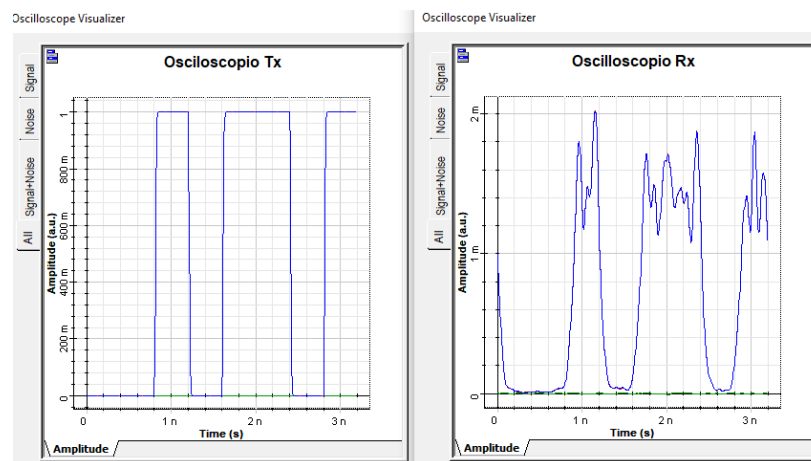


Figura 3.51 Señal en transmisor y señal en receptor correspondiente a la longitud de onda de 1 650 (nm).

3.10 Resultados obtenidos para el estándar G.652 categoría D para la longitud de 50 km

Para este estándar también te tomará en cuenta solo los resultados de las señales obtenidas en el receptor, de modo que las mediciones de las potencias y la respuesta en frecuencia se exhibirán en el Anexo VIII.

Simulación correspondiente a 1 270 (nm).

La señal de recepción que se muestra en la Figura 3.52 tienen un nivel de ruido introducido similar a la que se exhibe en la Figura 3.46.

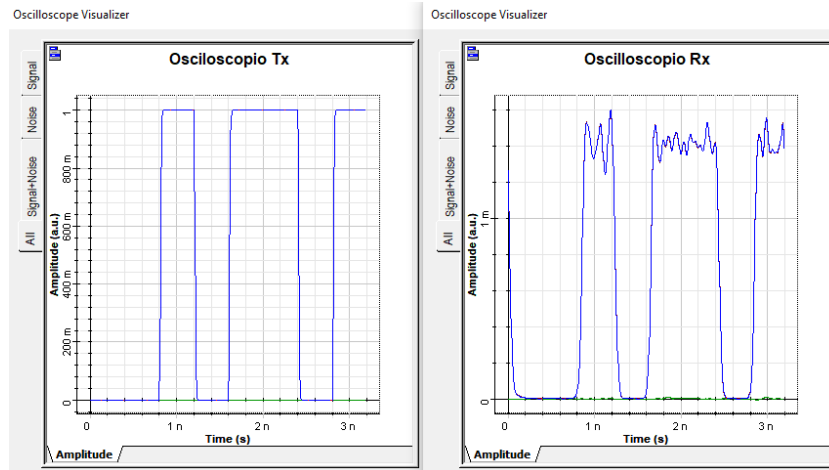


Figura 3.52 Señal del receptor correspondiente a la longitud de onda de 1 270 (nm).

Simulación correspondiente a 1 390 (nm).

La señal que se exhibe en la Figura 3.53 el nivel de ruido es mayor que la presentada en la Figura 3.52 debido a los picos que se pueden observar en su punto más alto.

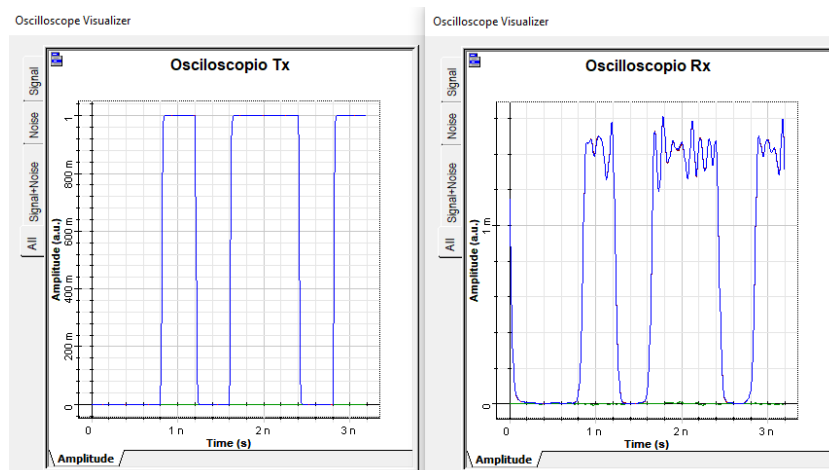


Figura 3.53 Señal correspondiente a la longitud de onda de 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm).

A medida que aumenta la longitud de onda, a la señal se le añade ruido de manera gradual, por ello se puede observar en la Figura 3.54 que la señal se encuentra distorsionada por la presencia de ruido en comparación con la Figura 3.53.

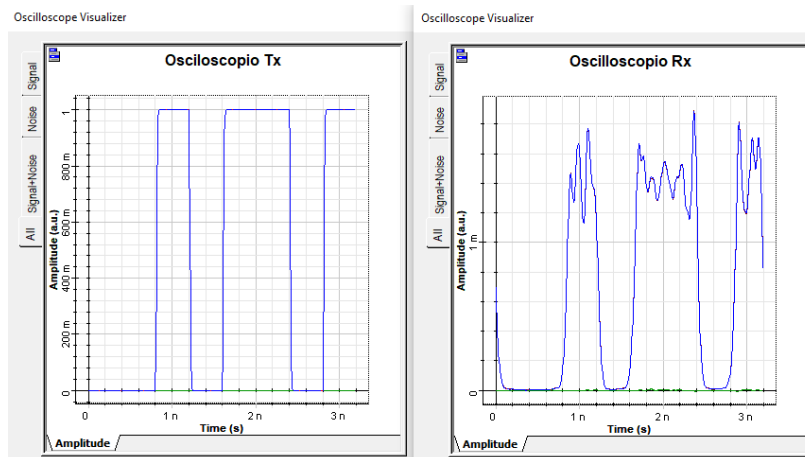


Figura 3.54 Señales correspondientes a la longitud de onda de 1 490 (nm) a la salida del transmisor y en el receptor.

Simulación correspondiente a 1 545 (nm).

Para la longitud de onda de 1 545 (nm) se puede observar que la señal que recibe el receptor tiene introducido un nivel mayor de ruido que los anteriores resultados.

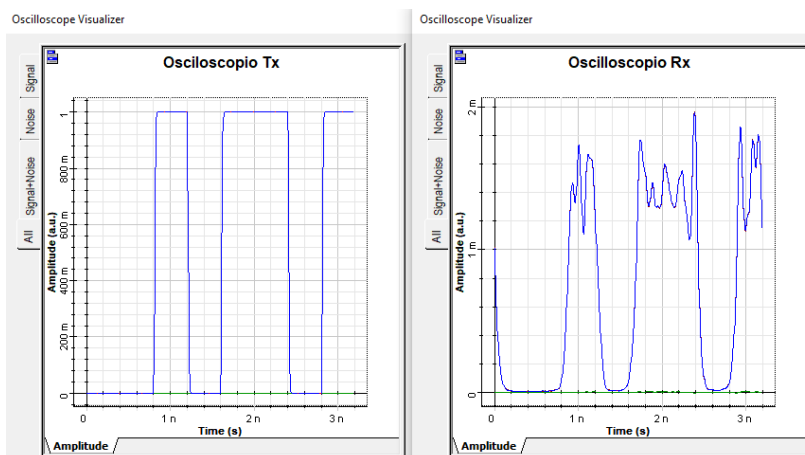


Figura 3.55 Correspondiente a la señal de transmisor y señal en el receptor para la longitud de onda de 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm).

La longitud de onda de 1 600 (nm) que se muestra en la Figura 3.56 se encuentra distorsionada debido al nivel de ruido que se ha introducido por parte del sistema.

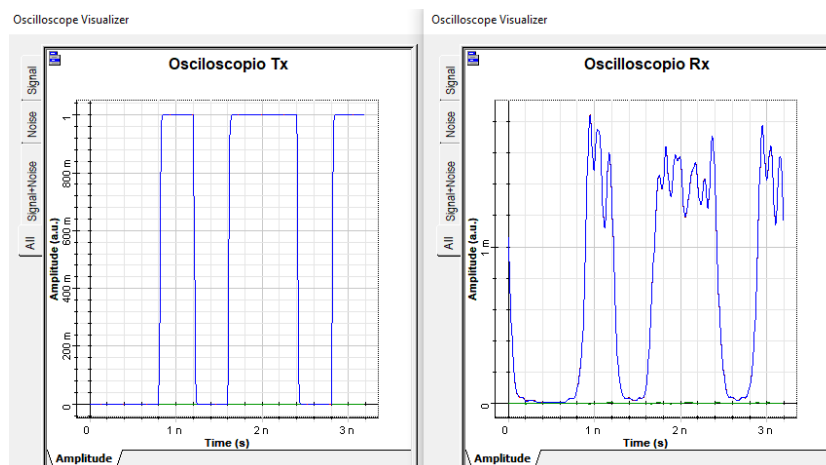


Figura 3.56 Correspondiente a la longitud de onda de 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm).

La última señal de esta estándar muestra a una señal muy distorsionada por el ruido, el regenerador es capaz de recuperar la señal original tal como se muestra en la Figura 3.58.

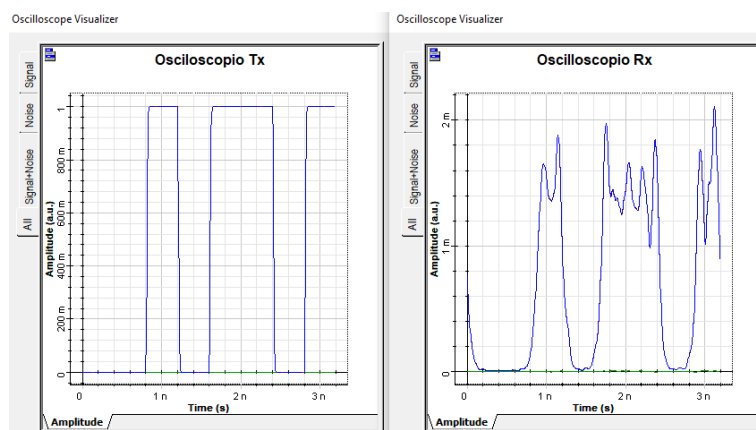


Figura 3.57 Señal correspondiente a la longitud de onda de 1 650 (nm).

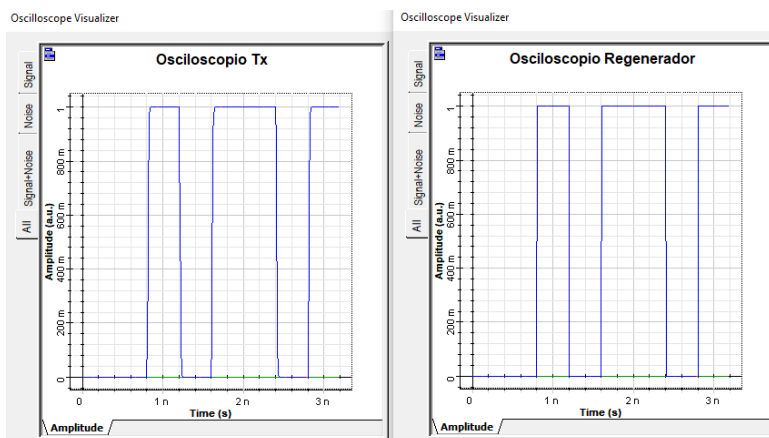


Figura 3.58 correspondiente a la señal original y señal recuperada para la longitud de onda de 1 650 (nm).

3.11 Resultados obtenidos para el estándar G.653 categoría B para la longitud de 50 km

Simulación correspondiente a 1 270 (nm).

Al igual que los resultados obtenidos para la longitud de enlace de 25 (km), tampoco se tomó en cuenta a la dispersión cromática para este estándar. El resultado arrojado por el osciloscopio se presenta en la Figura 3.59 la cual muestra una señal con mayor desplazamiento en el dominio del tiempo en comparación con la Figura 3.26 que corresponde a una distancia de 25 (km). El regenerador no pudo recuperar la señal original, en su lugar mostró un flujo de bits diferente como se muestra en la Figura 3.60. Los resultados de las potencias y respuesta en frecuencia obtenidas por el estándar se presentan en el Anexo IX.

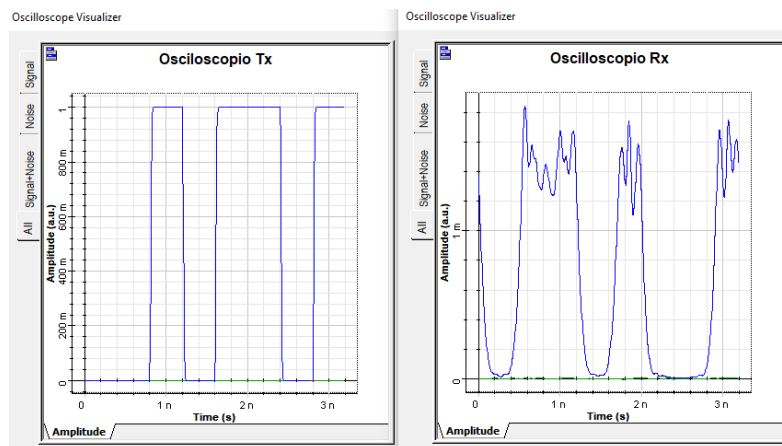


Figura 3.59 Señal correspondiente a la señal de salida de transmisor y señal en el receptor para la longitud de onda de 1 270 (nm).

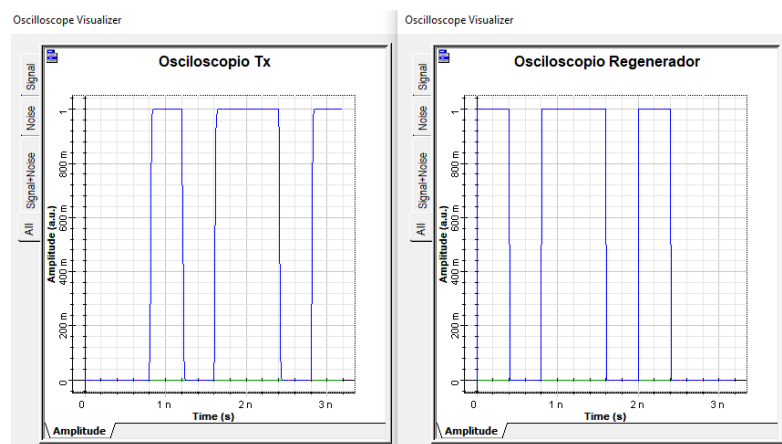


Figura 3.60 Señal recuperada por el regenerador.

Simulación correspondiente a 1 390 (nm).

Al igual que la simulación de 1 270 (nm), este también tuvo un resultado similar, la señal que recibe el receptor se encuentra desplazada en el dominio del tiempo, de modo que el regenerador no puede recuperar la secuencia de bits original y muestra una secuencia diferente como se muestra en la Figura 3.62.

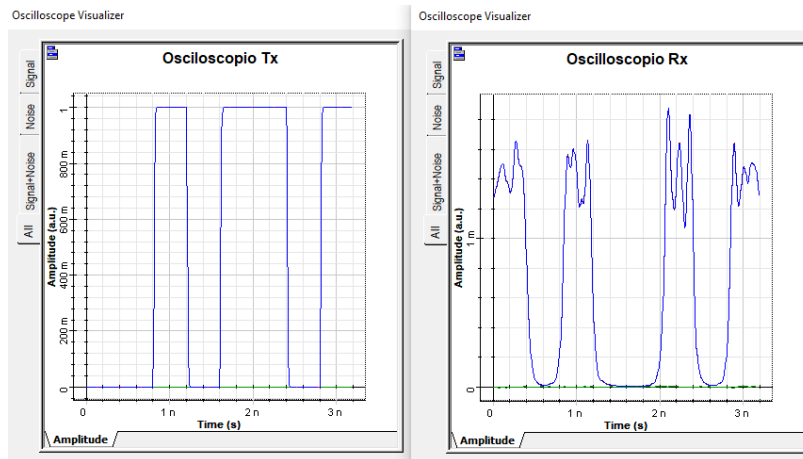


Figura 3.61 Señal recibida para la longitud de onda de 1 390 (nm).

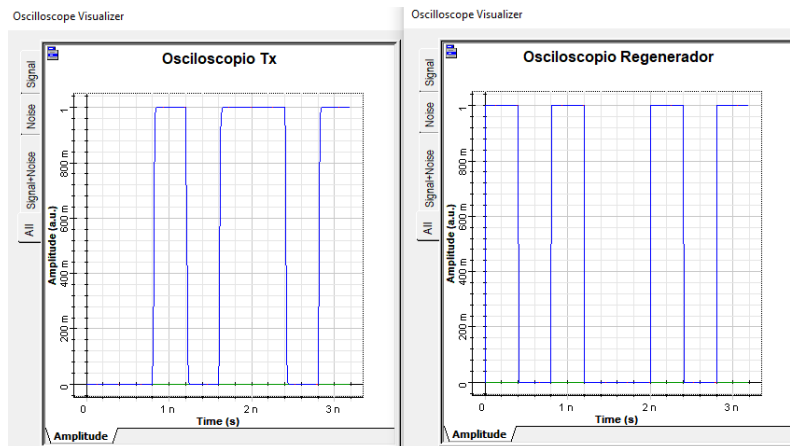


Figura 3.62 Señal regenerada.

Simulación correspondiente a 1 490 (nm).

Para esta simulación se tomó en cuenta el coeficiente de dispersión cromática, de modo que la Figura 3.63 muestra una señal en el receptor similar a la señal original, además el ruido que se añade es mínimo en comparación con los anteriores estándares.

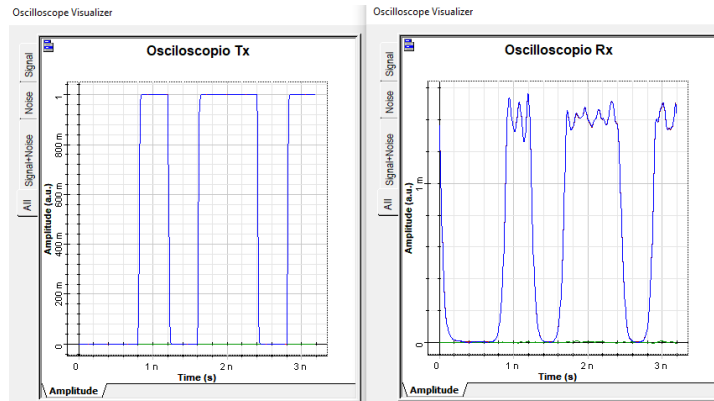


Figura 3.63 Señal en receptor para la longitud de onda de 1 490 (nm).

Simulación correspondiente a 1 545 (nm).

Para este estándar la señal recibida que se muestra en la Figura 3.64 tiene introducido muy poco ruido, y la señal no se ve afectada en gran medida por este fenómeno, comparándola con el resultado de la longitud de onda de 1 490 (nm) que se exhibe en la Figura 3.63, la señal mejora en gran medida.

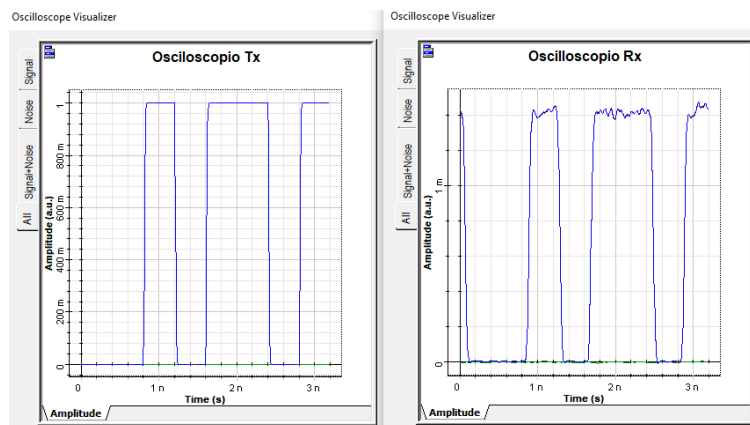


Figura 3.64 Señal recibida para la longitud de onda de 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm).

En este resultado se tiene una señal con un nivel de ruido mayor al recibido en las dos anteriores simulaciones, el regenerador es capaz de recuperar la señal original debido a que no presenta una distorsión muy grande.

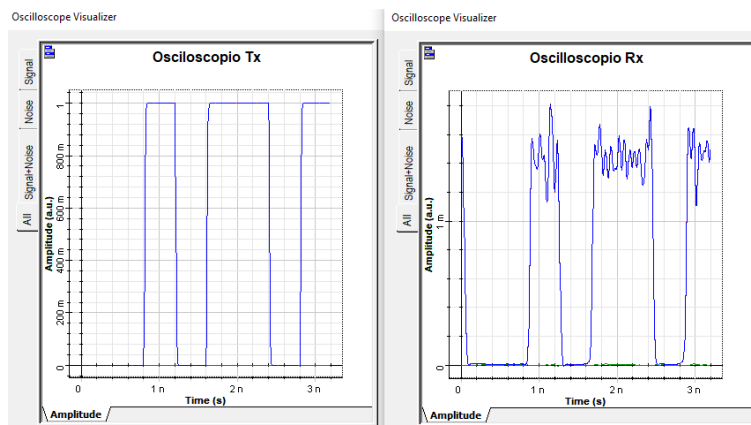


Figura 3.65 Señal recibida para la longitud de onda de 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm).

El resultado de la simulación mostrado en la Figura 3.66 tiene un nivel de ruido similar a la obtenida en la Figura 3.65.

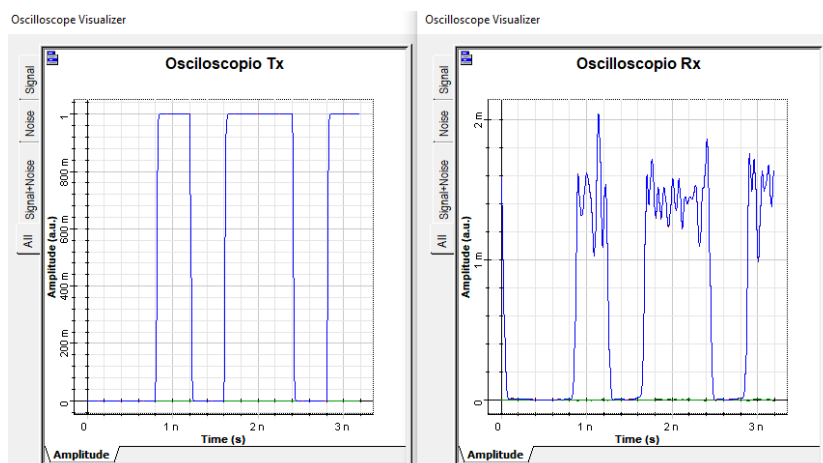


Figura 3.66 Señal recibida para la longitud de onda de 1 650 (nm).

3.12 Resultados obtenidos para el estándar G.655 categoría C para la longitud de 50 (km).

Simulación correspondiente a 1 270 (nm).

Para este resultado se tiene que la Figura 3.67 la señal recibida tiene introducido un nivel muy alto de ruido, además la dispersión cromática es evidente en esta longitud de onda, además como en el estándar G.653, tampoco se toma en cuenta el coeficiente de dispersión cromática. El sistema es capaz de recuperar la señal original. Los resultados de las potencias y de la respuesta en frecuencia para este estándar se presentan en el Anexo X.

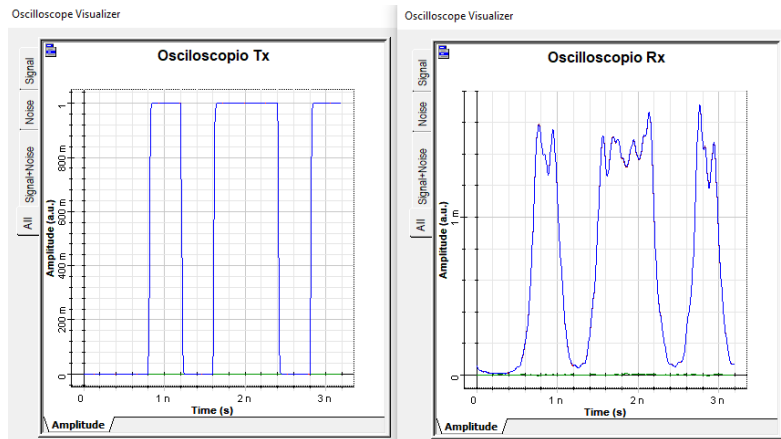


Figura 3.67 Correspondiente a la señal recibida en la longitud de 1 270 (nm).

Simulación correspondiente a 1 390 (nm).

El resultado de la Figura 3.68 exhibe una señal con un nivel de ruido similar a la mostrada en la Figura 3.67.

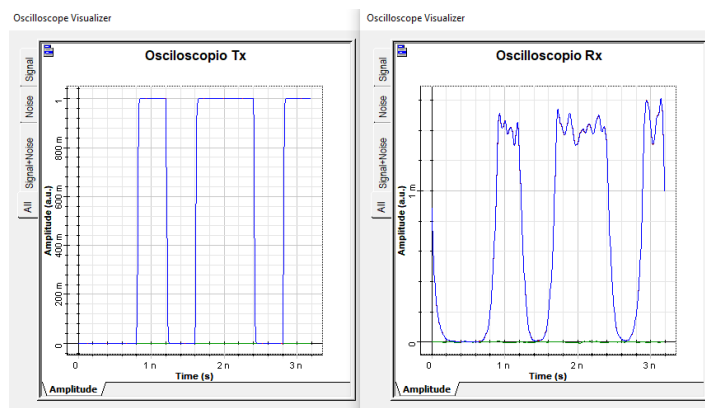


Figura 3.68 Señal recibida en la longitud de onda de 1 390 (nm).

Simulación correspondiente a 1 490 (nm).

En este caso, la señal que se observa en la Figura 3.69 presenta poco ruido introducido por parte del sistema, por ello la señal no se ve afectada en gran medida en comparación con las anteriores simulaciones.

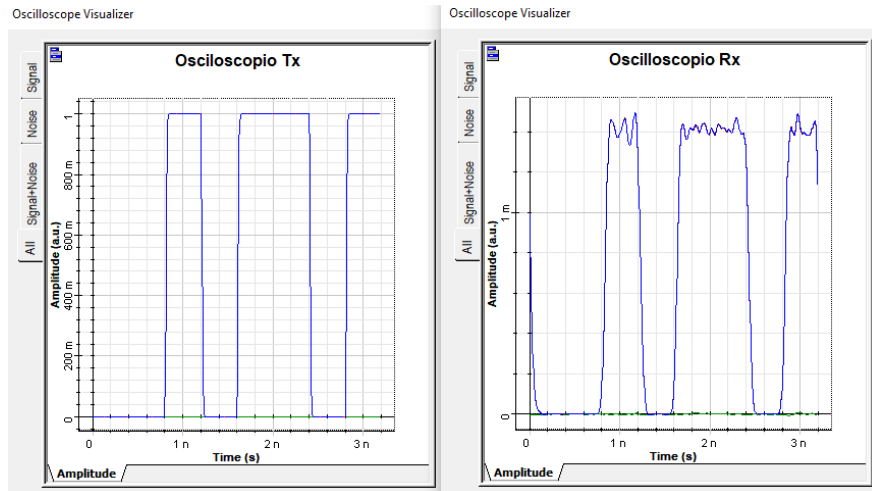


Figura 3.69 Señal en receptor en la longitud de onda de 1 490 nm.

Simulación correspondiente a 1 545 (nm).

La Figura 3.70 exhibe una señal de receptor con muy poca intensidad de ruido al igual que el resultado de la Figura 3.69.

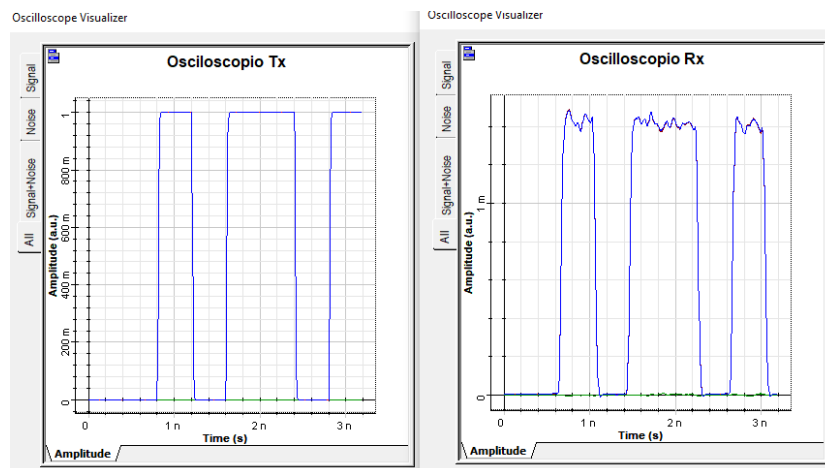


Figura 3.70 Señal en receptor en la longitud de onda de 1 545 (nm).

Simulación correspondiente a 1 600 (nm).

El resultado mostrado en la Figura 3.71 tiene un ruido muy alto en la señal recibida, el regenerador es capaz de recuperar la señal original.

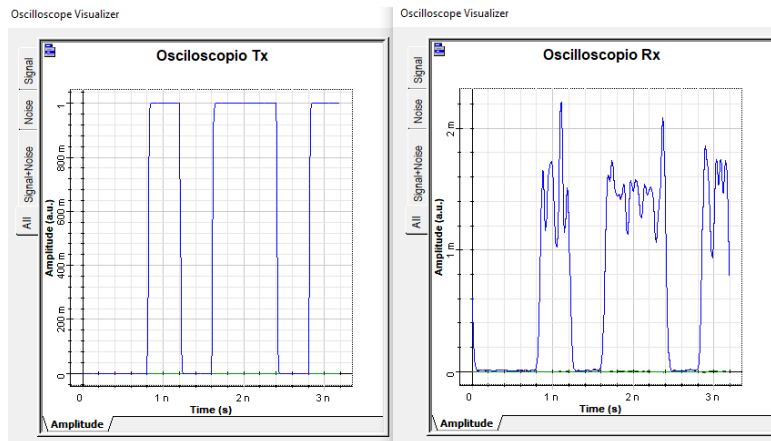


Figura 3.71 Señal en receptor en la longitud de onda de 1 600 (nm).

Simulación correspondiente a 1 650 (nm).

La Figura 3.72 muestra a la señal con un nivel alto de ruido introducido igual al presentado en la Figura 3.71.

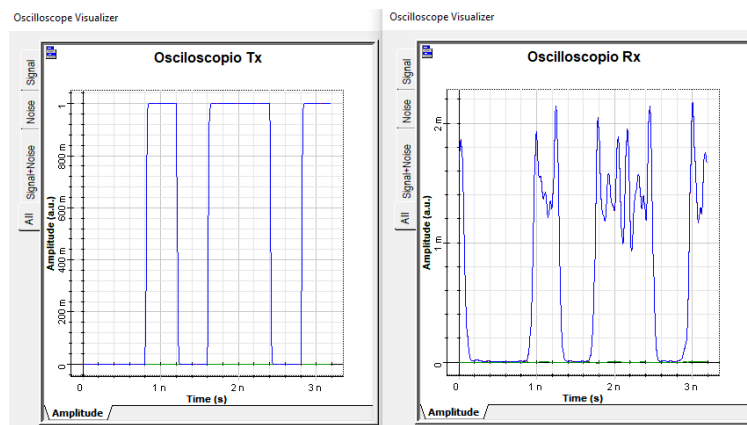


Figura 3.72 Señal recibida en la longitud de 1 650 (nm).

3.13 Resumen de potencias obtenidas para el enlace de 50 (km)

En la Tabla 3.15 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de potencias de cada estándar y longitud de onda de trabajo, con esto se puede comparar cuál de los siguientes estándares tienen un menor grado de atenuación, además se tomará en cuenta el nivel de ruido que se haya introducido en la señal.

Para la longitud de onda de 1 270 (nm) los estándares que obtuvieron la menor atenuación fueron los estándares G.652 categoría D, G.653 categoría B y G.655 categoría C, pero los dos últimos estándares estudiados no recomiendan el uso de esta

longitud, por ello el estándar G.652 categoría D es el indicado para esta longitud de onda.

La longitud de onda de trabajo de 1 390 (nm) se tiene que el mejor estándar en cuestión de atenuación es el G.652 categoría D, además porque los estándares G.653 y G.655 no recomiendan el uso de estas longitudes de onda en este tipo de fibras óptica.

En la longitud de onda de 1 490 (nm) se tiene al estándar G.652 categoría D pero este presenta un ruido introducido más alto como se muestra en el resultado de la Figura 3.53, por ello se tiene al estándar G.655 categoría C como mejor opción para esta longitud de onda debido al poco nivel de ruido introducido como se muestra en la Figura 3.69.

La longitud de onda de 1 545 (nm) también se tiene como mejor opción el estándar G.652 categoría D, pero como en el caso anterior se puede observar un nivel alto de ruido como se ve en la Figura 3.55. Por eso el estándar recomendado es el G.653 categoría C, debido al poco nivel de ruido introducido como se muestra en la Figura 3.63.

La longitud de onda de 1 600 (nm) tiene la menor atenuación en el estándar G.652 categoría D, pero el nivel de ruido es alto, por ello la mejor opción es el estándar G.653 categoría B por su bajo nivel de ruido en comparación con otros estándares.

Y, por último, la longitud de onda de 1 650 (nm) la mejor opción es el estándar G.653 categoría B por su bajo ruido en comparación con otros estándares como se muestra en la Figura 3.66.

Tabla 3.15 Potencia de salida de la fibra óptica a 50 (km).

Longitud de onda de trabajo (nm)	G.652A	G.652D	G.653B	G.655C
1 270	-26.557	-19.057	-19.057	-19.057
1 390	-21.557	-13.557	-19.057	-19.057
1 490	-21.557	-13.557	-19.057	-19.057
1 545	-21.557	-13.557	-19.057	-19.057
1 600	-21.557	-13.557	-19.057	-21.557
1 650	-21.557	-13.557	-19.057	-21.557

4 CONCLUSIONES

- Se logró identificar las características ópticas que establecen los estándares G.652A, G.652D, G.653B y G.655C como lo fueron: la longitud de onda de referencia, coeficientes de atenuación y PMD. Además de información relevante como son: ecuaciones para determinar el coeficiente de dispersión para cada estándar, recomendaciones de uso para las fibras ópticas en cada estándar y en recomendaciones sobre los mejores sistemas para cada estándar estudiado.
- Se simuló cada estándar con cada una de las bandas ópticas (O, E, S, C, L, U) en un enlace PTP, en este caso se varió la frecuencia de trabajo, pero esta frecuencia fue trabaja en longitudes de onda para tener un mejor entendimiento del sistema, además se establecieron parámetros como: la longitud de onda de trabajo, potencia óptica, longitud de enlace, coeficiente de atenuación y coeficiente PMD. El bloque donde se hicieron todas las modificaciones necesarias para simular cada estándar fue el *fiber optic*.
- Se simularon dos sistemas PTP en el simulador *OptiSystem*, uno de 25 (km) y otro de 50 (km), de este modo se pudo determinar el rendimiendo de cada estándar en cada longitud de onda trabajado mediante la potencia a la salida de la fibra óptica, respuesta en frecuencia y nivel de ruido que poseía cada resultado.
- Se determinó el mejor estándar para cada una de las bandas ópticas de trabajo basándose en la potencia de salida de la fibra y el nivel de ruido introducido, además se compararon estos dos estándares en dos diferentes longitudes de enlace.
- Para la banda O y E se determinó como mejor opción el estándar G.652 categoría D, debido a que el estándar G.652 categoría A tenía un coeficiente de atenuación alto, además los estándares G.653 y G.655 no recomiendan el uso de estas bandas y porque los resultados arrojados mostraban un desplazamiento en el dominio del tiempo haciendo que el regenerador no pueda recuperar la secuencia de bits original.
- Para la banda S se terminó como mejor opción el estándar G.655 categoría C, puesto que tienen un nivel de ruido más bajo y la señal obtenida en el receptor es semejante a la señal original permitiendo regenerar la señal de mejor manera.

- En la banda C el estándar adecuado es el estándar G.655 categoría C, porque el nivel de ruido dentro de esta banda es bajo, además el estándar G.655 determina una longitud de onda de referencia de 1 550 (nm).
- Para las bandas L y U el mejor estándar es el G.653 categoría B para las dos longitudes de enlace simulados, esto se debe a que este estándar tiene como máxima longitud de trabajo 400 (km)
- Se pudo observar que las bandas ópticas L y U introdujeron mucho ruido en sus señales a pesar de trabajar en estándares donde la longitud de onda de referencia era de 1 550 (nm), la distancia del enlace empeoraba aún más la señal debido a las deformaciones que causaba el ruido. También la dispersión cromática fue notoria en estas bandas como se pueden observar en los resultados.

5 RECOMENDACIONES

- Crear diferentes particiones con el sistema operativo Windows para poder usar el simulador *OptiSystem* en caso de que el tiempo de prueba haya caducado y se requiera usar para un trabajo o informe académico.
- No usar máquinas virtuales, puesto que el simulador requiere cumplir con diferentes especificaciones y además la licencia no permite su uso.
- Para seleccionar el coeficiente de dispersión adecuado se recomienda escoger valores de los extremos o intermedios para lograr que la señal llegue de manera correcta al receptor.
- Usar secuencia de bits cortos para observar de mejor manera el desempeño del estándar con las diferentes bandas de frecuencia ópticas.
- Modificar en el bloque *3R Regenerator* el parámetro *Delay compensation* a un segundo de modo que el regenerador pueda obtener la señal que ha sido enviada por el transmisor.
- Además de configurar el bloque *Fiber Optic* con la longitud de onda de referencia, también se debe modificar los parámetros de simulación en el panel de diseño al cual se accede con un doble *clic* en el panel principal.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Groz, «Sistemas de comunicación de fibra óptica de alta capacidad,» Instituto tecnológico de Buenos Aires, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- [2] H. D. Paucar Hidalgo, «Estudio y simulación de OTDM (optical Time Division Multiplexing),» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [3] J. R. Flores Luna, *Estudio y diseño de enlaces punto a punto*, Cuitláhuac: Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, 2018.
- [4] W. Alvarez Ortiz, «Fundamentos teóricos de las tecnologías de transporte PDH (Jerarquía Digital Plesiosincrónica) y SDH(Jerarquía Digital Síncrona),» Universidad del Azuay, Cuenca, 2004.
- [5] R. X. Román Vásquez, *Diseño De La Ampliación De La Red De Comunicación De Emelnorte Utilizando Fibra Óptica Y Tecnología Inalámbrica*, Quito, 2010.
- [6] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication System*, Texas: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [7] A. Rubio Mena, *Análisis y Simulación de los efectos no lineales de modulación de fase en fibras G.653 y G.655 y su relación con los parámetros de transmisión.*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [8] A. Abbas Khadir, B. Dhahir y X. Fu, «Achieving Optical Fiber Communication Experiments by OptiSystem,» *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 3, nº 6, pp. 42-53, 2014.
- [9] G. S. Hidalgo Moreta, *Diseño, simulación y pruebas de un laboratorio de sistema de comunicaciones ópticas usando Matlab, Communications System Toolbox, Simulink y Optisystem.*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [10] Optiwave, «Optiwave,» [En línea]. Available: <https://optiwave.com/category/optisystem-manuals/>. [Último acceso: 05 01 2023].
- [11] N. I. Mohd Rawi, Z. Jamaludin y F. Abdullah, vol. 4, 2014.

- [12] P. A. Castañeda Romero, Análisis y simulación del fenómeno de dispersión cromática en las fibras ópticas monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [13] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Características de un cable y fibra óptica monomodo,» 2016.
- [14] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Característica de cable y fibra óptica monomodo,» 2009.
- [15] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Características de los medios de transmisión y de los sistemas ópticos-Cables de fibra óptica.,» 2010.
- [16] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Características de los medios de transmisión – Cables de fibra óptica,» 2009.
- [17] International Telecommunication Union, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, 2016.

7 ANEXOS

ANEXO I. Certificado de originalidad

ANEXO II. Enlaces

ANEXO III. Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría A a 25 (km)

ANEXO IV. Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría D a 25 (km)

ANEXO V. Capturas correspondientes al estándar G.653 categoría B a 25 (km)

ANEXO VI. Capturas correspondientes al estándar G.655 categoría C a 25 (km)

ANEXO VII. Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría A a 50 (km)

ANEXO VIII. Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría D a 50 (km)

ANEXO IX. Capturas correspondientes al estándar G.653 categoría B a 50 (km)

ANEXO X. Capturas correspondientes al estándar G.655 categoría C a 50 (km)

ANEXO I: Certificado de Originalidad

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Quito, D.M. 2 de marzo de 2023

De mi consideración:

Yo, ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA, en calidad de Director del Trabajo de Integración Curricular titulado SIMULACIÓN DE UN ENLACE PTP QUE UTILIZA FIBRAS QUE CUMPLEN ESTÁNDARES ITU-T elaborado por el estudiante DAVID SANTIAGO AROTINGO BONILLA de la carrera en TECNOLOGÍA SUPERIOR EN REDES Y TELECOMUNICACIONES, certifico que he empleado la herramienta Turnitin para la revisión de originalidad del documento escrito completo, producto del Trabajo de Integración Curricular indicado.

El documento escrito tiene un índice de similitud del 14%.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente documento para los trámites de titulación.

NOTA: Se adjunta el link del informe generado por la herramienta Turnitin.

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/italo_carreno_epn_edu_ec/EW2T3n2doFtJgeMFBJ5TwI4BSeQHN2OAJYnLpw35YPoHJw?e=izJhKI

Atentamente,



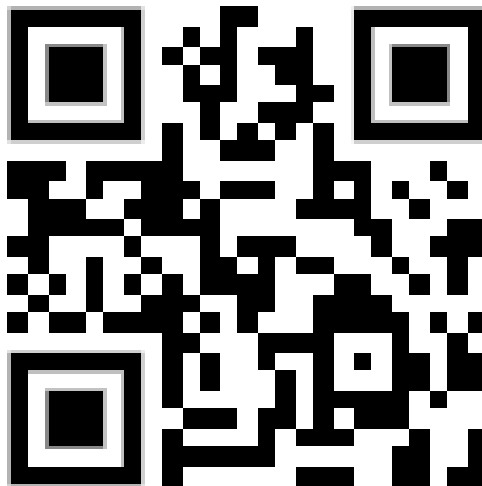
ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA

Docente

Escuela de Formación de Tecnólogos

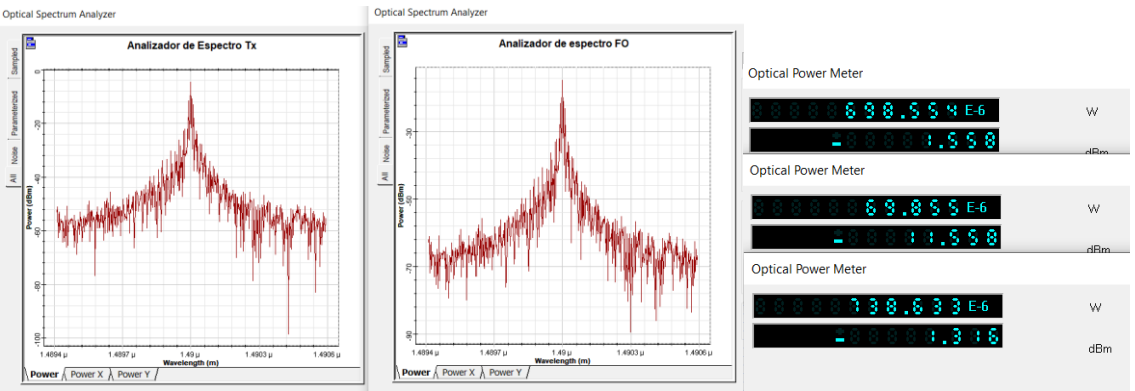
ANEXO II: Enlaces

Se debe colocar los códigos QR o enlaces de videos demostrativos, etc

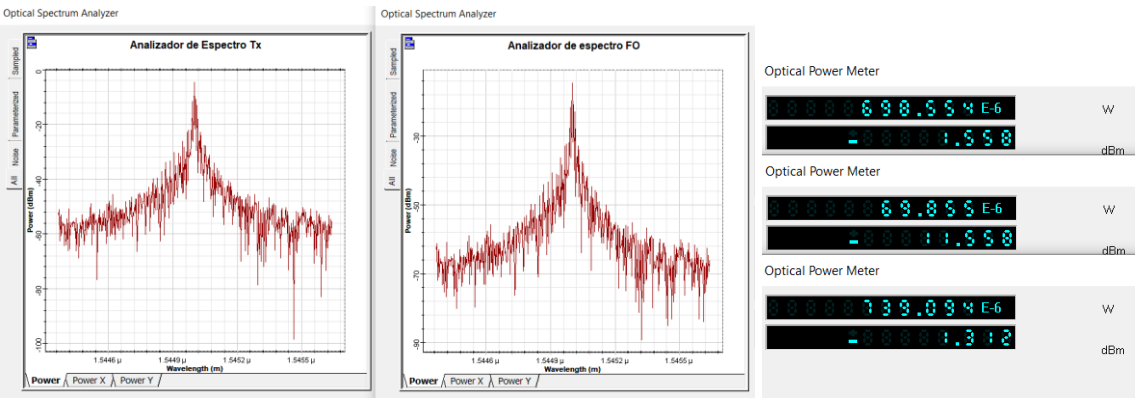


Anexo II.I Código QR de la implementación y pruebas de funcionamiento

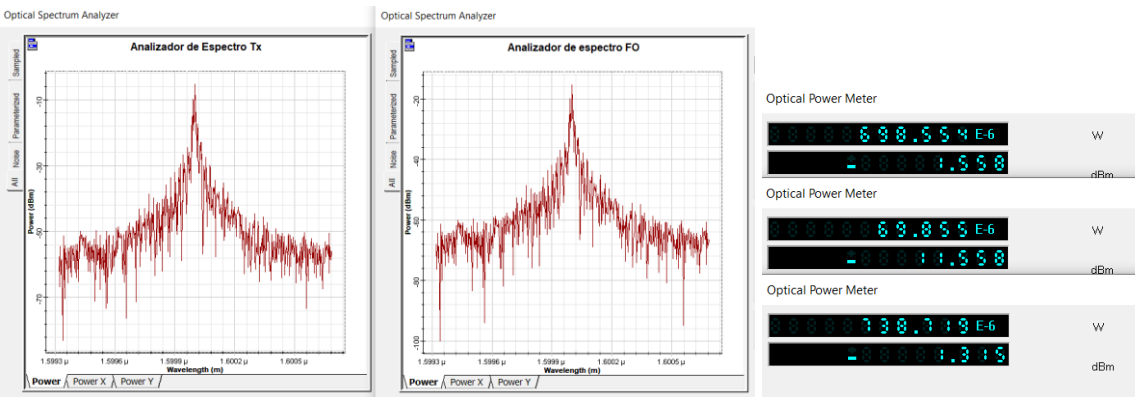
ANEXO III: Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría A a 25 (km)



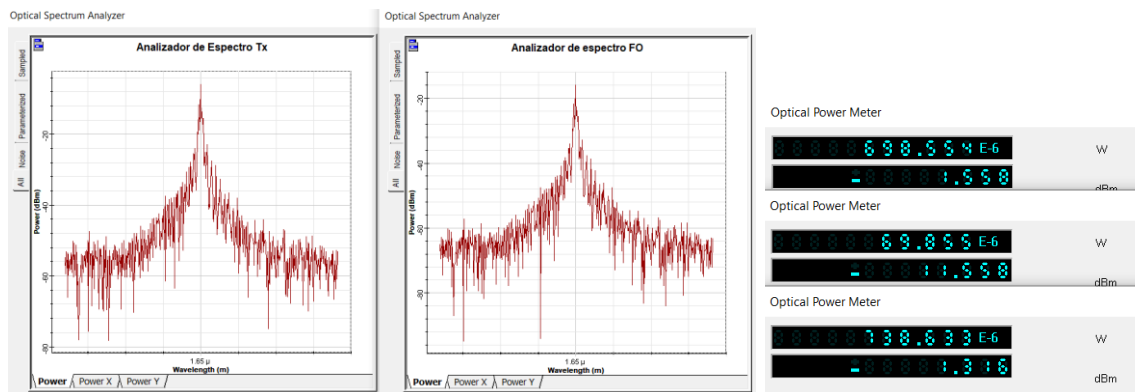
Anexo III.I Espectro y potencia medida a la salida de cada bloque para 1 490 (nm).



Anexo III.II Espectro y potencias para 1 545 (nm).

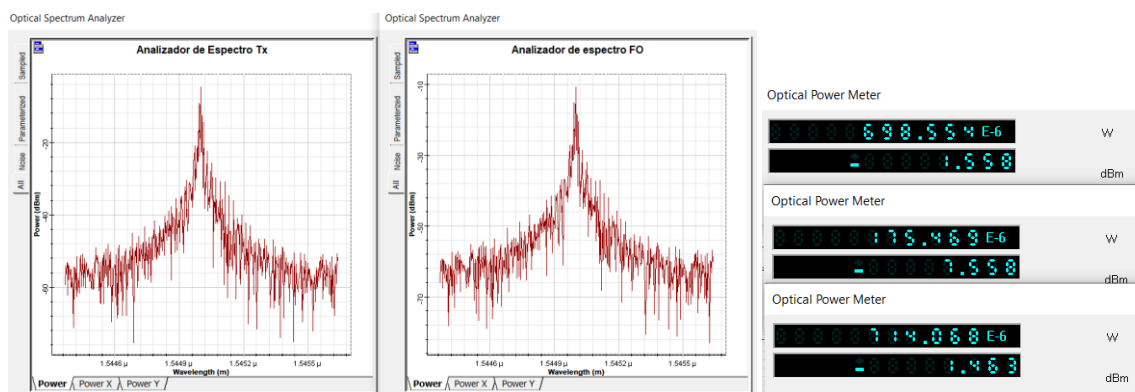


Anexo IV.III Espectro y potencias para 1 600 (nm).

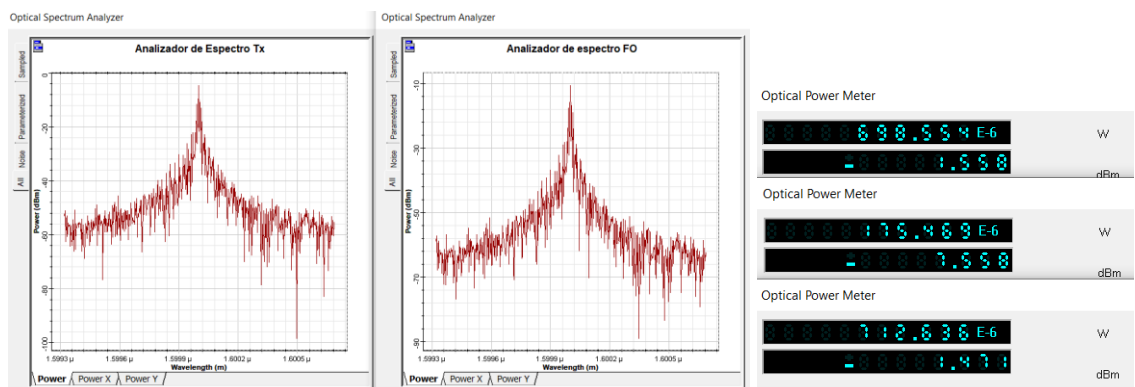


Anexo V.II Espectro y potencias para 1 650 (nm).

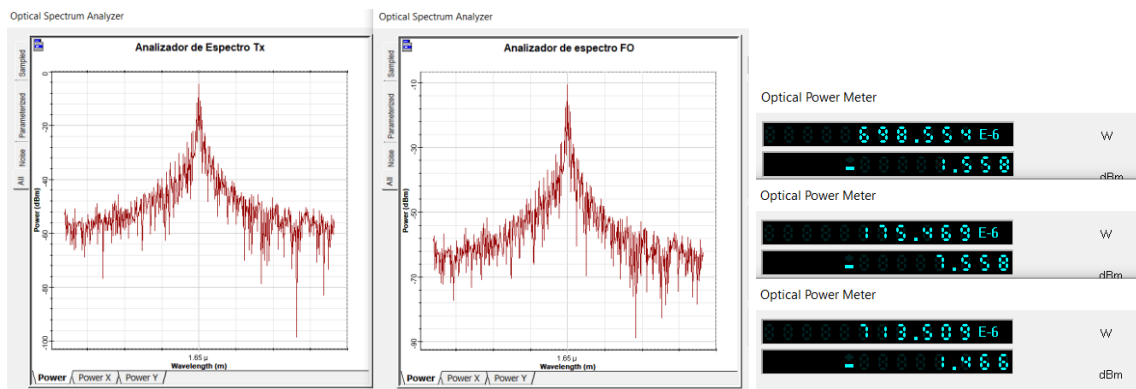
ANEXO IV: Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría D a 25 (km)



Anexo VIV.I Espectro y potencias para 1 545 (nm).

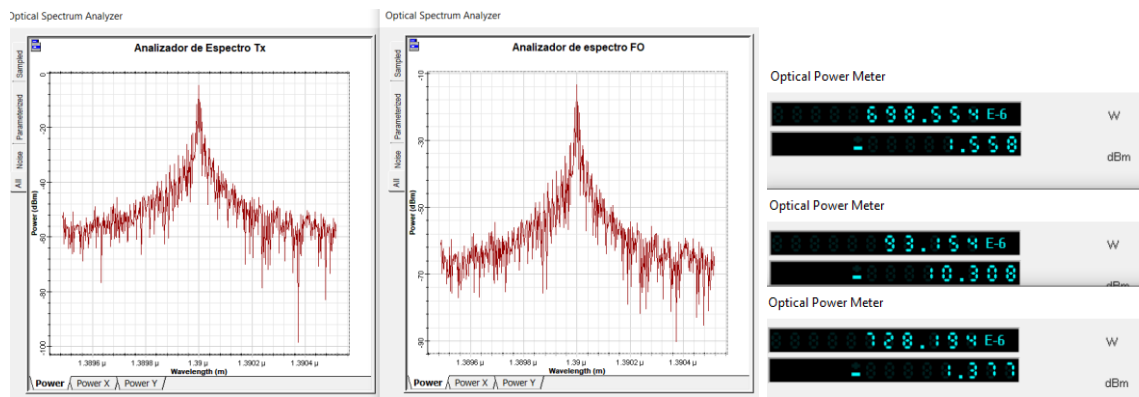


Anexo VIIV.II Espectro y potencias para 1 600 (nm).

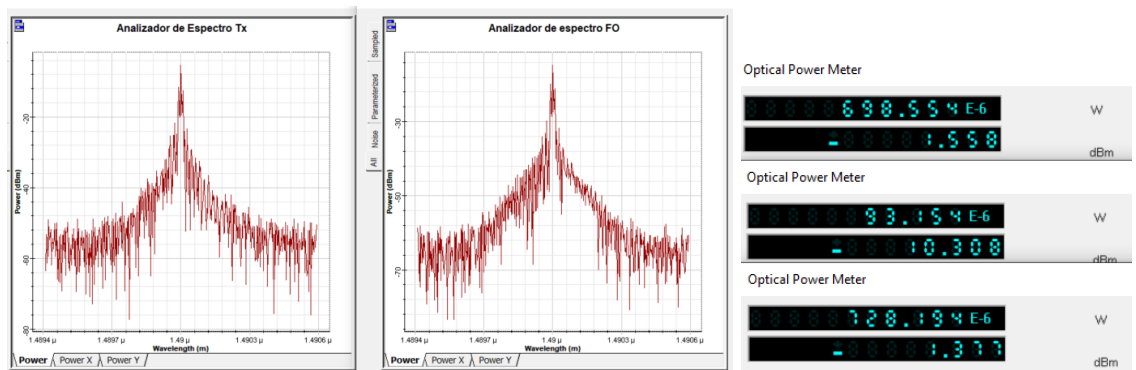


Anexo VIII.V.III Espectro y potencias para 1 650 (nm).

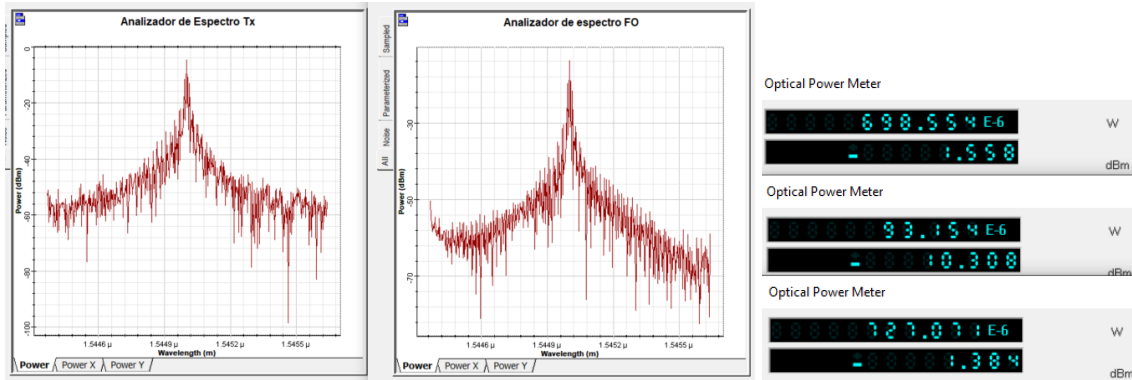
ANEXO V: Capturas correspondientes al estándar G.653 categoría B a 25 (km)



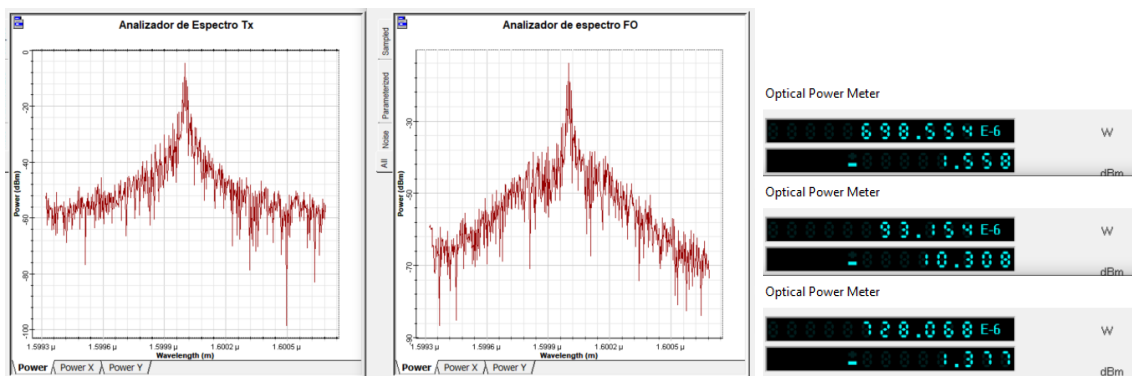
Anexo V.I Espectro y potencias para 1 390 (nm).



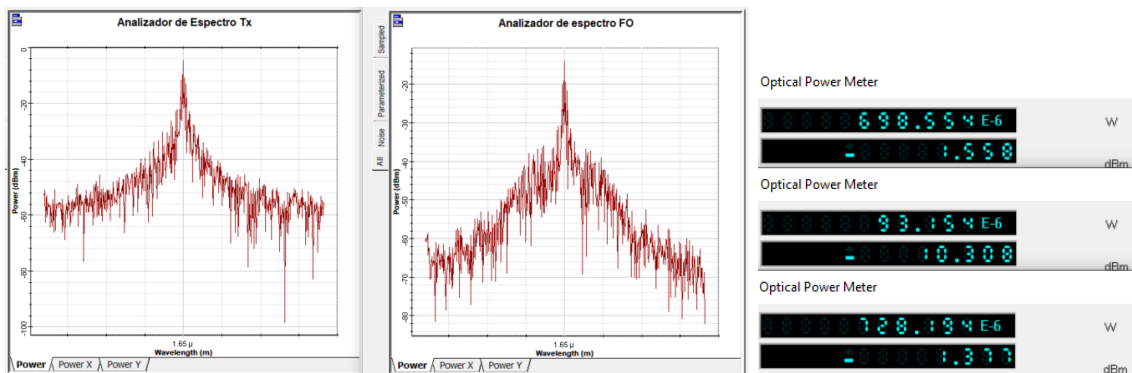
Anexo V.II Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo V.III Espectro y potencias para 1 545 (nm).

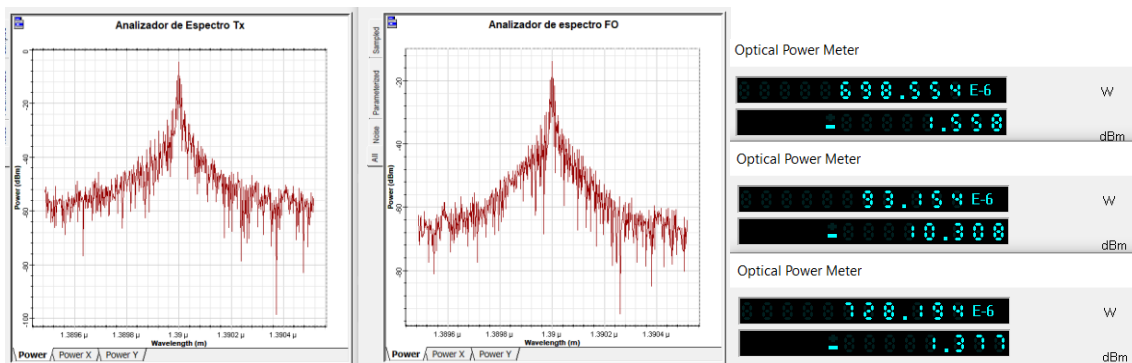


Anexo V.IV Espectro y potencias para 1 600 (nm).

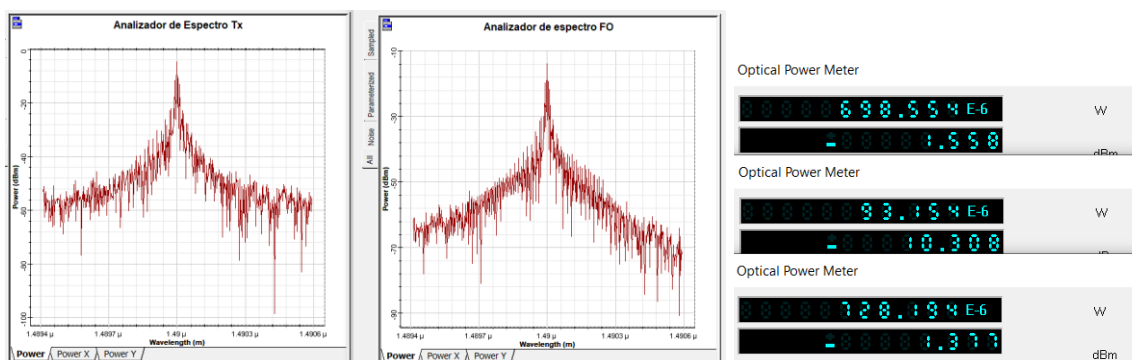


Anexo V.V Espectro y potencias para 1 650 (nm).

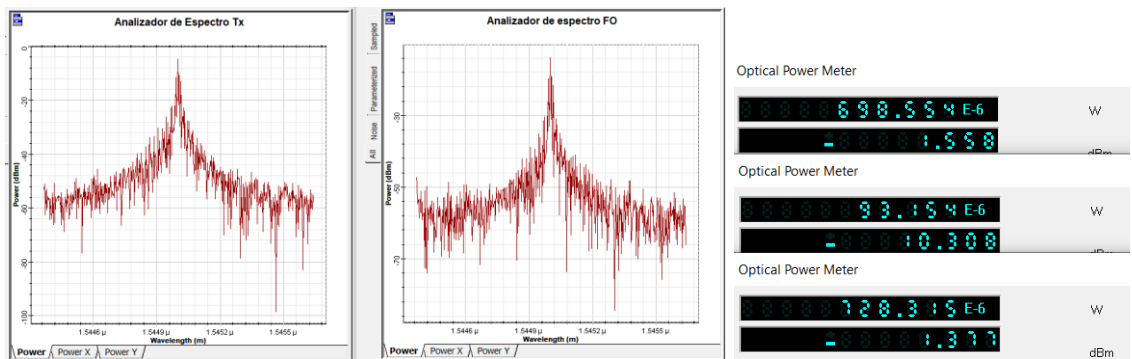
ANEXO VI: Capturas correspondientes al estándar G.655 categoría C a 25 (km)



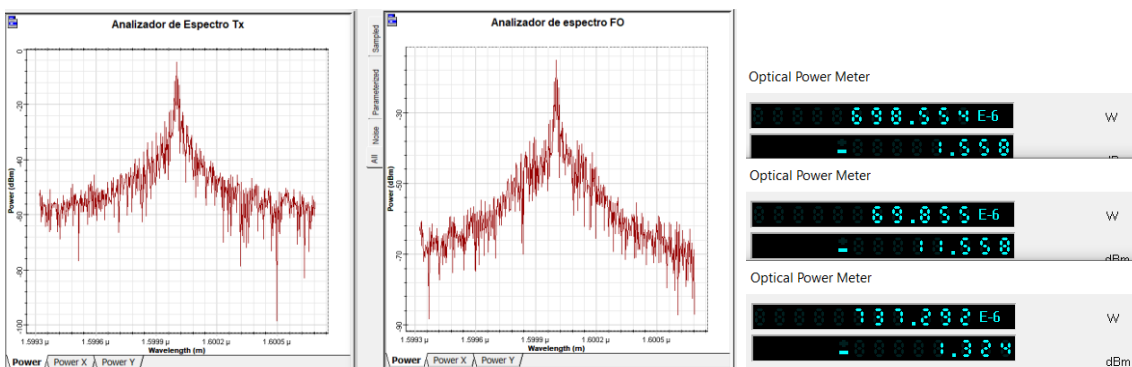
Anexo VI.I Espectro y potencias para 1 390 (nm).



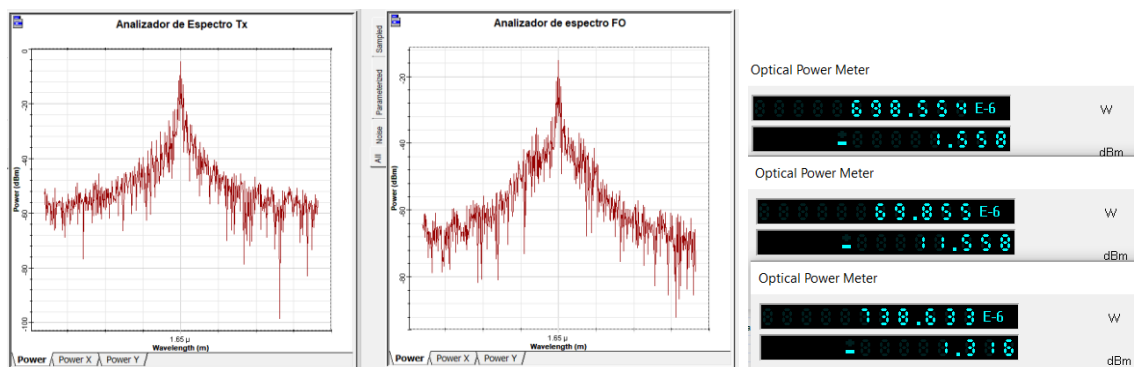
Anexo VI.II Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo VI.III Espectro y potencias para 1 545 (nm).

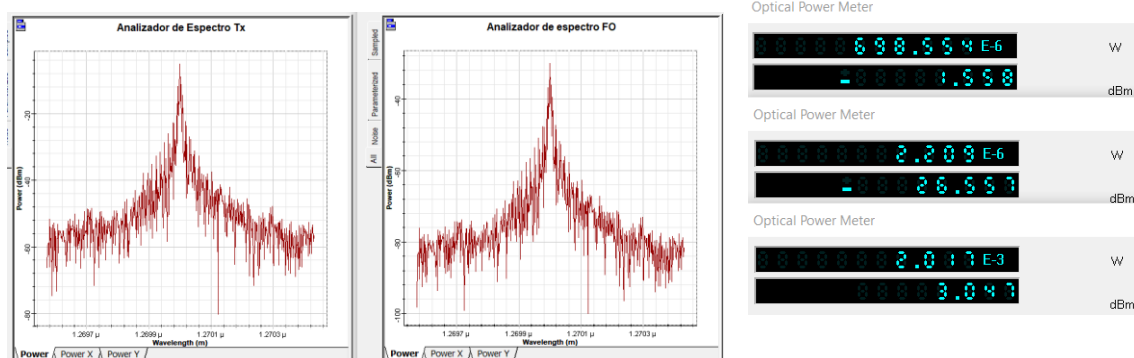


Anexo VI.IV Espectro y potencias para 1 600 (nm).

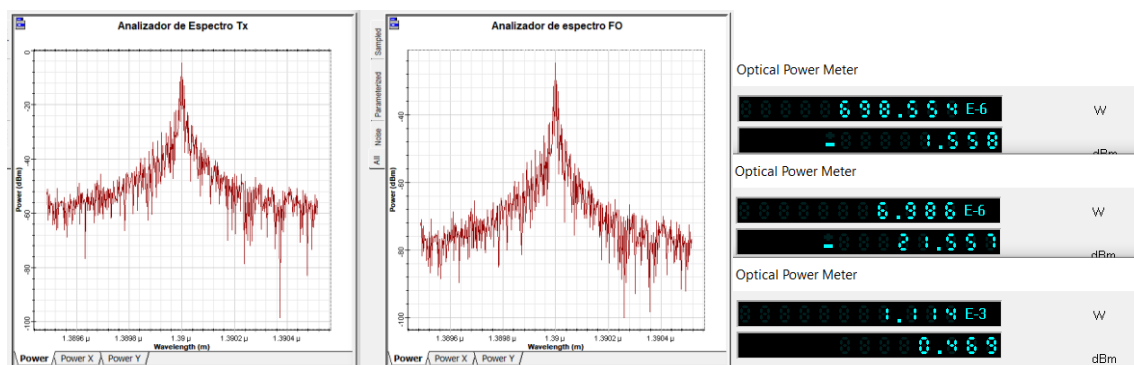


Anexo VI.V Espectro y potencias para 1 650 (nm).

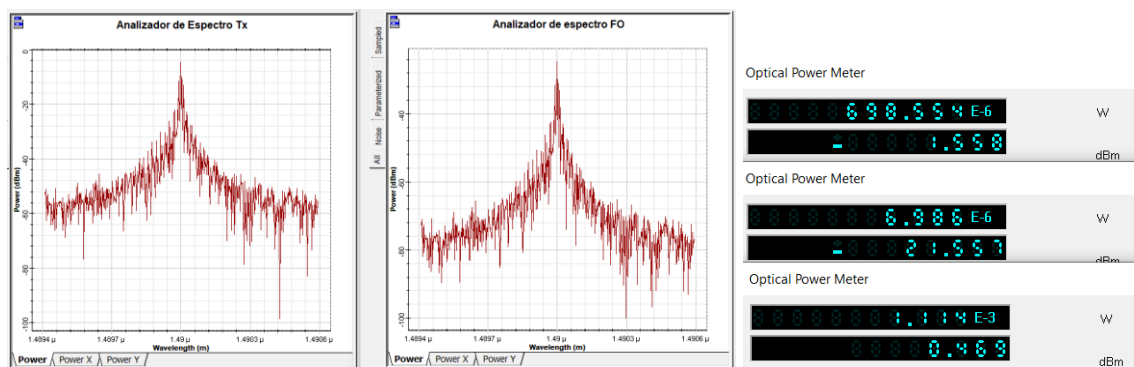
ANEXO VII: Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría A a 50 (km)



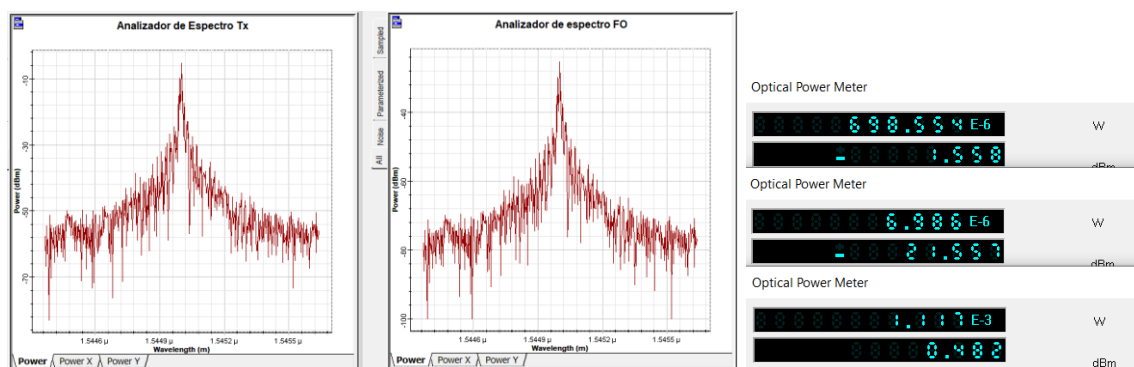
Anexo VII.I Espectro y potencias para 1 270 (nm).



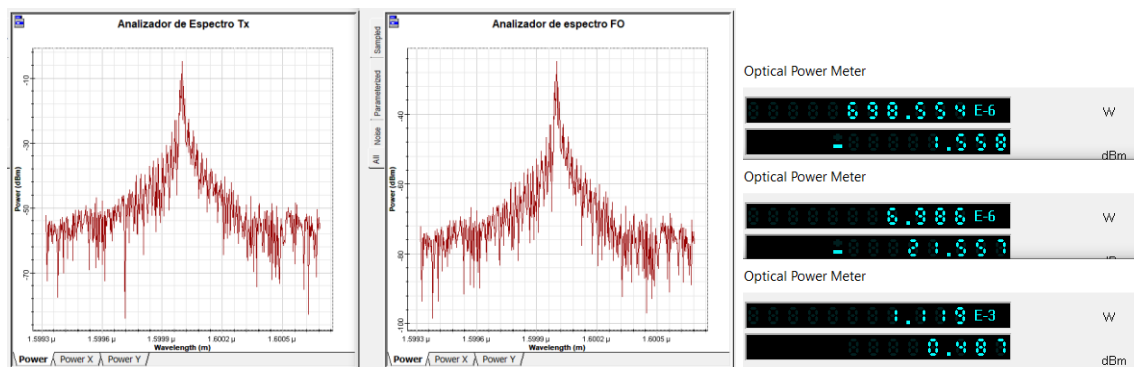
Anexo VII.II Espectro y potencias para 1 390 (nm).



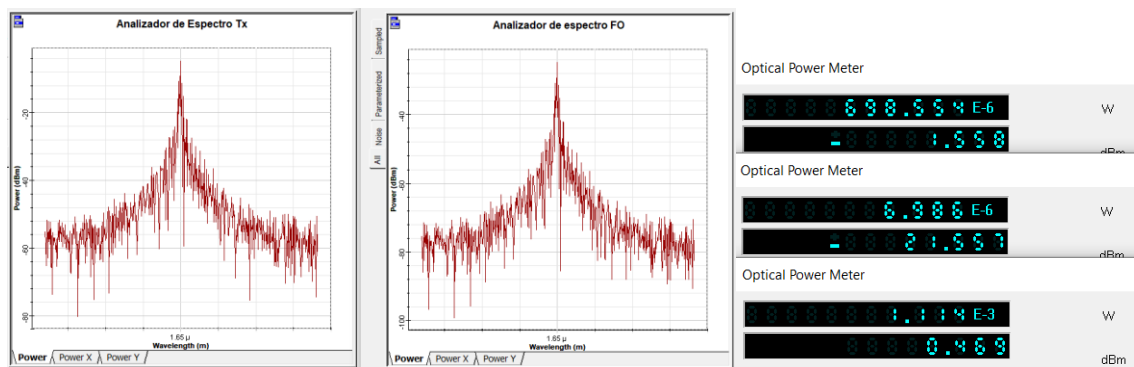
Anexo VII.III Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo VII.IV Espectro y potencias para 1 545 (nm).

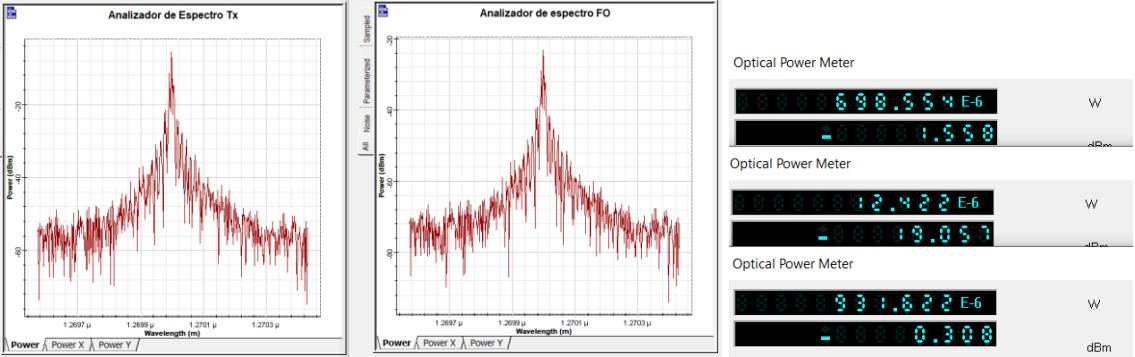


Anexo VII.V Espectro y potencias para 1 600 (nm).

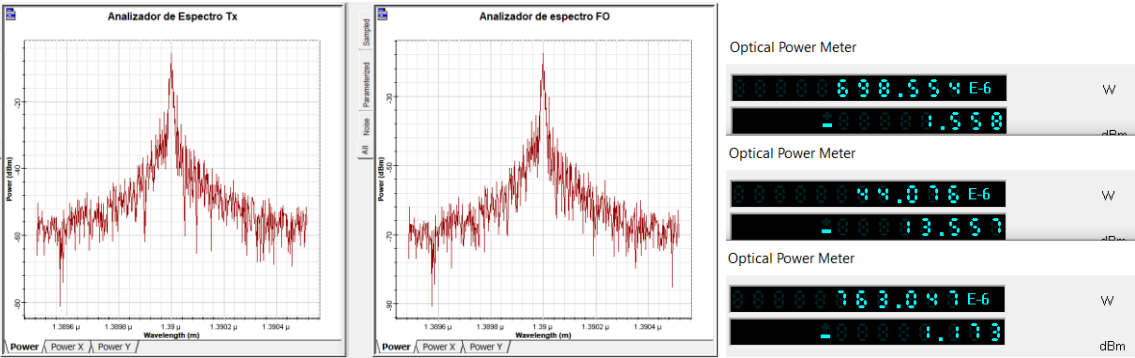


Anexo VII.VI Espectro y potencias para 1 650 (nm).

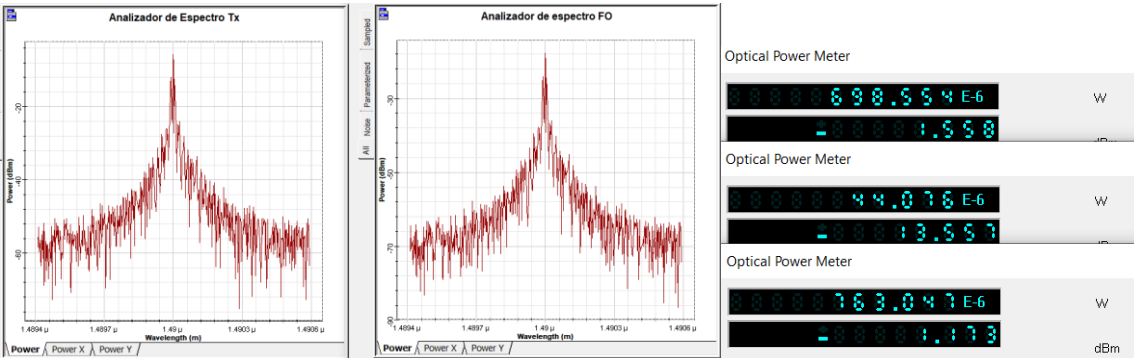
ANEXO VIII: Capturas correspondientes al estándar G.652 categoría D a 50 (km)



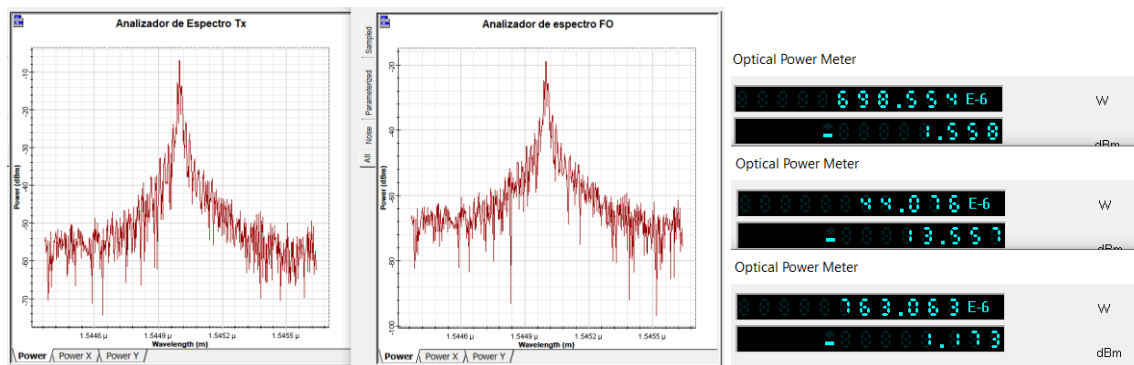
Anexo VIII.I Espectro y potencias para 1 270 (nm).



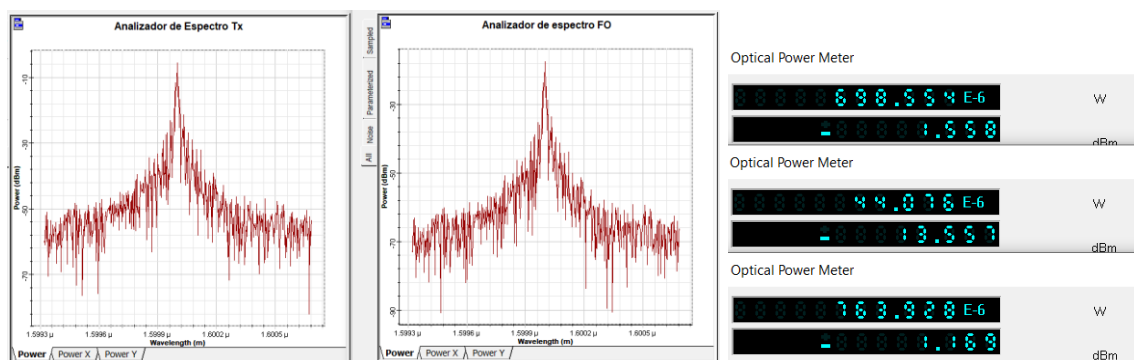
Anexo VIII.II Espectro y potencias para 1 390 (nm).



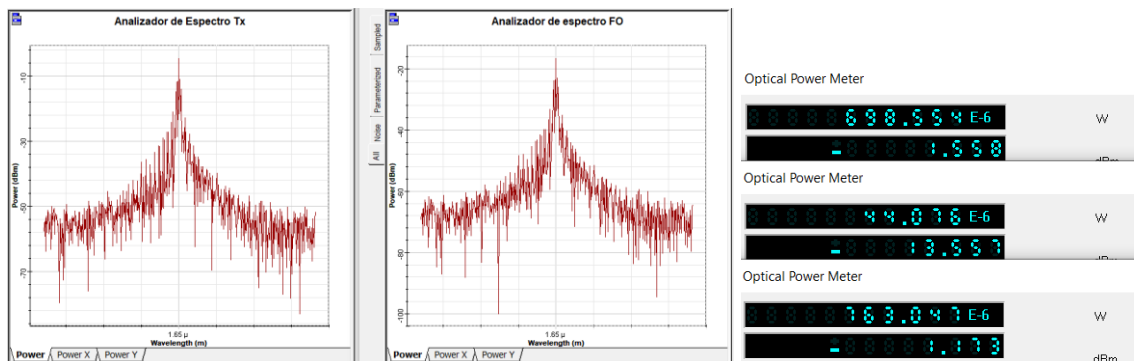
Anexo VIII.III Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo VIII.IV Espectro y potencias para 1 545 (nm).

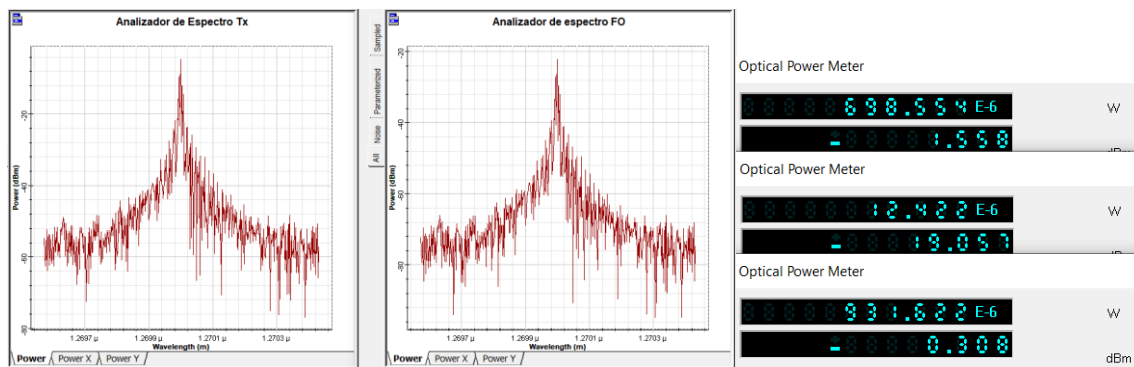


Anexo VIII.V Espectro y potencias para 1 600 (nm).

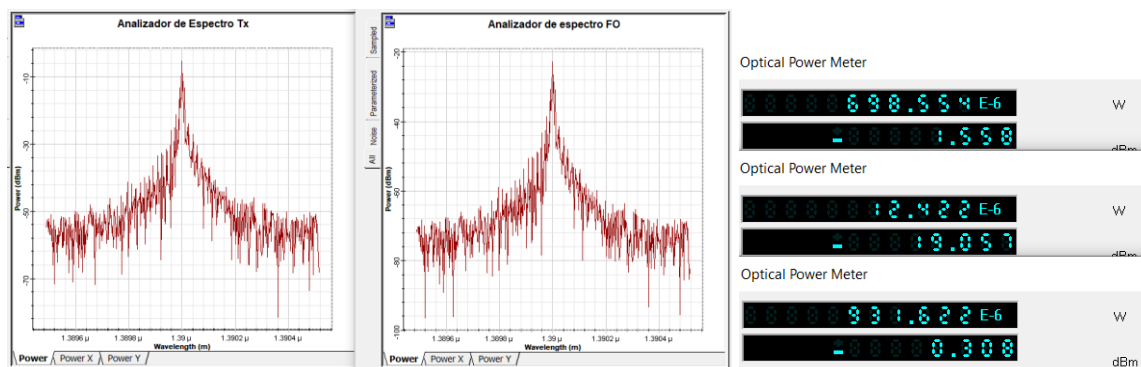


Anexo VIII.VI Espectro y potencias para 1 650 (nm).

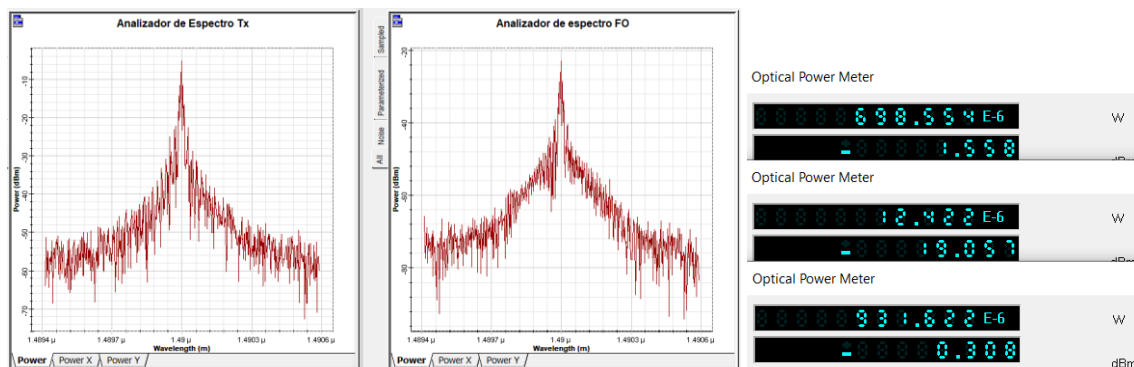
ANEXO IX: Capturas correspondientes al estándar G.653 categoría B a 50 (km)



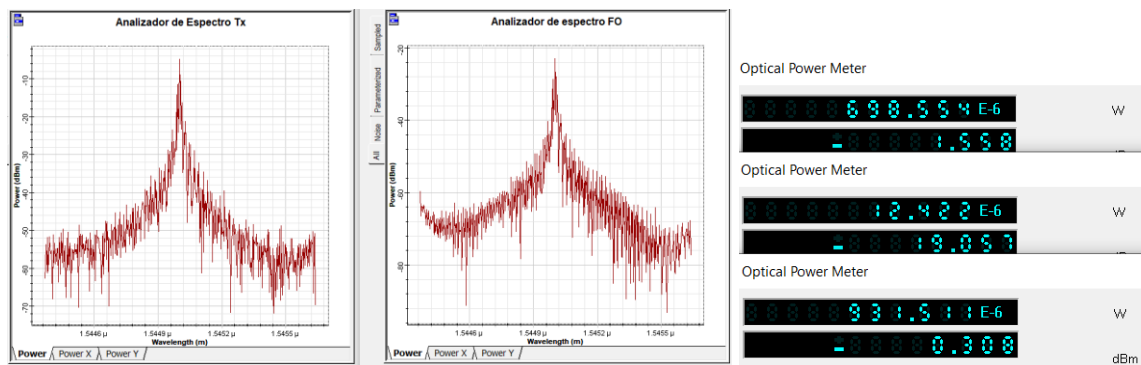
Anexo IX.I Espectro y potencias para 1 270 (nm).



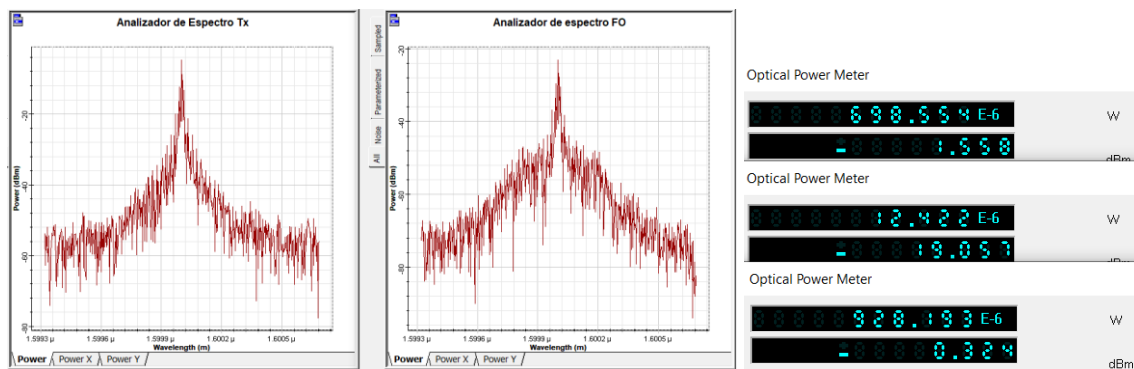
Anexo IX.II Espectro y potencias para 1 390 (nm).



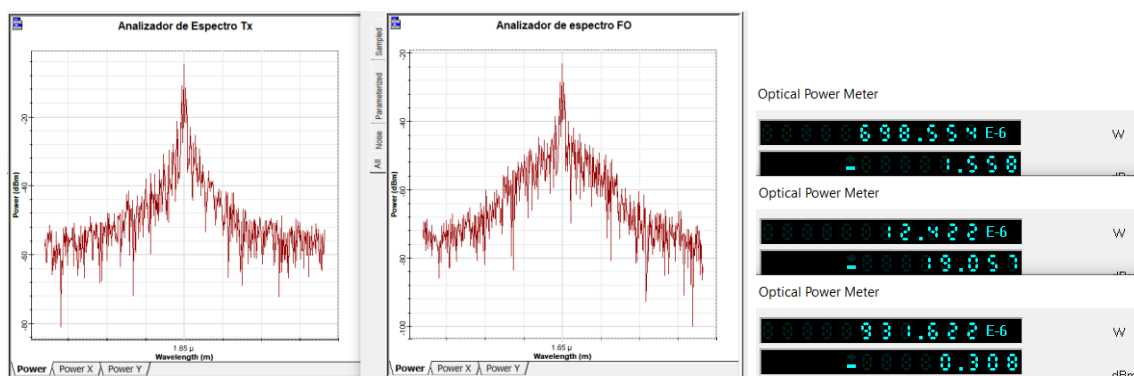
Anexo IX.III Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo IX.IV Espectro y potencias para 1 545 (nm).

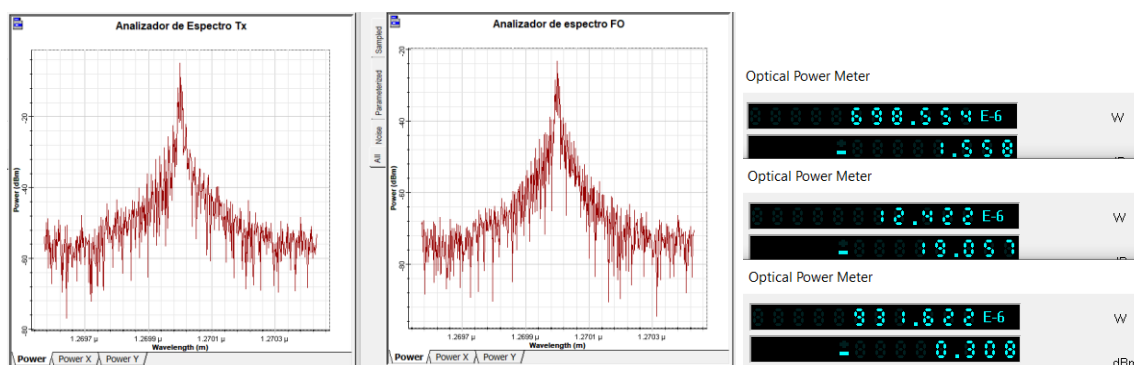


Anexo IX.V Espectro y potencias para 1 600 (nm).

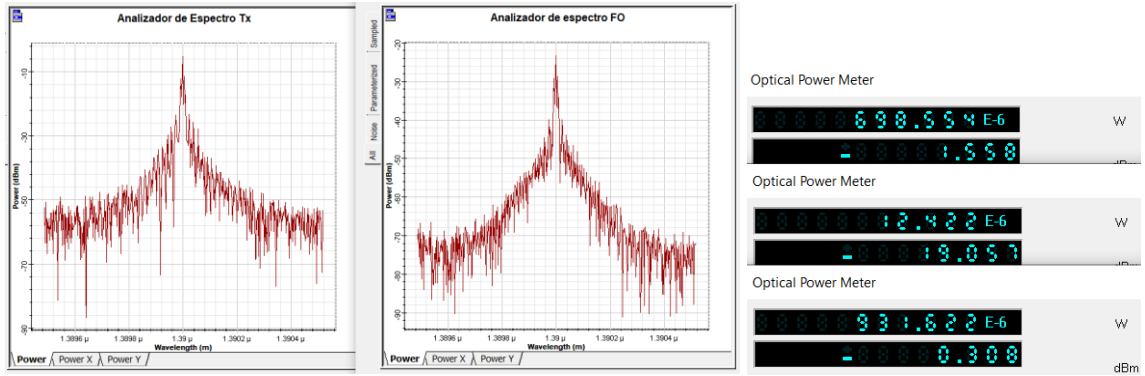


Anexo IX.VI Espectro y potencias para 1 650 (nm).

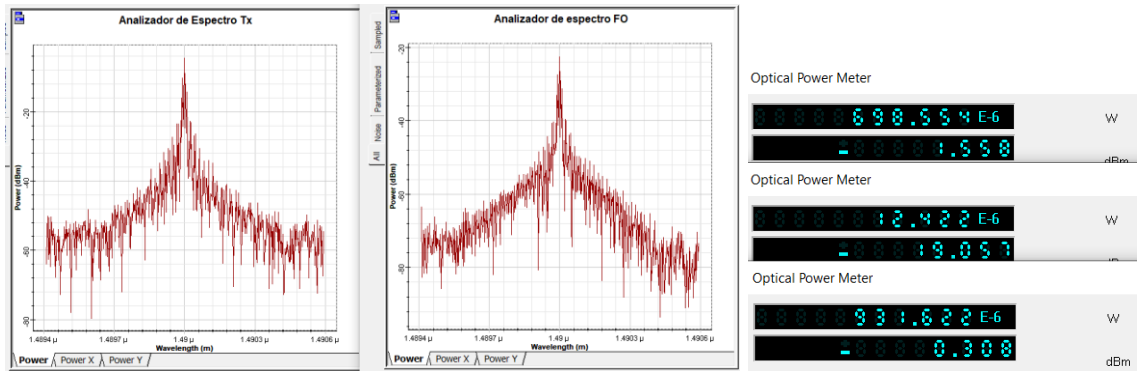
ANEXO X: Capturas correspondientes al estándar G.655 categoría C a 50 (km)



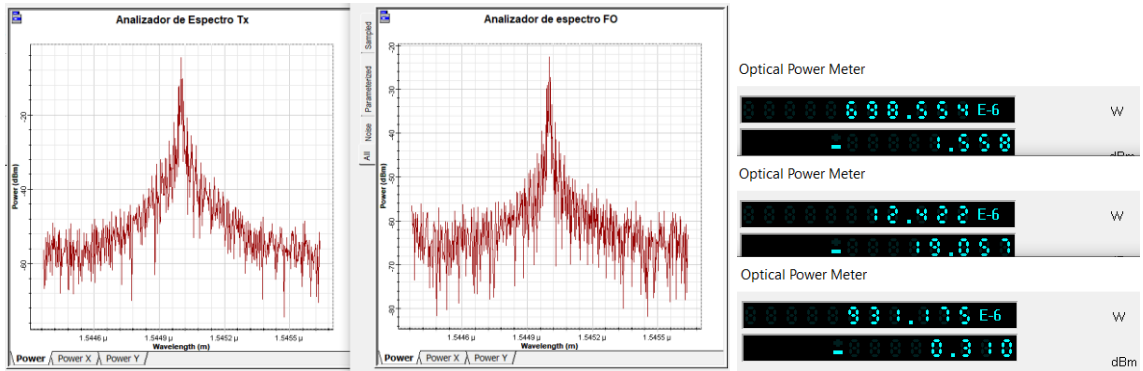
Anexo X.I Espectro y potencias para 1 270 (nm).



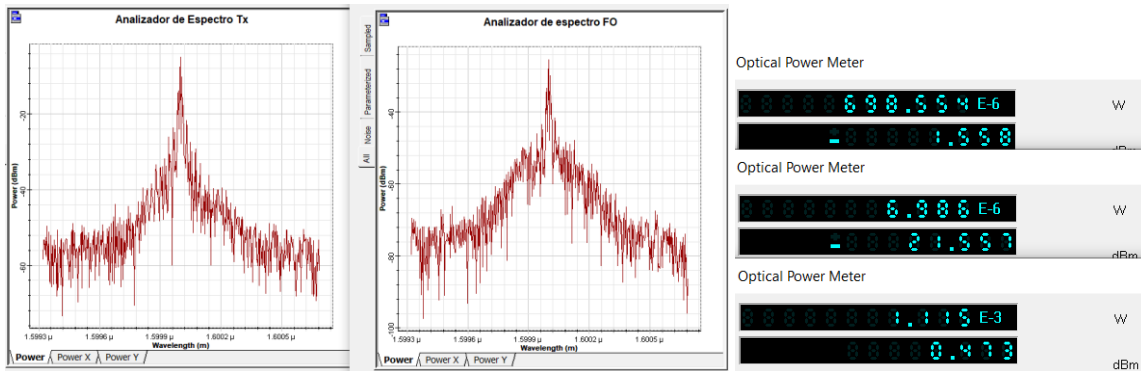
Anexo X.II Espectro y potencias para 1 390 (nm).



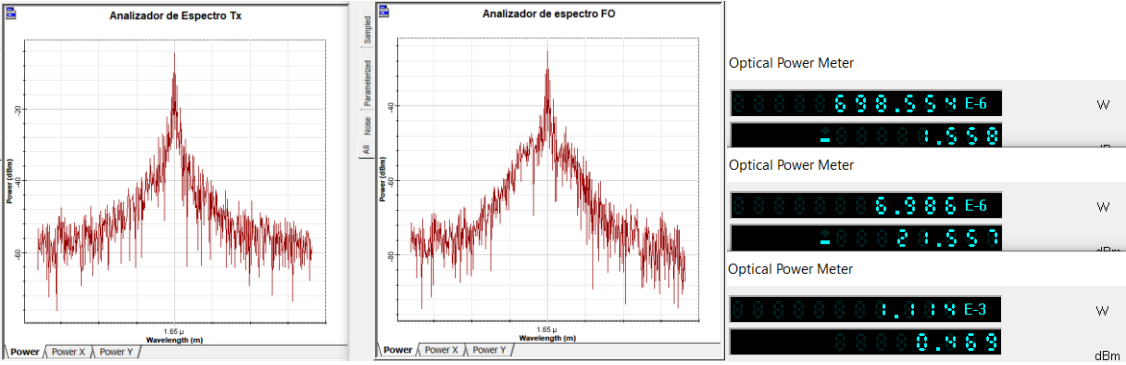
Anexo X.III Espectro y potencias para 1 490 (nm).



Anexo X.IV Espectro y potencias para 1 545 (nm).



Anexo X.V Espectro y potencias para 1 600 (nm).



Anexo X.VI Espectro y potencias para 1 650 (nm).