



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL  
FENÓMENO DE DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN  
EN FIBRAS ÓPTICAS NZDSF, DE ACUERDO CON EL  
ESTÁNDAR ITU-T G.655 MEDIANTE SIMULACIÓN”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR:**

**DIEGO ANDRES TORRES CLAVIJO**

Riobamba – Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL  
FENÓMENO DE DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN  
EN FIBRAS ÓPTICAS NZDSF, DE ACUERDO CON EL  
ESTÁNDAR ITU-T G.655 MEDIANTE SIMULACIÓN”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR: DIEGO ANDRES TORRES CLAVIJO**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO GEOVANNY MARTÍNEZ GUASHIMA**

Riobamba – Ecuador

2024

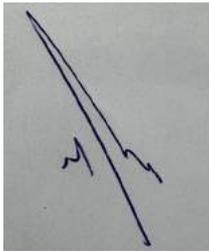
**©2024, Diego Andres Torres Clavijo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Diego Andres Torres Clavijo, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 22 de mayo del 2024.

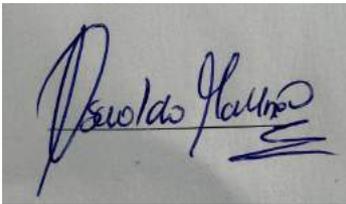


**Diego Andres Torres Clavijo**

**1600629933**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS NZDSF, DE ACUERDO CON EL ESTÁNDAR ITU-T G.655 MEDIANTE SIMULACIÓN**, realizado por el señor **DIEGO ANDRES TORRES CLAVIJO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Lourdes del Carmen Zuñiga Lema <b>PRESIDENTA DEL TRIBUNAL</b>		2024-05-22
Ing. Oswaldo Geovanny Martínez Guashima <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2024-05-22
Ing. Verónica Elizabeth Mora Chunllo <b>ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2024-05-22

## **DEDICATORIA**

Dedico este presente trabajo a mis padres, Francisco Torres y Soledad Clavijo, que han sido mi guía, inspiración y apoyo durante esta y todas las etapas de mi vida. Gracias por siempre creer en mí, en mis sueños y anhelos. Sin su amor, sabiduría y dedicación este logro no habría sido posible.

Diego

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi más profunda gratitud a Dios por su infinita bondad y por guiarme a lo largo de este camino. Le agradezco por las bendiciones que he recibido y por la fortaleza que me ha dado para superar los momentos difíciles. Luego, quiero agradecer a mis padres, Francisco Torres y Soledad Clavijo quienes me han brindado su apoyo incondicional desde el primer momento. Gracias a su amor, paciencia y sacrificio, he podido alcanzar mis metas y sueños. Son mi mayor fuente de inspiración y motivación. También quiero agradecer a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de formarme como profesional en la carrera de Telecomunicaciones. Agradezco a la institución por su excelente calidad educativa, por sus recursos por el equipo de docentes y personal administrativo que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme. De manera especial, quiero agradecer al Ingeniero Oswaldo Martínez y a la Ingeniera Verónica Mora por su invaluable apoyo y por la guía que me brindaron durante la elaboración de mi tesis. Su paciencia, dedicación y conocimiento fueron fundamentales para que este trabajo pudiera ser realizado. Finalmente, quiero agradecer a la Carrera de Telecomunicaciones de la Facultad de Informática y Electrónica por la formación académica recibida. Agradezco a todos los profesores que me han transmitido sus conocimientos que me han ayudado a desarrollar mis habilidades como profesional.

Diego

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvi
RESUMEN .....	xvii
SUMMARY .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES.....	2

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	4
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.3 Justificación .....	4
1.3.1 <i>Justificación teórica</i> .....	4
1.3.2 <i>Justificación aplicativa</i> .....	5

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Tecnología óptica .....	7
2.2 Contextualización de la fibra óptica y su evolución.....	7
2.2.1 <i>Concepto de fibra óptica</i> .....	7
2.2.2 <i>Desarrollo y perfeccionamiento de la fibra óptica</i> .....	8
2.2.3 <i>Aplicaciones iniciales de la fibra óptica</i> .....	10
2.3 Sistemas de comunicaciones ópticas .....	11

2.3.1	<i>Utilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas</i> .....	12
2.3.2	<i>Características de los sistemas de comunicaciones ópticas</i> .....	13
2.3.3	<i>Elementos de los sistemas de comunicaciones ópticas</i> .....	14
2.4	<b>Principios fundamentales de transmisión en fibras ópticas</b> .....	15
2.4.1	<i>Propagación de la luz en medios ópticos</i> .....	15
2.4.2	<i>Modos de transmisión y su influencia</i> .....	17
2.4.3	<i>Retardo diferencial de grupo (DGD)</i> .....	18
2.5	<b>Características y clasificación de las fibras ópticas</b> .....	18
2.5.1	<i>Propiedades de las fibras ópticas</i> .....	18
2.5.2	<i>Clasificación según modo y dispersión</i> .....	20
2.6	<b>Estándares y normativas en fibras ópticas</b> .....	20
2.6.1	<i>Rol de los estándares en las telecomunicaciones</i> .....	20
2.6.2	<i>Estándar ITU-T G.655 y su significado</i> .....	21
2.7	<b>Fenómeno de dispersión por Modo de Polarización (PMD)</b> .....	22
2.7.1	<i>Fundamentos de la PMD</i> .....	22
2.7.2	<i>Importancia de la PMD en sistemas ópticos</i> .....	23
2.7.3	<i>Relación entre PMD y Fibras Ópticas NZDSF</i> .....	23
2.8	<b>Características físicas y mecánicas de las NZDSF</b> .....	24
2.8.1	<i>Propiedades físicas de las NZDSF</i> .....	24
2.8.2	<i>Propiedades mecánicas de las NZDSF</i> .....	25
2.9	<b>Simulación óptica y herramientas utilizadas</b> .....	26
2.9.1	<i>Introducción a OptiSystem</i> .....	26
2.9.2	<i>Justificación de OptiSystem en la investigación</i> .....	27
2.10	<b>Variables clave en la simulación de PMD</b> .....	28
2.10.1	<i>Velocidad de transmisión</i> .....	28
2.10.2	<i>Longitud de la fibra y PMD</i> .....	28
2.10.3	<i>Coefficiente PMD y su rol en la dispersión</i> .....	28
2.11	<b>Futuras direcciones de investigación en fibras ópticas y PMD</b> .....	29
2.11.1	<i>Áreas de extensión y exploración</i> .....	29

## CAPÍTULO III

<b>3. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1 Introducción</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2 Tipo y diseño de la investigación</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3 OPTISYSTEM</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.1 Ventajas del uso de OPTISYSTEM</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.2 Descripción de la interfaz gráfica</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.3 Uso y manejo de OPTISYSTEM</b> .....	<b>35</b>
<b>3.4 Componentes necesarios para la simulación</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4.1 Componente User-defined bit sequence generator</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4.2 Componente Optical Gaussian Pulse Generator</b> .....	<b>39</b>
<b>3.4.3 Componente optical fiber</b> .....	<b>40</b>
<b>3.4.4 Componente Optical Time Domain Visualizer</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4.5 Componente Optical Spectrum Analyzer (OSA)</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4.6 Componente Polarization Controller</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4.7 Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4.8 Componente CW Laser</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4.9 Componente MZ Modulator Analytical</b> .....	<b>43</b>
<b>3.5 Implementación del escenario</b> .....	<b>44</b>
<b>3.6 Comprobación del simulador</b> .....	<b>45</b>
<b>3.6.1 Configuración del entorno de verificación</b> .....	<b>45</b>
<b>3.6.2 Configuración de parámetros de simulación</b> .....	<b>45</b>
<b>3.6.3 Generación de datos de entrada conocidos</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6.4 Ejecución de la simulación de verificación</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6.5 Análisis de resultados y comparación</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6.6 Validación de resultados</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6.7 Optimización y ajuste</b> .....	<b>47</b>
<b>3.7 Ejemplos de comprobación</b> .....	<b>47</b>

3.7.1	<i>Ejemplo 1</i> .....	47
3.7.2	<i>Ejemplo 2</i> .....	49
3.8	<b>Simulación de PMD en fibras NZDSF (ITU-T G.655)</b> .....	51
3.8.1	<i>Coefficiente PMD de enlace (PMD<sub>q</sub>)</i> .....	52
3.8.2	<i>Coefficiente PMD estocástico de OptiSystem</i> .....	52
3.9	<b>Definición de los escenarios de simulación de PMD</b> .....	53

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	56
4.1	<b>Entorno de simulación de PMD</b> .....	57
4.2	<b>Análisis de la simulación de PMD</b> .....	57
4.2.1	<i>Casos más significativos dentro de la simulación</i> .....	59
4.3	<b>Análisis de la simulación de compensación de PMD</b> .....	74
4.3.1	<i>Simulación del sistema de pre-compensador de PMD</i> .....	74

## CAPÍTULO V

5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	96
----	---	----

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3-1:</b> Escenarios de simulación.....	54
<b>Tabla 3-2:</b> Técnicas de compensación.....	55
<b>Tabla 4-1:</b> Resumen de la datos obtenidos en la simulación .....	58

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1.</b> Enlace por fibra óptica.....	9
<b>Ilustración 2-2.</b> Enlace por fibra óptica.....	10
<b>Ilustración 2-3.</b> Sistema de comunicación estándar .....	12
<b>Ilustración 2-4.</b> Refracción de la luz.....	16
<b>Ilustración 2-5.</b> Reflexión de la luz.....	16
<b>Ilustración 2-6.</b> Estructura de la fibra óptica .....	19
<b>Ilustración 2-7.</b> Estructura PMD .....	23
<b>Ilustración 2-8.</b> Interfaz de la herramienta OptiSystem.....	27
<b>Ilustración 3-1.</b> Barra de menú .....	31
<b>Ilustración 3-2.</b> Barra de herramientas.....	32
<b>Ilustración 3-3.</b> Área de trabajo principal .....	32
<b>Ilustración 3-4.</b> Librería de componentes.....	33
<b>Ilustración 3-5.</b> Propiedades del componente .....	33
<b>Ilustración 3-6.</b> Ventana de resultados.....	34
<b>Ilustración 3-7.</b> Ventana de propiedades y configuración.....	34
<b>Ilustración 3-8.</b> Barra de estado .....	35
<b>Ilustración 3-9.</b> Cálculo del proyecto.....	37
<b>Ilustración 3-10.</b> Componente generador de secuencias de bits .....	38
<b>Ilustración 3-11.</b> Componente Optical Gaussian Pulse Generator.....	39
<b>Ilustración 3-12.</b> Componente optical fiber .....	40
<b>Ilustración 3-13.</b> Componente Optical Time Domain Visualizer .....	41
<b>Ilustración 3-14.</b> Componente Optical Spectrum Analyzer (OSA).....	42
<b>Ilustración 3-15.</b> Componente Polarization Controller .....	42
<b>Ilustración 3-16.</b> Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner.....	43
<b>Ilustración 3-17.</b> Componente CW Laser.....	43
<b>Ilustración 3-18.</b> Componente MZ Modulator Analytical.....	43
<b>Ilustración 3-19.</b> Diagrama del entorno de simulación .....	44

<b>Ilustración 3-20.</b> Entorno de trabajo para el primer caso .....	48
<b>Ilustración 3-21.</b> Retardo temporal de 100 ps del pulso de salida en función del pulso de entrada .....	48
<b>Ilustración 3-22.</b> Pulsos de frecuencia a la entrada y salida del sistema.....	49
<b>Ilustración 3-22.</b> Pulsos de tiempo en la etapa de transmisión con sus componentes en X, Y ....	50
<b>Ilustración 3-24.</b> Pulsos de tiempo en la etapa de recepción con sus componentes en X, Y ....	50
<b>Ilustración 3-25.</b> Pulsos de frecuencia en la etapa de transmisión con sus componentes en X, Y .....	50
<b>Ilustración 3-26.</b> Pulsos de frecuencia en la etapa de recepción con sus componentes en X, Y .....	51
<b>Ilustración 4-1.</b> Entorno de simulación de PMD.....	57
<b>Ilustración 4-2.</b> $\phi_{\text{PMD}} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ .....	59
<b>Ilustración 4-3.</b> $V_{\text{tx}} = 10 \text{ Gbps}$ .....	60
<b>Ilustración 4-4.</b> 1550 nm.....	60
<b>Ilustración 4-5.</b> Señal de entrada en el dominio del tiempo .....	61
<b>Ilustración 4-6.</b> Señal de entrada en el dominio de frecuencia .....	61
<b>Ilustración 4-7.</b> Señales de entrada y salida para el caso 1: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	62
<b>Ilustración 4-8.</b> Generador de secuencia de bits definida por el usuario .....	63
<b>Ilustración 4-9.</b> Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	63
<b>Ilustración 4-10.</b> Diagrama de ojo .....	64
<b>Ilustración 4-11.</b> $\phi_{\text{PMD}} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ .....	64
<b>Ilustración 4-12.</b> $V_{\text{tx}} = 120 \text{ Gbps}$ .....	65
<b>Ilustración 4-13.</b> 1310 nm.....	65
<b>Ilustración 4-14.</b> Señales de entrada y salida para el caso 2: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	66
<b>Ilustración 4-15.</b> Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	66
<b>Ilustración 4-16.</b> Diagrama de ojo .....	67

<b>Ilustración 4-17.</b> $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$ .....	68
<b>Ilustración 4-18.</b> $V_{\text{tx}} = 10 \text{ Gbps}$ .....	68
<b>Ilustración 4-19.</b> 1550 nm.....	69
<b>Ilustración 4-20.</b> Señales de entrada y salida para el caso 3: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	69
<b>Ilustración 4-21.</b> Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	70
<b>Ilustración 4-22.</b> Diagrama de ojo .....	70
<b>Ilustración 4-23.</b> $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ .....	71
<b>Ilustración 4-24.</b> $V_{\text{tx}} = 120 \text{ Gbps}$ .....	71
<b>Ilustración 4-25.</b> 1400 nm.....	72
<b>Ilustración 4-26.</b> Señales de entrada y salida para el caso 4: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	72
<b>Ilustración 4-27.</b> Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y) .....	73
<b>Ilustración 4-28.</b> Diagrama de ojo .....	74
<b>Ilustración 4-29.</b> Escenario de simulación con pre-compensador .....	75
<b>Ilustración 4-30.</b> Configuración del componente Gaussian Pulse Generator .....	75
<b>Ilustración 4-31.</b> Configuración del componente Polarization Controller.....	76
<b>Ilustración 4-32.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 120 Gbps.....	77
<b>Ilustración 4-33.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 120 Gbps.....	77
<b>Ilustración 4-34.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 40 Gbps.....	78
<b>Ilustración 4-35.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 40 Gbps.....	79
<b>Ilustración 4-36.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 10 Gbps.....	79
<b>Ilustración 4-37.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 10 Gbps.....	80
<b>Ilustración 4-38.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 120 Gbps.....	81
<b>Ilustración 4-39.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 120 Gbps.....	81
<b>Ilustración 4-40.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 40 Gbps.....	82
<b>Ilustración 4-41.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 40 Gbps.....	83
<b>Ilustración 4-42.</b> Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 10 Gbps.....	83

<b>Ilustración 4-43.</b> Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 10 Gbps.....	84
<b>Ilustración 4-44.</b> Escenario de simulación con post-compensador de una etapa .....	85
<b>Ilustración 4-45.</b> Configuración de los componentes Polarization Splitter .....	86
<b>Ilustración 4-46.</b> Configuración del componente Optical Fiber .....	86
<b>Ilustración 4-47.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	87
<b>Ilustración 4-48.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	88
<b>Ilustración 4-49.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	88
<b>Ilustración 4-50.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	89
<b>Ilustración 4-51.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	90
<b>Ilustración 4-52.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	90
<b>Ilustración 4-53.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	91
<b>Ilustración 4-54.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	92
<b>Ilustración 4-55.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	92
<b>Ilustración 4-56.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	93
<b>Ilustración 4-57.</b> Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador .....	94
<b>Ilustración 4-58.</b> Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones .....	94

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** CADENA DE CARACTERES

**ANEXO B:** ENTRADA TIEMPO

**ANEXO C:** ENTRADA ESPECTRO

**ANEXO D:** G.655 – G.655.A ATRIBUTOS

**ANEXO E:** G.655 – G.655.B ATRIBUTOS

**ANEXO F:** G.655 – G.655.C ATRIBUTOS

**ANEXO G:** G.655 – G.655.D ATRIBUTOS

**ANEXO H:** G.655 – G.655.E ATRIBUTOS

**ANEXO I:** FIBRA  $\pm$  LÍMITES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

**ANEXO J:** FIBRA  $\pm$  UN LÍMITE DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

## RESUMEN

Este estudio se enfoca en analizar el fenómeno de dispersión por PMD (modo de polarización) en NZDSF (fibras ópticas de dispersión no nula) según el estándar ITU-T G.655. Se emplea una metodología que combina enfoques experimentales y descriptivos, utilizando el software OptiSystem para simulaciones ópticas avanzadas. Se investigan aspectos temporales y características físicas y mecánicas de las fibras ópticas NZDSF. Se evaluaron técnicas de compensación pre y post-compensadores para mitigar los efectos de la PMD, revelando su eficacia variable según las condiciones. Se destaca la importancia de considerar la distribución maxwelliana del coeficiente PMD y su impacto en la variabilidad de los resultados. Los hallazgos subrayan la complejidad de los desafíos asociados con la transmisión de señales ópticas de alta velocidad y la necesidad de abordarlos integralmente. Se proporciona información valiosa para el diseño y la optimización de redes de comunicación óptica, así como para identificar áreas de investigación futura. En conclusión, el estudio efectivamente demuestra el impacto de la PMD en la transmisión de señales ópticas a través de fibras ópticas NZDSF y proporciona fundamentos para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de comunicación óptica. Además, se sugiere la exploración de técnicas de compensación más avanzadas para optimizar aún más el rendimiento de las redes ópticas.

**Palabras clave:** <MODO DE POLARIZACIÓN>, <DISPERSIÓN>, <SIMULACIONES ÓPTICAS>, <FIBRA ÓPTICA>, <OPTISYSTEM>.

0426-DBRA-UPT-2024



## SUMMARY

This study focuses on the dispersion phenomenon analysis by PMD (Polarization Mode Dispersion) in NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) according to the ITU-T G.655 standard. It employs a methodology that combines experimental and descriptive approaches, using the OptiSystem software for advanced optical simulations. The study investigates the temporal aspects and physical and mechanical characteristics of NZDSF optical fibers. Techniques for pre- and post-compensation were evaluated to mitigate the effects of PMD, revealing their varying efficacy depending on the conditions. The importance of considering the Maxwellian distribution of the PMD coefficient and its impact on the variability of the results is highlighted. The findings underscore the complexity of the challenges associated with high-speed optical signal transmission and the need for a comprehensive approach. Valuable insights are provided for the design and optimization of optical communication networks, as well as identifying future research areas. In conclusion, the study effectively demonstrates the impact of PMD on transmitting optical signals through NZDSF optical fibers. It provides a basis for enhancing the efficiency and reliability of optical communication systems. Furthermore, more advanced compensation techniques are suggested to optimize the performance of optical networks.

**KEYWORDS:** <POLARIZATION MODE>, <DISPERSION>, <OPTICAL SIMULATIONS>, <OPTICAL FIBER>, <OPTISYSTEM>



**Lic. Maritza Larrea Mg.**

**0603370784**

## INTRODUCCIÓN

La revolución en las telecomunicaciones ha sido impulsada en gran medida por avances continuos en la transmisión de datos a través de fibras ópticas. En este contexto, el presente estudio se sumerge en un ámbito crítico de la óptica de fibras, centrándose en el fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF), de acuerdo con el estándar ITU-T G.655.

La comprensión y el análisis detallado de la PMD son cruciales para optimizar el rendimiento y la eficiencia de las redes ópticas, especialmente en un escenario donde la demanda de ancho de banda y velocidad de transmisión sigue en constante aumento.

El estándar ITU-T G.655 establece las especificaciones para las fibras ópticas, delineando parámetros físicos y mecánicos que son fundamentales para garantizar un despliegue robusto y confiable de infraestructuras de comunicación óptica. En este contexto, la presente investigación busca explorar a fondo las características físicas y mecánicas de las fibras ópticas NZDSF, arrojando luz sobre aspectos cruciales que influyen en la transmisión eficiente de datos (Cadena y Jiménez 2019).

La importancia de este estudio radica en su capacidad para proporcionar una visión integral de la dispersión por modo de polarización en fibras ópticas, abordando no solo las especificaciones del estándar ITU-T G.655, sino también explorando las interacciones complejas entre variables clave como la velocidad de transmisión, longitud de la fibra y el coeficiente PMD. Estos conocimientos son esenciales para diseñar y mantener redes ópticas que sean resilientes y capaces de satisfacer las crecientes demandas de conectividad en la era digital (Duran 2022).

La metodología empleada en este estudio se basa en la utilización del software OptiSystem, una herramienta reconocida por su eficacia en simulaciones ópticas avanzadas. La elección de esta plataforma se fundamenta en su capacidad para modelar y analizar con precisión los fenómenos ópticos relevantes para nuestro estudio. A través de esta metodología, buscamos obtener resultados que no solo sean representativos de la realidad, sino que también permitan una interpretación significativa de los efectos de la PMD en las fibras ópticas NZDSF.

## ANTECEDENTES

La constante evolución de las telecomunicaciones ha situado a las fibras ópticas en el epicentro de las infraestructuras de transmisión de datos, proporcionando una capacidad excepcional para transportar información a velocidades sin precedentes. En este contexto, la eficiencia y confiabilidad de las redes ópticas se tornan cruciales, y un fenómeno que ha capturado la atención de los expertos en el campo es la dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF), particularmente según las directrices delineadas por el estándar ITU-T G.655 (Landivar 2021).

Los antecedentes en esta área revelan un creciente interés en entender y mitigar los efectos de la PMD, dado su impacto directo en la calidad de las transmisiones ópticas. Investigaciones previas han abordado la PMD en fibras ópticas convencionales, pero la necesidad de un análisis específico en el contexto de las fibras NZDSF, en concordancia con el estándar G.655, motiva la presente investigación.

Los estudios preexistentes destacan la complejidad del fenómeno de PMD y su relación intrínseca con factores como la velocidad de transmisión, la longitud de la fibra y el coeficiente PMD. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones no se centran en las características particulares de las fibras NZDSF, las cuales presentan propiedades físicas y mecánicas específicas, en consonancia con las directrices establecidas por el ITU-T G.655 (Cadena y Jiménez 2019).

En el trabajo de titulación denominado: Análisis y simulación del fenómeno de dispersión cromática en las fibras ópticas monomodo ITU-T G.652 y ITU-T G.655, se examinaron los diversos tipos de dispersión presentes en las fibras ópticas y su impacto en los sistemas de comunicaciones ópticas. Se hizo hincapié en el fenómeno de la dispersión cromática, investigando las razones detrás de su ocurrencia con el objetivo de mejorar la calidad en la transmisión de información en los sistemas ópticos de comunicación. Se destacó que la dispersión cromática no solo afecta el ancho del pulso, sino que también provoca atenuación, es decir, a medida que el ancho del pulso aumenta, la atenuación también se incrementa debido a la redistribución de energía durante el ensanchamiento de los pulsos. Además, se señaló que la dispersión cromática no genera degradación en las componentes de frecuencia de las señales transmitidas por la fibra óptica, manteniendo la señal constante en el dominio de la frecuencia (longitud de onda) tanto a la entrada como a la salida del enlace óptico. Se concluyó que la dispersión cromática afecta considerablemente las transmisiones de larga distancia, especialmente en el estándar ITU-T G.655 en tercera ventana, donde los pulsos ópticos sufren un ensanchamiento a velocidades de

2.5 Gbps y distancias de 1000 y 2000 kilómetros. Se resaltó la importancia de utilizar fibras con bajos valores de dispersión cromática para mantener la calidad de la señal al transmitir información a mayores velocidades y distancias, siempre implementando métodos de compensación para contrarrestar los efectos de la dispersión cromática (Castañeda 2018).

La investigación titulada: Análisis y simulación del fenómeno de dispersión por Modo de Polarización (PMD) en fibras ópticas ITU-T G.655, se enfocó en examinar y simular el fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas monomodo, explorando los principios fundamentales y las expresiones matemáticas que definían esta forma de dispersión. Este fenómeno impactaba las comunicaciones por fibra en la época, especialmente al operar con velocidades de transmisión que superaban los 10 Gb/s y en distancias considerablemente largas. Se abordó específicamente el análisis del nivel de dispersión y atenuación provocados por la PMD en fibras de dispersión desplazada no nula NZDSF, de acuerdo con el estándar ITU-T G.655, al transmitirse pulsos ópticos a través de ellas. A través de diversas simulaciones, se identificaron los valores de distancia y velocidad de transmisión en los cuales la PMD comenzaba a incidir de manera significativa en la calidad de la transmisión de la información. Para concluir, se sometió a prueba y se examinó mediante simulación una técnica de compensación de PMD en los escenarios previamente descritos (Cadena y Jiménez 2019).

La relevancia de esta investigación se refuerza al considerar el rápido aumento en la demanda de ancho de banda, impulsada por aplicaciones emergentes como la realidad virtual, la inteligencia artificial y la Internet de las cosas. En este contexto dinámico, comprender a fondo los factores que afectan la eficiencia de las fibras ópticas NZDSF se vuelve esencial para el diseño y despliegue efectivo de redes de comunicación óptica de próxima generación.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

¿Cómo influyen las especificaciones del estándar ITU-T G.655 en la respuesta óptica de las fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF)?

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 *Objetivo general*

Analizar las características principales del fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas NZDSF

#### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- Estudiar las características físicas y mecánicas de acuerdo con el estándar ITUT G.655.
- Analizar los niveles de dispersión y atenuación de pulsos de luz mediante la velocidad de transmisión, longitud de la fibra y coeficiente PMD utilizando el software OptiSystem.
- Comprobar el efecto que produce la PMD utilizando el estándar ITU-T G.655 sobre un pulso de luz que se propaga a través de un segmento de fibra NZDSF.

### 1.3 Justificación

#### 1.3.1 *Justificación teórica*

La presente investigación encuentra su razón de ser en la necesidad imperativa de abordar un aspecto crítico y complejo en el panorama de las telecomunicaciones modernas: la dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF), conforme a las rigurosas pautas delineadas por el estándar ITU-T G.655. La justificación teórica se erige sobre la base de diversos motivos que convergen en la urgencia de comprender, analizar y optimizar este fenómeno en el contexto específico de las fibras NZDSF.

En primer término, la importancia de esta investigación se funda en el reconocimiento de que las fibras ópticas NZDSF representan un componente esencial en las infraestructuras de transmisión de datos. Su empleo se ha intensificado exponencialmente debido a su capacidad para gestionar volúmenes de información significativamente mayores que sus contrapartes convencionales. Sin embargo, la presencia de la PMD introduce una variable crítica que puede comprometer la integridad y eficacia de estas transmisiones, instando a un análisis detenido de sus implicaciones (García, Morgado y Esquivel 2022).

La justificación se fortalece al considerar la relevancia del estándar ITU-T G.655 como marco regulatorio que define las características físicas y mecánicas de las fibras ópticas, incluyendo aquellas de dispersión no nula. La normativa establecida proporciona directrices específicas que guían la implementación y el despliegue de estas fibras, pero su impacto preciso en la dinámica de la PMD en este contexto particular requiere una evaluación meticulosa (Cadena 2017).

El vertiginoso avance tecnológico, caracterizado por una demanda insaciable de ancho de banda y velocidades de transmisión cada vez más elevadas, añade una capa adicional de complejidad al escenario. La justificación se cimienta en la premisa de que comprender y controlar los efectos de la PMD en fibras NZDSF es esencial para satisfacer las crecientes expectativas de rendimiento de las redes ópticas en el entorno actual de comunicación digital.

Asimismo, la justificación teórica se apoya en la identificación de lagunas en la literatura existente. A pesar de la abundancia de investigaciones sobre la PMD en fibras ópticas, la falta de un enfoque específico en las características particulares de las fibras NZDSF y su conformidad con el estándar ITU-T G.655 presenta un vacío de conocimiento que esta investigación busca llenar.

### **1.3.2 *Justificación aplicativa***

La trascendencia de la presente investigación halla su arraigo en una necesidad aplicativa que responde a los desafíos concretos que caracterizan el despliegue y operación de infraestructuras de telecomunicaciones contemporáneas. La dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF), bajo los auspicios del estándar ITU-T G.655, constituye un foco crítico cuya comprensión y dominio resultan esenciales para abordar problemáticas aplicativas de relevancia inmediata.

En el ámbito práctico, la expansión vertiginosa de la demanda de ancho de banda, guiada por innovaciones tecnológicas emergentes, impone una carga sin precedentes sobre las redes de

comunicación óptica. La justificación aplicativa se erige en la premisa de que el entendimiento preciso de la PMD en fibras NZDSF se traducirá directamente en mejoras tangibles en la capacidad de las redes para gestionar volúmenes de datos masivos, garantizando una transmisión eficiente y confiable en consonancia con las expectativas contemporáneas (García, Morgado y Esquivel 2022).

Además, en un contexto donde la virtualización, la inteligencia artificial y otras aplicaciones de vanguardia exigen velocidades de transmisión más rápidas y consistentes, la capacidad de mitigar y controlar los efectos adversos de la PMD en las fibras ópticas adquiere un valor estratégico. La justificación aplicativa se fundamenta en la premisa de que el éxito de estas aplicaciones avanzadas depende intrínsecamente de la capacidad de las infraestructuras ópticas para mantener un rendimiento óptimo y sostenible.

La relevancia práctica de esta investigación se enfatiza al considerar la ubicuidad de las fibras ópticas NZDSF en despliegues de redes de largo alcance y en entornos donde la robustez y la confiabilidad son imperativas. Comprender los efectos de la PMD, en consonancia con las directrices del ITU-T G.655, no solo permite optimizar la infraestructura existente, sino que también orienta el diseño de nuevas redes hacia la resistencia y la eficiencia en condiciones operativas diversas.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Tecnología óptica

La tecnología óptica, una rama pionera en la ingeniería de comunicaciones, se erige como un paradigma de innovación y eficiencia en la transmisión de información. Su fundamentación se halla en la manipulación y aprovechamiento de la luz como portadora de datos, un enfoque que ha desencadenado avances extraordinarios en diversas disciplinas (Ramos 2019).

En el contexto de las telecomunicaciones, la tecnología óptica ha emergido como la columna vertebral de las redes de alta velocidad y capacidad, superando las limitaciones inherentes a las tecnologías de transmisión convencionales. La capacidad de las señales ópticas para transportar datos a través de fibras ópticas, gracias a la propiedad de la modulación de la luz, ha propiciado la creación de una infraestructura de comunicación global y eficiente (Espinosa 2019).

En el núcleo de esta tecnología reside la fibra óptica, un componente sofisticado que permite la transmisión de datos mediante pulsos de luz. Estas fibras, compuestas de materiales dieléctricos altamente reflectantes, guían la luz a lo largo de distancias considerables con mínima pérdida de señal. Este diseño, basado en principios físicos como la reflexión interna total, imparte a la tecnología óptica una ventaja inherente en términos de ancho de banda y velocidad de transmisión (Radicelli et al. 2019).

El espectro electromagnético visible, junto con el desarrollo de láseres y diodos emisores de luz (LED), ha propiciado la diversificación de las aplicaciones de la tecnología óptica. Desde la transmisión de datos a larga distancia hasta la cirugía láser en medicina, estas aplicaciones abarcan un amplio espectro de industrias, reflejando la versatilidad y la adaptabilidad de esta tecnología (Radicelli et al. 2019).

#### 2.2 Contextualización de la fibra óptica y su evolución

##### 2.2.1 *Concepto de fibra óptica*

La fibra óptica, en el vasto panorama de las telecomunicaciones y la ingeniería de transmisión de datos, constituye un hito tecnológico que ha redefinido la forma en que la información es transportada a través de vastas distancias. Este medio de transmisión se fundamenta en los

principios avanzados de la propagación de la luz, presentando una sinergia meticulosa entre la física óptica y la ingeniería de materiales (Cando 2020).

Se configura como un conducto dieléctrico flexible, típicamente elaborado a partir de vidrio o materiales plásticos especializados. Su estructura cilíndrica, con un núcleo central y una envoltura externa, exhibe propiedades refractivas que permiten la guía precisa de señales lumínicas a lo largo de distancias significativas. Este fenómeno se materializa gracias al principio de reflexión interna total, donde la luz incidente se refleja de forma continua dentro del núcleo de la fibra, asegurando la propagación sin pérdida apreciable (Alustiza et al. 2019).

La capacidad distintiva de las fibras ópticas para transportar datos reside en la modulación de la luz. El uso de láseres o diodos emisores de luz para generar pulsos luminosos, cuyas variaciones representan la información a transmitir, garantiza una velocidad y ancho de banda superiores a los ofrecidos por los medios de transmisión tradicionales. Este atributo ha catapultado a la fibra óptica como el pilar de las redes de comunicación de alta velocidad, habilitando la transmisión de enormes volúmenes de datos con mínima pérdida de calidad de señal (Alustiza et al. 2019).

Un aspecto distintivo de la fibra óptica es su capacidad para soportar múltiples longitudes de onda de luz simultáneamente, una propiedad conocida como multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Esto posibilita la transmisión de diversos flujos de datos independientes a través de la misma fibra, multiplicando exponencialmente la capacidad de transmisión sin comprometer la integridad de la información (Cando 2020).

### ***2.2.2 Desarrollo y perfeccionamiento de la fibra óptica***

Desde sus antecedentes iniciales en la década de 1950, la fibra óptica ha experimentado una metamorfosis sustancial, alimentada por una simbiosis entre los fundamentos teóricos de la óptica y la convergencia de disciplinas multidisciplinarias. El surgimiento de la fibra óptica se fundamenta en los preceptos científicos que gobiernan la propagación de la luz, con la teoría de la reflexión interna total que allanó el camino para la concepción de guías de ondas ópticas eficaces (Borbor y Cusme 2022).

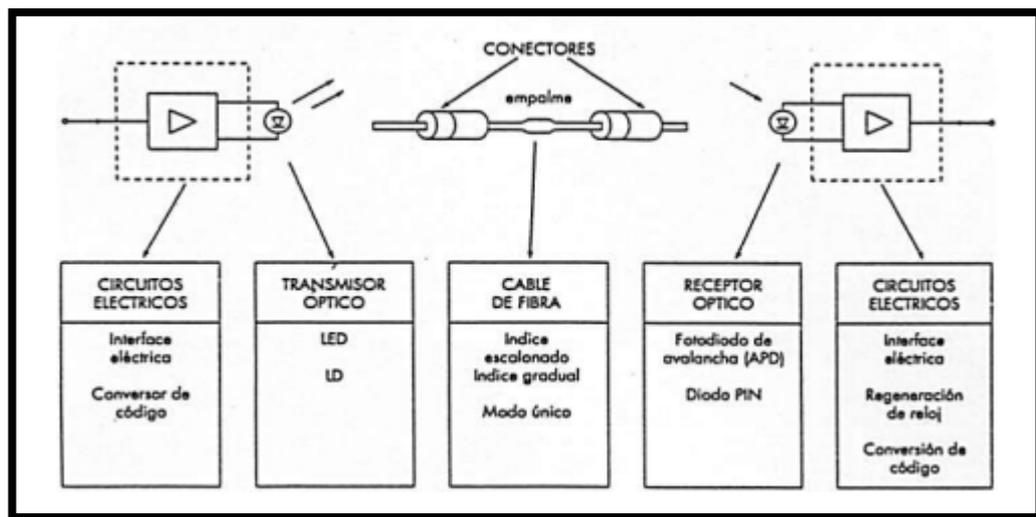
El perfeccionamiento de la fibra óptica se ha visto catalizado por la mejora continua de materiales, notoriamente la transición de fibras de vidrio a fibras de sílice ultrapura, una innovación que ha resultado fundamental para minimizar las pérdidas de señal y maximizar la eficiencia de transmisión. La síntesis de recubrimientos protectores y técnicas de fabricación avanzadas ha

contribuido al robustecimiento estructural de las fibras, permitiendo despliegues más extensos y resilientes en diversas condiciones ambientales (Rodríguez 2018).

La década de 1970 marcó un hito significativo con la invención de la fibra óptica de índice gradual, un desarrollo que permitió la atenuación de las limitaciones asociadas con la dispersión modal y, por ende, la mejora sustancial de la calidad de transmisión de señales a través de largas distancias. Paralelamente, la introducción de las fibras ópticas monomodo, caracterizadas por la transmisión eficiente de una única modalidad de luz, redefinió los estándares de velocidad y capacidad de transmisión (Borbor y Cusme 2022).

El desarrollo de tecnologías de amplificación, como los amplificadores de fibra dopada con erbio, ha contribuido de manera determinante al perfeccionamiento de las fibras ópticas al facilitar la transmisión de señales a través de distancias intercontinentales sin la necesidad de repetidores electrónicos intermedios (Vargas 2018).

Este proceso de perfeccionamiento ha sido esencial para la consolidación de la fibra óptica como el medio de transmisión predilecto en las comunicaciones de alta velocidad y capacidad, encontrando aplicaciones en telecomunicaciones, redes de área local, y sistemas de transmisión de datos de alta velocidad (Vargas 2018).

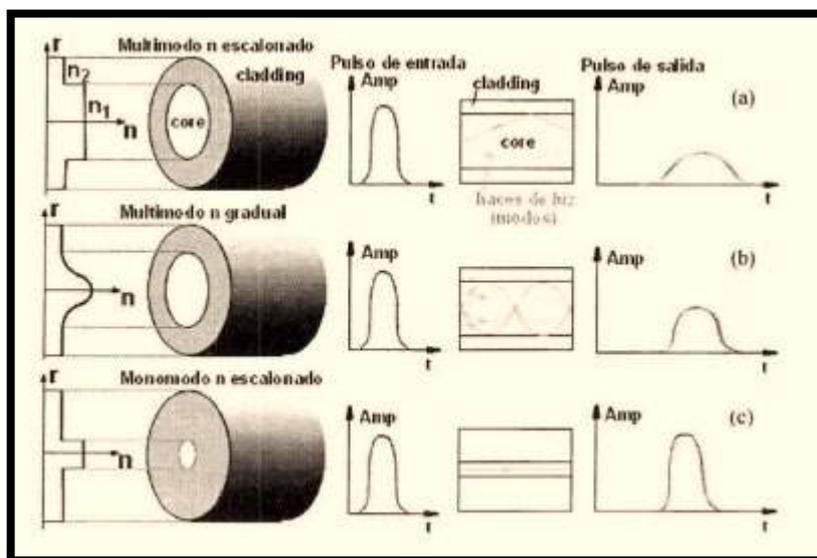


**Ilustración 2-1.** Enlace por fibra óptica

Fuente: (Altamar y Puerta 2021).

### 2.2.3 Aplicaciones iniciales de la fibra óptica

Las aplicaciones iniciales de la fibra óptica representan una fase seminal en la integración de esta tecnología revolucionaria en diversos ámbitos, marcando un hito en la historia de las comunicaciones y la transmisión de datos. En los albores de la década de 1970, cuando la fibra óptica comenzó a manifestar su potencial, sus aplicaciones pioneras se vislumbraron en campos selectos y estratégicos (Popoca 2018).



**Ilustración 2-2.** Enlace por fibra óptica

Fuente: (Borbor y Cusme 2022).

Uno de los primeros dominios que abrazó las ventajas de la fibra óptica fue el de las comunicaciones telefónicas. A medida que la demanda de capacidad de transmisión aumentaba exponencialmente, la fibra óptica emergió como un medio eficiente para superar las limitaciones de las líneas telefónicas convencionales. Su capacidad para transportar señales de voz y datos a velocidades insuperables, combinada con la inmunidad a interferencias electromagnéticas, marcó un cambio paradigmático en la infraestructura de las telecomunicaciones (Popoca 2018).

En el ámbito de las redes de área local (LAN), la fibra óptica también dejó su impronta temprana. La necesidad de una transmisión de datos más rápida y segura impulsó la adopción de esta tecnología en entornos corporativos y académicos. Las redes basadas en fibras ópticas proporcionaron una conectividad fiable y de alta velocidad, catalizando la evolución de las LAN hacia entornos más robustos y eficientes (Camacho 2019).

En el ámbito militar, las aplicaciones iniciales de la fibra óptica se destacaron por su capacidad para proporcionar comunicaciones seguras y de alta velocidad. La naturaleza insensible a las interferencias electromagnéticas de las fibras ópticas las convirtió en un activo estratégico en operaciones donde la seguridad y la velocidad eran imperativas. Además, en el campo de la medicina, la fibra óptica encontró un terreno fértil para su aplicación. Las endoscopias, basadas en la transmisión de luz a través de fibras ópticas delgadas y flexibles, revolucionaron los procedimientos médicos al permitir la visualización interna de cavidades del cuerpo humano de manera menos invasiva (Chan 2020).

### **2.3 Sistemas de comunicaciones ópticas**

Los sistemas de comunicaciones ópticas, pilares fundamentales en la infraestructura de las telecomunicaciones modernas, representan una convergencia ingenieril de tecnologías ópticas avanzadas destinadas a la transmisión eficiente de información a través de señales luminosas. Este dominio multidisciplinario abarca un espectro diverso de componentes y conceptos, convergiendo en una sinfonía técnica diseñada para superar las limitaciones inherentes a los sistemas de comunicación convencionales (López 2022).

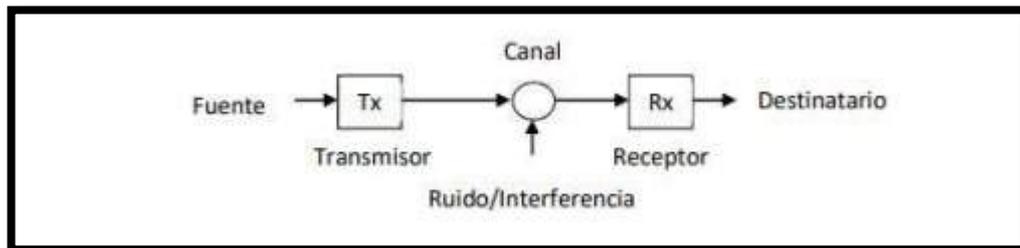
En la esencia misma de los sistemas de comunicaciones ópticas se encuentra el aprovechamiento de la luz como portadora de información. Este enfoque, basado en la modulación de la luz para representar datos, permite un ancho de banda significativamente mayor en comparación con los sistemas tradicionales. La utilización de señales ópticas, a menudo en la forma de pulsos de luz, posibilita la transmisión de grandes volúmenes de datos a velocidades extraordinarias, abriendo las puertas a aplicaciones que demandan un rendimiento excepcional (Rojas et al. 2020).

La fibra óptica, componente central de los sistemas de comunicaciones ópticas, actúa como el medio de transmisión para las señales luminosas. Su capacidad para guiar la luz de manera eficiente y con pérdidas mínimas ofrece una ventaja crítica en términos de alcance y calidad de la transmisión. Asimismo, la continua evolución en el diseño de fibras ópticas, incluyendo variantes como las fibras de dispersión desplazada no nula (NZDSF), refleja la constante búsqueda de mayores capacidades y mejoras en la gestión de fenómenos ópticos, como la dispersión por modo de polarización (PMD) (López 2022).

El diseño y optimización de componentes adicionales, tales como moduladores, amplificadores ópticos y detectores, constituyen áreas cruciales en el desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticas eficientes. La capacidad para modular señales ópticas de manera precisa, amplificarlas sin

pérdida significativa y detectarlas de manera confiable son aspectos esenciales para garantizar la integridad de la transmisión y la recepción de datos en entornos desafiantes (López 2022).

Además, la integración de estándares y protocolos, respaldados por organismos reguladores como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), desempeña un papel clave en la interoperabilidad y la coherencia global de los sistemas de comunicaciones ópticas. La adopción de estándares establecidos facilita la implementación uniforme de tecnologías, promoviendo la cohesión en el ecosistema de las comunicaciones ópticas a escala mundial (Rojas et al. 2020).



**Ilustración 2-3.** Sistema de comunicación estándar

Fuente: (Altamar y Puerta 2021).

### 2.3.1 Utilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas

La utilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas se erige como un pilar esencial en la infraestructura tecnológica contemporánea, manifestándose como una amalgama sofisticada de principios ópticos y avanzadas tecnologías de transmisión. Estos sistemas, al emplear la luz como portadora de información, han demostrado ser instrumentos fundamentales para la transmisión eficiente y fiable de datos en escalas que trascienden los límites de los sistemas de comunicación convencionales (Santiago 2018).

En el corazón de la utilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas reside su capacidad inherente para transportar información a través de señales luminosas moduladas. Este enfoque, sustentado en la propiedad fundamental de la luz como portadora de datos, confiere a estos sistemas un ancho de banda sustancialmente superior en comparación con las tecnologías tradicionales. La capacidad de transmitir grandes volúmenes de datos a velocidades extraordinarias se traduce en una respuesta eficiente a las crecientes demandas de conectividad en la era digital (Rojas et al. 2020).

La fibra óptica, componente central en este paradigma, proporciona un medio de transmisión altamente eficiente y con pérdidas mínimas para las señales luminosas. Su utilidad radica en la

capacidad de guiar la luz de manera precisa, permitiendo transmisiones a larga distancia con una calidad de señal notablemente superior. La continua evolución en el diseño de fibras ópticas, incluyendo innovaciones como las fibras de dispersión desplazada no nula (NZDSF), refleja el compromiso constante con la mejora de la eficiencia y la gestión de fenómenos ópticos, fortaleciendo así la utilidad de estos sistemas (Rojas et al. 2020).

La versatilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas se manifiesta en su capacidad para adaptarse a diversas aplicaciones, desde redes de telecomunicaciones hasta enlaces de transmisión de datos en centros de datos y sistemas de transmisión de televisión. La transmisión confiable de datos a través de estas plataformas se traduce en una conectividad eficiente que sustenta las operaciones diarias en diversos sectores, desde la investigación científica hasta el comercio global (Santiago 2018).

La implementación de estándares y protocolos, respaldados por organismos internacionales, añade un nivel de coherencia y fiabilidad a la utilidad de estos sistemas. La adhesión a normativas establecidas facilita la interoperabilidad global y la creación de redes que pueden comunicarse sin problemas, contribuyendo así a la armonía y eficiencia en el panorama de las comunicaciones ópticas (Santiago 2018).

### ***2.3.2 Características de los sistemas de comunicaciones ópticas***

Las características de los sistemas de comunicaciones ópticas delinean un panorama tecnológico de alta complejidad y sofisticación, fundamentado en los principios de la óptica y destinado a satisfacer las crecientes demandas de transmisión de datos en la era moderna. Estas características, intrínsecamente ligadas al aprovechamiento de la luz como medio de transmisión, definen la esencia de una tecnología que ha revolucionado la conectividad y la velocidad de transmisión de información (Rojas et al. 2020).

La capacidad distintiva de los sistemas de comunicaciones ópticas radica en su habilidad para utilizar señales luminosas moduladas para la transmisión de información. Esta característica fundamental, derivada del principio de modulación de luz, confiere a estos sistemas un ancho de banda excepcionalmente amplio en comparación con las tecnologías convencionales. La posibilidad de transportar grandes volúmenes de datos a velocidades notables representa una ventaja significativa en un entorno digital que demanda una transmisión eficiente y rápida (Rojas et al. 2020).

La fibra óptica, como componente central de estos sistemas, exhibe características notables que contribuyen a su eficacia. La capacidad de guiar la luz con mínimas pérdidas y distorsiones a lo largo de largas distancias es una propiedad esencial. La baja atenuación de señal y la inmunidad a interferencias electromagnéticas constituyen características que hacen de la fibra óptica un medio de transmisión altamente fiable y eficiente (Cano 2022).

La versatilidad en la aplicación de los sistemas de comunicaciones ópticas es otra característica distintiva. Estos sistemas encuentran aplicación en diversas áreas, desde las redes de telecomunicaciones hasta los enlaces de transmisión de datos en centros de datos y sistemas de transmisión de televisión. La capacidad de adaptarse a entornos y aplicaciones heterogéneos refleja la flexibilidad inherente a esta tecnología, lo que la convierte en una opción integral para una amplia gama de necesidades de transmisión (Cano 2022).

La confiabilidad y la integridad de la transmisión de datos son características intrínsecas a estos sistemas, respaldadas por avances constantes en la gestión de fenómenos ópticos, como la dispersión por modo de polarización (PMD). La mejora continua en el diseño de fibras ópticas, incluyendo variantes como las fibras NZDSF, contribuye a mitigar los efectos adversos y a mantener la calidad de la señal en condiciones operativas variables (Cano 2022).

### ***2.3.3 Elementos de los sistemas de comunicaciones ópticas***

Los elementos constitutivos de los sistemas de comunicaciones ópticas se revelan como componentes ingenieriles meticulosamente diseñados que colaboran en armonía para permitir la transmisión eficiente y fiable de información a través de señales luminosas. Estos elementos, intrínsecamente vinculados a los principios ópticos, representan una amalgama de tecnologías avanzadas que convergen para formar una infraestructura capaz de satisfacer las crecientes demandas de conectividad en el panorama digital contemporáneo (Santiago 2018).

En el núcleo mismo de estos sistemas yaciendo como protagonista principal se encuentra la fibra óptica. Este componente fundamental sirve como el medio de transmisión, canalizando la luz con mínimas pérdidas y distorsiones a lo largo de distancias considerables. La fibra óptica, con su capacidad única para guiar la luz con precisión, constituye el pilar esencial que permite la transmisión de información a velocidades extraordinarias y con una calidad de señal sobresaliente (Santiago 2018).

La fuente de luz, otro elemento clave, desempeña un papel fundamental en la generación de señales ópticas. Dispositivos como diodos láser o lámparas de estado sólido, con su capacidad

para emitir luz coherente, proporcionan la base para la creación de señales ópticas moduladas que llevan la información. La elección y optimización de la fuente de luz son consideraciones críticas para asegurar una transmisión eficiente y de alta calidad (Santiago 2018).

Los moduladores ópticos son elementos esenciales para conferir información a las señales luminosas. Estos dispositivos permiten la variación controlada de las características de la luz, codificando datos en la señal óptica. Moduladores electroópticos, basados en efectos como el efecto Pockels, son comúnmente empleados para lograr esta modulación precisa, contribuyendo así a la transmisión de datos de manera eficiente (Cano 2022).

Los amplificadores ópticos, como los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), son elementos críticos para mantener la integridad de la señal a lo largo de largas distancias de transmisión. Estos dispositivos, al amplificar selectivamente las señales ópticas, contrarrestan las pérdidas inherentes al recorrido a través de la fibra óptica, asegurando así una recepción confiable de la información (Rojas et al. 2020).

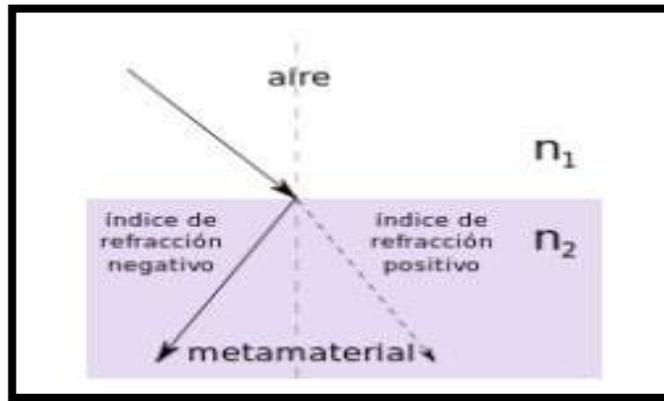
Además, los detectores ópticos, que transforman las señales luminosas en señales eléctricas, representan un componente vital en la recepción de datos. Detectores de fotodiodos o detectores de avalancha son comúnmente empleados para este propósito, proporcionando una interfaz eficaz entre el dominio óptico y eléctrico (Cano 2022).

## **2.4 Principios fundamentales de transmisión en fibras ópticas**

### **2.4.1 *Propagación de la luz en medios ópticos***

La propagación de la luz en medios ópticos constituye un fenómeno intrincado, regido por los preceptos fundamentales de la óptica y la teoría electromagnética. Este proceso se desenvuelve en conformidad con las leyes de refracción y reflexión, manifestando una complejidad que ha sido objeto de estudio y análisis en la física óptica a lo largo de los siglos (Landivar 2021).

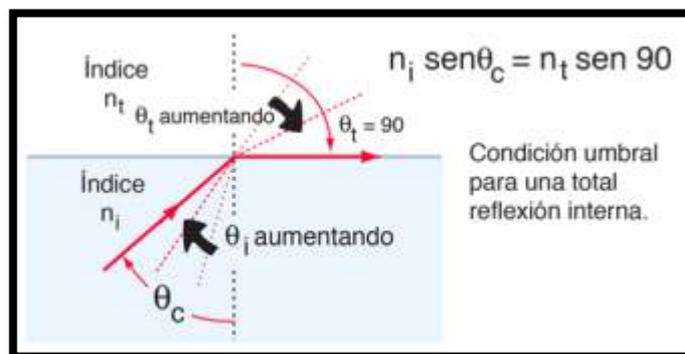
En su travesía a través de medios ópticos, la luz experimenta un cambio de velocidad y dirección al pasar de un medio a otro. Este fenómeno, denominado refracción, se encuentra gobernado por la ley de Snell, que establece la relación entre los ángulos de incidencia y refracción y los índices de refracción de los dos medios involucrados. Tal interacción es fundamental para comprender cómo la luz se curva al ingresar y salir de materiales con diferentes propiedades ópticas (Landivar 2021).



**Ilustración 2-4.** Refracción de la luz

Fuente: (Borbor y Cusme 2022).

La reflexión, por otro lado, surge cuando la luz incide sobre una interfaz entre dos medios con una diferencia significativa en sus índices de refracción. Este proceso, reflejado en la ley de reflexión, implica que la luz rebota en un ángulo igual al de incidencia. Estos principios de refracción y reflexión convergen para dar forma al comportamiento global de la luz en su propagación a través de medios ópticos (Peláez 2023).



**Ilustración 2-5.** Reflexión de la luz

Fuente: (Borbor y Cusme 2022).

La velocidad de propagación de la luz, un componente clave de este fenómeno, está intrínsecamente vinculada a la densidad del medio. De acuerdo con la ecuación de velocidad de la luz en un medio, la velocidad se reduce en proporción inversa a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del material. Este aspecto es central en la comprensión de cómo la luz interactúa y se desplaza a través de diferentes medios, incidiendo directamente en la velocidad de propagación y la longitud de onda (Muñoz y Ruiz 2023).

Es esencial destacar el papel de la dispersión cromática durante la propagación de la luz en medios ópticos. Este fenómeno, originado por la dependencia de la velocidad de la luz en el índice de refracción con respecto a la longitud de onda, genera la descomposición de la luz en sus componentes espectrales. La dispersión cromática es crucial en el diseño de sistemas ópticos para mitigar efectos adversos como la distorsión de la señal y la pérdida de información (Vergel y Acosta 2022).

#### **2.4.2 Modos de transmisión y su influencia**

La consideración de los modos de transmisión en el contexto de las comunicaciones ópticas es un aspecto esencial que influye de manera significativa en la propagación y calidad de las señales luminosas a lo largo de las fibras ópticas. Los modos de transmisión representan los distintos caminos que la luz puede seguir a través del núcleo de la fibra óptica, cada uno caracterizado por su propia distribución espacial de intensidad luminosa (Jijón y Rojas 2017).

En una fibra óptica multimodo, que admite varios modos de transmisión, cada modo se propaga con un ángulo y una velocidad ligeramente diferentes, lo que resulta en disparidades temporales en la llegada de los pulsos de luz. Este fenómeno, conocido como dispersión modal, puede tener un impacto adverso en la integridad de las señales transmitidas, limitando la capacidad de transmisión de datos a largas distancias y a altas velocidades (Jijón y Rojas 2017).

Por otro lado, las fibras ópticas monomodo, al admitir un solo modo de transmisión, superan las limitaciones asociadas con la dispersión modal. La luz que se propaga a través de una fibra monomodo sigue un camino único, lo que resulta en una mayor coherencia temporal y una menor interferencia entre los diferentes modos. Este enfoque monomodo se traduce en una mejora sustancial en la capacidad de transmisión de datos a distancias extendidas y velocidades elevadas (Jijón y Rojas 2017).

La elección entre fibras multimodo y monomodo depende de los requisitos específicos de la aplicación. Mientras que las fibras multimodo son adecuadas para distancias más cortas y velocidades moderadas, las fibras monomodo se destacan en aplicaciones que exigen transmisiones de larga distancia y altas velocidades, siendo especialmente cruciales en entornos de telecomunicaciones de alta capacidad y redes de área extensa (Godoy y Caiza 2022).

### **2.4.3 Retardo diferencial de grupo (DGD)**

El retardo diferencial de grupo (DGD) es una medida fundamental en sistemas de comunicación óptica que evalúa la variación temporal entre los distintos modos de polarización que componen un pulso de luz al propagarse a través de un medio de transmisión. Esta variación puede deberse a irregularidades en la fibra óptica, como la birrefringencia, que provoca que los modos de polarización se desplacen a diferentes velocidades. El DGD es crítico en la determinación de la calidad de la transmisión, ya que puede provocar distorsiones y pérdidas de señal significativas si no se controla adecuadamente. Por lo tanto, su medición y compensación son aspectos clave en el diseño y operación de sistemas de comunicación óptica, especialmente en entornos donde la dispersión de polarización es un factor importante por considerar (Aguinaga y Fernández 2022).

La importancia del DGD radica en su capacidad para influir en la estabilidad y la integridad de la señal transmitida. Cuando el DGD es elevado, es más probable que los distintos modos de polarización experimenten desfases significativos, lo que puede conducir a fenómenos como la dispersión de polarización y el desvanecimiento diferencial. Esto puede resultar en una degradación severa de la calidad de la señal, afectando la confiabilidad y la eficiencia de la comunicación. Por lo tanto, la caracterización precisa y la gestión efectiva del DGD son esenciales para garantizar un rendimiento óptimo en los sistemas de comunicación óptica, lo que implica el uso de técnicas avanzadas de compensación y la implementación de estrategias de diseño que minimicen su impacto (Borbor y Cusme 2022).

## **2.5 Características y clasificación de las fibras ópticas**

### **2.5.1 Propiedades de las fibras ópticas**

Las propiedades físicas intrínsecas de las fibras ópticas constituyen una dimensión esencial en la comprensión y optimización de esta tecnología vanguardista. Estos atributos, determinantes para el rendimiento y la eficiencia de las fibras ópticas, abarcan una gama de características que van desde la geometría estructural hasta las propiedades mecánicas, desempeñando un papel crítico en la transmisión eficaz de señales lumínicas a través de estos conductos dieléctricos (Aguinaga y Fernández 2022).

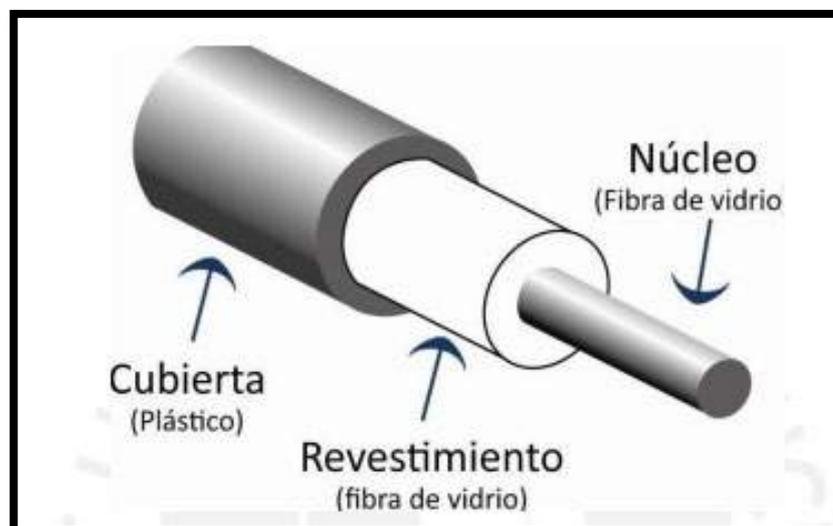
En términos de geometría, el núcleo y el revestimiento de una fibra óptica juegan un papel crucial en su capacidad de transmitir luz de manera eficiente. La dimensión del núcleo, en particular, impacta directamente en el número de modos de transmisión que la fibra puede soportar, diferenciando entre fibras multimodo y monomodo. La precisión en la manufactura del núcleo y

el revestimiento, con tolerancias mínimas, es esencial para garantizar la calidad y coherencia de las señales luminosas (Cuvas 2020).

La pureza y composición del material utilizado en la construcción de la fibra óptica son determinantes para sus propiedades ópticas. En este sentido, las fibras ópticas a menudo se fabrican con vidrio de sílice ultrapura, un material dieléctrico altamente transparente que minimiza las pérdidas de señal durante la propagación de la luz. La baja atenuación óptica es un indicador crítico de la calidad de la fibra y su capacidad para mantener la integridad de las señales a lo largo de distancias considerables (Cuvas 2020).

La resistencia mecánica de las fibras ópticas, una característica de suma importancia se refiere a su capacidad para soportar tensiones y deformaciones sin comprometer la integridad de la transmisión óptica. Este aspecto cobra particular relevancia en aplicaciones donde la fibra está sujeta a condiciones ambientales variables o instalaciones en entornos exigentes. Materiales como la sílice dopada con germanio se utilizan comúnmente para reforzar la fibra, asegurando una resistencia mecánica adecuada (Vergel y Acosta 2022).

Asimismo, la flexibilidad y el diámetro de la fibra son elementos que inciden en su manejabilidad y versatilidad en aplicaciones prácticas. Fibras ópticas más delgadas y flexibles permiten una instalación más sencilla y adaptabilidad a distintos entornos, mientras que las fibras más gruesas pueden ser empleadas para aplicaciones que requieran mayor robustez estructural (Aguinaga y Fernández 2022).



**Ilustración 2-6.** Estructura de la fibra óptica

Fuente: (Burga 2022).

## **2.5.2 Clasificación según modo y dispersión**

La clasificación de las fibras ópticas, según los modos de transmisión y las propiedades de dispersión, constituye un marco conceptual esencial en la ingeniería de sistemas de comunicación óptica. Esta categorización estratégica se erige como un pilar fundamental para la selección y diseño de fibras en función de los requisitos específicos de la aplicación (Altamar y Puerta 2021).

En términos de modos de transmisión, las fibras ópticas pueden ser clasificadas como multimodo o monomodo. Las fibras multimodo permiten la propagación de varios modos de luz a través de su núcleo, lo que resulta en una diversidad de trayectorias para las señales luminosas. En contraste, las fibras monomodo favorecen la transmisión de un único modo de luz, lo que conlleva a una mayor coherencia temporal y una menor dispersión. Esta distinción entre fibras multimodo y monomodo es esencial para adecuar la tecnología a las necesidades específicas de la aplicación, considerando aspectos como la distancia de transmisión y la velocidad de la señal (Altamar y Puerta 2021).

La clasificación según la dispersión es otra faceta crítica en la caracterización de las fibras ópticas. La dispersión modal, asociada principalmente con las fibras multimodo, se refiere a la variación en el tiempo de llegada de los pulsos luminosos causada por la diversidad de modos de transmisión. Por otro lado, la dispersión cromática, presente en ambas fibras multimodo y monomodo, se vincula a la dependencia de la velocidad de la luz con respecto a la longitud de onda, generando la descomposición espectral de la señal. La comprensión detallada de estos fenómenos es esencial para mitigar sus efectos en la integridad de la transmisión de datos (Altamar y Puerta 2021).

## **2.6 Estándares y normativas en fibras ópticas**

### **2.6.1 Rol de los estándares en las telecomunicaciones**

El papel fundamental de los estándares en el ámbito de las telecomunicaciones se erige como una piedra angular que promueve la coherencia, interoperabilidad y eficiencia dentro de este complejo ecosistema tecnológico. Los estándares, en este contexto, representan directrices y normativas consensuadas que regulan diversos aspectos, desde la transmisión de datos hasta la arquitectura de redes, facilitando la uniformidad y la compatibilidad entre diferentes componentes y sistemas (Revelo 2019).

En la vertiginosa evolución de las telecomunicaciones, los estándares desempeñan un papel crucial al establecer una base común para la concepción, desarrollo e implementación de tecnologías. Estas directrices, concebidas y respaldadas por organismos internacionales y entidades reguladoras, actúan como cimientos que promueven la innovación y el progreso continuo en el sector (Cando 2020).

La adopción generalizada de estándares en las telecomunicaciones también conlleva beneficios significativos en términos de economía de escala y competencia leal. Al establecer reglas comunes para la fabricación y operación de equipos y servicios, se facilita la creación de un entorno competitivo donde los actores del mercado pueden centrarse en la calidad, la innovación y la eficiencia, en lugar de enfrentar obstáculos derivados de la heterogeneidad tecnológica. Asimismo, los estándares desempeñan un papel crucial en la seguridad y fiabilidad de las telecomunicaciones. Al establecer directrices para la protección de datos, la integridad de las señales y la interoperabilidad segura, contribuyen a la construcción de redes robustas y confiables que son esenciales en la era digital actual (Álvarez, Guarín y Bermeo 2020).

### ***2.6.2 Estándar ITU-T G.655 y su significado***

El estándar ITU-T G.655, un marco normativo concebido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T), encierra un significado profundo y estratégico en el panorama de las telecomunicaciones, específicamente en el ámbito de las fibras ópticas. Este estándar establece parámetros y especificaciones para las fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF), trazando directrices cruciales para el diseño y despliegue de infraestructuras de transmisión de datos de alta capacidad (Cadena y Jiménez 2019).

En esencia, el estándar G.655 aborda de manera directa el fenómeno de la dispersión por modo de polarización (PMD), una preocupación inherente en las fibras ópticas de larga distancia. La PMD implica variaciones en la velocidad de propagación de diferentes modos de polarización de la luz, generando distorsiones temporales en la señal lumínica que pueden afectar la integridad de la transmisión de datos (Burga 2022).

El estándar G.655, al definir parámetros específicos para las fibras ópticas NZDSF, busca mitigar los efectos adversos de la PMD. Establece criterios rigurosos para las características físicas y mecánicas de estas fibras, delineando requisitos que van desde la geometría del núcleo hasta las propiedades de dispersión cromática y modal. Al hacerlo, proporciona un marco técnico que

orienta el desarrollo y la implementación de fibras ópticas optimizadas para transmisiones de largo alcance y altas velocidades (Chepkoiwo et al. 2020).

La adopción y cumplimiento del estándar ITU-T G.655 se traducen en una serie de beneficios sustanciales para los operadores de redes y proveedores de servicios de telecomunicaciones. Al minimizar la PMD, se mejora la calidad de la transmisión, reduciendo la probabilidad de errores y distorsiones en la señal. Además, al proporcionar una referencia común, fomenta la interoperabilidad y la compatibilidad entre equipos y sistemas de diferentes fabricantes, facilitando la expansión y actualización de infraestructuras de telecomunicaciones (Chepkoiwo et al. 2020).

## **2.7 Fenómeno de dispersión por Modo de Polarización (PMD)**

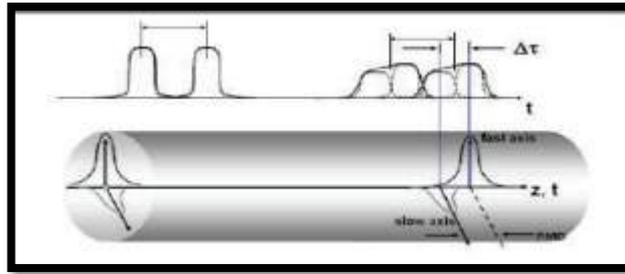
### **2.7.1 Fundamentos de la PMD**

Este fenómeno, de relevancia crítica en las comunicaciones ópticas de alta velocidad, se origina en la asimetría estructural y la birrefringencia inherente de las fibras, elementos que introducen variaciones en la velocidad de propagación de los modos de polarización de la luz (Cadena 2017).

La birrefringencia, propiedad que confiere a las fibras ópticas la capacidad de dividir un haz de luz incidente en dos modos de polarización ortogonales, es el cimiento de la PMD. Cuando estos modos de polarización se desplazan a velocidades ligeramente distintas a lo largo de la fibra, surge la dispersión temporal, una disparidad en los tiempos de llegada de los diferentes componentes espectrales de la señal luminosa (Duran 2022).

Este desfase temporal, consecuencia directa de la PMD, puede traducirse en distorsiones y alargamientos de los pulsos lumínicos, afectando negativamente la integridad de la transmisión de datos a través de la fibra óptica. Factores externos, como tensiones mecánicas y variaciones en la temperatura, pueden exacerbar la PMD, complicando aún más la gestión de este fenómeno (Duran 2022).

La PMD, por ende, se manifiesta como un desafío técnico que debe ser abordado con precisión en las redes de comunicación óptica de alta velocidad. Su comprensión implica no solo la evaluación de las propiedades estructurales de las fibras ópticas, sino también la implementación de estrategias de mitigación y compensación para asegurar una transmisión de datos eficiente y fiable (Conche y Hans 2021).



**Ilustración 2-7.** Estructura PMD

Fuente: (Cadena 2017).

### 2.7.2 *Importancia de la PMD en sistemas ópticos*

En sistemas ópticos de alta velocidad, donde la capacidad de transmisión de datos es esencial, la PMD puede introducir distorsiones temporales en las señales luminosas. Estas distorsiones, traducidas en alargamientos y deformaciones de los pulsos ópticos, afectan la coherencia temporal de la señal y pueden resultar en errores de transmisión y pérdida de información. La importancia de mitigar la PMD radica en preservar la calidad y la fiabilidad de la transmisión de datos, aspectos críticos en aplicaciones que demandan un rendimiento óptimo (Duran 2022).

La PMD también adquiere relevancia en sistemas ópticos de larga distancia, donde las señales luminosas atraviesan extensos tramos de fibra óptica. En estas condiciones, la PMD puede acumularse a lo largo de la ruta de transmisión, exacerbando sus efectos y dificultando la gestión de la dispersión. La comprensión y control preciso de la PMD se vuelven, por lo tanto, imperativos para garantizar una transmisión de datos efectiva y eficiente en sistemas de comunicación óptica de larga distancia (Conche y Hans 2021).

Los desafíos presentados por la PMD en sistemas ópticos resaltan la necesidad de estrategias de mitigación y compensación. Estas estrategias incluyen el uso de fibras ópticas específicas diseñadas para reducir la PMD, así como la implementación de dispositivos y algoritmos de compensación que corrigen activamente los efectos adversos de este fenómeno (Conche y Hans 2021).

### 2.7.3 *Relación entre PMD y Fibras Ópticas NZDSF*

La relación intrínseca entre la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) y las fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF) constituye un aspecto crítico en la comprensión de la complejidad de la transmisión de datos a través de medios ópticos. Las fibras ópticas NZDSF,

diseñadas específicamente para abordar los desafíos asociados con la PMD, representan un hito significativo en la ingeniería de sistemas de comunicación óptica avanzados (Duran 2022).

La PMD, como fenómeno inherente a las fibras ópticas, se manifiesta como variaciones temporales en la propagación de la luz debido a diferencias en la velocidad de transmisión de los modos de polarización. En las fibras ópticas NZDSF, esta relación se aborda de manera proactiva mediante una cuidadosa manipulación de las propiedades estructurales y ópticas de la fibra (Duran 2022).

Las fibras ópticas NZDSF presentan una distribución especial de la birrefringencia a lo largo del núcleo de la fibra, lograda mediante la introducción de un perfil de índice de refracción específico. Este diseño meticuloso busca reducir la PMD al minimizar las variaciones en la velocidad de propagación de los modos de polarización. La birrefringencia controlada en las fibras NZDSF contribuye a mantener una coherencia temporal superior en la transmisión de datos, mitigando así los efectos adversos de la PMD (Cadena y Jiménez 2019).

La relación entre la PMD y las fibras ópticas NZDSF destaca la importancia de adaptar la estructura de la fibra para abordar desafíos específicos en la transmisión de datos de alta velocidad y larga distancia. La implementación de fibras NZDSF representa un avance estratégico al proporcionar una solución ingenieril que optimiza la coherencia temporal de las señales lumínicas, fundamental para mantener la integridad de la transmisión de datos en entornos ópticos desafiantes (Duran 2022).

## **2.8 Características físicas y mecánicas de las NZDSF**

### **2.8.1 *Propiedades físicas de las NZDSF***

Las propiedades físicas de las fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF) constituyen un ámbito crucial en la ingeniería de sistemas de comunicación óptica avanzada, destacando por su capacidad para abordar desafíos específicos asociados con la dispersión por modo de polarización (PMD). Estas propiedades, meticulosamente diseñadas, dan forma a las características estructurales y ópticas de las fibras NZDSF, permitiendo un rendimiento optimizado en la transmisión de datos a través de medios ópticos (Peñaranda y Rodríguez 2019).

En términos estructurales, las fibras NZDSF exhiben una configuración única en su núcleo, donde la birrefringencia se distribuye de manera controlada. Esta distribución especializada contribuye a minimizar las variaciones en la velocidad de propagación de los modos de polarización de la

luz, reduciendo así la probabilidad de la dispersión temporal asociada con la PMD. Además, la birrefringencia controlada en las NZDSF asegura una coherencia temporal superior en la transmisión de señales, esencial para la integridad de la comunicación óptica (Peñaranda y Rodríguez 2019).

Desde el punto de vista óptico, las fibras NZDSF presentan un perfil de índice de refracción diseñado para optimizar la eficiencia en la transmisión de datos. La ingeniería precisa de este perfil busca minimizar las pérdidas de señal y mejorar la calidad de la transmisión en distancias significativas. Esta característica óptica, combinada con la birrefringencia controlada, contribuye a la capacidad única de las NZDSF para gestionar eficazmente la PMD en entornos de alta velocidad y larga distancia (Burga 2022).

Además, las propiedades físicas de las NZDSF se extienden a su capacidad para soportar tensiones mecánicas y variaciones térmicas sin comprometer la integridad de la transmisión de datos. La resistencia mecánica, junto con la flexibilidad y manejabilidad de estas fibras, añade una dimensión práctica y robusta a su utilidad en diversos entornos de implementación (Burga 2022).

### **2.8.2 Propiedades mecánicas de las NZDSF**

Las propiedades mecánicas de las fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF) representan un componente fundamental de su diseño ingenieril, otorgándoles robustez y resistencia para enfrentar las exigencias mecánicas a las que pueden estar expuestas en distintos entornos de implementación. Estas propiedades, cuidadosamente consideradas en el desarrollo de las NZDSF, contribuyen no solo a su durabilidad estructural, sino también a su capacidad para mantener la integridad de la transmisión de datos en condiciones adversas (Alustiza et al. 2019).

Una de las características destacadas en términos de propiedades mecánicas es la resistencia a tensiones mecánicas. Las NZDSF exhiben una capacidad intrínseca para soportar tensiones sin comprometer la integridad del núcleo óptico. Esta propiedad es esencial, especialmente en aplicaciones donde las fibras pueden estar sujetas a tensiones externas debido a instalaciones o manipulaciones durante el despliegue de la red (Alustiza et al. 2019).

La flexibilidad es otra propiedad mecánica relevante de las NZDSF. Su capacidad para doblarse y adaptarse a curvas sin afectar significativamente la transmisión de datos es crucial en escenarios donde se requiere una instalación en espacios reducidos o con trayectorias curvilíneas. Esta flexibilidad mejora la versatilidad de las NZDSF y facilita su despliegue en entornos donde la instalación puede presentar desafíos geométricos (Vargas 2018).

Adicionalmente, la manejabilidad de las NZDSF es una propiedad que resalta su facilidad de manipulación durante la instalación y mantenimiento. La capacidad de manejar las fibras ópticas con relativa facilidad contribuye a la eficiencia en los procesos de despliegue, minimizando la posibilidad de daños y asegurando la consistencia en la calidad de la conexión óptica (Vargas 2018).

Una vez estudiadas las características físicas y mecánicas de las fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF) según el estándar ITU G.655, se justifica la importancia del análisis de este tipo de fibras. Esto se debe a que, a pesar de sus grandes capacidades de transmisión de datos, desde el punto de vista físico y mecánico, las NZDSF no presentan inconvenientes.

## **2.9 Simulación óptica y herramientas utilizadas**

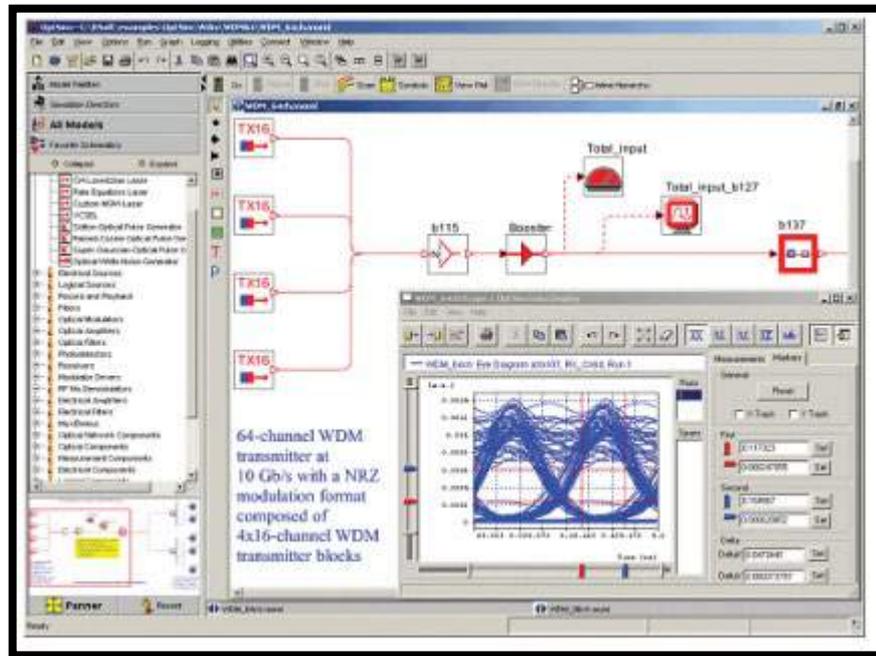
La simulación óptica, una disciplina esencial en la investigación y desarrollo de sistemas de comunicación óptica, se erige como un medio sofisticado para modelar y analizar el comportamiento de las señales luminosas en diversos entornos. Esta herramienta de ingeniería se despliega con el propósito de comprender y optimizar fenómenos ópticos, como la dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF). En este contexto, la simulación óptica constituye un recurso invaluable para evaluar la eficacia de estrategias de mitigación y compensación, así como para anticipar el rendimiento de sistemas ópticos complejos (Burga 2022).

### **2.9.1 Introducción a OptiSystem**

OptiSystem, una herramienta de simulación óptica de vanguardia destaca como una plataforma integral y sofisticada empleada en la ingeniería de sistemas de comunicación óptica. Su prominencia radica en ofrecer un entorno computacional avanzado que posibilita el modelado preciso y la evaluación detallada de componentes ópticos complejos, desde fuentes de luz hasta dispositivos de detección (Selvendran et al. 2019).

Esta aplicación no solo se limita a representar de manera fidedigna los fenómenos ópticos, sino que también proporciona una interfaz intuitiva que facilita la configuración de escenarios de simulación complejos. A través de su extensa biblioteca de módulos y algoritmos, OptiSystem permite la representación meticulosa de sistemas de transmisión óptica, abarcando desde fibras ópticas hasta dispositivos de modulación y demodulación (Qureshi et al. 2020).

OptiSystem se destaca por su capacidad para integrar parámetros específicos, como velocidades de transmisión, longitudes de fibra y coeficientes de dispersión, permitiendo así una evaluación precisa del rendimiento del sistema en condiciones variables. Además, su capacidad para realizar simulaciones paramétricas facilita la exploración eficiente de múltiples configuraciones, impulsando la optimización iterativa de diseño (Sani 2022).



**Ilustración 2-8.** Interfaz de la herramienta OptiSystem

Fuente: (Cadena 2017).

### 2.9.2 Justificación de OptiSystem en la investigación

La elección de OptiSystem como herramienta de simulación en la presente investigación se sustenta en la necesidad imperativa de contar con una plataforma tecnológica avanzada y especializada que permita modelar, analizar y comprender con precisión los fenómenos ópticos complejos asociados con la dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZDSF).

OptiSystem destaca como una solución integral y sofisticada en el ámbito de la simulación óptica, proporcionando una interfaz que va más allá de la mera representación gráfica de escenarios. Su robusta biblioteca de módulos y algoritmos ofrece una capacidad única para modelar de manera detallada cada componente del sistema de comunicación óptica, desde fuentes de luz hasta dispositivos de detección (Sani 2022).

## **2.10 Variables clave en la simulación de PMD**

En el contexto de la simulación de la dispersión por modo de polarización (PMD), diversas variables clave se revelan como elementos fundamentales que inciden en la precisión y comprensión de los fenómenos ópticos en sistemas de comunicación óptica avanzada. Estas variables, cuidadosamente seleccionadas, permiten explorar y analizar de manera exhaustiva la influencia de la PMD en las señales luminosas transmitidas a través de fibras ópticas, siendo esenciales para una simulación completa y efectiva (Cadena y Jiménez 2019).

### **2.10.1 Velocidad de transmisión**

Una variable primordial en la simulación de PMD es la velocidad de transmisión de la señal óptica. Esta variable determina la frecuencia con la que los pulsos luminosos son enviados a lo largo de la fibra, y su consideración meticulosa es esencial para evaluar cómo la PMD afecta la integridad temporal de la señal. Una alta velocidad de transmisión puede amplificar los efectos de la PMD, convirtiéndose en un factor crítico para tener en cuenta en el diseño y optimización de sistemas de comunicación óptica (Cadena y Jiménez 2019).

### **2.10.2 Longitud de la fibra y PMD**

La longitud de la fibra óptica es otra variable clave que desempeña un papel central en la simulación de PMD. La variación de la longitud de la fibra puede influir significativamente en la acumulación de los efectos de la PMD a lo largo de la ruta de transmisión. Considerar la longitud de la fibra de manera detallada permite una evaluación más precisa de cómo la PMD impacta la calidad de la señal a diferentes distancias, aspecto vital en aplicaciones de transmisión de datos a larga distancia (Cadena y Jiménez 2019).

### **2.10.3 Coeficiente PMD y su rol en la dispersión**

El coeficiente de PMD en sí mismo representa una variable crítica, ya que cuantifica la magnitud de la dispersión por modo de polarización en la fibra óptica. Esta variable encapsula la esencia del fenómeno de la PMD y su inclusión en la simulación es esencial para modelar con precisión los efectos adversos en la propagación de la luz a través de la fibra. Un análisis exhaustivo de cómo diferentes valores de coeficiente de PMD afectan la transmisión óptica proporciona información valiosa para la optimización de sistemas (Cadena y Jiménez 2019).

## **2.11 Futuras direcciones de investigación en fibras ópticas y PMD**

### **2.11.1 Áreas de extensión y exploración**

La exploración de las futuras direcciones de investigación en el ámbito de las fibras ópticas y la dispersión por modo de polarización (PMD) se configura como un camino estratégico en la vanguardia de la ingeniería óptica, prometiendo avances significativos en la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de comunicación óptica. Estas direcciones no solo buscan abordar los desafíos actuales, sino también anticipar y superar obstáculos emergentes, consolidando así la posición de las fibras ópticas en la vanguardia de las tecnologías de transmisión de datos (Cotí 2022).

Una de las perspectivas futuras más prometedoras radica en el perfeccionamiento de las características físicas de las fibras ópticas, especialmente en el desarrollo de fibras de dispersión desplazada no nula (NZDSF) más avanzadas. Investigaciones dirigidas a optimizar la birrefringencia controlada y el perfil de índice de refracción de las fibras NZDSF buscan mejorar la capacidad de mitigar la PMD de manera más eficaz. Este enfoque pionero abre la puerta a la creación de fibras ópticas aún más especializadas, capaces de mantener la integridad de la transmisión de datos en condiciones operativas cada vez más desafiantes (Nieto et al. 2020).

Otro camino de investigación fructífero se vislumbra en la aplicación de técnicas innovadoras de compensación y corrección de la PMD. El diseño de dispositivos y algoritmos avanzados destinados a contrarrestar los efectos adversos de la dispersión por modo de polarización representa un área de interés emergente. Investigaciones que exploren métodos adaptativos y dinámicos para mitigar la PMD en tiempo real prometen optimizar la calidad de la transmisión, incluso en entornos dinámicos y variables (Cotí 2022).

Además, las futuras investigaciones podrían dirigirse hacia la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial (IA), en la gestión y mitigación de la PMD. La capacidad de los sistemas ópticos para aprender y adaptarse a las condiciones cambiantes podría revolucionar la forma en que se aborda la PMD, permitiendo soluciones más flexibles y eficientes. La investigación en fibras ópticas y PMD también podría explorar el diseño de sistemas de monitoreo avanzados que proporcionen información en tiempo real sobre el estado de la fibra y los efectos de la PMD. Esto podría permitir una gestión más proactiva y predictiva de la calidad de la señal, contribuyendo a la creación de redes ópticas más resilientes.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología que se utilizó al momento de desplegar el análisis del fenómeno PMD en fibras ópticas de tipo NZDSF, se expone el diseño a simular, así como también los diferentes escenarios para comprobar el fenómeno PMD en escenarios con la presencia de compensadores antes y después del tramo de fibra. Para ello es necesario contar con 2 ejemplos prácticos de comprobación, así como con 3 escenarios base para un análisis a profundidad.

#### 3.2 Tipo y diseño de la investigación

La investigación que se lleva a cabo tiene características tanto experimentales como descriptivas, lo que implica abordar el estudio desde diferentes perspectivas con el objetivo de obtener una comprensión completa del fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF), según las especificaciones del estándar ITU-T G.655.

La investigación se apoya en el uso del software OptiSystem para llevar a cabo simulaciones ópticas avanzadas. Este enfoque experimental implica la manipulación de variables, como la velocidad de transmisión, longitud de la fibra y coeficiente PMD, para observar y analizar los niveles de dispersión y atenuación en pulsos de luz en fibras ópticas NZDSF. La elección de realizar experimentos a través de simulaciones en OptiSystem sugiere la intención de obtener resultados representativos y cuantificables que permitan interpretar los efectos de la PMD de manera significativa.

La investigación aborda aspectos temporales al analizar cómo la PMD afecta la transmisión de pulsos de luz a lo largo de un segmento de fibra óptica NZDSF. La evaluación se realiza en diferentes momentos o condiciones, permitiendo una comprensión más profunda de las variaciones a lo largo del tiempo. Se examinan las características físicas y mecánicas de las fibras ópticas NZDSF en un momento específico, con la intención de proporcionar una descripción detallada y actualizada de estas propiedades. Además, se analiza la respuesta óptica bajo las condiciones especificadas por el estándar ITU-T G.655 en un momento específico.

### 3.3 OPTISYSTEM

OptiSystem es un software de simulación óptica líder en la industria, diseñado para facilitar el diseño y la evaluación de sistemas de comunicación óptica. Desarrollado por la empresa Optiwave, este software se utiliza ampliamente en la investigación y desarrollo de redes ópticas y sistemas de transmisión de datos.

#### 3.3.1 *Ventajas del uso de OPTISYSTEM*

**Interfaz gráfica intuitiva:** OptiSystem cuenta con una interfaz gráfica fácil de usar que facilita la construcción y simulación de sistemas ópticos complejos.

**Precisión:** Ofrece modelos precisos de componentes ópticos y tiene en cuenta una amplia variedad de fenómenos ópticos, lo que lo convierte en una herramienta confiable para la simulación.

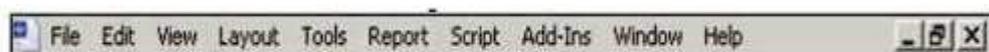
**Flexibilidad:** Permite la personalización de sistemas y experimentos para adaptarse a una amplia gama de escenarios y requisitos de investigación.

#### 3.3.2 *Descripción de la interfaz gráfica*

La interfaz gráfica de OptiSystem está diseñada para proporcionar a los usuarios una experiencia intuitiva y fácil de usar mientras construyen y simulan sistemas ópticos complejos. Aquí tienes una descripción detallada de los elementos clave de la interfaz gráfica de OptiSystem:

##### 3.3.2.1 *Barra de menú*

La barra de menú en la parte superior de la interfaz contiene opciones para acceder a diversas funciones y configuraciones. Incluye menús como "Archivo", "Editar", "Ver" y otros, donde los usuarios pueden encontrar herramientas para la gestión de proyectos, la importación y exportación de datos, y ajustes de visualización.



**Ilustración 3-1.** Barra de menú

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.2 Barra de herramientas

Justo debajo de la barra de menú se encuentra la barra de herramientas, que proporciona accesos rápidos a funciones comunes. Aquí se encuentran botones para acciones como guardar el proyecto, ejecutar simulaciones, y otras operaciones frecuentes.

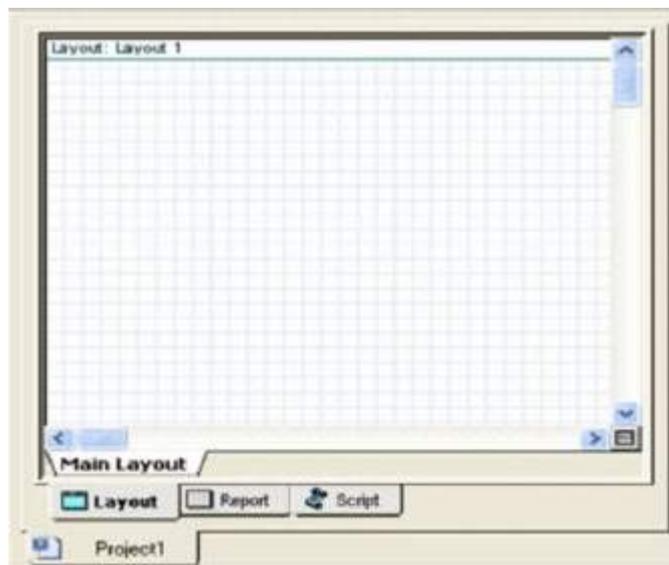


**Ilustración 3-2.** Barra de herramientas

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.3 Área de trabajo principal

El área de trabajo principal ocupa la mayor parte de la interfaz. Aquí es donde los usuarios diseñan y construyen sus sistemas ópticos. Pueden arrastrar y soltar componentes desde la librería a esta área, conectarlos y configurar sus propiedades.

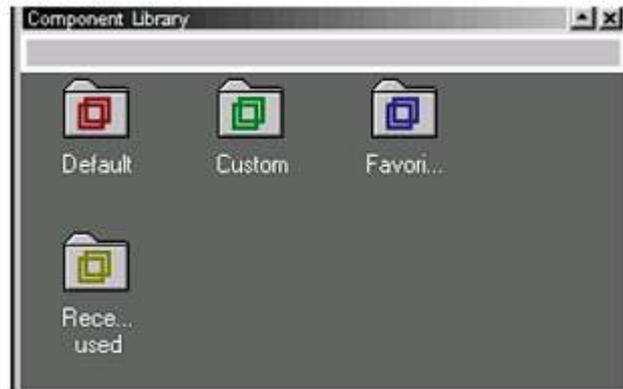


**Ilustración 3-3.** Área de trabajo principal

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.4 Librería de componentes

A la izquierda de la interfaz, hay una librería de componentes que contiene una amplia variedad de elementos ópticos, como fuentes de luz, moduladores, fibras, detectores y amplificadores. Los usuarios pueden explorar la librería y arrastrar componentes a su área de trabajo.

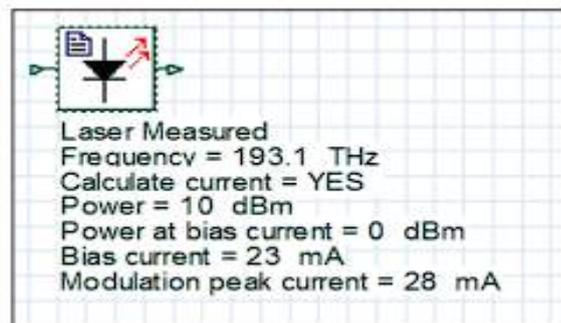


**Ilustración 3-4.** Librería de componentes

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.5 *Propiedades del componente*

Al seleccionar un componente en el área de trabajo, se muestra una ventana de propiedades en la que los usuarios pueden configurar detalles específicos del componente, como longitudes de onda, potencia de salida, etc.



**Ilustración 3-5.** Propiedades del componente

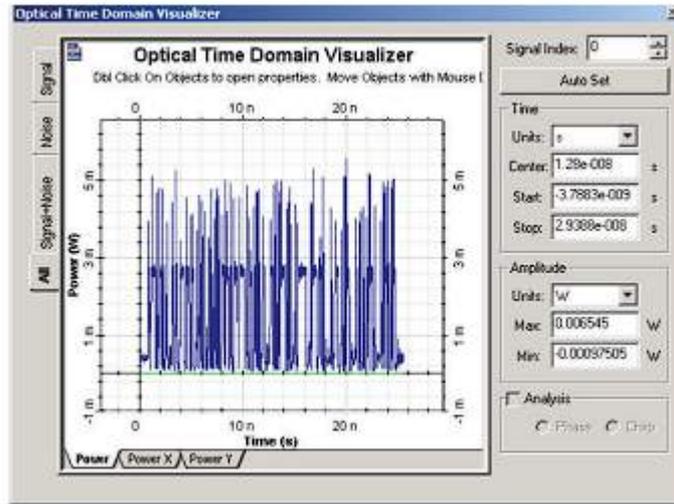
Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.6 *Diagrama de bloques*

La construcción del sistema se realiza mediante un enfoque de diagrama de bloques, donde los usuarios conectan los componentes arrastrando conexiones entre ellos. Esto facilita la comprensión visual de la topología del sistema.

### 3.3.2.7 Ventana de resultados

OptiSystem proporciona una ventana de resultados donde se pueden visualizar y analizar los resultados de las simulaciones. Los gráficos y datos se presentan de manera clara para facilitar la interpretación.

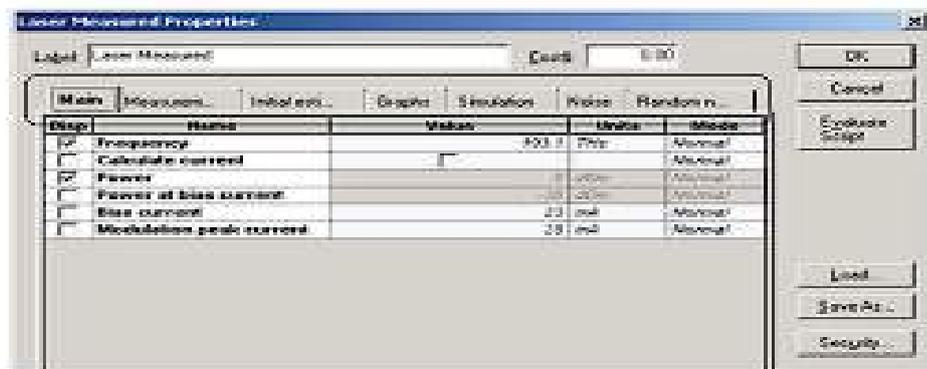


**Ilustración 3-6.** Ventana de resultados

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.8 Ventanas de propiedades y configuración

Aparte de las propiedades de los componentes, hay ventanas adicionales para configurar aspectos específicos del proyecto, como las condiciones de simulación, los parámetros del sistema y otras configuraciones avanzadas.

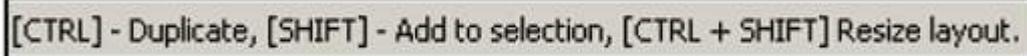


**Ilustración 3-7.** Ventana de propiedades y configuración

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.3.2.9 Barra de estado

En la parte inferior de la interfaz, hay una barra de estado que proporciona información sobre el estado actual de la simulación, el progreso y cualquier mensaje de estado relevante.



[CTRL] - Duplicate, [SHIFT] - Add to selection, [CTRL + SHIFT] Resize layout.

#### **Ilustración 3-8.** Barra de estado

**Realizado por:** Torres D., 2024.

### 3.3.2.10 Ayuda y documentación

OptiSystem incluye recursos de ayuda integrados, como manuales y documentación en línea. Los usuarios pueden acceder a estos recursos para obtener orientación sobre el uso de la herramienta.

## **3.3.3 Uso y manejo de OPTISYSTEM**

OptiSystem, con su interfaz gráfica intuitiva, se destaca como una herramienta fundamental en el ámbito de diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica. Su amplia gama de componentes ópticos virtuales y funciones de simulación avanzadas lo convierten en una elección preferida para ingenieros, científicos e investigadores que buscan entender y optimizar el comportamiento de sistemas ópticos complejos.

El proceso de uso de OptiSystem generalmente comienza con la exploración de la librería de componentes, ubicada a la izquierda de la interfaz. Aquí, los usuarios pueden encontrar fuentes de luz, moduladores, fibras ópticas, detectores y otros elementos esenciales para la construcción de sus sistemas. La interfaz permite un simple arrastrar y soltar de estos componentes al área de trabajo principal, donde los usuarios pueden conectarlos y configurar sus propiedades de manera eficiente.

La construcción del sistema se realiza mediante un enfoque de diagrama de bloques, facilitando la visualización clara de la topología del sistema. Al seleccionar un componente, los usuarios pueden ajustar sus propiedades específicas a través de la ventana de propiedades. Este diseño visual y lógico hace que la construcción y configuración del sistema sea accesible incluso para aquellos que no son expertos en programación.

Una vez que el sistema está configurado, los usuarios pueden ejecutar simulaciones y analizar los resultados en la ventana dedicada. OptiSystem proporciona herramientas de análisis poderosas que permiten visualizar aspectos clave de la simulación, como la forma de onda, la constelación y el espectro. Además, la barra de estado en la parte inferior de la interfaz proporciona información sobre el estado actual de la simulación, brindando a los usuarios una retroalimentación instantánea.

Correr una simulación en OptiSystem es un proceso relativamente sencillo y sigue pasos básicos, mostrados a continuación:

#### *3.3.3.1 Diseño del sistema*

Abre OptiSystem y crea o carga tu diseño de sistema óptico en el área de trabajo principal. Asegúrate de haber colocado todos los componentes necesarios y de haber configurado las propiedades de cada elemento según tus requisitos.

#### *3.3.3.2 Configuración de la simulación*

Antes de ejecutar la simulación, verifica que hayas configurado adecuadamente las condiciones de simulación. Esto incluye parámetros como la duración de la simulación, el paso de tiempo, la frecuencia de muestreo, entre otros. Puedes acceder a estas configuraciones a través de la ventana de propiedades del proyecto.

#### *3.3.3.3 Configuración de resultados deseados*

Decide qué resultados específicos deseas analizar durante y después de la simulación. OptiSystem permite configurar qué datos deseas visualizar, como formas de onda, constelaciones, espectros, entre otros. Ajusta estas configuraciones según tus necesidades.

#### *3.3.3.4 Ejecución de la simulación*

Una vez que hayas diseñado tu sistema y configurado los parámetros de simulación, puedes ejecutar la simulación. Para hacerlo, ve a la barra de herramientas y haz clic en el botón "Run Simulation" (Ejecutar simulación) o utiliza el atajo de teclado correspondiente.

### 3.3.3.5 Seguimiento del progreso

Durante la simulación, puedes seguir el progreso a través de la barra de estado en la parte inferior de la interfaz. OptiSystem te proporcionará información sobre el estado actual de la simulación, el tiempo transcurrido y otros detalles relevantes.

### 3.3.3.6 Análisis de resultados

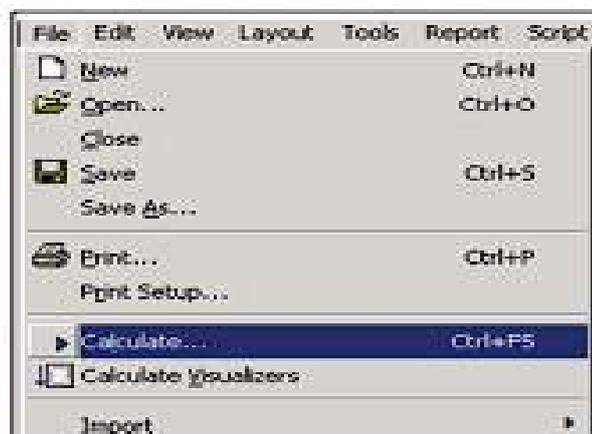
Después de que la simulación haya concluido, puedes analizar los resultados. Abre la ventana de resultados para visualizar gráficos y datos relacionados con el rendimiento de tu sistema. Puedes ajustar los parámetros de visualización según sea necesario.

### 3.3.3.7 Optimización del diseño (Opcional)

Si lo deseas, puedes utilizar las herramientas de optimización de OptiSystem para ajustar parámetros y mejorar el rendimiento de tu sistema. Esta fase es opcional y dependerá de tus objetivos específicos.

### 3.3.3.8 Guardado de resultados y proyecto

Una vez que estés satisfecho con los resultados, puedes guardar tu proyecto de OptiSystem, así como exportar o guardar los datos de resultados según tus necesidades.



**Ilustración 3-9.** Cálculo del proyecto

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.4 Componentes necesarios para la simulación

La simulación en OptiSystem requiere la selección y configuración de varios componentes ópticos que constituirán el sistema a analizar. Estos componentes son esenciales para modelar y evaluar el comportamiento de sistemas de comunicación óptica. A continuación, se describen algunos de los componentes necesarios para llevar a cabo una simulación efectiva en OptiSystem:

**Fuente de luz:** La fuente de luz es un componente crucial que emite señales ópticas al sistema. Puedes seleccionar diferentes tipos de fuentes de luz, como láseres o diodos emisores de luz (LED), y configurar parámetros como la longitud de onda y la potencia.

**Medios de transmisión:** Representa la infraestructura que conecta los componentes. Puede incluir medios de transmisión específicos como cables de fibra óptica o enlaces inalámbricos.

**Visualizadores Ópticos:** Permiten visualizar la señal óptica en diferentes etapas del sistema, facilitando la comprensión del comportamiento y la identificación de posibles problemas.

**Sistemas de Compensación PMD:** Componentes dedicados a compensar los efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas. Pueden incluir compensadores específicos para mitigar los efectos adversos de la PMD.

#### 3.4.1 *Componente User-defined bit sequence generator*

El componente "User-defined bit sequence generator" es un generador de secuencias de bits personalizadas que te permite definir y controlar la secuencia de bits que se utilizará en tu simulación. Este componente es útil para introducir patrones de bits específicos en el sistema y analizar cómo afectan el rendimiento del sistema de comunicación óptica.



**Ilustración 3-10.** Componente generador de secuencias de bits

Realizado por: Torres D., 2024.

Sus parámetros principales son:

**Bit Sequence:** Este parámetro te permite ingresar la secuencia de bits que deseas utilizar. Puedes definir una secuencia binaria específica (0s y 1s) que represente tu patrón de interés.

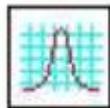
**Bit Rate:** Indica la tasa de bits a la que se generará la secuencia de bits. Puedes especificar la velocidad con la que los bits se generarán en el sistema.

**Polarización:** En algunos casos, este parámetro te permite especificar la polarización de la señal generada, lo cual es relevante si estás simulando sistemas ópticos con componentes que son sensibles a la polarización.

**Amplitud:** Permite ajustar la amplitud de la señal generada. Dependiendo de tu configuración, podrías necesitar modificar este parámetro para que se ajuste a tus requisitos específicos.

### 3.4.2 *Componente Optical Gaussian Pulse Generator*

Este componente genera pulsos ópticos con forma de campana (Gaussianos) que son fundamentales en la modelación de sistemas de comunicación óptica para representar señales temporales.



**Ilustración 3-11.** Componente Optical Gaussian Pulse Generator

Realizado por: Torres D., 2024.

Sus parámetros principales son:

**Pulse Width:** Este parámetro define la duración del pulso Gaussiano. Se expresa típicamente como el ancho completo a la mitad máximo (FWHM) de la función Gaussiana. Cuanto mayor sea el valor, más ancho será el pulso.

**Chirp:** El chirp (viraje) es un parámetro que indica la variación de la frecuencia a lo largo del pulso. Un chirp positivo indica un aumento en la frecuencia hacia el extremo delantera del pulso, mientras que un chirp negativo indica una disminución en la frecuencia.

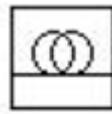
**Central Wavelength:** Representa la longitud de onda central del pulso Gaussiano. Esta es la longitud de onda en la cual el pulso Gaussiano alcanza su intensidad máxima.

**Amplitud:** Permite ajustar la amplitud del pulso Gaussiano. Puedes modificar este parámetro para controlar la intensidad máxima del pulso generado.

**Polarization:** Algunos modelos pueden incluir un parámetro para definir la polarización del pulso Gaussiano.

### 3.4.3 *Componente optical fiber*

El componente "Optical Fiber" representa una fibra óptica y es esencial para modelar la transmisión de señales ópticas a través de medios de fibra. Este componente simula los efectos asociados con la propagación de la luz a lo largo de la fibra óptica, incluyendo la dispersión, la atenuación y otros fenómenos ópticos. Este componente modela una sección de fibra óptica en un sistema de comunicación óptica. La fibra óptica es el medio de transmisión principal en muchas redes ópticas y sistemas de comunicación.



**Ilustración 3-12.** Componente optical fiber

Realizado por: Torres D., 2024.

Sus parámetros principales son:

**Longitud:** Este parámetro especifica la longitud de la fibra óptica que se está modelando en la simulación. Puedes ajustar la longitud de la fibra según tus necesidades específicas.

**Atenuación:** Representa la pérdida de potencia de la señal a medida que viaja a lo largo de la fibra óptica. La atenuación puede deberse a diversos factores, como la absorción y la dispersión en la fibra.

**Dispersión:** Modela la dispersión de la señal óptica. La dispersión puede dividirse en dispersión cromática y dispersión modal. La dispersión afecta la duración del pulso y la calidad de la transmisión.

**Mode Type:** Puedes seleccionar entre modos de propagación, como modos multimodo o modos monomodo, dependiendo de la configuración de tu sistema y el tipo de fibra que estás simulando.

**PMD (Polarization Mode Dispersion):** Algunas versiones del componente permiten la simulación de la dispersión por modo de polarización (PMD), un fenómeno que puede afectar la integridad de las señales ópticas.

**Nonlinear Effects:** Algunas versiones pueden incluir parámetros para modelar efectos no lineales en la fibra, como la auto-fase de modulación (SPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM).

**Polarización:** Algunas versiones del componente permiten especificar la polarización de la señal transmitida a través de la fibra.

#### **3.4.4 Componente Optical Time Domain Visualizer**

El OTDV es un componente de análisis temporal que muestra la evolución temporal de una señal óptica a medida que se propaga a través del sistema. Permite visualizar la forma de onda temporal, la dispersión temporal y otros parámetros que son cruciales para comprender el comportamiento temporal de las señales en un sistema óptico.

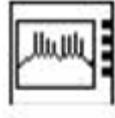


**Ilustración 3-13.** Componente Optical Time Domain Visualizer

**Realizado por:** Torres D., 2024.

#### **3.4.5 Componente Optical Spectrum Analyzer (OSA)**

El Optical Spectrum Analyzer (OSA) es un componente que simula un dispositivo de medición utilizado en sistemas de comunicación óptica para analizar la composición espectral de las señales ópticas. Proporciona información sobre la intensidad de la luz en función de la longitud de onda, lo que permite evaluar la distribución espectral de una señal.

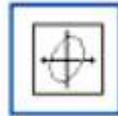


**Ilustración 3-14.** Componente Optical Spectrum Analyzer (OSA)

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.4.6 *Componente Polarization Controller*

El Polarization Controller simula un dispositivo que ajusta la polarización de una señal óptica. Este componente es fundamental cuando se trabaja con sistemas de comunicación óptica donde la polarización puede afectar significativamente la calidad de la señal y la transmisión de datos.



**Ilustración 3-15.** Componente Polarization Controller

Realizado por: Torres D., 2024.

Sus parámetros principales son:

**Input Port:** Selecciona el puerto de entrada al Polarization Controller. Puedes conectar la salida de cualquier componente que desees ajustar en términos de polarización.

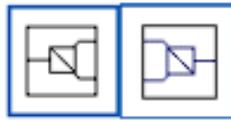
**Polarization State:** Este parámetro te permite especificar el estado de polarización deseado para la señal de salida. Puedes ajustar la polarización en términos de ángulo o estados específicos, como polarización lineal o circular.

**Polarization Dependent Loss:** Modela la pérdida de señal que puede ocurrir debido a cambios en la polarización. Algunos sistemas son sensibles a la polarización, y este parámetro simula la pérdida asociada.

### 3.4.7 *Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner*

Los componentes "Polarization Splitter" (Divisor de Polarización) y "Polarization Combiner" (Combinador de Polarización) son elementos cruciales en sistemas de comunicación óptica que trabajan con señales polarizadas. Estos componentes permiten manipular y controlar la

polarización de las señales ópticas, lo que es esencial para optimizar la transmisión de información a través de fibras ópticas.



**Ilustración 3-16.** Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.4.8 *Componente CW Laser*

El componente CW Laser en OptiSystem representa un láser de emisión continua (Continuous Wave Laser, CW Laser) en el contexto de simulaciones de sistemas de comunicación óptica. Este componente es esencial para modelar la fuente de luz que proporciona una señal óptica continua, a diferencia de los láseres pulsados que generan señales ópticas en forma de pulsos.



**Ilustración 3-17.** Componente CW Laser

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.4.9 *Componente MZ Modulator Analytical*

El componente CW Laser es fundamental en simulaciones de sistemas de comunicación óptica porque proporciona la fuente de luz necesaria para modelar la transmisión de datos a través de fibras ópticas. Su capacidad para generar una señal óptica continua y estable lo convierte en un componente clave para la comprensión y optimización del rendimiento de los sistemas ópticos.



**Ilustración 3-18.** Componente MZ Modulator Analytical

Realizado por: Torres D., 2024.

### 3.5 Implementación del escenario



**Ilustración 3-19.** Diagrama del entorno de simulación

Realizado por: Torres D., 2024.

Después de examinar minuciosamente cada uno de los elementos que integrarán el contexto de simulación de PMD, la configuración de este entorno quedaría definida de la siguiente manera, tal como se ilustra en la figura.

Los módulos Generador de Secuencia de Bits Definida por el Usuario y Generador de Pulsos Ópticos Gaussiano constituyen la fuente lumínica del sistema. Además, el componente CW Laser es otro elemento clave en la generación de luz para la simulación. Este componente emite una señal óptica continua, sin modular, que puede servir como una fuente de luz fundamental en sistemas de comunicación óptica. Por otro lado, el componente MZ Modulator Analytical desempeña un papel crucial al permitir la modulación precisa de la intensidad de la luz. Este modulador Mach-Zehnder es esencial para introducir variaciones controladas en la señal óptica, lo que facilita la transmisión de datos en sistemas de comunicación óptica. Juntos, estos componentes forman una fuente lumínica versátil y adaptable para la simulación de sistemas ópticos complejos.

Por otro lado, el módulo Fibra Óptica es representativo del medio de transmisión, específicamente una fibra monomodo NZDSF. Este componente modela la propagación de la señal óptica a través de la fibra, teniendo en cuenta fenómenos como la dispersión por modo de polarización (PMD) y la atenuación. Además, en el análisis de los resultados, se emplean observadores en los dominios temporal y de frecuencia para evaluar las variaciones en la señal de salida con respecto a la entrada.

En cuanto al diagrama del ojo del programa, este representa gráficamente la calidad de la señal recibida en un sistema de comunicación óptica. El diagrama del ojo muestra la forma de onda temporal de la señal, permitiendo identificar la apertura del ojo y evaluar la interferencia entre símbolos, lo que es crucial para determinar la calidad de la transmisión de datos. Además, el

componente Oscilador se utiliza para generar señales de referencia en el sistema. Este módulo es fundamental para sincronizar diferentes partes del sistema y establecer la frecuencia de operación.

En el procedimiento de simulación, se llevará a cabo el siguiente proceso: los elementos que componen la fuente lumínica del sistema generarán una señal óptica cuyas características dependerán de cada escenario que se esté simulando. Esta señal atravesará el medio de transmisión, que en este caso es una fibra óptica, experimentando dispersión por modo de polarización hasta alcanzar el extremo opuesto de dicho medio. Con el propósito de analizar los resultados de la simulación, la señal luminosa será visualizada tanto en la entrada como en la salida de la fibra mediante los observadores correspondientes.

### **3.6 Comprobación del simulador**

La verificación del simulador es un paso crucial para garantizar la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. A continuación, te proporciono una metodología detallada para la verificación del simulador en el contexto de tu investigación sobre dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas de dispersión no nula (NZDSF) utilizando OptiSystem:

#### **3.6.1 Configuración del entorno de verificación**

**Definición del caso de prueba:** Selecciona un caso de prueba específico que sea representativo de los escenarios que pretendes simular. Esto debe incluir configuraciones de fibras, parámetros de PMD y otros factores relevantes.

**Condiciones de referencia:** Establece condiciones de referencia con las que puedas comparar los resultados de la simulación. Esto puede incluir datos conocidos o resultados teóricos derivados de la literatura existente o de otras fuentes confiables.

#### **3.6.2 Configuración de parámetros de simulación**

**Reproducción del escenario de investigación:** Configura OptiSystem con los mismos parámetros y condiciones que usarías en una simulación típica de tu investigación. Asegúrate de utilizar las mismas características de fibra, fuente de luz, y otros componentes.

**Verificación de parámetros de simulación:** Revisa y verifica que todos los parámetros de simulación, como la duración de la simulación, el paso de tiempo y la frecuencia de muestreo, estén configurados correctamente.

### **3.6.3 *Generación de datos de entrada conocidos***

**Generación de secuencias de bits:** Utiliza el generador de secuencias de bits definido por el usuario para crear una secuencia específica de bits que sea conocida y controlada. Esto permitirá una comparación precisa entre los datos de entrada y salida.

**Generación de Pulsos Ópticos Gaussiano:** Configura el generador de pulsos ópticos gaussianos para producir pulsos con parámetros específicos que puedan ser verificados con valores teóricos o conocidos.

### **3.6.4 *Ejecución de la simulación de verificación***

**Inicio de la simulación:** Ejecuta la simulación con los datos de entrada conocidos y las condiciones establecidas en el caso de prueba.

**Monitoreo del progreso:** Supervisa el progreso de la simulación a través de la barra de estado y verifica que la simulación se complete sin errores.

### **3.6.5 *Análisis de resultados y comparación***

**Visualización de resultados:** Utiliza las ventanas de resultados proporcionadas por OptiSystem para visualizar las formas de onda, espectros y cualquier otro parámetro relevante.

**Comparación con datos de referencia:** Compara los resultados obtenidos con los datos de referencia establecidos en el caso de prueba. Presta especial atención a la dispersión por modo de polarización y otras características relevantes.

### **3.6.6 *Validación de resultados:***

**Análisis de tendencias:** Examina las tendencias y patrones en los resultados para asegurarte de que coincidan con las expectativas teóricas y prácticas.

**Verificación cuantitativa:** Realiza análisis cuantitativos para evaluar la precisión numérica de los resultados en comparación con los datos de referencia.

### 3.6.7 Optimización y ajuste

**Ajuste de parámetros:** Si es necesario, ajusta los parámetros de simulación para mejorar la concordancia entre los resultados simulados y los datos de referencia.

**Iteración de la verificación:** Repite el proceso de verificación después de realizar ajustes para asegurarte de que los cambios hayan mejorado la precisión del simulador.

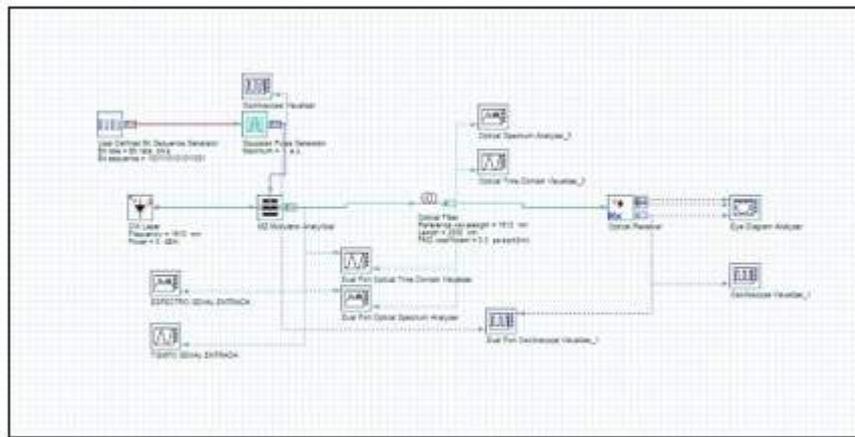
## 3.7 Ejemplos de comprobación

La verificación de la exactitud del simulador es un paso fundamental para garantizar la validez de los resultados obtenidos en la simulación de PMD. En este estudio, se han realizado dos ejemplos con cálculos teóricos y sus respectivas simulaciones, que permiten evaluar la precisión y veracidad de OptiSystem.

En este estudio, se han realizado dos ejemplos de simulación de PMD sobre fibras Hi-Bi PM, en las que el DGD es linealmente dependiente de la distancia. Este tipo de fibras se ha seleccionado por su sencillez matemática, ya que, en ausencia de acoplamiento de modos, el valor de birrefringencia y la orientación de los ejes de la fibra son constantes. En este estudio, los cálculos teóricos de PMD se realizarán utilizando el formalismo de Jones, ya que es el método más sencillo y fiable para trabajar con luz totalmente polarizada.

### 3.7.1 Ejemplo 1

Para el primer ejemplo, se conforma un tramo de fibra de tipo NZDSF de 2.5 km de largo con un coeficiente PMD de 40 ps/km. La señal de entrada por facilidad de análisis y visualización tendrá el valor de “uno” con un *bit rate* de 1 Gbps con polarización totalmente horizontal.



**Ilustración 3-20.** Entorno de trabajo para el primer caso

Realizado por: Torres D., 2024.

*Resolución:*

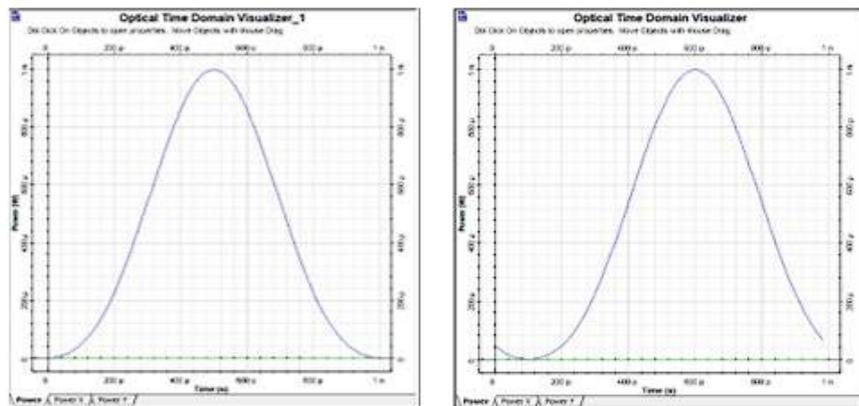
Partiendo de la ecuación de DGD para calcular el retardo temporal inducido entre los PSP del pulso de luz se obtiene:

$$\Delta t_{PMD} = DGD = |\Delta\beta_1| * L$$

$$\Delta t_{PMD} = DGD = 40 \frac{ps}{km} * 2.5 km$$

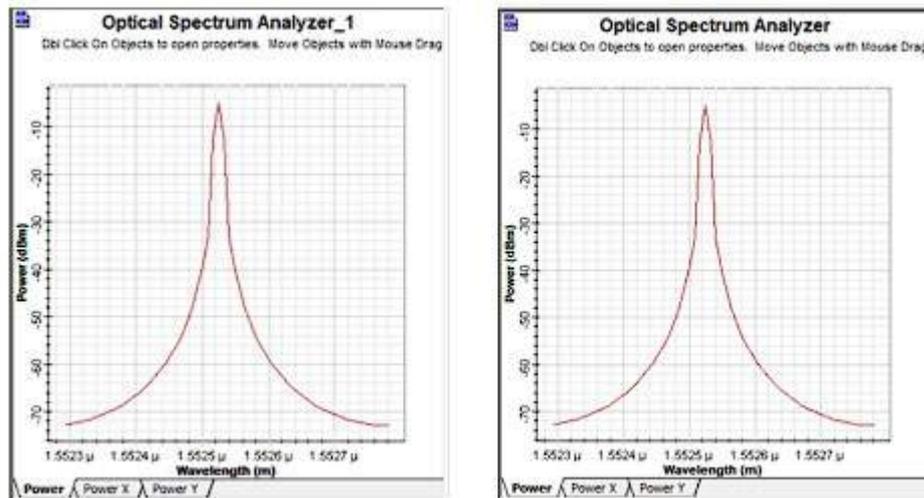
$$\Delta t_{PMD} = DGD = 100 ps$$

En función de los resultados obtenidos nos indican que habrá un retardo de 100 ps respecto al pulso de entrada.



**Ilustración 3-21.** Retardo temporal de 100 ps del pulso de salida en función del pulso de entrada

Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 3-22.** Pulsos de frecuencia a la entrada y salida del sistema

Realizado por: Torres D., 2024.

En las figuras se observa que el pulso de salida se ha desplazado 100 ps en el dominio del tiempo, sin sufrir dispersión. Estos resultados corroboran los cálculos teóricos, lo que demuestra la exactitud y veracidad del simulador. También se observa que el pulso no ha sufrido ningún cambio en el dominio de la frecuencia. Esto se debe a que el nivel de PMD es insuficiente para generar armónicos o nuevas componentes de frecuencia en el pulso propagado.

### 3.7.2 Ejemplo 2

Para el segundo ejemplo de comprobación, se conservará el mismo valor de pulso de entrada ahora con una polarización lineal de 45 grados. La longitud de la fibra será de 4 Km y el coeficiente PMD de 100 ps/km

*Resolución:*

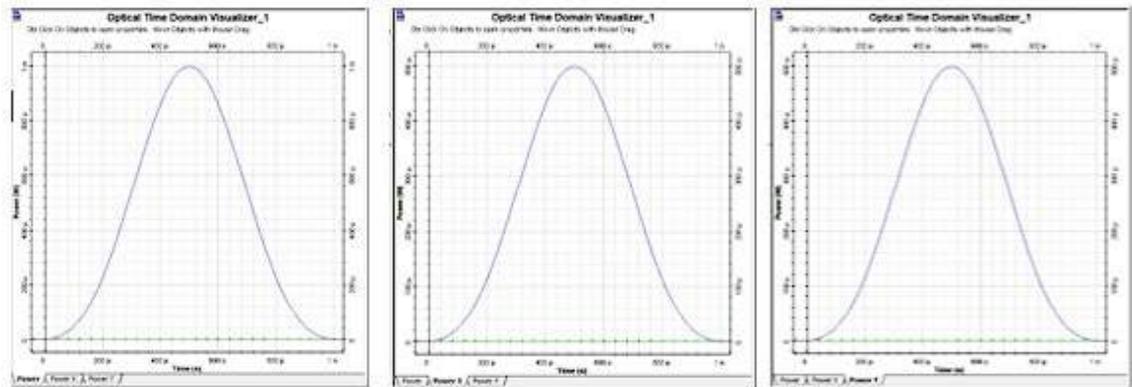
Obtenemos el valor de DGD para calcular el retardo temporal inducido entre los PSP del pulso de luz:

$$\Delta t_{PMD} = DGD = |\Delta\beta_1| * L$$

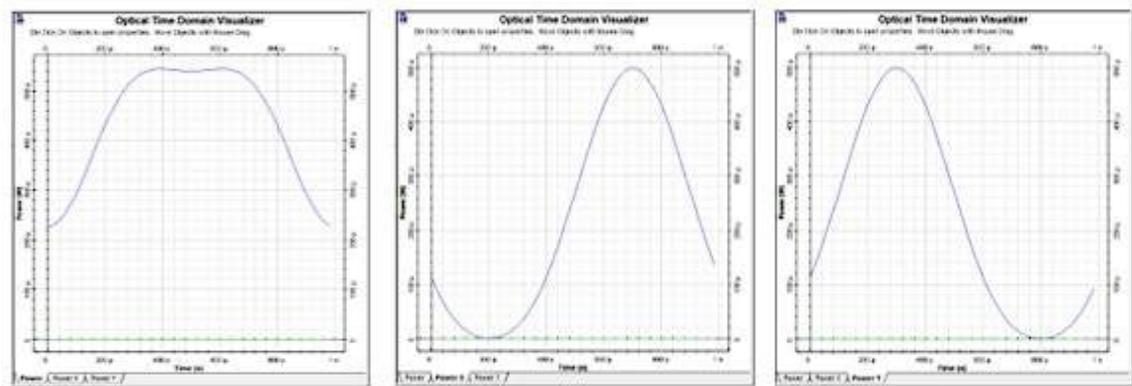
$$\Delta t_{PMD} = DGD = 100 \frac{ps}{km} * 4 km$$

$$\Delta t_{PMD} = DGD = 400 ps$$

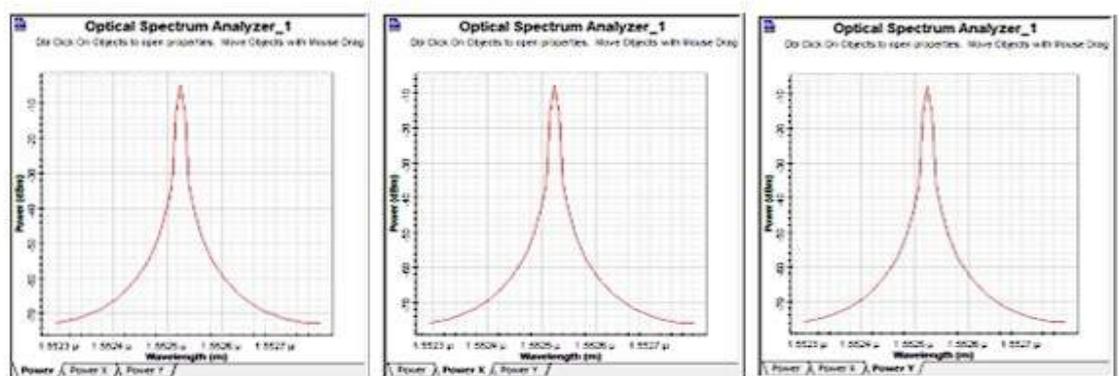
El valor obtenido de DGD traduce en que los componentes PSP del pulso de luz tienen una separación de 400 ps entre ellos. Además, que por la polarización se tendrá componentes de potencia tanto en X como en Y.



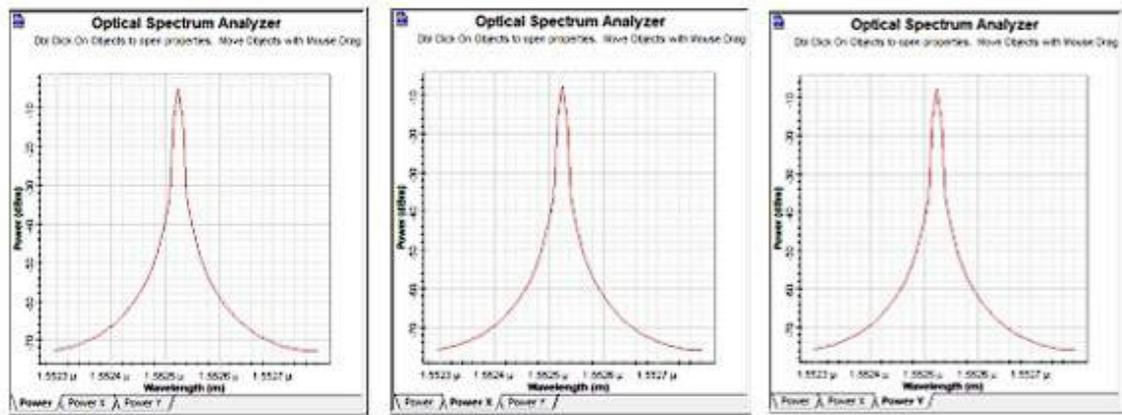
**Ilustración 3-22.** Pulsos de tiempo en la etapa de transmisión con sus componentes en X, Y.  
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 3-24.** Pulsos de tiempo en la etapa de recepción con sus componentes en X, Y  
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 3-25.** Pulsos de frecuencia en la etapa de transmisión con sus componentes en X, Y  
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 3-26.** Pulsos de frecuencia en la etapa de recepción con sus componentes en X, Y  
 Realizado por: Torres D., 2024.

La ilustración 26-3 muestra el pulso resultante a la salida del segmento de fibra. Este pulso ha sufrido un ensanchamiento debido a la dispersión de sus componentes ortogonales (x, y), con un valor de 400 ps correspondiente al DGD inducido. Cada componente posee la mitad de la potencia del pulso total.

Estos resultados corroboran los cálculos teóricos, lo que demuestra la exactitud y veracidad del software de simulación OptiSystem. Este software posee las características necesarias y suficientes para obtener resultados precisos y concordantes con la teoría expuesta acerca de PMD.

### 3.8 Simulación de PMD en fibras NZDSF (ITU-T G.655)

Como se ha mencionado previamente, el módulo Optical Fiber de OptiSystem tiene la capacidad de replicar diversos tipos de fibras ópticas monomodo, ya sean ZDSF, NZDSF, u otros, mediante la variación de sus parámetros y características. Por esta razón, este trabajo presta especial atención a los valores especificados en la recomendación ITU-T G.655 sobre la Dispersión de Modo de Polarización (PMD), con el propósito de simular de manera precisa la propagación de pulsos a través de una fibra NZDSF.

A continuación, se explican conceptos clave relacionados con el coeficiente de PMD, conforme a lo establecido en la recomendación ITU-T G.655 y en el simulador OptiSystem, con el fin de facilitar un análisis más completo de los resultados obtenidos.

### **3.8.1 Coeficiente PMD de enlace (PMDq)**

Si se opta por utilizar fibra óptica cableada, la recomendación ITU-T G.655 establece un parámetro denominado Coeficiente de Dispersión por Modo de Polarización de Enlace (Polarization Mode Dispersion Link Design Value, PMDq). Este término se define como el límite estadístico superior del coeficiente de PMD de los cables de fibra óptica cableada concatenados en un posible enlace compuesto por M secciones de cable. En otras palabras, cuando se construyen enlaces de varios cientos de kilómetros de fibra óptica cableada, suele ser necesario unir o concatenar varios segmentos de fibra, ya que sería impracticable crear un solo segmento de tal longitud. Debido a la concatenación de varios segmentos de cable (generalmente alrededor de 20), los valores del coeficiente PMD y, por ende, de la DGD, tienden a variar en comparación con lo que sería un solo segmento. Así, el valor del PMDq de un enlace de fibra representa el máximo que podría alcanzar el coeficiente PMD para un enlace conformado por M segmentos de fibra cableada concatenados.

Este límite superior se establece en relación con un bajo nivel de probabilidad "Q", que indica la probabilidad de que el valor del coeficiente PMD del conjunto de fibras concatenadas supere al valor de PMDq.

La recomendación ITU-T G.655 detalla un valor máximo de PMDQ de  $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  con  $M=20$  cables y  $Q=0.01$  para las categorías A y B, mientras que para las categorías C, D, E, el valor máximo de PMDq es de  $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , también con  $M=20$  cables y  $Q=0.01$ . Además, se especifica que el valor del coeficiente PMD para un solo segmento de fibra debe ser igual o inferior al PMDq máximo recomendado. Estos valores representan los límites máximos que los fabricantes deben seguir para cumplir con las recomendaciones. No obstante, existe la posibilidad de que el usuario y el fabricante acuerden valores de PMDq superiores para aplicaciones específicas. En el caso de la fibra no cableada, el valor máximo permitido para el coeficiente PMD en una fibra en particular será igual al valor de PMDq establecido para la fibra cableada, según lo especificado en la recomendación.

### **3.8.2 Coeficiente PMD estocástico de OptiSystem**

La naturaleza probabilística del coeficiente de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) y, por ende, de la Diferencia de Retardo de Grupo (DGD), ha sido un desafío para la mayoría de los simuladores de fibra óptica, que buscan obtener resultados lo más realistas posible. En el caso de OptiSystem, se emplea un algoritmo conocido como Coarse-Step Method, que se basa en la

combinación de dos ecuaciones NLSE para representar los estados cambiantes de polarización de los pulsos de luz, permitiendo trabajar con un DGD variable en un entorno de acoplamiento de modos.

Para comprender mejor ambos parámetros, se configura el componente Optical Fiber de OptiSystem con birrefringencia estocástica y un coeficiente PMD de  $0.5 \text{ ps/km}^{(1/2)}$ , se activan tres campos en la ventana de propiedades, que hasta ahora no se habían utilizado: el coeficiente PMD, la longitud promedio de la sección de dispersión y la desviación de la sección de dispersión.

El parámetro Longitud Promedio de la Sección de Dispersión, representado por " $L'scatt$ ", indica la longitud promedio de las secciones birrefringentes concatenadas de fibra. Esta longitud se calcula siguiendo una distribución de probabilidad gaussiana, cuyo valor medio es determinado por el usuario. La desviación estándar de la curva de distribución, denotada como  $\sigma_{scatt}$ , es un parámetro configurable que determina la dispersión de dicha distribución.

La importancia de  $\sigma_{scatt}$  se ilustra con un ejemplo que propone la transmisión de un pulso de luz ultracorto, cuyo ancho es mucho menor al tiempo de bit de la señal y al DGD inducido por la fibra. Si  $L'scatt$  tiene un valor dado y  $\sigma_{scatt}$  es "cero", el simulador generará segmentos de fibra con birrefringencia aleatoria concatenados, de igual longitud. En este escenario, el pulso resultante a la salida estará compuesto por pulsos parciales correspondientes a los intercambios de energía producidos. Los valores de  $L'scatt$  y  $\sigma_{scatt}$  afectan la forma de la envolvente del pulso debido al acoplamiento de modos aleatorio, pero no alteran el ancho del pulso ni la dispersión. En las simulaciones subsiguientes, se mantendrán ambos parámetros en sus valores predeterminados.

### **3.9 Definición de los escenarios de simulación de PMD**

Una vez definidos los elementos esenciales y el entorno de simulación, se llevarán a cabo varias simulaciones para validar la teoría expuesta en las secciones anteriores. De todas las simulaciones disponibles, se seleccionaron aquellas más representativas, proporcionando una comprensión clara del impacto de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en la transmisión de pulsos ópticos a través de fibras monomodo NZDSF.

**Tabla 3-1.** Escenarios de simulación

<b>ANALISIS INICIAL</b>		
PMD=0,1		
PMD=0,3		
<b>VENTANA</b>	<b>DISTANCIA</b>	<b>Gbps</b>
1310	2000 KM	10
1400		40
1550		80
1610		120

**Realizado por:** Torres D., 2024.

La tabla presenta los resultados del análisis inicial de la capacidad de transmisión de datos en distintas longitudes de onda y valores de dispersión por modo de polarización (PMD) a una distancia fija de 2000 km. Los hallazgos se pueden interpretar de la siguiente manera:

Los resultados revelan variaciones en la capacidad de transmisión de datos medida en gigabits por segundo (Gbps) para diferentes ventanas de longitud de onda, incluyendo 1310 nm, 1400 nm, 1550 nm y 1610 nm. Se observa una tendencia de aumento en la capacidad de transmisión a medida que aumenta la longitud de onda, lo que podría estar relacionado con las características de dispersión de la fibra óptica en cada ventana. Sin embargo, se destaca que a medida que el valor de PMD aumenta, hay una disminución en la capacidad de transmisión, indicando un impacto negativo en el rendimiento de la transmisión.

En cuanto a la selección de la distancia de 2000 km, se especifica que esta elección se hizo como la longitud promedio entre las propuestas. Esta decisión puede haberse fundamentado en la necesidad de equilibrar la capacidad de transmisión con consideraciones técnicas y económicas. Es probable que esta distancia represente un compromiso entre la eficiencia del sistema y la pérdida de señal a lo largo de distancias más extensas, lo que implica una cuidadosa ponderación de los aspectos de rendimiento y eficiencia en el diseño del sistema de transmisión óptica.

**Tabla 3-2:** Técnicas de compensación

<b>ANÁLISIS CON COMPENSADORES</b>		
PMD=0,3		
	<b>DISTANCIA</b>	<b>Gbps</b>
<b>+ FACTOR Q</b>	1000 KM	120
	2000 KM	40
	5000 KM	10
<b>- FACTOR Q</b>	1000 KM	120
	2000 KM	40
	5000 KM	10

**Realizado por:** Torres D., 2024.

La tabla presenta resultados del análisis con compensadores para un valor de dispersión por modo de polarización (PMD) de 0,3, mostrando la capacidad de transmisión de datos en gigabits por segundo (Gbps) a diferentes distancias. Aquí está la interpretación:

Se observan diferentes capacidades de transmisión de datos en las distancias especificadas (1000 km, 2000 km y 5000 km) bajo dos escenarios: "Más FACTOR Q" (tasa de error de bits más alta) y "Menos FACTOR Q" (tasa de error de bits más baja). En el escenario "Más FACTOR Q", la capacidad de transmisión varía significativamente con la distancia, con valores de 140 Gbps a 1000 km, 40 Gbps a 2000 km y 10 Gbps a 5000 km.

En el escenario "Menos FACTOR Q", se observa una tendencia similar de disminución en la capacidad de transmisión a medida que aumenta la distancia, con valores consistentes de 140 Gbps a 1000 km, 40 Gbps a 2000 km y 10 Gbps a 5000 km. Es importante destacar que las distancias de 1000 km, 2000 km y 5000 km son consistentes en ambos escenarios, lo que permite una comparación directa de la capacidad de transmisión en diferentes configuraciones de compensación de PMD.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se profundiza en el estudio del fenómeno de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en fibras del tipo NZDSF, empleando como herramienta de análisis el software OptiSystem. Se presentan los hallazgos obtenidos a través de tablas, capturas de pantalla e interpretaciones detalladas, centrándose en el examen del impacto de la PMD en la transmisión de señales ópticas a distintas velocidades y longitudes de fibra. Además, se realiza un análisis exhaustivo de la PMD en función de la longitud de la fibra, se estudia la evolución del diagrama de ojo y se profundiza el factor Q, explorando su relevancia en la calidad de la transmisión óptica.

El factor  $q$  es de suma importancia en el análisis de sistemas de comunicación óptica, ya que proporciona una medida cuantitativa de la degradación de la señal debido a la Dispersión por Modo de Polarización (PMD). Este parámetro permite evaluar la calidad de la transmisión óptica al considerar tanto la atenuación como la dispersión de la señal recibida. Por lo tanto, entender y controlar el factor Q es esencial para diseñar enlaces ópticos robustos y eficientes, garantizando una comunicación fiable y de alta calidad en entornos con presencia de PMD.

En particular, se aborda la interpretación de los resultados para identificar valores críticos de PMD, lo que permite ofrecer recomendaciones prácticas para el diseño de enlaces ópticos más robustos y eficientes. Se discuten también técnicas de mitigación de PMD, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los sistemas de comunicación óptica frente a este fenómeno.

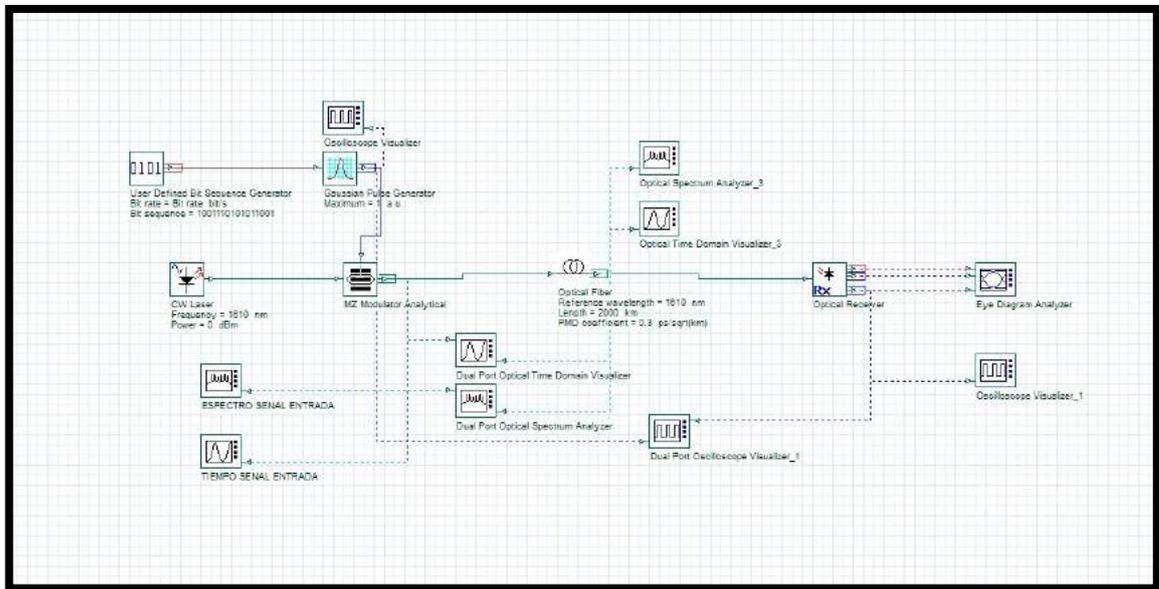
Además, se amplía el análisis mediante la inclusión de etapas de pre y post compensación de 1 etapa para ambos casos, tanto antes como después de la transmisión de la señal a través de la fibra óptica. Estas etapas de compensación se examinan en detalle para comprender su impacto en la reducción de los efectos adversos de la PMD y en la mejora de la calidad de la transmisión.

En resumen, este capítulo ofrece una visión integral del estudio de la PMD en fibras NZDSF, destacando su importancia en la ingeniería de sistemas de comunicación óptica. Se proporcionan conclusiones fundamentadas en los resultados obtenidos, se analizan sus implicaciones prácticas y se sugieren áreas de investigación futuras para continuar avanzando en el diseño y la optimización de sistemas ópticos de alta calidad y rendimiento.

#### 4.1 Entorno de simulación de PMD

Para esta simulación, se han seleccionado valores de coeficiente de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) de 0,3 y 0,1 ps/km<sup>1/2</sup>. Estos valores son estándar en la industria y se encuentran comúnmente en fibras comerciales. La elección de estos valores comerciales permite establecer escenarios de simulación ampliamente aplicables, sin restringirse a un tipo específico de aplicación o uso de fibra, ya sea cableada o no, y considerando las implicaciones relacionadas con los valores PMD, M y Q definidos en la recomendación ITU-T G.655.

El valor de 0,3 ps/km<sup>1/2</sup> cumple con las especificaciones para las categorías A y B de la recomendación, mientras que el valor de 0,1 ps/km<sup>1/2</sup> cumple con las especificaciones para las categorías C, D y E. Esta elección garantiza la representatividad y relevancia de los escenarios simulados en una amplia gama de aplicaciones y entornos de fibra óptica. Para esto, los componentes necesarios para el entorno de simulaciones serán los correspondientes a la ilustración 1-4.



**Ilustración 4-1.** Entorno de simulación de PMD

Realizado por: Torres D., 2024.

#### 4.2 Análisis de la simulación de PMD

La tabla 1-4 presenta los resultados derivados de las simulaciones realizadas según los distintos escenarios definidos, donde se contrasta el porcentaje de atenuación con el factor Q. Estos resultados permiten visualizar los niveles de atenuación y dispersión alcanzados en función de los valores de PMD. Se destacará especialmente el factor Q máximo como un indicador crucial de la

atenuación y la dispersión en cada caso. Se seleccionarán dos casos significativos para cada valor de PMD: el más crítico, que representa las condiciones de mayor degradación de la señal, y el más estable o favorable, que refleja mejores condiciones de transmisión, dentro de este análisis.

**Tabla 4-1:** Resumen de los datos obtenidos en la simulación

<b>TABLA DE RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS</b>				
<b>PMD</b>	<b>Vtx</b>	<b>nm</b>	<b>Atenuación (%)</b>	<b>Factor Q MAX</b>
<i>0,1ps/(km<sup>0,5</sup>)</i>	10	1310	0-2	284,203
		1400	0a12	283,824
		1550	0a12	284,491
		1610	0-2	283,796
	40	1310	0a15	140,929
		1400	0a18	140,598
		1550	0a18	140,162
		1610	10a120	141,105
	80	1310	30a150	91,0193
		1400	30a160	91,0193
		1550	10a125	91,5009
		1610	10a120	87,5143
	120	1310	30a150	49,1564
		1400	50a170	49,5912
		1550	25-50	73,1931
		1610	30-60	52,3588
<i>0,3ps/(km<sup>0,5</sup>)</i>	10	1310	0a18	283,384
		1400	5a115	274,631
		1550	0a12	283,649
		1610	5a110	275,481
	40	1310	30a160	126,151
		1400	20a135	91,3383
		1550	20a140	126,752
		1610	30a150	122,188
	80	1310	30a160	54,6505
		1400	40a170	56,8536
		1550	30a160	64,5415

	120	1610	50a170	51,0609
		1310	50a180	30,0641
		1400	70-95	0
		1550	70a190	30,7889
		1610	70-100	36,5677

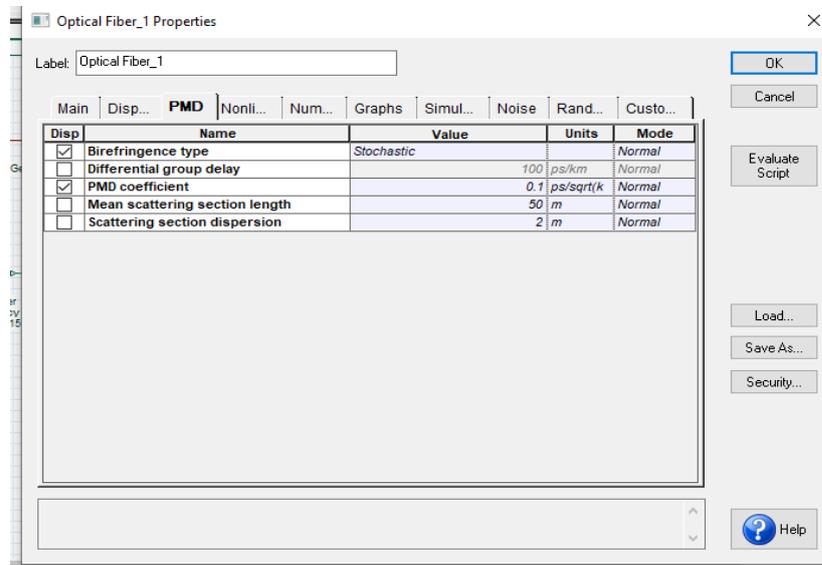
Realizado por: Torres D., 2024.

#### 4.2.1 Casos más significativos dentro de la simulación

En esta sección, se examinan los resultados de dos escenarios de simulación presentados en la tabla 1-4, los cuales se han dividido en 4 casos según el coeficiente de Dispersión por Modo de Polarización (PMD):  $\phi_{PMD}=0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$  para el caso 1 y 2; y  $\phi_{PMD}=0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$  para el caso 3 y 4. Para cada escenario, se proporciona un análisis detallado de los resultados de simulación más representativos.

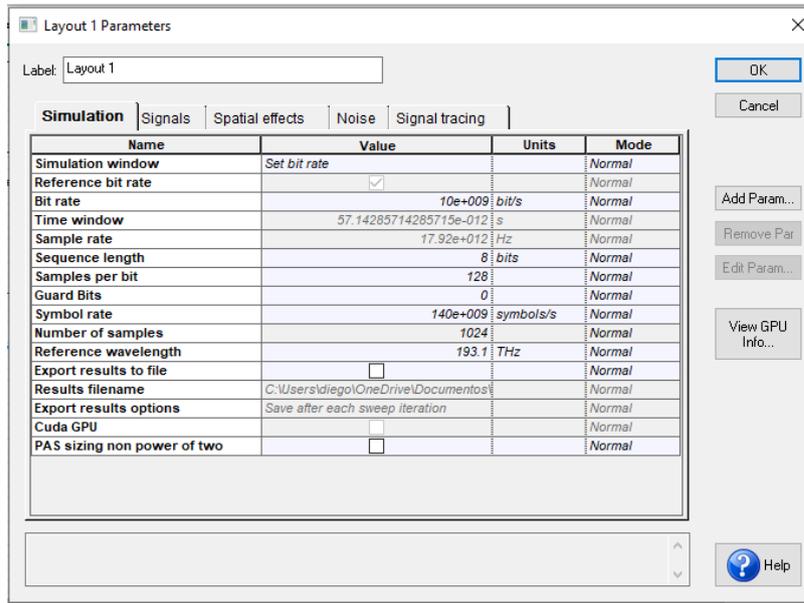
La recomendación ITU-T G.663 para fibras monomodo establece que el Retardo de Grupo Diferencial (DGD) máximo permitido para un enlace de fibra no debe exceder la tercera parte del tiempo de bit de la señal a transmitir. Este criterio, que se ha mantenido en recomendaciones posteriores como la ITU-T G.655, se utiliza como base en este trabajo para analizar el efecto de la PMD en cada uno de los escenarios planteados.

##### 4.2.2.1. Caso 1 $\phi_{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ ; $L = 2000\text{Km}$ ; $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$ ; $1550\text{nm}$



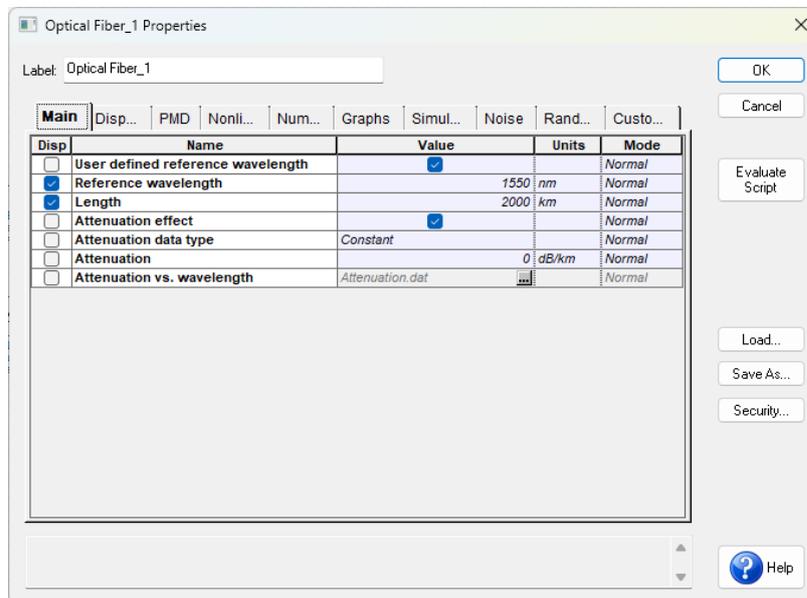
**Ilustración 4-2.**  $\phi_{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$

Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-3.**  $V_{tx} = 10$  Gbps

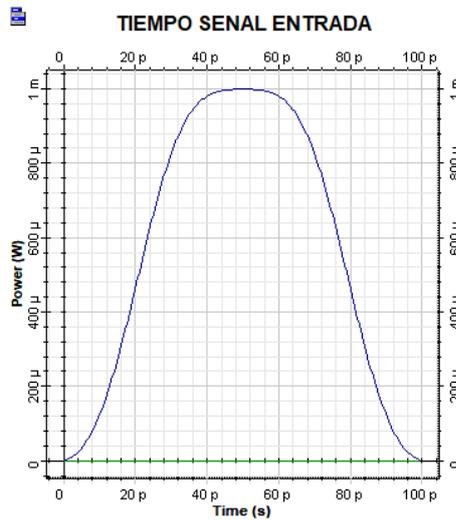
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-4.** 1550 nm

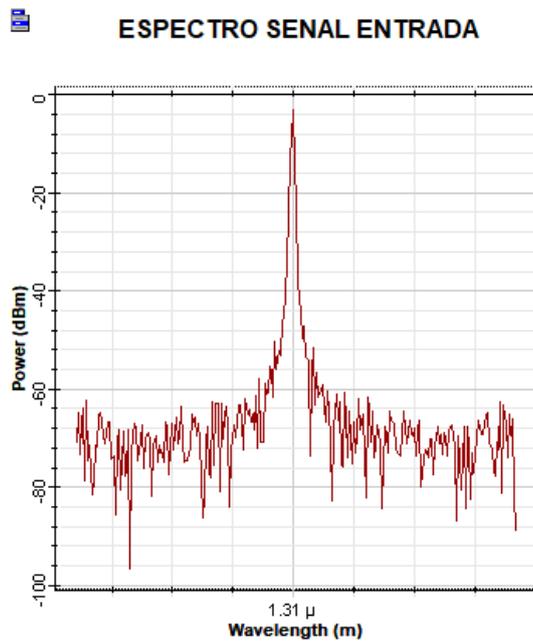
Realizado por: Torres D., 2024.

Después de configurar todos los parámetros requeridos para replicar las condiciones de este escenario, se procede a ejecutar la simulación. La forma de onda del pulso de entrada tanto en el dominio temporal como en el de frecuencia se muestra en la ilustración 5-4 y 6-4 respectivamente. A continuación se presentan los resultados:



**Ilustración 4-5.** Señal de entrada en el dominio del tiempo

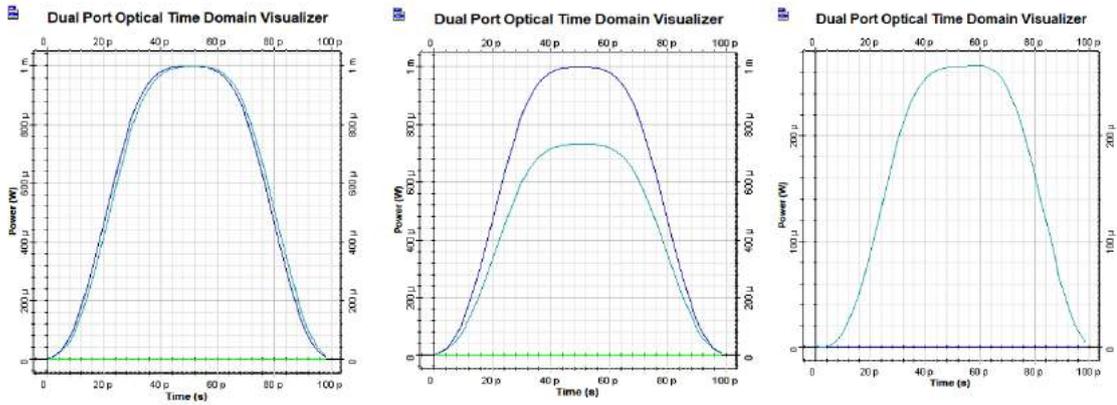
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-6.** Señal de entrada en el dominio de frecuencia

Realizado por: Torres D., 2024.

La representación visual proporcionada en la ilustración 7-4 exhibe una comparación entre las señales de entrada y salida. Se destaca el pulso de entrada en color celeste y el pulso de salida en azul. Además, se contrastan sus componentes en los planos ortogonales (x, y).



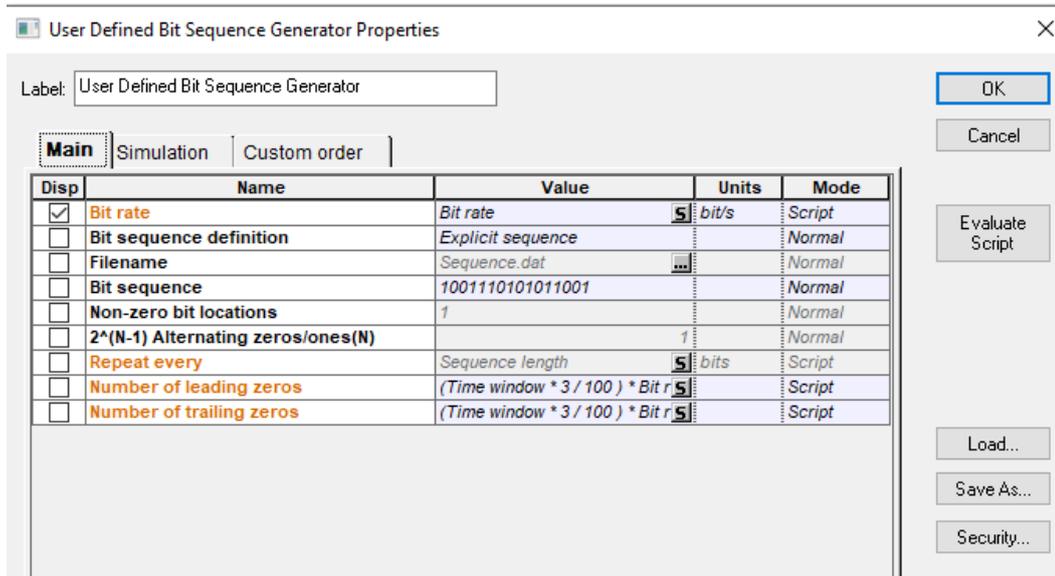
**Ilustración 4-7.** Señales de entrada y salida para el caso 1: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

Realizado por: Torres D., 2024.

Como se evidencia, el pulso experimenta una dispersión leve a lo largo de la fibra, y su estado de polarización no permanece constante; en su lugar, la energía se disemina a través de los estados de polarización principales (PSP) debido al acoplamiento de modos en la fibra, lo cual confirma la teoría previamente expuesta en el capítulo II.

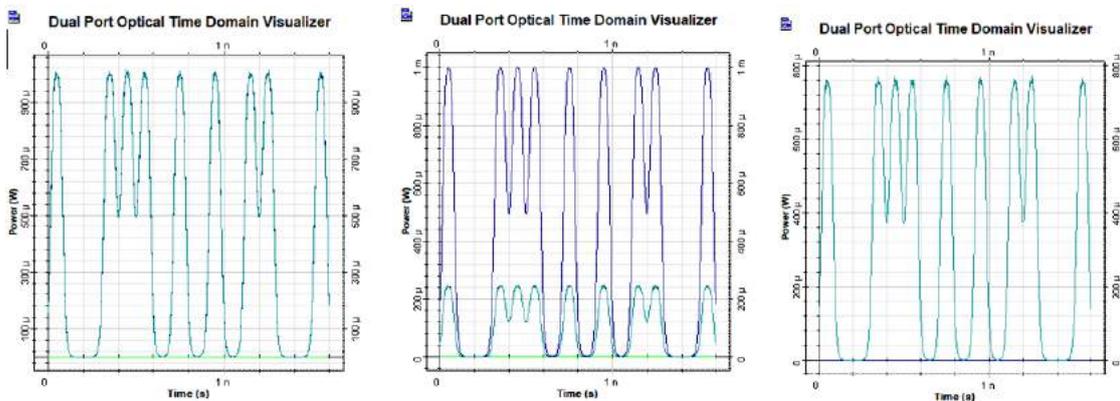
Como se detalló en secciones anteriores, los resultados de la simulación no son consistentes, sino que varían aleatoriamente conforme a la distribución maxweliana del coeficiente PMD. Es importante destacar que este análisis se realizó para un solo bit singular, lo que subraya la naturaleza específica y detallada de la exploración.

Por otro lado, en la ilustración 8-4, se examina la situación bajo la consideración de una cadena de caracteres. En este contexto, se evalúa cómo se comporta la señal a medida que atraviesa la cadena de caracteres, lo que permite una comprensión más profunda del fenómeno de dispersión y la variabilidad del estado de polarización en condiciones más realistas.



**Ilustración 4-8.** Generador de secuencia de bits definida por el usuario

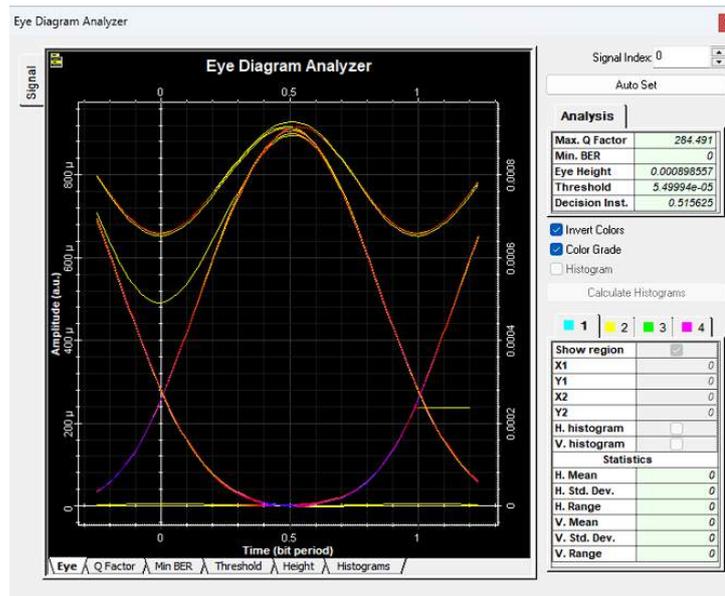
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-9.** Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

Realizado por: Torres D., 2024.

Según la ilustración 9-4, se observa que en esta cadena de caracteres transmitida no hay una gran presencia de atenuación y dispersión, mientras que la Interferencia Intersimbólica (ISI) es despreciable. Esta observación se confirma mediante el valor del factor Q, que indica la calidad de la señal, y se refleja en la imagen obtenida en el diagrama del ojo. El factor Q proporciona una medida cuantitativa de la calidad de la señal.

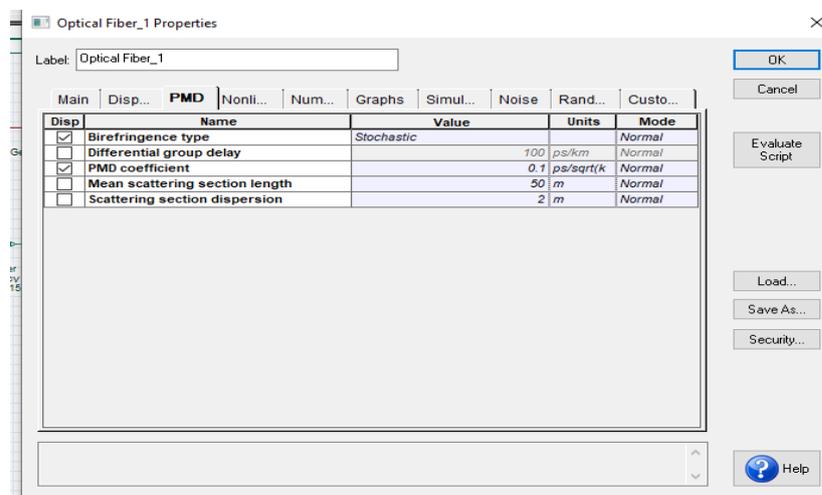


**Ilustración 4-10.** Diagrama de ojo

Realizado por: Torres D., 2024.

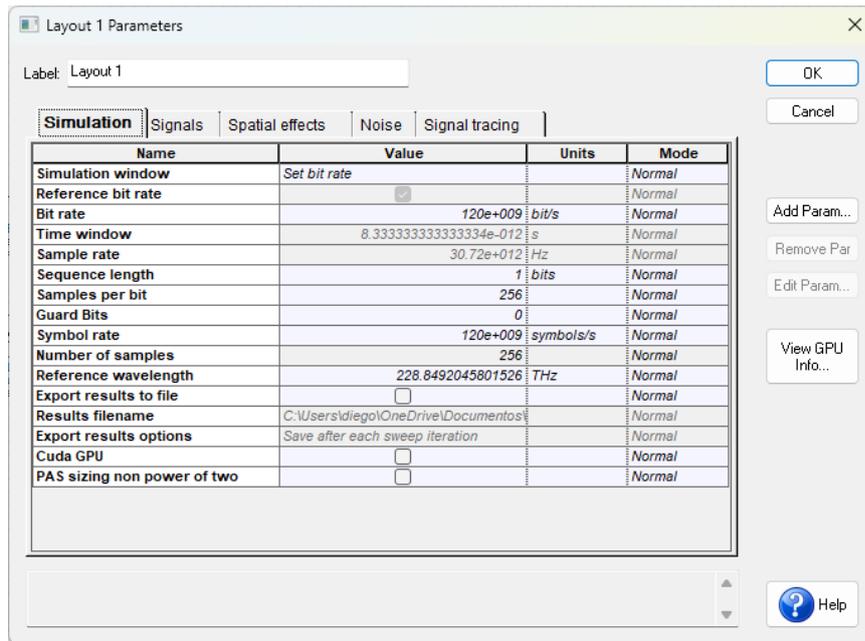
Basándonos en lo anteriormente expuesto y comparando con el diagrama de ojo presentado en la ilustración 10-4, podemos confirmar que la transmisión se llevó a cabo en condiciones estables. El diagrama de ojo proporciona una representación visual de la calidad de la señal recibida, mostrando la apertura del ojo con un ancho y una altura adecuados, lo que sugiere una buena separación entre los bits y una mínima distorsión. Por lo tanto, podemos concluir que, a pesar de la presencia de dispersión, la transmisión se realizó de manera estable, lo que respalda la fiabilidad del enlace de comunicación en este escenario.

4.2.2.2. Caso 2  $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ ;  $L = 2000\text{Km}$ ;  $V_{tx} = 120 \text{ Gbps}$ ;  $1310 \text{ nm}$



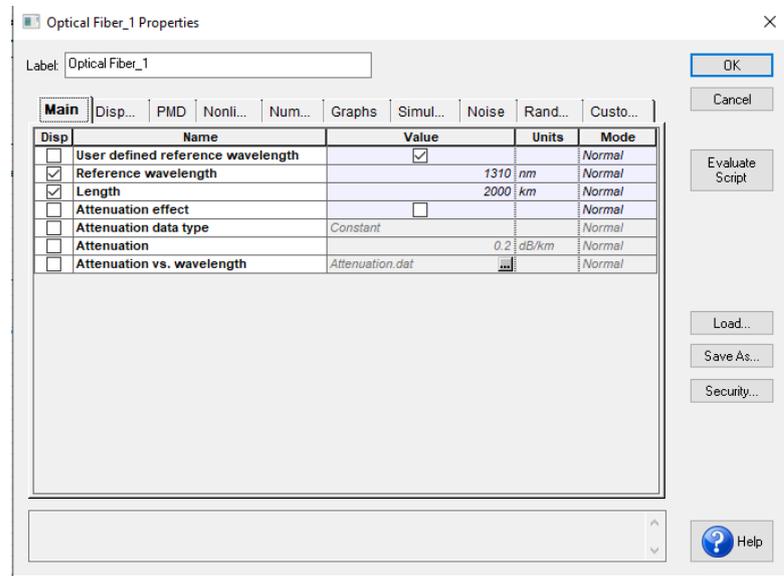
**Ilustración 4-11.**  $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$

Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-12.** Vtx= 120 Gbps

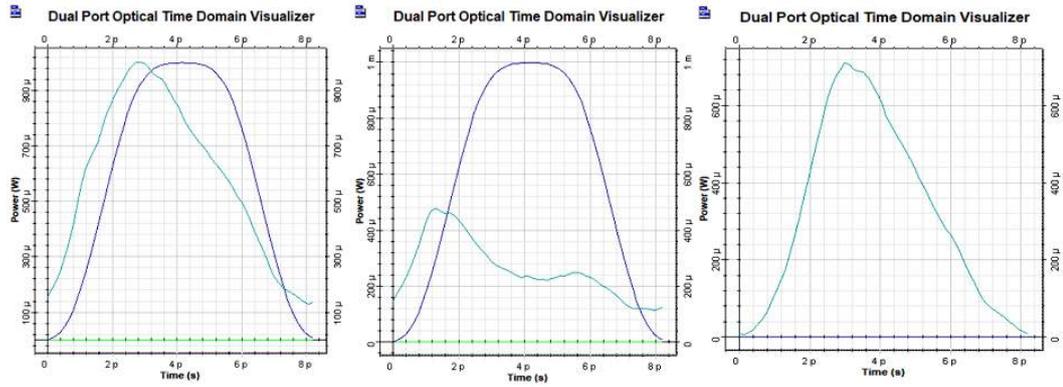
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-13.** 1310 nm

Realizado por: Torres D., 2024.

Una vez establecidos todos los parámetros necesarios para simular este escenario, se procede con la ejecución de la simulación. En la ilustración 14-4 se presenta una comparativa entre las señales de entrada y salida. Se resalta el pulso de entrada en tono celeste y el de salida en azul, junto con la comparación de sus componentes en los planos ortogonales (x, y).

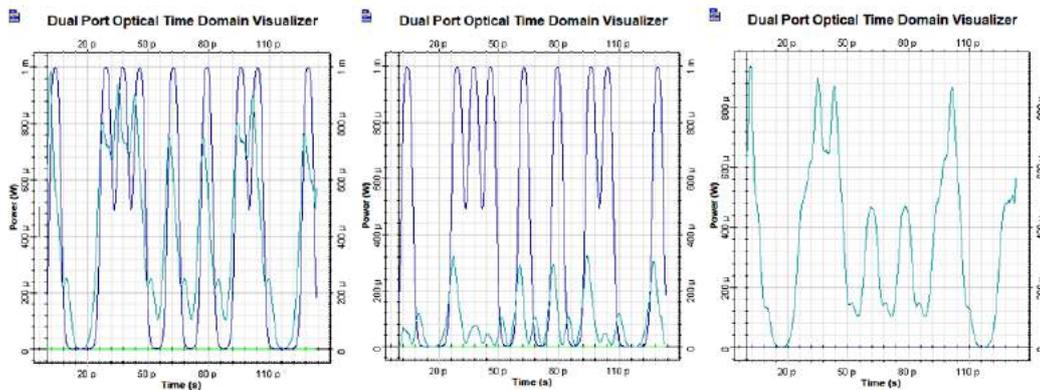


**Ilustración 4-14.** Señales de entrada y salida para el caso 2: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

Realizado por: Torres D., 2024.

Como se observa claramente, el pulso experimenta una dispersión leve a lo largo de la fibra óptica, y su estado de polarización no permanece constante; en su lugar, la energía se distribuye a través de los estados de polarización principales (PSP) debido al acoplamiento de modos en la fibra. Como se explicó en secciones anteriores, los resultados de la simulación no son consistentes, sino que varían aleatoriamente según la distribución del coeficiente PMD. Es crucial resaltar que este análisis se realizó para un solo bit individual, destacando así la naturaleza específica y detallada de la exploración.

Por otro lado, en la ilustración 15-4, se investiga la situación considerando una cadena de caracteres. En este contexto, se examina cómo se comporta la señal al atravesar una cadena de caracteres de 16 bits, lo que permite una comprensión más profunda del fenómeno de dispersión y atenuación.

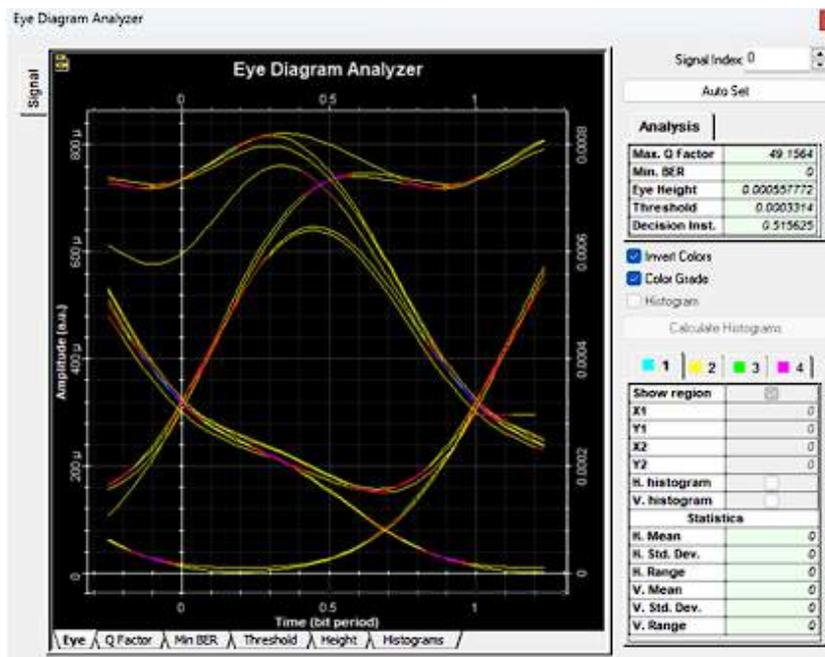


**Ilustración 4-15.** Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

Realizado por: Torres D., 2024.

Si bien es cierto que al analizar un solo bit no se observó una alteración significativa, al considerar una cadena de caracteres, se evidencia una notable distorsión, principalmente debido a la interferencia intersimbólica causada por la secuencia de caracteres. Esta interferencia intersimbólica es la responsable de la degradación en la calidad de la señal, lo que se refleja claramente en el análisis.

La presencia de múltiples bits en la secuencia introduce complejidades adicionales en la transmisión, ya que cada bit interactúa con los bits adyacentes, dando lugar a un efecto acumulativo que afecta la integridad de la señal. Este fenómeno se justifica mediante el análisis del factor Q, el cual proporciona una medida objetiva de la calidad de la transmisión. Una disminución en el valor del factor Q indica una mayor degradación en la señal, lo que confirma la influencia significativa de la interferencia intersimbólica en la cadena de caracteres.

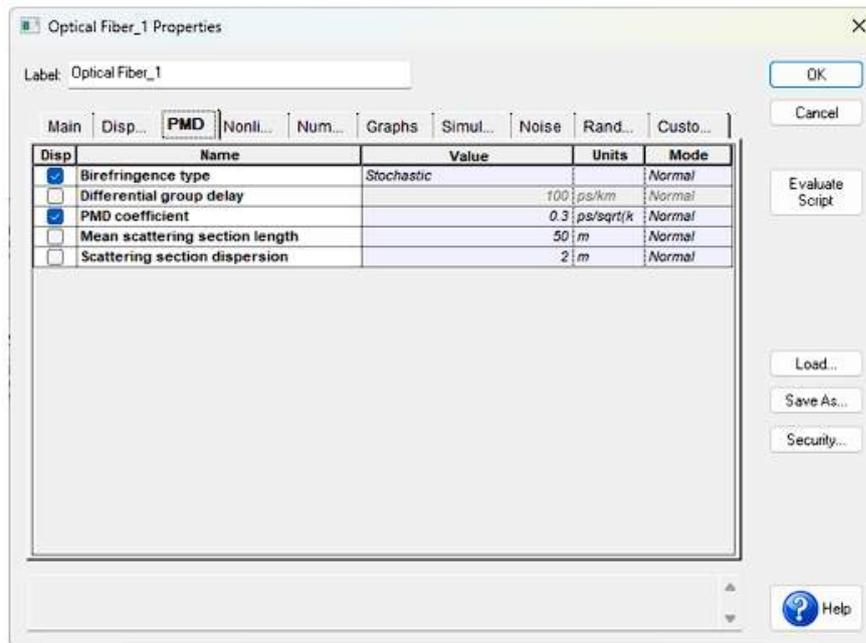


**Ilustración 4-16.** Diagrama de ojo

Realizado por: Torres D., 2024.

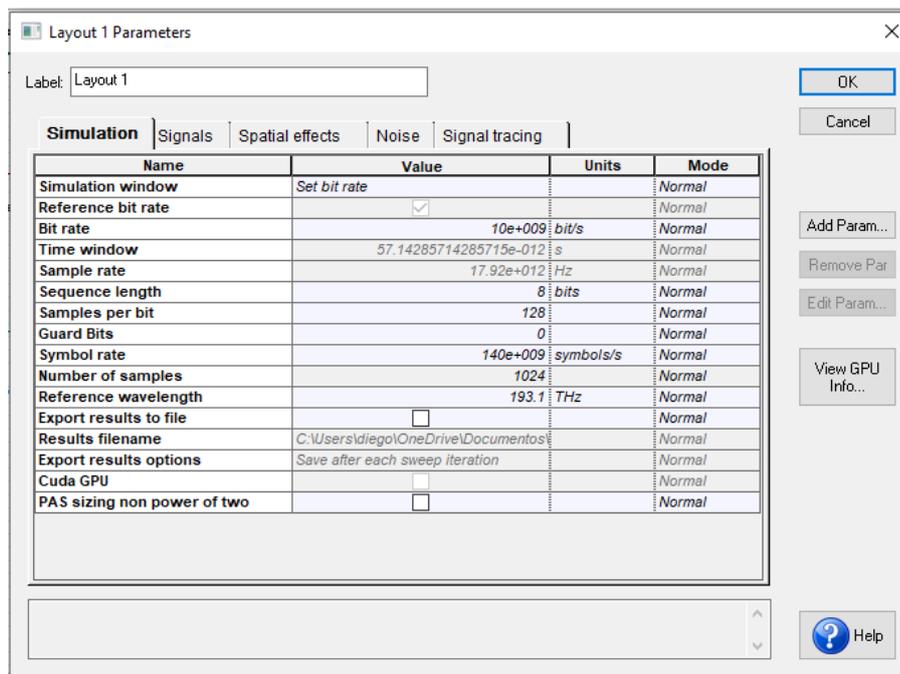
En el diagrama de ojo se corrobora la degradación en la calidad de la señal, mostrando una apertura reducida y una mayor superposición entre los niveles lógicos de la señal. Esta disminución en la apertura del ojo indica una mayor dificultad para distinguir entre los estados lógicos de "cero" y "uno", lo que confirma la influencia negativa de la interferencia intersimbólica en la integridad de la transmisión.

4.2.2.3. Caso 3  $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$ ;  $L = 2000\text{Km}$ ;  $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$ ;  $1550 \text{ nm}$



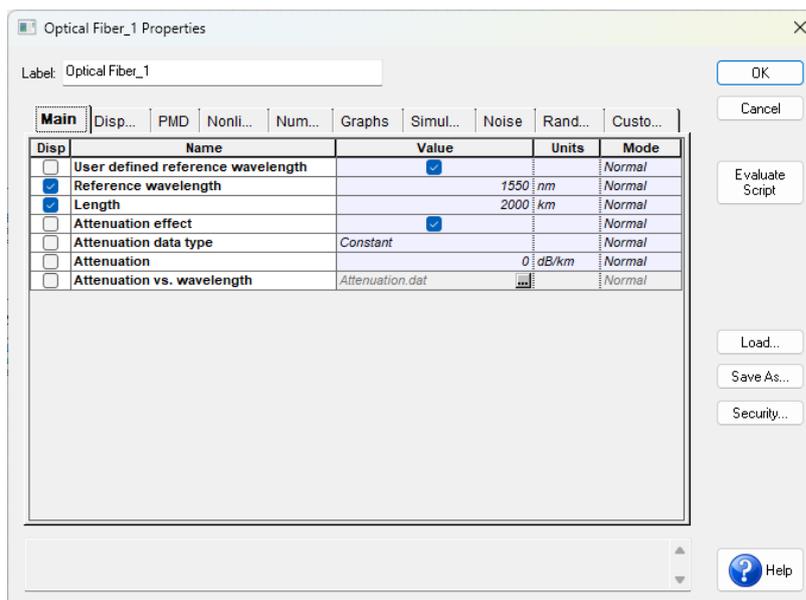
**Ilustración 4-17.**  $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$

Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-18.**  $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$

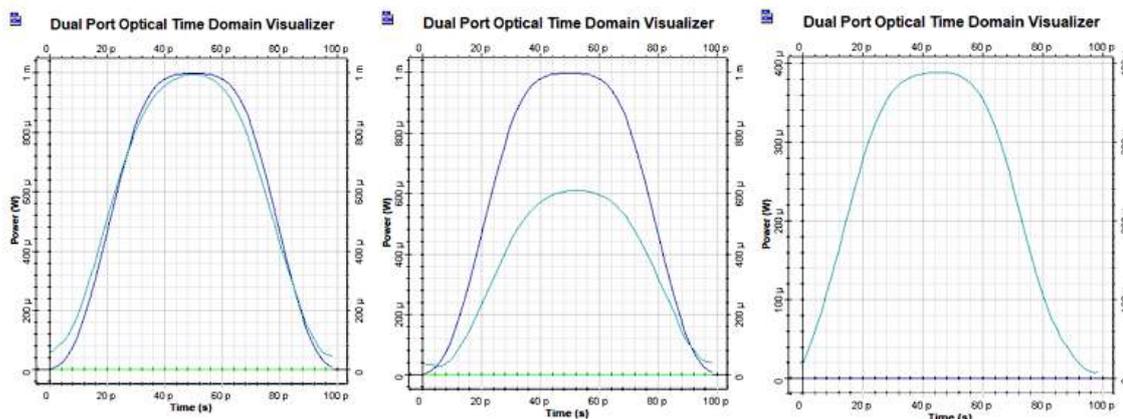
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-19.** 1550 nm

Realizado por: Torres D., 2024.

Una vez establecidos todos los parámetros necesarios para recrear las condiciones de este escenario, se procede con la ejecución de la simulación. Los resultados obtenidos se presentan a continuación: La figura 20-4 muestra una comparación visual entre las señales de entrada y salida correspondientes a un único bit. Se visualiza el pulso de entrada en tono celeste y el pulso de salida en color azul, destacando además sus componentes en los planos ortogonales (x, y).



**Ilustración 4-20.** Señales de entrada y salida para el caso 3: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

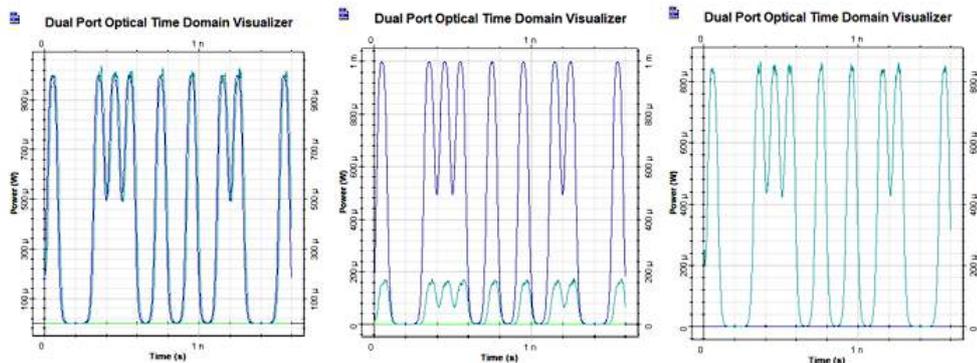
Realizado por: Torres D., 2024.

Como se puede observar, el pulso experimenta una dispersión leve a medida que atraviesa la fibra óptica, y su estado de polarización no permanece constante; en su lugar, la energía se distribuye

a través de los estados de polarización principales (PSP) debido al acoplamiento de modos en la fibra.

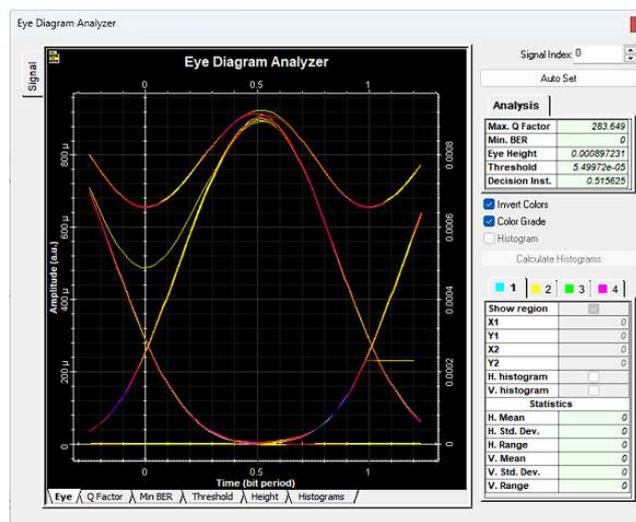
Además, como se explicó anteriormente, los resultados de la simulación no son uniformes, sino que varían de manera aleatoria según la distribución maxwelliana del coeficiente PMD. Es importante resaltar que este análisis se enfocó en un solo bit singular, lo que enfatiza la precisión y especificidad de la exploración.

Por otro lado, en la figura 21-4, se analiza la situación bajo la consideración de una cadena de caracteres. En este contexto, se examina cómo se comporta la señal a medida que atraviesa la cadena de caracteres, lo que proporciona una comprensión más completa del fenómeno de dispersión y la variabilidad del estado de polarización en condiciones más realistas.



**Ilustración 4-21.** Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

Realizado por: Torres D., 2024.

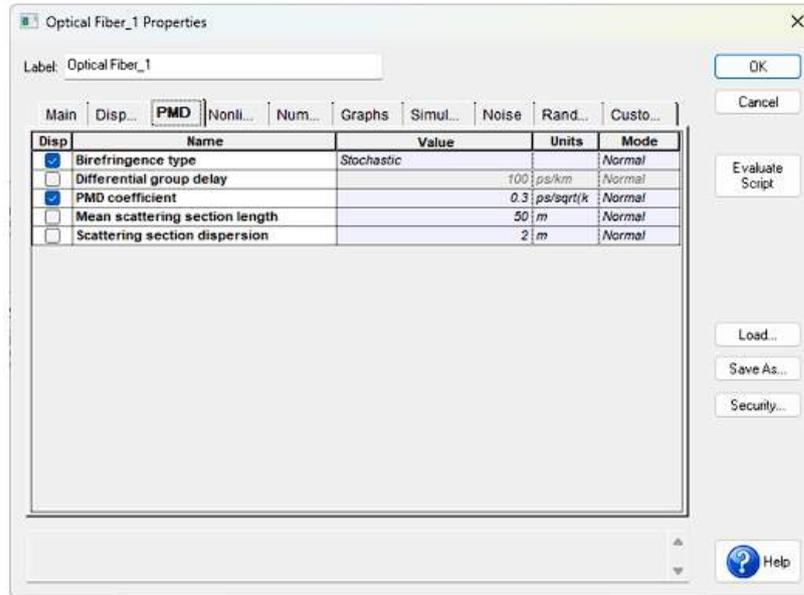


**Ilustración 4-22.** Diagrama de ojo

Realizado por: Torres D., 2024.

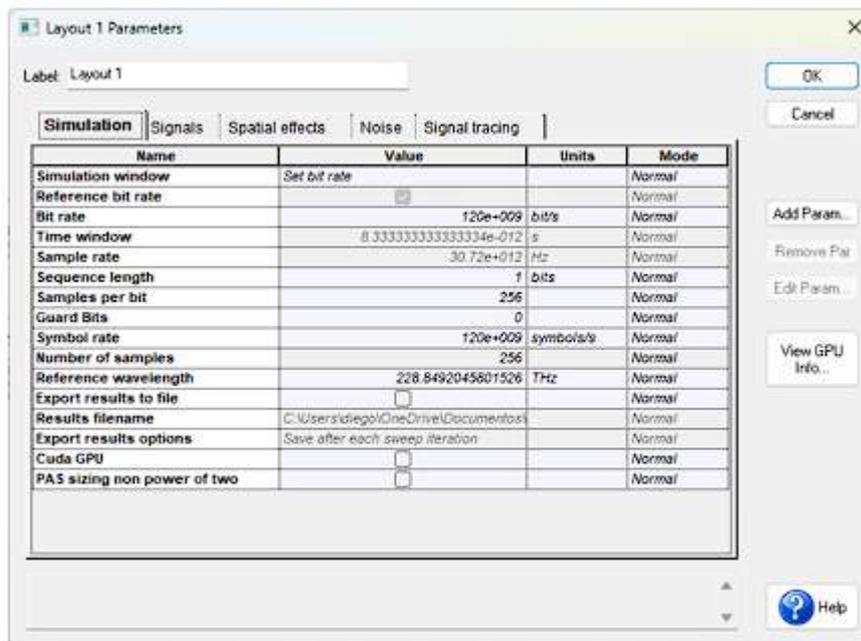
En el diagrama de ojo correspondiente a esta simulación, se confirma una mejora notable en la calidad de la señal. La representación visual revela una apertura más amplia y definida del ojo, indicando una reducción en la interferencia y en la degradación de la señal.

4.2.2.4. Caso 4  $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$ ;  $L = 2000\text{Km}$ ;  $V_{tx} = 120 \text{ Gbps}$ ;  $1400 \text{ nm}$



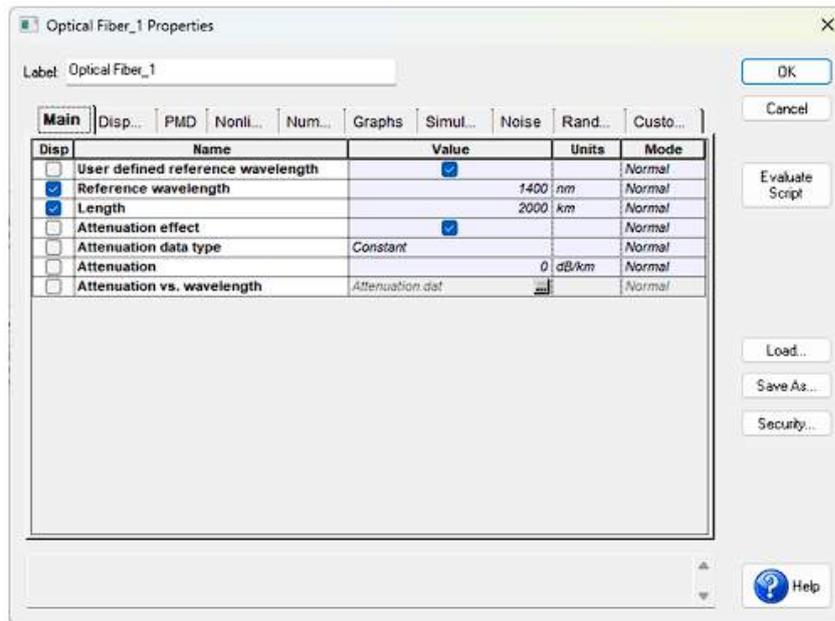
**Ilustración 4-23.**  $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$

Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-24.**  $V_{tx} = 120 \text{ Gbps}$

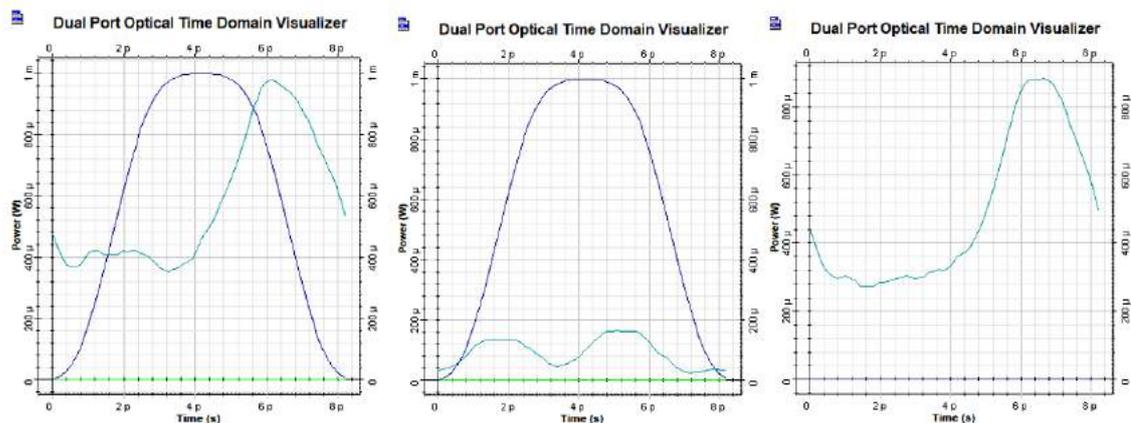
Realizado por: Torres D., 2024.



**Ilustración 4-25.** 1400 nm

Realizado por: Torres D., 2024.

Una vez configurados todos los parámetros esenciales para simular este escenario, la simulación se lleva a cabo. La ilustración 26-4 exhibe una comparación entre las señales de entrada y salida. Se destaca el pulso inicial en tono celeste y el resultado de salida en azul, junto con una comparación de sus componentes en los planos ortogonales (x, y).



**Ilustración 4-26.** Señales de entrada y salida para el caso 4: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

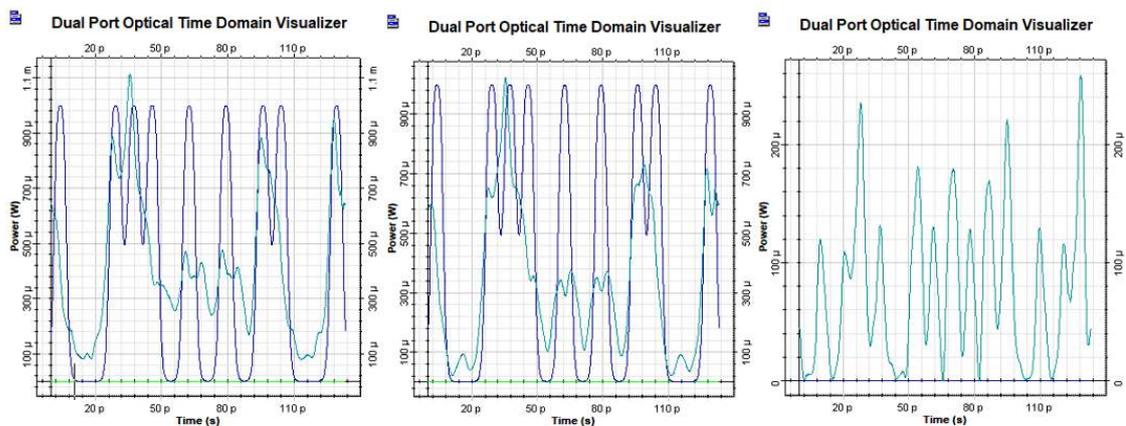
Realizado por: Torres D., 2024.

Como se puede apreciar claramente en la ilustración 26-4, como se evidencia claramente en la ilustración 26-4, se observa una dispersión considerable junto con una fuerte atenuación en la señal. Este fenómeno se relaciona con la distribución de la energía a través de los estados de

polarización principales (PSP) debido al acoplamiento de modos en la fibra óptica. La dispersión pronunciada y la atenuación significativa destacan la importancia de comprender y gestionar adecuadamente estos efectos en los sistemas de comunicación óptica. La distribución de la energía a través de los PSP refleja la complejidad del comportamiento de la luz en el medio de transmisión, lo que subraya la necesidad de estrategias de compensación y diseño que minimicen estos efectos para garantizar una transmisión eficiente y fiable de la información.

Como se explicó anteriormente, los resultados de la simulación no son uniformes, sino que varían aleatoriamente según la distribución del coeficiente PMD. Es esencial destacar que este análisis se centró en un único bit, resaltando la especificidad y minuciosidad de la exploración.

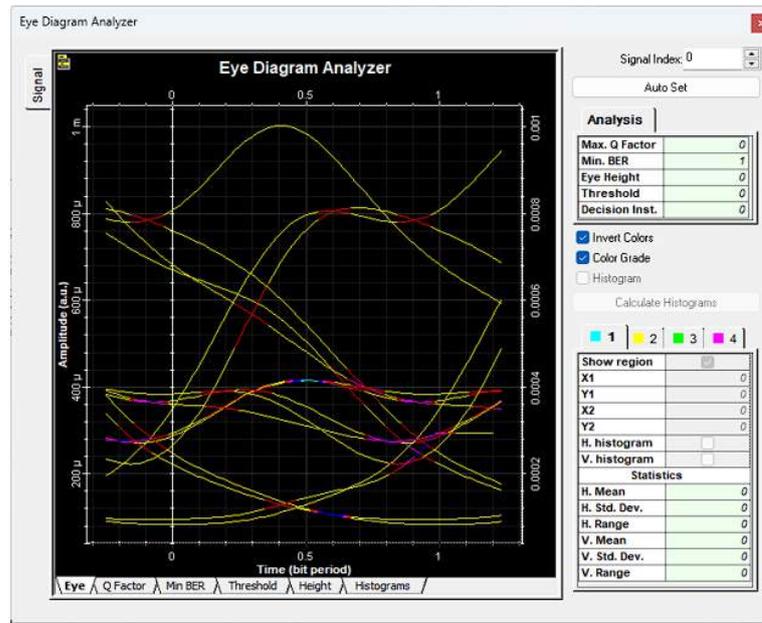
Por otro lado, en la ilustración 27-4, se analiza la situación considerando una cadena de caracteres. Aquí se examina cómo se comporta la señal al atravesar una secuencia de 16 bits, lo que proporciona una comprensión más profunda del fenómeno de dispersión y atenuación.



**Ilustración 4-27.** Señales de entrada y salida para una secuencia de 16 bits: 1) Pulsos totales, 2) Pulsos en el eje (x), 3) Pulsos en el eje (y)

**Realizado por:** Torres D., 2024.

En el análisis detallado a nivel de la cadena de caracteres, se observa cómo la Interferencia intersimbólica (ISI) tiene un impacto significativo en la comunicación. Este fenómeno se evidencia claramente en el diagrama de ojo, donde se aprecia una apertura muy reducida y una alta distorsión de la señal. Estas condiciones se reflejan en un BER de 1 y un factor Q igual a 0, como se observa en la ilustración 28-4, lo que indica una comunicación inexistente o extremadamente deficiente. Es decir, la interferencia intersimbólica ha generado una degradación tan significativa en la calidad de la señal que la comunicación no se pudo establecer correctamente.



**Ilustración 4-28.** Diagrama de ojo

Realizado por: Torres D., 2024.

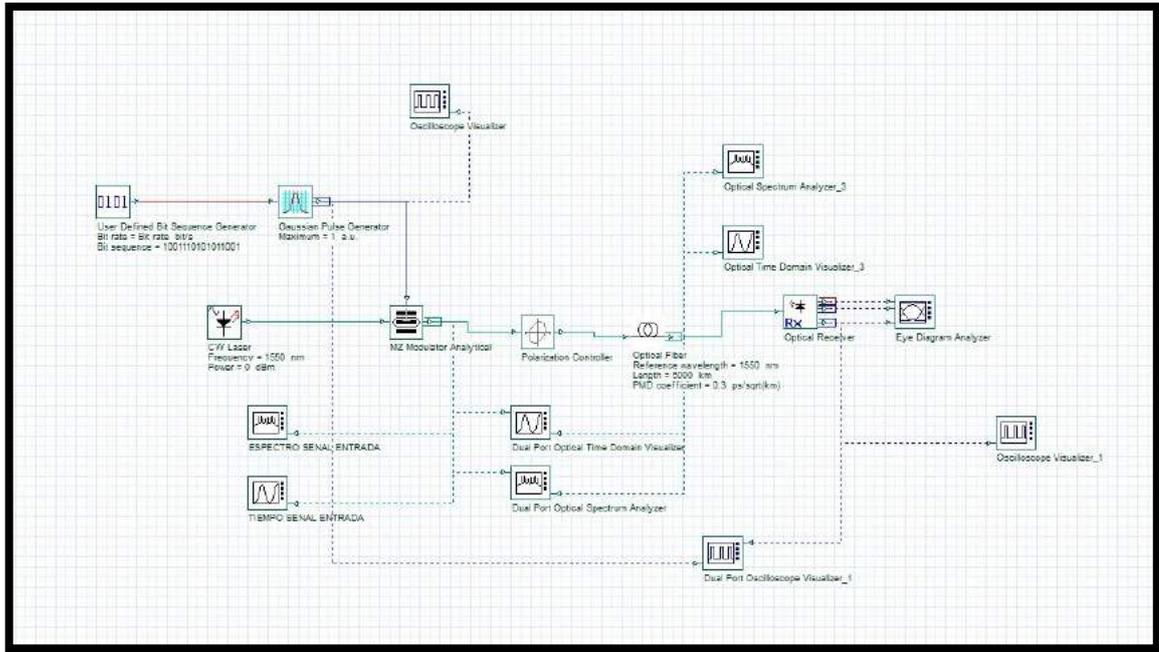
### 4.3 Análisis de la simulación de compensación de PMD

Como se puede observar, estos casos abarcan distintas estrategias de compensación óptica de PMD, excluyendo las técnicas de compensación electrónica debido a las restricciones del simulador en cuanto a componentes electrónicos. Por lo tanto, se focalizará en dos métodos de compensación: pre-compensación y post-compensación de una sola etapa.

El valor del coeficiente PMD utilizado en todas las simulaciones será de  $0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$ . Esta elección se hizo con el propósito de generar niveles considerables de dispersión y, así, facilitar un análisis más exhaustivo sobre la efectividad de la compensación.

#### 4.3.1 Simulación del sistema de pre-compensador de PMD

La técnica inicial bajo análisis es la del pre-compensador de dispersión, situado en la región de transmisión de la señal. Este componente se compone principalmente de un controlador de polarización, que tiene la función de alinear los Estados de Polarización Principal (PSP) del pulso de luz con los ejes de birrefringencia de la fibra. Esto tiene como objetivo mitigar la dispersión causada por el acoplamiento de modos en la fibra.



**Ilustración 4-29.** Escenario de simulación con pre-compensador

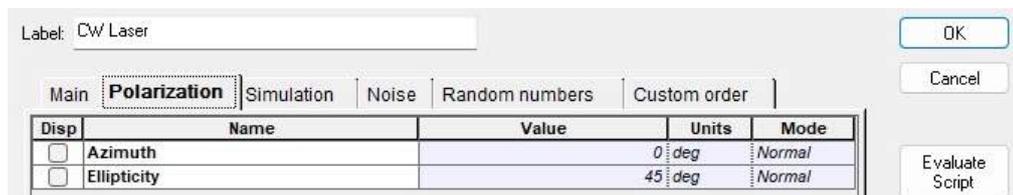
Realizado por: Torres D., 2024.

La situación de simulación para este caso se exhibe en la ilustración 29-4. En esta representación, se destaca la presencia del controlador de polarización que sigue al generador de pulsos gaussianos. Después de establecer el entorno de simulación, cada componente se configura según los parámetros definidos para cada escenario en particular.

*Configuración del pre-compensador:*

Como se muestra en la figura 31-4, el pre-compensador estará formado exclusivamente por un controlador de polarización, identificado por el componente "Polarization Controller".

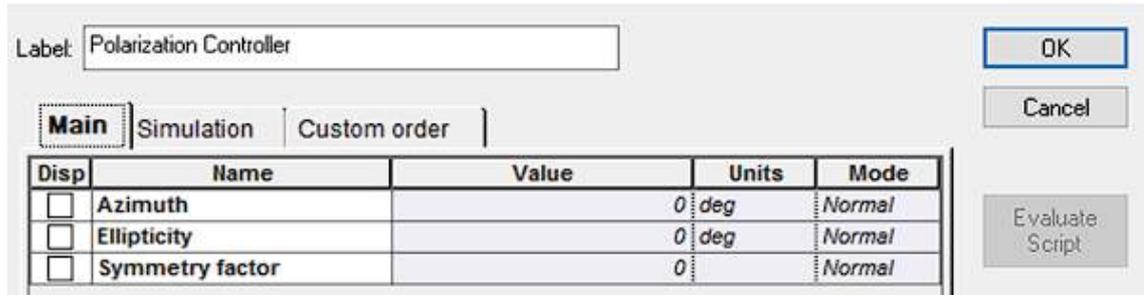
Para establecer las condiciones de simulación, se configura inicialmente el componente "Gaussian Pulse Generator" con un estado de polarización arbitrario. La ilustración 30-4 ilustra la configuración de este componente con un ángulo de elipticidad de 45 grados.



**Ilustración 4-30.** Configuración del componente Gaussian Pulse Generator

Realizado por: Torres D., 2024.

También se requiere ajustar la configuración del componente "Polarization Controller" para alinear el estado de polarización del pulso gaussiano con los ejes de birrefringencia del tramo de fibra. La ilustración 31-4 ilustra la configuración detallada del componente "Polarization Controller", incluyendo todos sus parámetros.



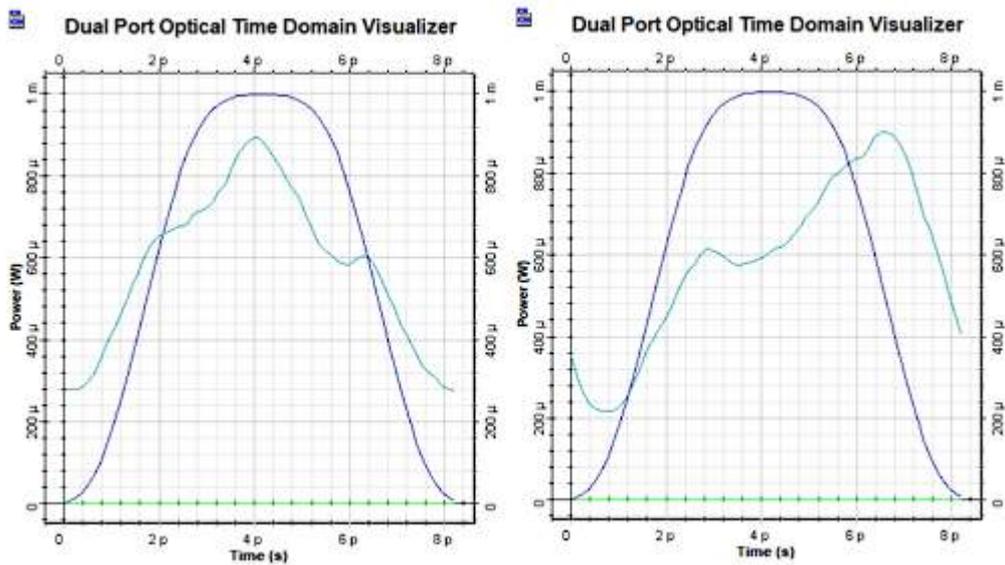
**Ilustración 4-31.** Configuración del componente Polarization Controller

Realizado por: Torres D., 2024.

Como se puede observar, el controlador cambia el estado de polarización del pulso gaussiano a una polarización lineal horizontal, ya que este es el valor por defecto para los ejes del componente Optical Fiber. Una vez configurados los elementos del pre-compensador, se realizan las simulaciones para los diferentes escenarios establecidos.

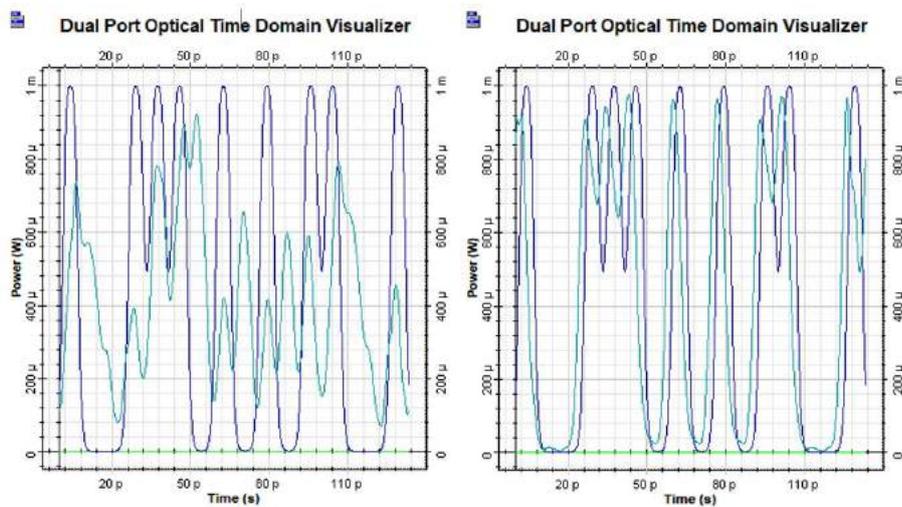
#### 4.3.1.1 Pre-compensador caso 1: 1400nm; L=1000 Km; Vtx=120 Gbps; $\phi$ PMD = 0,3 ps/km<sup>1/2</sup>

En este contexto, se llevará a cabo la compensación de PMD para un escenario con las siguientes características: longitud de onda de 1400 nm, distancia de transmisión de 1000 km, velocidad de transmisión de 120 Gbps y un coeficiente PMD ( $\phi$ PMD) de 0,3 ps/km<sup>1/2</sup>. Por consiguiente, se ajustan los parámetros globales y específicos de cada componente para recrear estas condiciones. La figura 33-4 exhibe los resultados obtenidos para dos pulsos distintos, simulados bajo las condiciones previamente establecidas. En esta representación, se contrastan los pulsos de entrada en tono celeste (antes de la dispersión) con los de salida en tono azul (después de la dispersión).



**Ilustración 4-32.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 120 Gbps  
 Realizado por: Torres D., 2024.

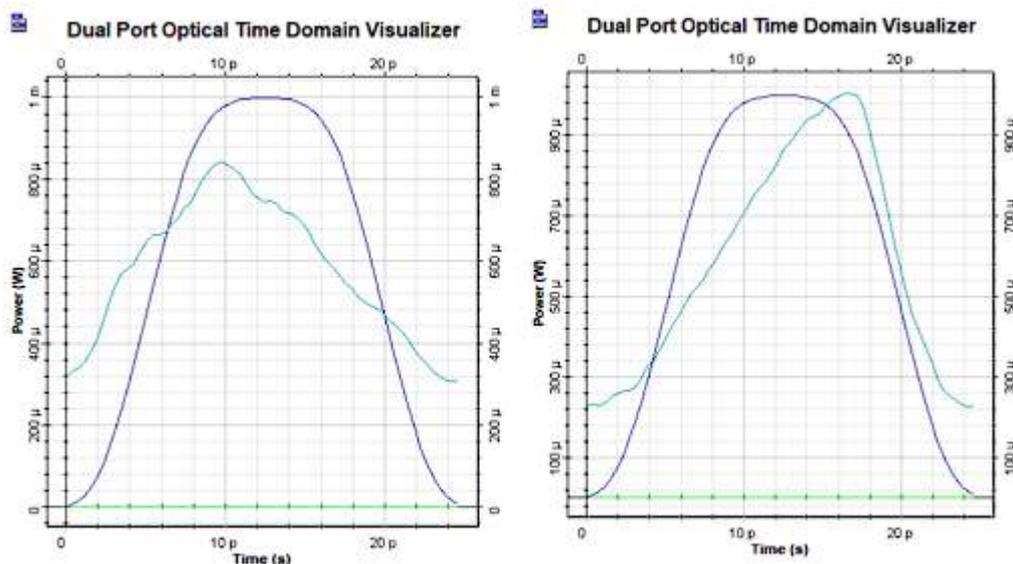
El análisis de la simulación representada en la ilustración 32-4 refleja los resultados obtenidos al evaluar dos pulsos bajo las condiciones especificadas. Se observa que, en comparación con los resultados presentados en la tabla 1-4, a pesar de que la distancia de transmisión es menor, el resultado es similar. Esto sugiere que la compensación implementada en este caso no fue efectiva para mitigar los efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD). A pesar de haber aplicado la compensación, los pulsos de salida aún muestran una dispersión significativa y una distorsión similar a la de los pulsos sin compensar, como se observa en la ilustración. Este hallazgo resalta la importancia de evaluar cuidadosamente las estrategias de compensación y considerar otros factores que puedan influir en la efectividad de estas técnicas.



**Ilustración 4-33.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 120 Gbps  
 Realizado por: Torres D., 2024.

En el análisis de la cadena de caracteres para este escenario, se puede concluir que se observa una leve mejoría, particularmente en el segundo análisis, en términos de atenuación. Esta mejora es evidente al comparar los resultados antes y después de la compensación, como se indica en la ilustración 33-4. En cuanto a los valores del factor Q, se observa una mejora significativa después de la compensación. Comparando los valores de factor Q de la tabla 1-4 con los obtenidos después de la compensación, se registró un incremento de 0 a 29 en el factor Q. Este aumento en el factor Q sugiere que la transmisión se vuelve más confiable después de la compensación, lo que indica una mejora en la calidad de la señal y una reducción en la tasa de error de bits (BER). Estos hallazgos respaldan la efectividad de la compensación implementada en este caso, destacando la importancia de estas técnicas para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas de comunicación óptica.

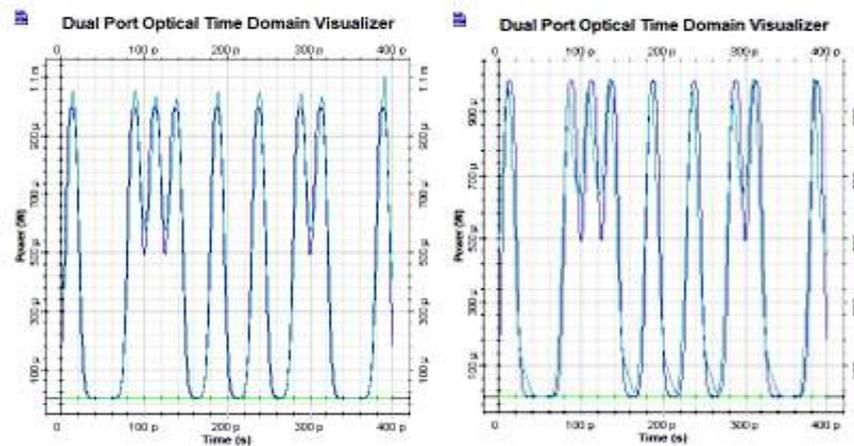
#### 4.3.1.2 Pre-compensador caso 2: $1400\text{nm}$ ; $L=2000\text{ Km}$ ; $V_{tx}=40\text{ Gbps}$ ; $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-34.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 40 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

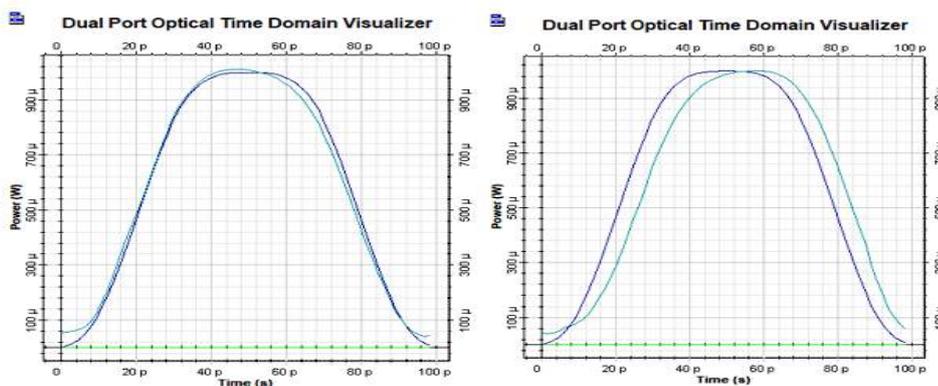
En comparación con los resultados de la tabla 1-4, se observa una leve mejoría en términos de atenuación en el análisis de este escenario. Aunque los valores de dispersión se mantienen relativamente constantes, la compensación implementada logra mejorar la calidad de la transmisión. Esta mejora en la atenuación sugiere una reducción en las pérdidas de señal a lo largo del enlace de fibra óptica, lo que puede traducirse en una mayor integridad de la señal transmitida. Aunque los efectos de dispersión pueden no haberse abordado completamente, la compensación logra mitigar suficientemente estos efectos, resultando en una transmisión más robusta y confiable.



**Ilustración 4-35.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 40 Gbps  
 Realizado por: Torres D., 2024.

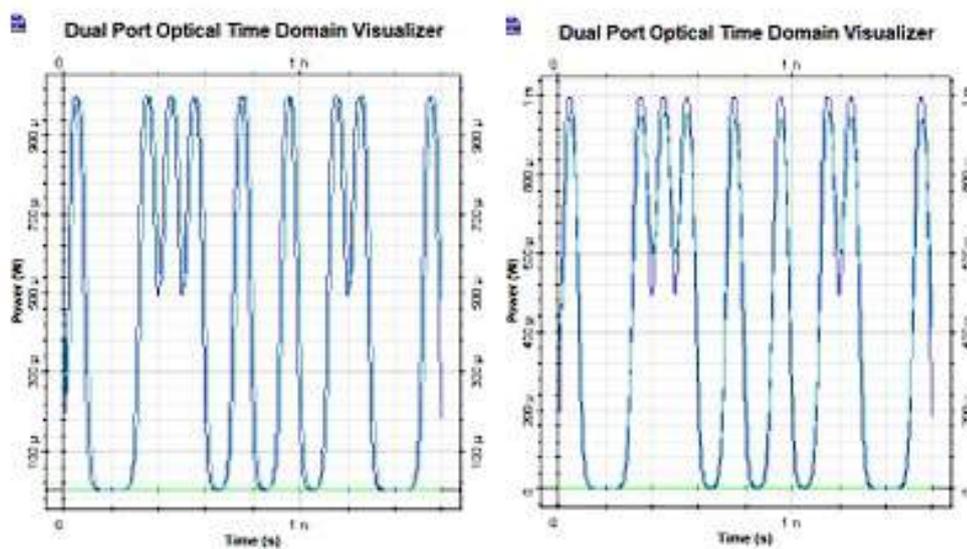
Al comparar los resultados obtenidos en la ilustración 35-4 con los datos de la tabla 1-4, se evidencia una notable mejora después de la compensación. La reducción de la Interferencia de Símbolos Indeseados (ISI) indica una disminución en la distorsión de la señal, lo que sugiere una transmisión más clara y precisa. Además, se observa una mejora en términos de dispersión, lo que sugiere una mayor estabilidad en la transmisión de la señal a través del enlace de fibra óptica. Esto se refleja en la mejora del factor Q, que aumenta significativamente de 91 a 120 después de la compensación. Este incremento en el factor Q indica una mayor calidad de la señal transmitida, lo que sugiere una reducción en la tasa de error y una mayor confiabilidad en la comunicación. En resumen, estos resultados demuestran la eficacia de la compensación en la mejora del rendimiento del sistema de comunicación óptica, destacando su importancia en la optimización de la calidad de la señal y la fiabilidad de la transmisión.

#### 4.3.1.3 Pre-compensador caso 3: $1400\text{nm}$ ; $L=5000\text{ Km}$ ; $V_{tx}=10\text{ Gbps}$ ; $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-36.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 10 Gbps  
 Realizado por: Torres D., 2024.

El análisis de la ilustración 36-4 revela una mejora significativa en los términos de dispersión y atenuación después de la etapa de compensación. Esta mejora sugiere la efectividad de la compensación para este escenario específico. Se observa que los efectos adversos de la dispersión y la atenuación se han reducido considerablemente en comparación con las condiciones iniciales, lo que indica una transmisión más estable y confiable de la señal a través del enlace de fibra óptica. La reducción en la dispersión significa que la señal se propaga de manera más uniforme y coherente, lo que contribuye a una mejor calidad de la transmisión. Además, la disminución en la atenuación sugiere una menor pérdida de potencia de la señal durante la transmisión, lo que aumenta la distancia sobre la cual la señal puede ser transmitida con éxito.

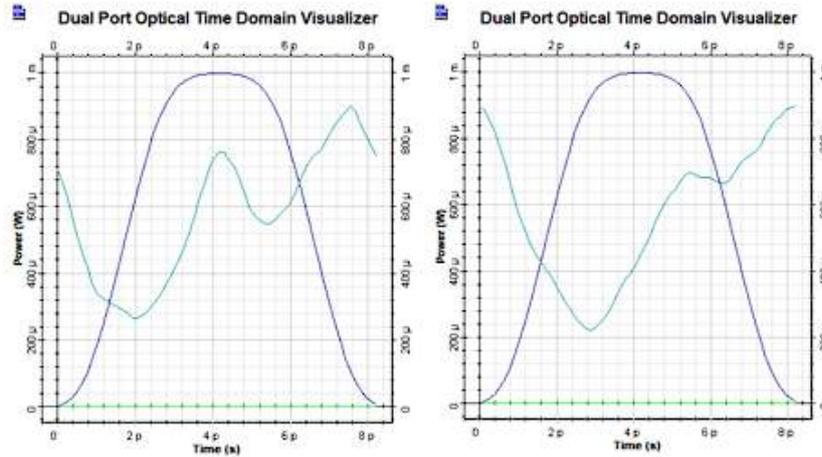


**Ilustración 4-37.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 10 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

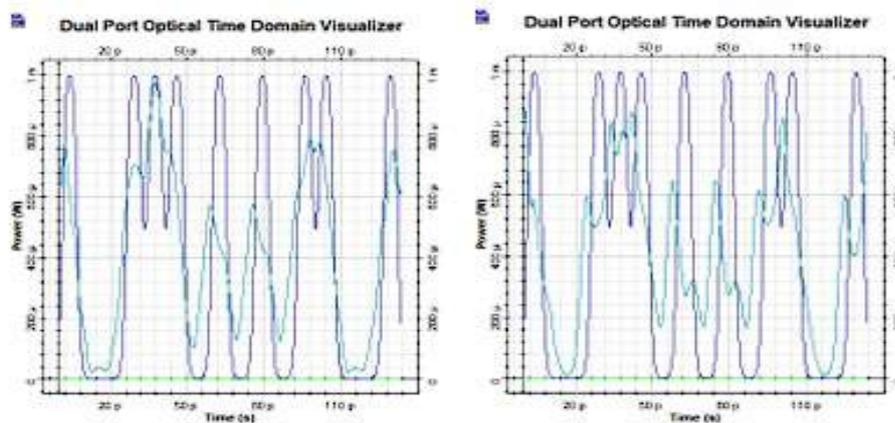
El análisis de la ilustración 37-4 muestra que, en términos de atenuación y dispersión, la transmisión es fiable y estable. Aunque el factor Q disminuyó de 279 a 239 después de la compensación, este descenso puede atribuirse a la mayor distancia de transmisión, que pasó de 2000 a 5000 kilómetros. A pesar de esta disminución en el factor Q, la transmisión sigue siendo confiable debido a la reducción significativa en la atenuación y la dispersión. La atenuación indica una pérdida mínima de potencia de la señal durante la transmisión, lo que permite que la señal se transmita eficientemente a lo largo de distancias mayores. Por otro lado, la dispersión, que puede causar distorsiones en la señal, se ha controlado efectivamente, lo que garantiza una transmisión más clara y precisa. Además, se observa que hay una cantidad mínima de Inter-Symbol Interference (ISI), lo que indica una mejor integridad de la señal.

4.3.1.4 Pre-compensador caso 4: 1550nm; L=1000 Km; Vtx=120 Gbps;  $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-38.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 120 Gbps  
Realizado por: Torres D., 2024.

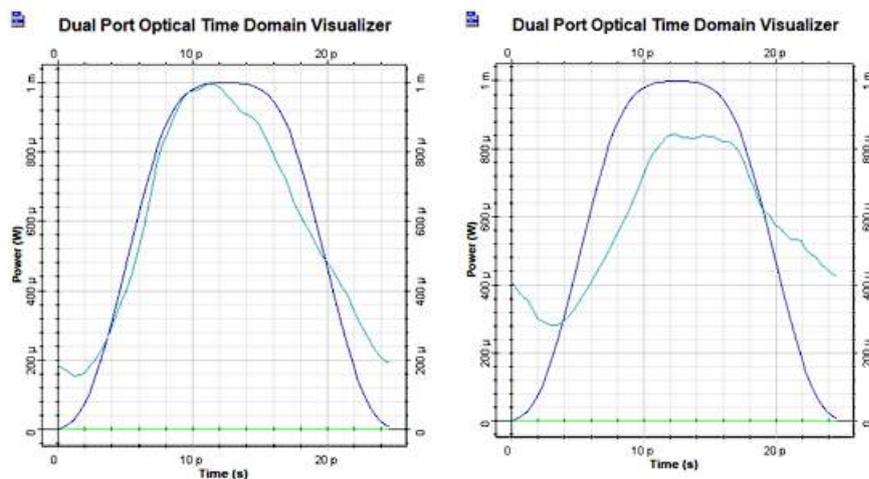
El análisis de la ilustración 38-4 revela que la compensación no es efectiva en este caso particular. No se observa una mejora significativa en términos de atenuación y dispersión después de la aplicación de la compensación. Esto sugiere que los dispositivos utilizados para la compensación no han logrado corregir adecuadamente los efectos adversos de la dispersión por modo de polarización (PMD). La falta de mejora en la atenuación indica que la potencia de la señal no se ha mantenido de manera óptima a lo largo de la transmisión, lo que podría afectar la calidad y la integridad de la señal recibida. Además, la ausencia de mejora en la dispersión sugiere que los dispositivos de compensación no han logrado mitigar eficazmente los efectos de la dispersión en la señal transmitida, lo que podría provocar distorsiones y errores en la comunicación.



**Ilustración 4-39.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 120 Gbps  
Realizado por: Torres D., 2024.

El análisis de la ilustración 39-4 muestra una ligera mejoría en comparación con las condiciones previas a la compensación. Esta mejora se refleja principalmente en el factor Q, que pasó de 30 a 40 después de la aplicación de la compensación. El aumento en el factor Q sugiere una mejora en la calidad de la señal transmitida, lo que indica una mayor confiabilidad en la comunicación. Aunque la mejora es leve, es significativa ya que indica que la compensación ha logrado mitigar parte de los efectos adversos de la dispersión por modo de polarización (PMD). Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de esta mejora en el factor Q, aún pueden existir ciertos desafíos asociados con la atenuación y la dispersión que podrían afectar la integridad de la transmisión.

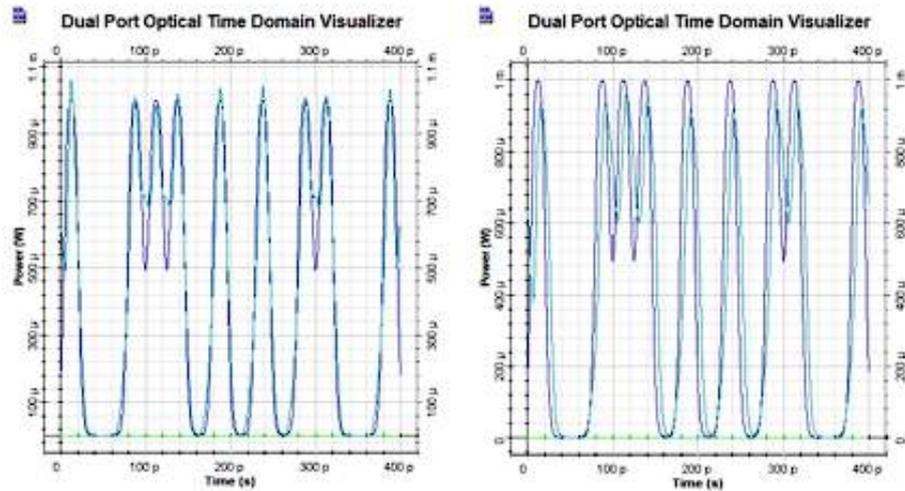
4.3.1.5 *Pre-compensador caso 5: 1550nm; L=2000 Km; Vtx=40 Gbps;  $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$*



**Ilustración 4-40.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 40 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

El análisis de la ilustración 40-4 revela una mejora notable en términos de dispersión, aunque no se observa un cambio significativo en la atenuación. Esta mejora en la dispersión sugiere que la compensación aplicada ha sido efectiva para mitigar parte de los efectos adversos de la dispersión por modo de polarización (PMD). Sin embargo, es importante destacar que la atenuación se mantiene en niveles normales y no muestra mejoría ni empeoramiento después de la compensación. Esto puede interpretarse como una indicación de que la compensación ha tenido un impacto selectivo en la dispersión, pero no ha afectado significativamente la atenuación de la señal.

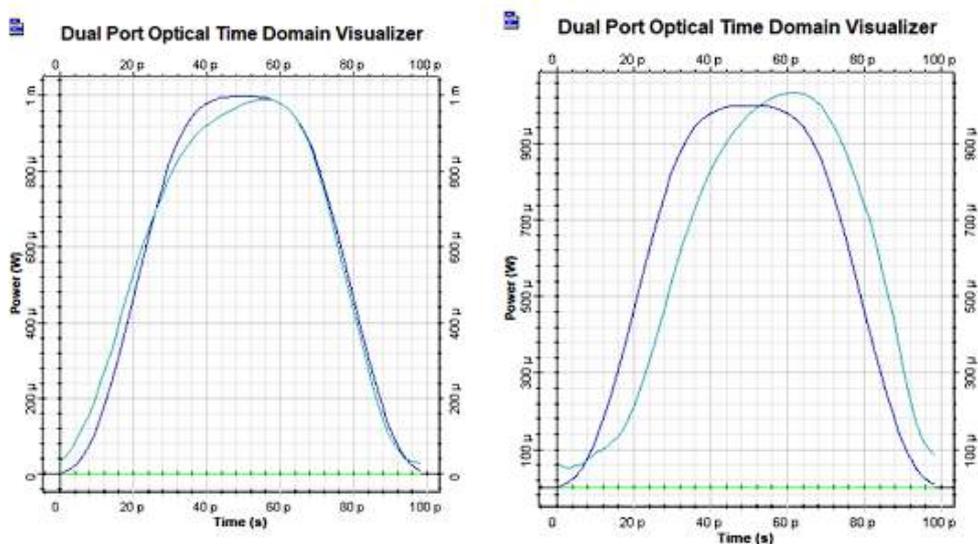


**Ilustración 4-41.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 40 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

El análisis de la ilustración 41-4 indica que, a pesar de la aplicación del pre-compensador, no se observa una mejora significativa ni en la dispersión ni en la atenuación. Esto sugiere que, en este caso particular, la compensación no ha tenido un impacto positivo en la calidad de la transmisión. De hecho, los resultados muestran que el factor Q, una medida de la calidad de la señal, disminuye ligeramente de 126 a 115 después de la compensación. Esta disminución en el factor Q sugiere que la calidad de la transmisión no mejora con la aplicación del pre-compensador en este escenario específico.

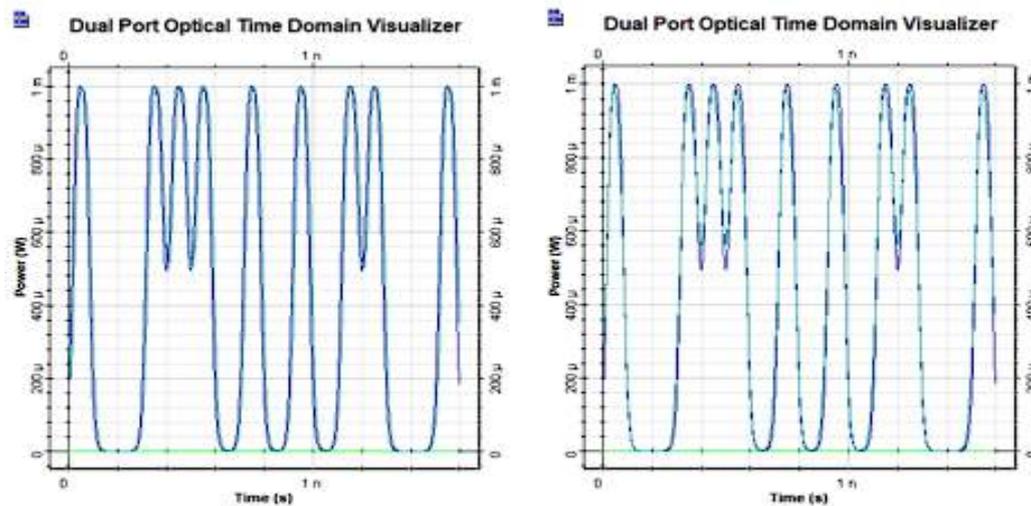
#### 4.3.1.6 Pre-compensador caso 6: 1550nm; L=5000 Km; Vtx=10 Gbps; $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-42.** Resultados de la pre-compensación para dos pulsos a 10 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

El análisis de la ilustración 42-4 revela que, en términos de atenuación y dispersión, no se observa una mejora significativa. Sin embargo, esto puede atribuirse al incremento en la distancia de transmisión. A medida que la distancia aumenta, los compensadores tienden a ser más efectivos, especialmente en distancias más largas. Esto sugiere que, si bien los compensadores pueden ser eficaces para mitigar los efectos de la dispersión en distancias extendidas, su aplicabilidad puede verse limitada en términos de la velocidad de transmisión.



**Ilustración 4-43.** Resultados para dos análisis cadenas de caracteres a 10 Gbps

Realizado por: Torres D., 2024.

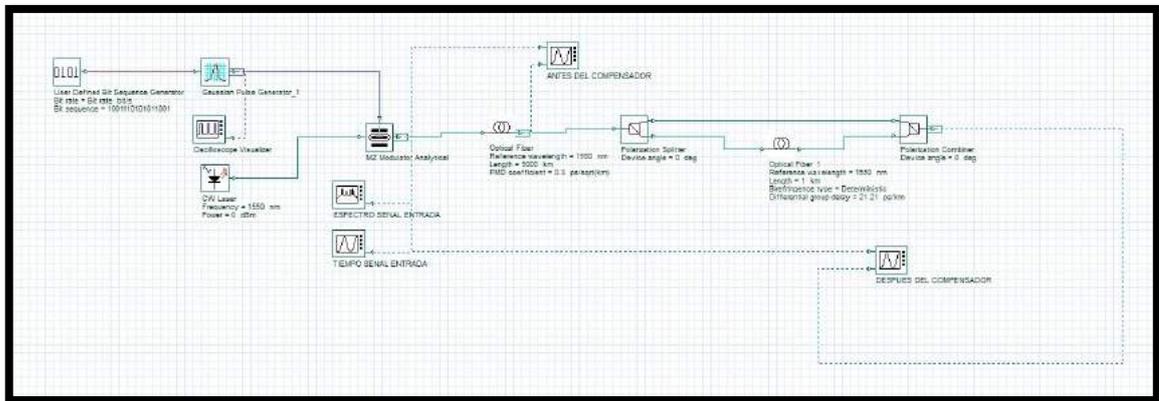
El análisis de la ilustración 43-4 indica que la transmisión es fiable en términos de atenuación y dispersión. Aunque el factor Q disminuyó de 283 a 240, lo cual podría interpretarse inicialmente como una señal de deterioro en la calidad de la transmisión, este decremento se compensa por la distancia aumentada de 2000 a 5000. Este cambio en la distancia parece contribuir a una mejora general en la transmisión, lo que sugiere que, en este caso, la transmisión es aún confiable y puede considerarse exitosa. Además, se observa una reducida presencia de ISI, lo que añade robustez a la comunicación. Por lo tanto, aunque el factor Q haya disminuido, la combinación de factores indica que la transmisión es efectiva y confiable en este escenario.

### **Análisis del apartado del pre-compensador**

Podemos definir que la compensación dada por el controlador de polarización es insignificante para el número de intercambios de energía entre PSP que ocurren en la transmisión, entonces se concluye que este acoplamiento es poco útil a comparación con el intercambio de energía que se da entre PSP.

### 4.3.2. Simulación del sistema de post-compensador de PMD de una etapa

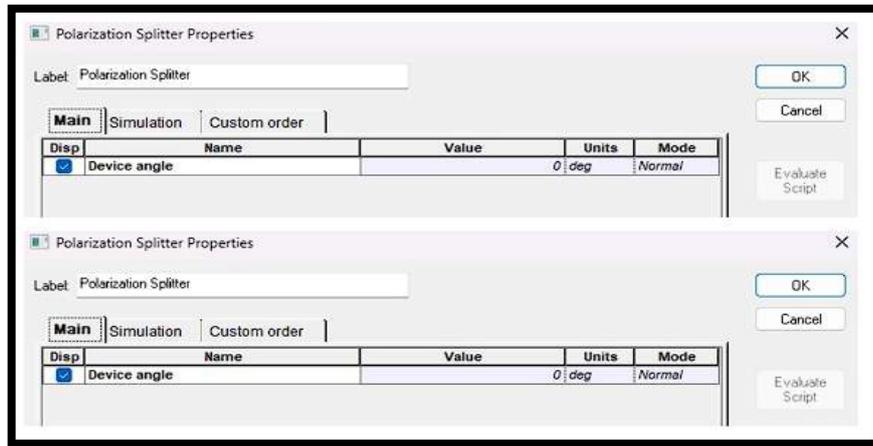
Las próximas técnicas de análisis se centran en la post-compensación, una estrategia que se fundamenta en el uso de divisores de polarización y retardadores temporales. Estos métodos buscan equilibrar el tiempo de retardo entre los estados de polarización principales (PSP) de un pulso de luz. Sin embargo, debido a las limitaciones de los componentes disponibles en el simulador, solo se considerarán técnicas pasivas de post-compensación. La implementación de métodos dinámicos requeriría el desarrollo de componentes y algoritmos que están fuera del alcance de este estudio. La primera técnica de post-compensación emplea un retardador temporal fijo ubicado en el extremo de salida de la fibra óptica. Este retardador incluye un polarizador divisor, un segmento de fibra Hi-Bi PM y un mezclador de polarización, como se presenta en la ilustración 44-4.



**Ilustración 4-44.** Escenario de simulación con post-compensador de una etapa

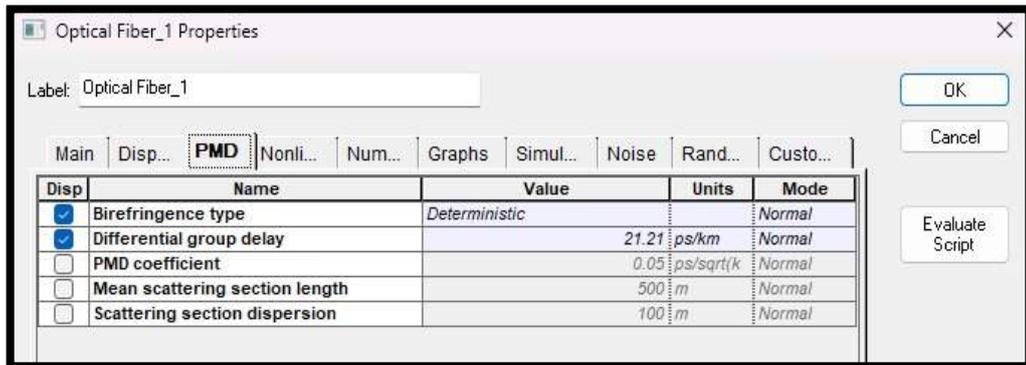
Realizado por: Torres D., 2024.

El post-compensador opera de la siguiente manera: El Polarization Splitter divide el pulso de luz en sus estados de polarización ortogonales (PSP), enviándolos por puertos separados. El segmento de fibra mantenedora de polarización introduce un retardo comparable al DGD experimentado por el PSP que se adelanta, equilibrando así los tiempos de retardo entre ambos estados de polarización. Para configurar el post-compensador de una sola etapa, es necesario ajustar cada componente según sea necesario. La ilustración 45-4 muestra la configuración del Polarization Splitter, donde el único parámetro ajustable, llamado Ángulo del dispositivo, se establece en "cero".



**Ilustración 4-45.** Configuración de los componentes Polarization Splitter  
 Realizado por: Torres D., 2024.

Para ajustar el segmento de fibra Hi-Bi PM, se requiere conocer el DGD teórico generado y luego asignar este valor al retardo diferencial de grupo del componente Optical Fiber asociado al post-compensador.



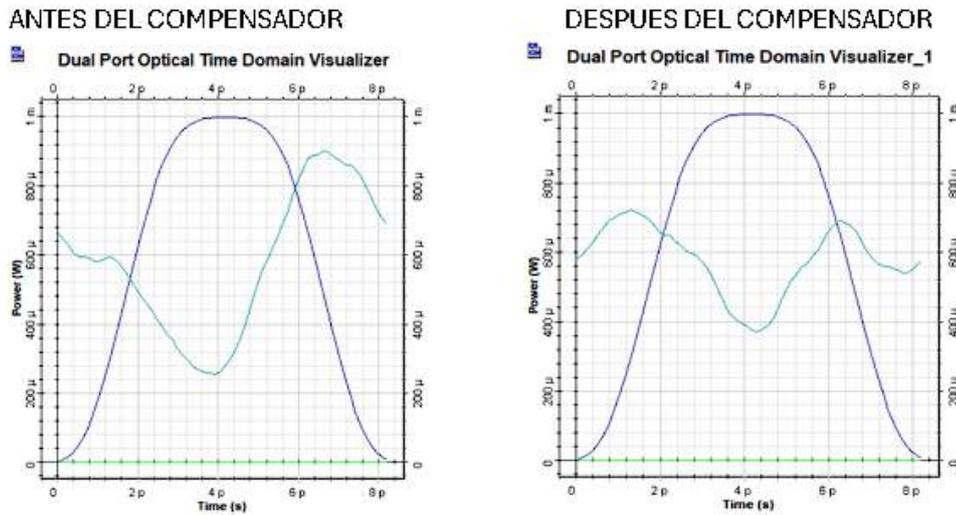
**Ilustración 4-46.** Configuración del componente Optical Fiber  
 Realizado por: Torres D., 2024.

Se configura el componente con un tipo específico de birrefringencia según se muestra en la ilustración 46-4, y se desactivan los parámetros no relacionados con la dispersión por modo de polarización (PMD) para eliminar otros posibles efectos. Una vez establecidos todos los parámetros necesarios para el post-compensador, se procede a ejecutar la simulación y analizar los resultados obtenidos.

Es importante destacar que en un entorno real, una de las funciones del post-compensador es determinar cuál de los estados de polarización principales (PSP) se adelanta para luego introducir el retardo temporal necesario. Sin embargo, debido a las limitaciones del simulador, solo se

considerarán los casos en los que la componente en y sea la que se adelante para llevar a cabo la compensación.

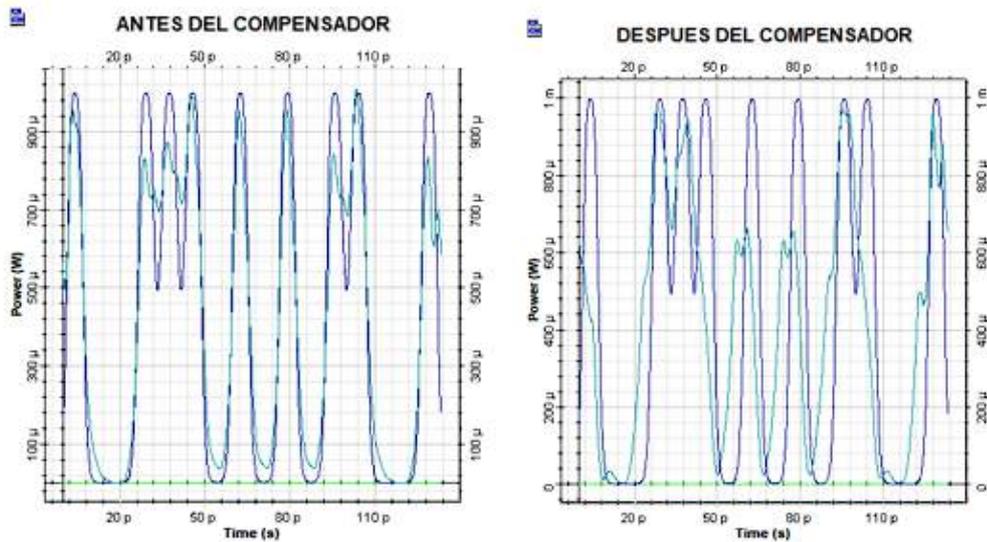
4.3.2.1 Post-compensador caso 1: 1400nm; L=1000 Km; Vtx=120 Gbps;  $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-47.** Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 47-4, se observa una disminución de aproximadamente un 20% en la atenuación, lo que indica una mejora en la capacidad de transmisión de la señal. Sin embargo, en términos de dispersión, no se observa una mejora significativa ni un empeoramiento notable. Esto sugiere que, si bien la compensación ha logrado reducir la atenuación, no ha tenido un impacto significativo en la dispersión de la señal.

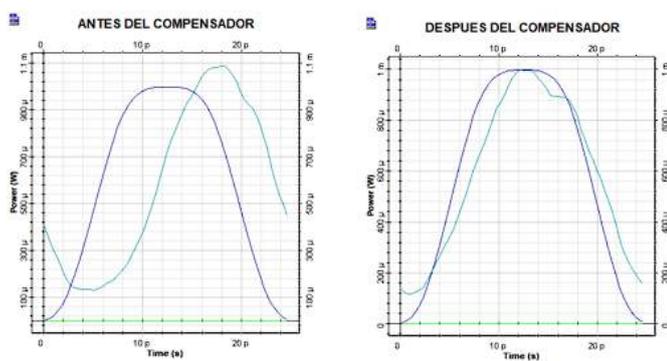


**Ilustración 4-48.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 48-4, se evidencia un déficit en el efecto del post-compensador en términos de dispersión y ISI (Inter-Symbol Interference). Esta falta de mejora sugiere que el post-compensador no fue efectivo en este caso específico. La dispersión y el ISI no muestran una reducción significativa después de la aplicación del post-compensador, lo que indica que no ha logrado corregir eficazmente estos problemas en la transmisión de la señal óptica.

#### 4.3.2.2 Post-compensador caso 2: 1400nm; L=2000 Km; Vtx=40 Gbps; $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$

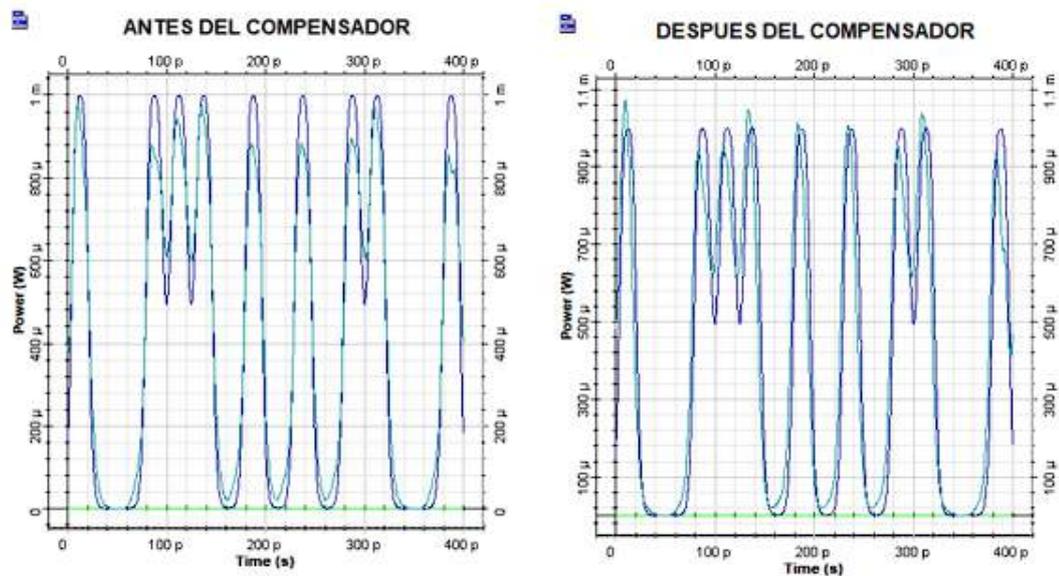


**Ilustración 4-49.** Análisis de dos muestras bajo mismas condiciones en post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 49-4, se observa una mejora notable en la dispersión, donde los efectos de dispersión parecen haber sido mitigados de manera efectiva por el post-compensador. Sin embargo, en términos de atenuación, los valores se mantienen en línea con los observados antes

de la compensación, lo que sugiere que el post-compensador no afectó significativamente la atenuación de la señal. En general, estos resultados indican que el efecto del post-compensador fue útil para mejorar la dispersión de la señal, aunque no tuvo un impacto significativo en la atenuación.

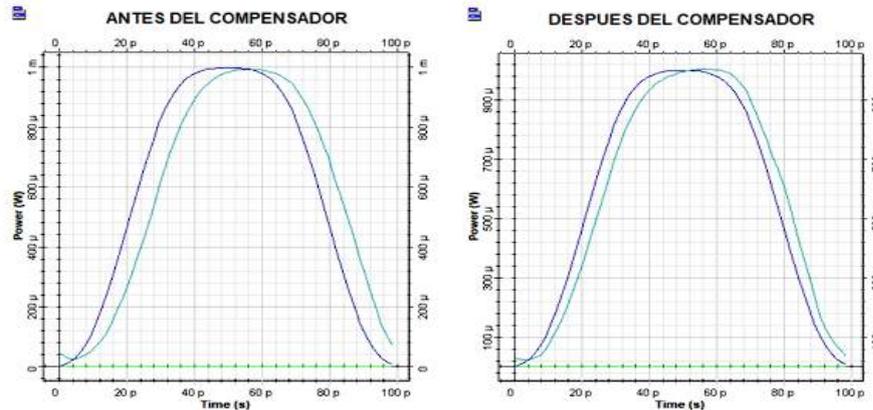


**Ilustración 4-50.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 50-4, se observa una mejora visible en la atenuación después de aplicar el post-compensador. Este resultado sugiere que el post-compensador ha sido efectivo para reducir la pérdida de señal a lo largo de la transmisión. La atenuación es un factor crucial en la calidad de la señal, y una disminución en la misma indica una mejora en la integridad y la fuerza de la señal transmitida. Por lo tanto, podemos concluir que el post-compensador ha demostrado ser útil en este caso al mejorar la atenuación de la señal, lo que contribuye a una transmisión más confiable y eficiente.

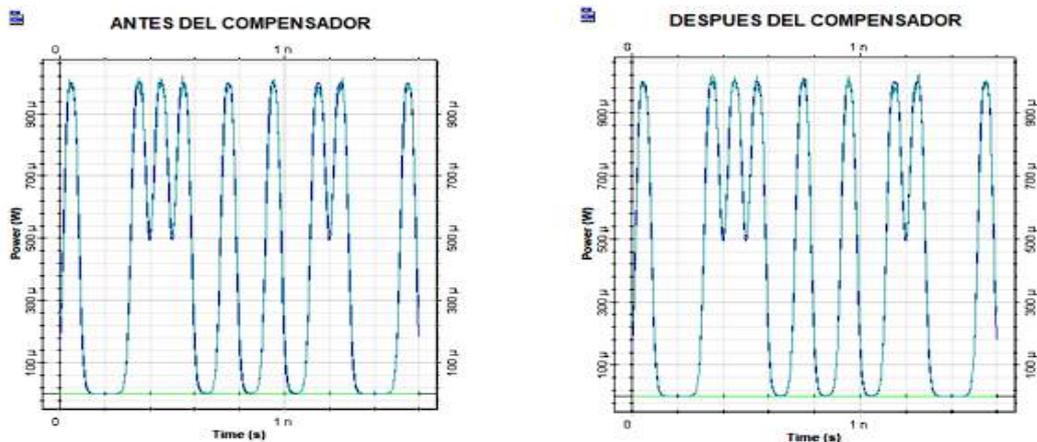
4.3.2.3 Post-compensador caso 3:  $1400\text{nm}$ ;  $L=5000\text{ Km}$ ;  $V_{tx}=10\text{ Gbps}$ ;  $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-51.** Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 51-4, se observa una mejora notable en términos de dispersión. Esto se evidencia por el desplazamiento del pulso recibido respecto al pulso original transmitido, indicando que el pulso ha recorrido alrededor de 8 ps en dirección al pulso original. Este cambio en la posición del pulso indica una reducción en los efectos de dispersión, lo cual es una señal positiva de mejora en la integridad de la señal. Además, en términos de atenuación, los valores se conservan, lo cual es beneficioso ya que no se observa una pérdida significativa de calidad en la transmisión. En conjunto, estos resultados sugieren que el post-compensador ha sido efectivo para mitigar los efectos de la dispersión sin comprometer la atenuación, lo que contribuye a una transmisión más confiable y estable.

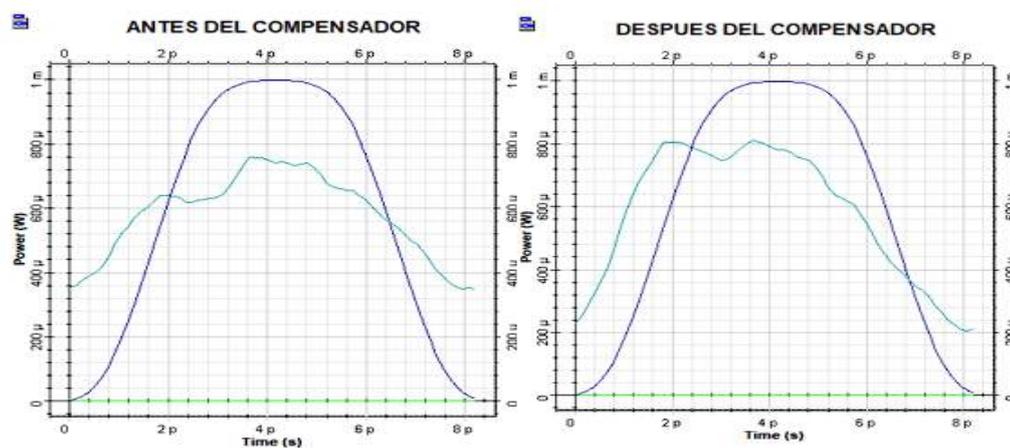


**Ilustración 4-52.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 52-4, se observa que no se detectan fallos significativos en términos de atenuación ni de dispersión. Los valores de ambas variables se mantienen dentro de los rangos esperados y no muestran signos de degradación en la calidad de la señal. Este resultado sugiere que el post-compensador ha sido efectivo en su función de mitigar los efectos adversos de la dispersión sin introducir pérdidas adicionales en términos de atenuación. En consecuencia, se puede concluir que el post-compensador ha demostrado ser eficiente en este caso, contribuyendo a una transmisión confiable y estable.

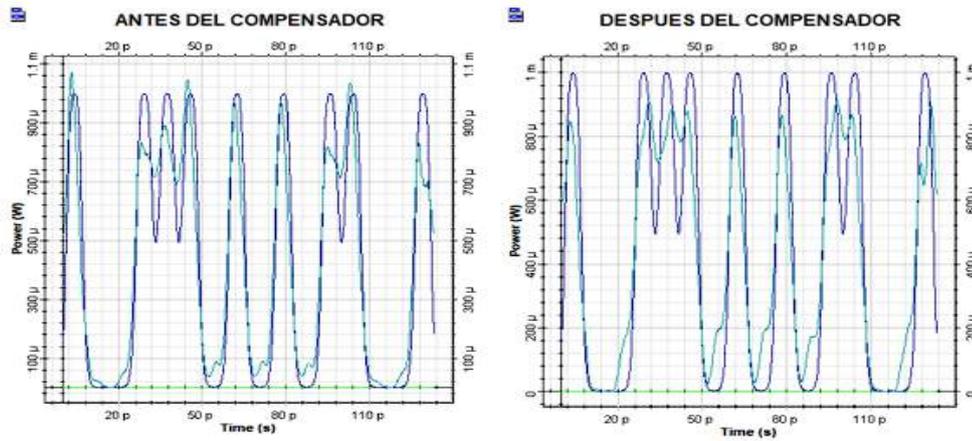
#### 4.3.2.4 Post-compensador caso 4: 1550nm; L=1000 Km; Vtx=120 Gbps; $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-53.** Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 53-4, se aprecia una mejora notable en términos de atenuación, lo cual indica que el post-compensador ha sido efectivo en reducir las pérdidas de señal durante la transmisión. Sin embargo, es importante destacar que la dispersión se mantiene en niveles similares, a pesar del uso del post-compensador. Esto sugiere que si bien se ha logrado mejorar la atenuación, la compensación de la dispersión no ha sido tan efectiva. Es posible que el diseño o la configuración del post-compensador no sean óptimos para abordar completamente los efectos de la dispersión en este caso particular. Por lo tanto, aunque se observa una mejora en un aspecto crucial como la atenuación, la falta de impacto significativo en la dispersión indica que podrían ser necesarios ajustes adicionales para optimizar la eficacia del post-compensador.

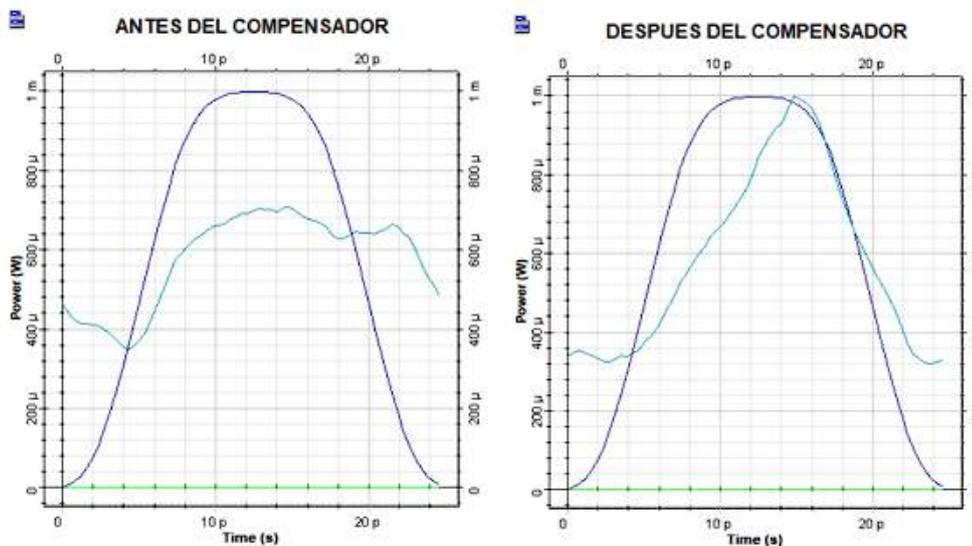


**Ilustración 4-54.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 54-4, se observa una mejora notable en términos de dispersión en comparación con los resultados anterior. Esto sugiere que el post-compensador ha sido efectivo en mitigar los efectos adversos de la dispersión en la señal transmitida. La reducción en la dispersión indica una mayor estabilidad en la transmisión de la señal, lo que podría traducirse en una mejor calidad de la comunicación. Esta mejora en la dispersión sugiere que el post-compensador está cumpliendo su función de corregir los efectos indeseados de la dispersión en la señal óptica.

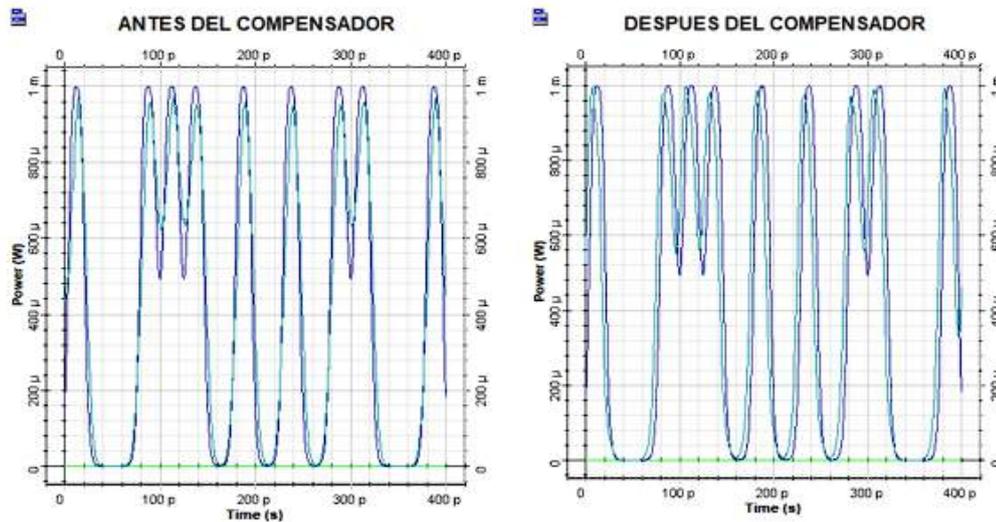
4.3.2.5 Post-compensador caso 5:  $1550\text{nm}$ ;  $L=2000\text{ Km}$ ;  $V_{tx}=40\text{ Gbps}$ ;  $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-55.** Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 55-4, se evidencia una mejora significativa en la atenuación, lo que indica que el post-compensador ha sido efectivo para reducir las pérdidas de señal durante la transmisión. Esta mejora es un indicador positivo de la eficacia del post-compensador en este escenario particular. Además, se observa una mejora considerable en la dispersión, lo que sugiere que el post-compensador también ha sido capaz de mitigar los efectos adversos de la dispersión en la señal óptica. Esta mejora en la dispersión contribuye a una mayor estabilidad en la transmisión de la señal, lo que es fundamental para garantizar una comunicación confiable.

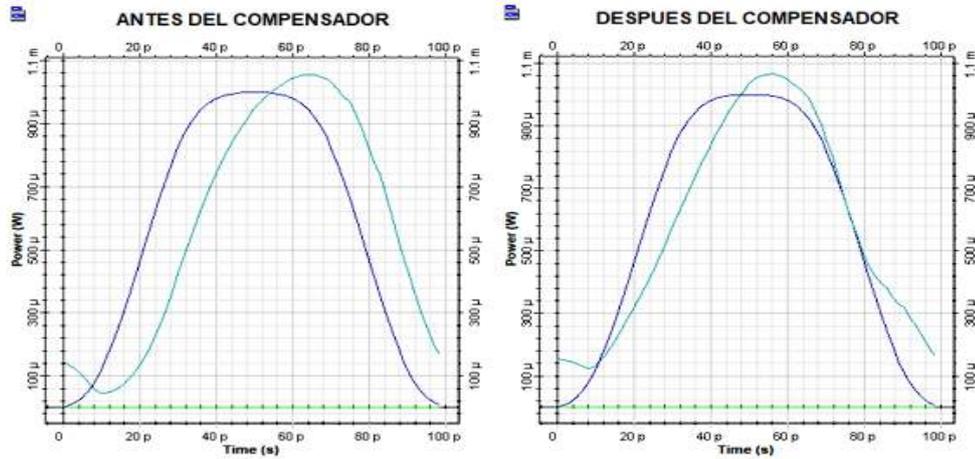


**Ilustración 4-56.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 56-4, se observa una clara mejora tanto en términos de dispersión como de atenuación. Esto sugiere que el post-compensador ha logrado corregir eficazmente los efectos adversos de la dispersión y las pérdidas de señal durante la transmisión. La mejora en la dispersión es especialmente notable, ya que una menor dispersión contribuye a una transmisión de señal más estable y confiable. Además, la reducción en la atenuación es crucial para garantizar que la señal transmitida conserve su integridad y pueda ser correctamente interpretada en el receptor.

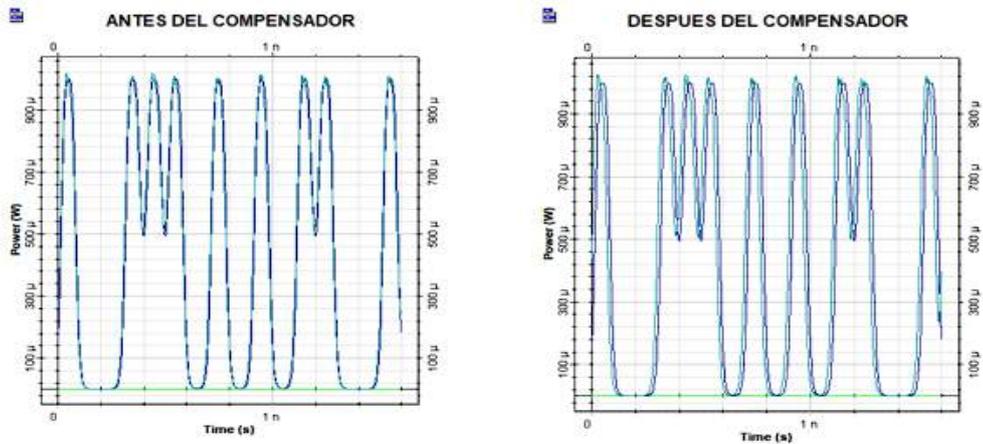
4.3.2.6 Post-compensador caso 6: 1550nm; L=5000 Km; Vtx=10 Gbps;  $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$



**Ilustración 4-57.** Análisis de dos muestras bajo las mismas condiciones en el post-compensador

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 57-4, se puede apreciar una mejora significativa en términos de atenuación en comparación con el caso anterior. Aunque se observa un traslado de 10ps en el pulso, lo que podría indicar una leve desviación en el tiempo de llegada de la señal, esta mejora en la atenuación es alentadora ya que contribuye a una transmisión más eficiente y confiable de la señal óptica. Por otro lado, en el primer caso, si bien no se registra una mejora en la atenuación, se observa una mejora en la dispersión. Esto sugiere que, aunque la señal experimenta un traslado en el tiempo, la calidad de la transmisión se beneficia de una menor dispersión, lo que podría compensar cualquier pérdida de señal.



**Ilustración 4-58.** Análisis de dos muestras de una cadena de caracteres bajo las mismas condiciones

Realizado por: Torres D., 2024.

En la ilustración 58-4, se evidencia una mejora significativa en términos de atenuación, a pesar de observarse un traslado de la señal de 10ps. Este resultado es alentador, ya que indica que el compensador ha logrado mitigar la pérdida de señal durante la transmisión óptica. Aunque el traslado de 10ps puede sugerir una leve desviación en el tiempo de llegada de la señal, la mejora en la atenuación es un factor crucial para garantizar una transmisión eficiente y confiable de la información.

### **Conclusiones del apartado del post-compensador de una etapa**

A diferencia del pre-compensador, aquí si se tuvo resultados favorables para algunos de los casos analizados, esto dependiendo en gran magnitud de la distancia a la cual se dio el análisis, así como la longitud de onda aplicada. Se destaca que la compensación resulto útil para análisis a largas distancias donde se pudo evidenciar en la recepción un factor Q favorable lo cual denota una buena transmisión.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

Se estudiaron las características físicas y mecánicas según el estándar ITUT G.655, mediante un análisis exhaustivo de escenarios de simulación. Se evaluaron las implicaciones de la dispersión de modo de polarización (PMD) en la transmisión óptica y se exploraron técnicas de compensación con pre y post-compensadores.

Se analizaron los niveles de dispersión y atenuación de pulsos de luz mediante el software OptiSystem, revelando la complejidad de estos efectos en la transmisión óptica. Se destacó la importancia de considerar valores adecuados para características como velocidad de transmisión, longitud de fibra y coeficiente PMD.

Se evidenció cómo la PMD afecta la integridad de los pulsos de luz durante su propagación, influyendo en la dispersión y atenuación de la señal. Estos hallazgos son cruciales para el diseño de sistemas de comunicación óptica más eficientes y confiables.

## **RECOMENDACIONES**

Se sugiere llevar a cabo una optimización continua en el diseño de sistemas de comunicación óptica, considerando detalladamente los efectos de la PMD según el estándar ITU-T G.655. Esto implica realizar simulaciones con más de un compensador, así como el uso de amplificadores para las longitudes de onda que reaccionen mejor a los mismos.

En cuanto a los requerimientos del sistema empiezan a tomar importancia para simulaciones que conlleven una cadena de caracteres extensa, una velocidad de transmisión elevada y una distancia de trabajo sobre los 5000km.

Se debe considerar que para tener un resultado óptimo realizar una comprobación con ejemplos de poca complejidad para así asegurar la eficacia del sistema.

Para un análisis más exhaustivo de las variables como atenuación, dispersión, factores de calidad y tasa de errores de bit, realizar una conexión con software matemáticos como Matlab los cuales si son soportados por el software utilizado en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **AGUINAGA, E; et al.** *Estudio evaluativo de las propiedades fisico-mecánicas de bloques de concreto translúcido con fibra óptica* [en línea]. 2022. Disponible en: [www.coursehero.com](http://www.coursehero.com). 2022.
2. **ALTAMAR, J; et al.** *Diseño de una red de fibra óptica para el suministro de internet hogar en la comunidad del barrio altos de Aeromar - Santa Marta, Magdalena*. 2021.
3. **ALUSTIZA, D; et al.** Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado de magnitudes relevantes en ingeniería civil. *Revista de ingeniería*, vol. 1, no. 1. 2019.
4. **ÁLVAREZ, M; et al.** Reingeniería del proceso administrativo de gestión inmobiliaria en una empresa de telecomunicaciones. *Revista Científica Profundidad Construyendo Futuro*, vol. 13, no. 13, ISSN 2422-1783. DOI 10.22463/24221783.2551. 2020.
5. **BORBOR, M; et al.** *Análisis y diseño de una red de fibra óptica para brindar servicios de telecomunicaciones en las parroquias rurales Guale y Lascano – provincia de Manabí*. 2022.
6. **BURGA, A..** *Simulación para la detección de fallas de estructuras petroleras por medio de sensado acústico distribuido con fibra óptica*. 2022.
7. **CADENA, J.** *Análisis y simulación del fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas ITU-T G.655*. 2017.
8. **CADENA, J; et al.** Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en Fibras Ópticas ITU-T G.655 Analysis and Simulation of the Polarization Mode Dispersion Phenomenon using ITU-T G.655 Optical Fibers. *Revista Politécnica*, vol. 43, no. 2, 2019.
9. **CAMACHO, J.** *Diseño del cableado estructurado backbone horizontal en fibra óptica para mejorar la velocidad de transmisión de datos en la empresa industrial Cerámica San Lorenzo en las plantas de producción 1 y 2 basándose en el estándar ANSI/TIA/EIA-568-A y TIA/EIA-568-B.3* [en línea]. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/625694>. 2019.
10. **CANDO, C.** *Análisis comparativo entre NGPON2 Y GPON para mejorar el desempeño de las redes pasivas de fibra óptica FTTH*. 2020.
11. **CANO, R.** *Simulador de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes*. 2022.
12. **CASTAÑEDA, P.** *Análisis y simulación del fenómeno de dispersión cromática en las fibras ópticas monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655*. 2018.
13. **CHAN, A.** *Fibra óptica: Evolución, estándares y aplicaciones*. 2020.

14. **CHEPKOIWO, H; et al.** Performance of 1550 nm VCSEL at 10 Gb/s in G.655 and G.652 SSMF. *International Journal of Sustainability Management and Information Technologies*, vol. 6, no. 1, ISSN 2575-5102. DOI 10.11648/j.ijsm.20200601.12. 2020.
15. **CONCHE, C; et al.** *La red dorsal nacional de fibra óptica y su influencia en el servicio de internet en el Perú* [en línea]. 2021. Disponible en: <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5651>.
16. **COTÍ, J.** *Diseño de investigación de una aplicación móvil para el control del desarrollo de ATP de proyectos en planta externa de anillos principales core de fibra óptica en una empresa de telecomunicaciones*. 2022.
17. **CUVAS, J.** *Estudio de las propiedades ópticas de nanopartículas plasmónicas fotodepositadas sobre fibras ópticas bajo la influencia de un campo coherente*. 2020.
18. **DURAN, M.** *Diseño e implementación de láseres de fibra óptica basados en reflectores pseudoaleatorios cuasidistribuidos*. 2022.
19. **ESPINOSA, J.** Gestionando la innovación desde la óptica de los estudios de ciencia, tecnología y sociedad: por una perspectiva constructivista y crítica de la gestión de la innovación. *Cadernos*, vol. 17, no. 1, DOI 10.1590/1679-395171625. 2019.
20. **GARCIA, L; et al.** Fiber Optic Reflectance Spectroscopy (FORS) of the main siliceous rock quarries in Andalusia and its application to the identification of the origin of lithic artifacts carved during Prehistory. *Complutum*, vol. 33, no. 1, ISSN 19882327. DOI 10.5209/cmpl.80885. 2022.
21. **GODOY, P; et al.** Características y ventajas existentes en la conexión inalámbrica y fibra óptica. Una revisión bibliográfica. *Journal of Engineering Science* [en línea], vol. 4, no. 9, ISSN 28065883. DOI 10.53734/esci.vol4.id224. Disponible en: <https://revista.estudioidea.org/ojs/index.php/esci/article/view/224>. 2022.
22. **JIJÓN, M; et al.** *Análisis de factores que influyen en la transmisión del cable de fibra óptica*. 2017.
23. **LANDIVAR, M.** Acoplamiento de la electrodinámica de maxwell-chern-simons a un campo gravitacional en presencia de un medio optico no dispersivo en 2+1. *Revista bolivariana de física*, vol. 39, no. 39, DOI 10.53287/qutt4741ow61q. 2021.
24. **LÓPEZ, J.** *Sistemas de alimentación remota con fibras ópticas en sistemas de comunicaciones y sensado*. 2022.
25. **MUÑOZ, M; et al.** Análisis de propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas. *Revista Perspectivas* [en línea], vol. 5, no. 2, ISSN 2661-6688. DOI 10.47187/perspectivas.5.2.200.2023. Disponible en: [http://perspectivas.esPOCH.edu.ec:8081/index.php/RCP\\_ESPOCH/article/view/200](http://perspectivas.esPOCH.edu.ec:8081/index.php/RCP_ESPOCH/article/view/200).

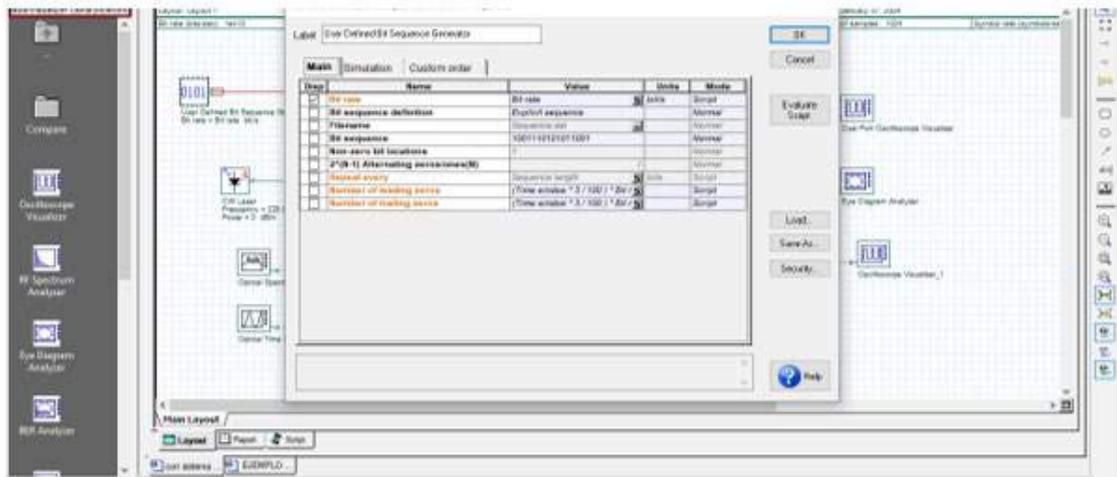
26. **NIETO, A; et al.** Análisis de un patrón de moteado de fibra óptica plástica con procesamiento digital de imágenes. *Verano de la ciencia* [en línea], vol. 1, no. 1, 2020. Disponible en: [www.veranos.ugto.mx](http://www.veranos.ugto.mx).
27. **PELÁEZ, D.** *Sobre los fundamentos geométricos de la propagación de la luz en medios* [en línea]. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. 2023 Disponible en: <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/9686>.
28. **PEÑARANDA, M; et al.** Diseño de fibras ópticas con dispersión modificada. *Revista Independiente* [en línea], vol. 5, no. 2, 2019. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/228899232>.
29. **POPOCA, F.** *Simulador interactivo sobre funcionamiento y aplicaciones de la fibra óptica*. 2018.
30. **QURESHI, K; et al.** Radio over fiber front haul link design using Optisystem. *Journal of Optical Communications*, vol. 3, no. 7, ISSN 01734911. DOI 10.1515/joc-2020-0074. 2020.
31. **RADICELLI, C; et al.** Red óptica pasiva para proveer de Internet a la ciudad de Riobamba. *Espacios*, vol. 40, no. 40, 2019.
32. **RAMOS, A.** *Diseño e implementación de una red de acceso con fibra óptica utilizando tecnología VDSL/FTTX para mejorar los servicios de telecomunicaciones de la corporación nacional de telecomunicaciones empresa pública en Guano*. 2019.
33. **REVELO, M.** Análisis de normativas para redes GPON y la calidad de servicio en Ecuador. *Recinatur internacional*, vol. 1, no. 1, 2019.
34. **RODRIGUEZ, Y.** Fibra óptica. [en línea]. 2018. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com>.
35. **ROJAS, J; et al.** Caracterización de un conversor de luz a frecuencia TSL235R-LF, para su aplicación en un sistema de comunicación por luz visible. *Revista EIA*, vol. 17, no. 34, ISSN 1794-1237. DOI 10.24050/reia.v17i34.1139. 2020.
36. **SANI, J.** *Diseño, evaluación de una red FTTH utilizando Optisystem y estrategia para la obtención de concesión que permita brindar servicios triple play*. 2022.
37. **SANTIAGO, J.** *Algoritmos y arquitecturas hardware para la implementación de OFDM en sistemas de comunicaciones ópticos*. 2018.
38. **SELVENDRAN, S; et al.** Certain Investigation on Visible Light Communication with OFDM Modulated White LED Using Optisystem Simulation. *Wireless Personal Communications*, vol. 109, no. 2, ISSN 1572834X. DOI 10.1007/s11277-019-06617-2. 2019.
39. **VARGAS, I.** Sistemas de fibra óptica. [en línea]. 2018. Disponible en: [www.icatron.org](http://www.icatron.org).

40. **VERGEL, F; et al.** *Estudio y análisis de las atenuaciones y potencias ópticas para la optimización del presupuesto óptico mediante pruebas en una red FTTH en el cantón Durán sector Los helechos.* 2022.

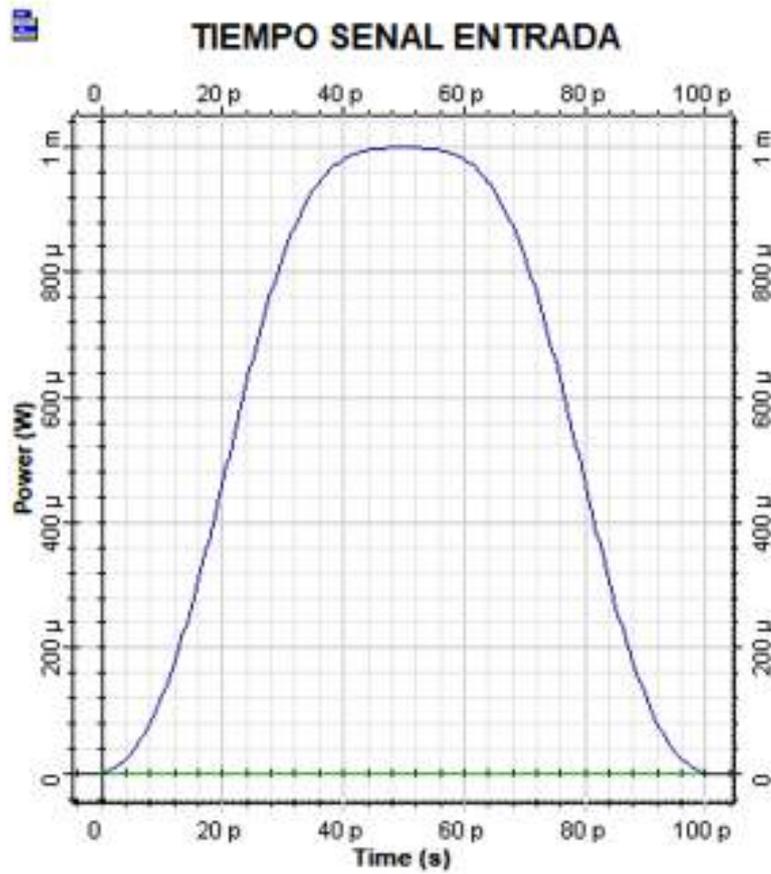


## ANEXOS

### ANEXO A: CADENA DE CARACTERES



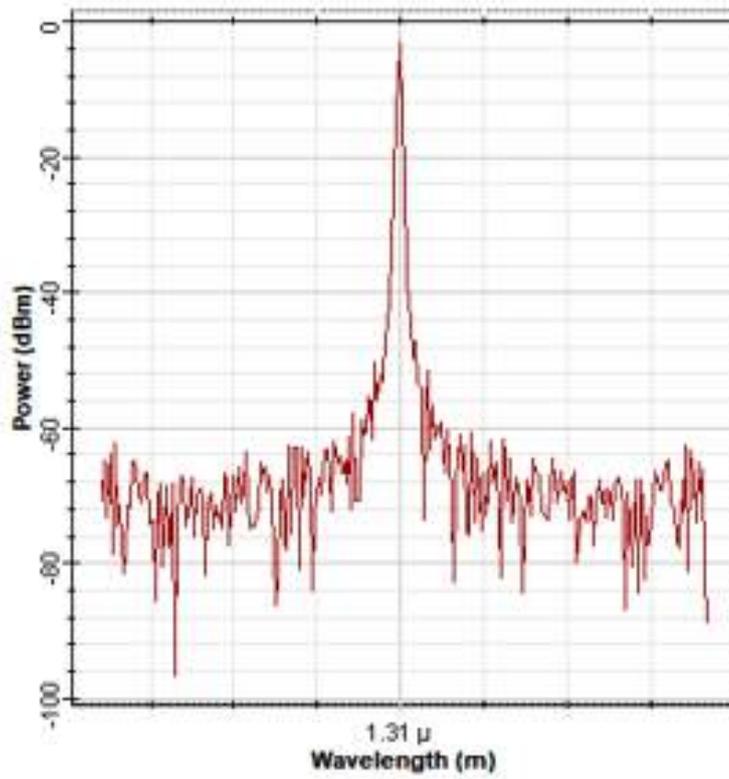
### ANEXO B: ENTRADA TIEMPO



## ANEXO C: ENTRADA ESPECTRO



### ESPECTRO SENAL ENTRADA



**ANEXO D: G.655 – G.655.A ATRIBUTOS**

<b>Atributos de la fibra</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550 nm
	Gama de valores nominales	8-11 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,8 $\mu\text{m}$
No circularidad del revestimiento	Máximo	2,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1450 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,50 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática Gama de longitudes de onda: 1530-1565 nm	$\lambda_{\text{mín}}$ y $\lambda_{\text{máx}}$	1530 nm y 1565 nm
	Valor mínimo de $D_{\text{mín}}$	0,1 ps/nm·km
	Valor máximo de $D_{\text{máx}}$	6,0 ps/nm·km
	Signo	Positivo o negativo
Coeficiente PMD de la fibra no cableada	Máximo	(Véase la nota)
<b>Atributos del cable</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1550 nm	0,35 dB/km
Coeficiente PMD	M	20 cables
	Q	0,01 %
	PMD <sub>Q</sub> máxima	0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – El fabricante del cable puede especificar un coeficiente PMD máximo opcional de fibra no cableada para soportar los requisitos primarios de PMD <sub>Q</sub> del cable, si ese valor se ha comprobado para un determinado tipo de construcción del cable.		

**ANEXO E: G.655 – G.655.B ATRIBUTOS**

<b>Atributos de la fibra</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550 nm
	Gama de valores nominales	8-11 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,8 $\mu\text{m}$
No circularidad del revestimiento	Máximo	2,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1450 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,50 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática Gama de longitudes de onda: 1530-1565 nm	$\lambda_{\text{mín}}$ y $\lambda_{\text{máx}}$	1530 nm y 1565 nm
	Valor mínimo de $D_{\text{mín}}$	1,0 ps/nm·km
	Valor máximo de $D_{\text{máx}}$	10,0 ps/nm·km
	Signo	Positivo o negativo
	$D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}$	$\leq 5,0$ ps/nm·km
Coeficiente de dispersión cromática Gama de longitudes de onda: 1565-1625 nm	$\lambda_{\text{mín}}$ y $\lambda_{\text{máx}}$	TBD
	Valor mínimo de $D_{\text{mín}}$	TBD
	Valor máximo de $D_{\text{máx}}$	TBD
	Signo	Positivo o negativo
Coeficiente de PMD de fibra no cableada	Máximo	(Véase la nota)
<b>Atributos de cable</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1550 nm	0,35 dB/km
	Máximo a 1625 nm	0,4 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD <sub>Q</sub> máximo	0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – El fabricante del cable puede especificar un coeficiente PMD máximo opcional de fibra no cableada para soportar los requisitos primarios de PMD <sub>Q</sub> del cable, si ese valor se ha comprobado para un determinado tipo de construcción del cable.		

**ANEXO F: G.655 – G.655.C ATRIBUTOS**

<b>Atributos de la fibra</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550 nm
	Gama de valores nominales	8-11 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,8 $\mu\text{m}$
No circularidad del revestimiento	Máximo	2,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1450 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,50 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática Gama de longitudes de onda: 1530-1565 nm	$\lambda_{\text{mín}}$ y $\lambda_{\text{máx}}$	1530 nm y 1565 nm
	Valor mínimo de $D_{\text{mín}}$	1,0 ps/nm·km
	Valor máximo de $D_{\text{máx}}$	10,0 ps/nm·km
	Signo	Positivo o negativo
	$D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}$	$\leq 5,0$ ps/nm·km
Coeficiente de dispersión cromática Gama de longitudes de onda: 1565-1625 nm	$\lambda_{\text{mín}}$ y $\lambda_{\text{máx}}$	TBD
	Valor mínimo de $D_{\text{mín}}$	TBD
	Valor máximo de $D_{\text{máx}}$	TBD
	Signo	Positivo o negativo
Coeficiente de PMD de fibra no cableada	Máximo	(Véase la nota)
<b>Atributos de cable</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1550 nm	0,35 dB/km
	Máximo a 1625 nm	0,4 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD <sub>Q</sub> máximo	0,20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – El fabricante del cable puede especificar un coeficiente PMD máximo opcional de fibra no cableada para soportar los requisitos primarios de PMD <sub>Q</sub> del cable, si ese valor se ha comprobado para un determinado tipo de construcción del cable.		

**ANEXO G: G.655 – G.655.D ATRIBUTOS**

<b>Fibre attributes</b>		
<b>Attribute</b>	<b>Detail</b>	<b>Value</b>
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Attenuation coefficient (Note 2)	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
	Maximum at 1625 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient (Note 3)	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD <sub>Q</sub>	0.20 ps/√km
<p>NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD<sub>Q</sub> value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD<sub>Q</sub>.</p> <p>NOTE 2 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cables as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm.</p> <p>NOTE 3 – Larger PMD<sub>Q</sub> values (e.g., ≤ 0.5 ps/√km) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.</p>		

**ANEXO H: G.655 – G.655.E ATRIBUTOS**

<b>Fibre attributes</b>		
<b>Attribute</b>	<b>Detail</b>	<b>Value</b>
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	± 0.6 μm
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	± 1 μm
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm·km)	$D_{min}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$
	$D_{min}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{3.30}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
	$D_{max}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{4.12}{75}(\lambda - 1550) + 9.31$
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Attenuation coefficient (Note 2)	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
	Maximum at 1625 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient (Note 3)	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD <sub>Q</sub>	0.20 ps/√km
<p>NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD<sub>Q</sub> value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD<sub>Q</sub>.</p> <p>NOTE 2 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cables as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm.</p> <p>NOTE 3 – Larger PMD<sub>Q</sub> values (e.g., ≤ 0.5 ps/√km) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.</p>		

#### ANEXO I: FIBRA ± LÍMITES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Chromatic dispersion coefficient (ps/nm·km)	$D_{min}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{6.94}{90}(\lambda - 1460) - 3.34$
	$D_{min}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{3.13}{75}(\lambda - 1550) + 3.60$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{2.78}{90}(\lambda - 1460) + 2.60$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{5.28}{75}(\lambda - 1550) + 5.38$

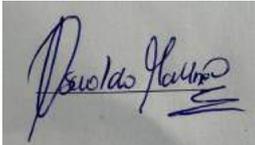
#### ANEXO J: FIBRA ± UN LÍMITE DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Chromatic dispersion coefficient (ps/nm·km)	$D_{min}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{5.28}{90}(\lambda - 1460) + 1.68$
	$D_{min}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{3.05}{75}(\lambda - 1550) + 6.96$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1460-1550 nm	$\frac{4.56}{90}(\lambda - 1460) + 3.89$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1550-1625 nm	$\frac{3.96}{75}(\lambda - 1550) + 8.45$



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 22/ 05 / 2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Diego Andres – Torres Clavijo
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Informática y Electrónica
<b>Carrera:</b> Telecomunicaciones
<b>Título a optar:</b> Ingeniera en Telecomunicaciones
 <b>Ing. Oswaldo Geovanny Martínez Guashima</b> <b>Director del Trabajo de Titulación</b>  <b>Ing. Verónica Elizabeth Mora Chunlo</b> <b>Asesora del Trabajo de Titulación</b>