

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN FIBRAS ÓPTICAS ITU-T G.655

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

JORGE GABRIEL CADENA PAREDES

(jgcp.91@gmail.com)

DIRECTORA: M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ

(maria.jimenez@epn.edu.ec)

Quito, junio de 2017

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Gabriel Cadena Paredes, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jorge Gabriel Cadena Paredes

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Gabriel Cadena Paredes, bajo mi supervisión.

M.Sc. María Soledad Jiménez
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primero a Dios por sobre todas las cosas, por permitirme cumplir con una meta más en mi vida, dándome las fuerzas necesarias para no desistir y siempre salir adelante.

A mi familia, especialmente a mi papá Gabriel y a mi mamá Kruskaya, por su apoyo, cariño, comprensión y esfuerzo, que me han permitido llegar a ser lo que ahora soy, por darme su amor incondicional y sus sabias enseñanzas todos estos años y por darme una excelente educación, no solo académica. Gracias, por ustedes soy lo que soy.

A mi hermana Andreina por su paciencia y comprensión todos estos años y por su apoyo incondicional.

A mis amigos que me acompañaron esta etapa de mi vida. Esta etapa termina y comienza una nueva, espero seguir contando con ustedes por siempre.

A mi directora de tesis, la MSc María Soledad Jiménez, quien fue mi guía durante todo este proceso, otorgándome su apoyo y conocimiento que me permitieron desarrollar este trabajo de la mejor manera.

Finalmente agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por la formación personal y profesional que brinda a todos los estudiantes que hemos pasado por sus aulas, sembrando las bases de nuestro futuro.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a todas y cada una de las personas que estuvieron conmigo todo este tiempo y han demostrado que soy una parte importante en sus vidas. A mis padres, hermana, familiares y amigos que han aportado algo importante en mi vida y por los que ahora soy lo que soy.

Jorge

CONTENIDO

RESUMEN	XVIII
PRESENTACIÓN	XX
CAPÍTULO 1	1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN EN FIBRA	
ÓPTICA.....	1
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE FIBRA ÓPTICA.....	1
1.1.1 DEFINICIÓN DE FIBRA ÓPTICA	1
1.1.2 PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA.....	2
1.1.2.1 Ley de la Reflexión.....	2
1.1.2.2 Ley de la Refracción (Ley de Snell).....	3
1.1.2.3 Índice de Refracción	4
1.1.2.4 Principio de Reflexión Interna Total (RIT).....	4
1.1.2.5 Modo de Propagación	5
1.1.2.6 Vector de Onda y Constante de Propagación	6
1.1.2.7 Velocidad de Grupo y Velocidad de Fase.....	7
1.1.3 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	8
1.1.3.1 Fibras Multimodo	8
1.1.3.2 Fibras Monomodo.....	10
1.1.4 DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL EN LA FIBRA ÓPTICA	11
1.1.4.1 Atenuación	11
1.1.4.2 Dispersión	13
1.1.4.2.1 Dispersión Modal	14
1.1.4.2.2 Dispersión Cromática	15
1.1.4.2.3 Dispersión por Modo de Polarización (PMD).....	17
1.1.4.2.4 Dispersión Total	18
1.1.5 FIBRAS DE CARACTERÍSTICAS ESPECIALES	18
1.1.5.1 Fibras Monomodo de Dispersión Desplazada (DSF)	18
1.1.5.1.1 Fibras de Dispersión Desplazada Nula (ZDSF).....	20
1.1.5.1.2 Fibras de Dispersión Desplazada No Nula (NZDSF).....	21
1.1.5.1.3 Descripción del estándar ITU-T G.655	22

1.1.5.2	Fibras Mantenedoras de Polarización (HI-BI PM).....	28
1.2	ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN	29
1.2.1	DEFINICIÓN DE PMD	29
1.2.2	POLARIZACIÓN DE LA LUZ	32
1.2.2.1	La Luz Polarizada.....	33
1.2.2.1.1	Polarización Lineal.....	33
1.2.2.1.2	Polarización Circular.....	34
1.2.2.1.3	Polarización Elíptica	35
1.2.2.2	La Luz No Polarizada.....	36
1.2.3	SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN DE LA POLARIZACIÓN	36
1.2.3.1	Vector Campo Eléctrico	36
1.2.3.2	La Elipse de Polarización	38
1.2.3.3	Sistema de Representación de Jones.....	39
1.2.3.4	Sistema de Representación de Stokes-Mueller	42
1.2.4	DEFINICIÓN DE BIRREFRINGENCIA	45
1.2.4.1	Birrefringencia en la Fibra Óptica	45
1.2.4.2	Acoplamiento de Modos	48
1.2.5	RETARDO DIFERENCIAL DE GRUPO (DGD).....	49
1.2.5.1	DGD en Fibras con Birrefringencia Constante	50
1.2.5.2	DGD en Fibras con Birrefringencia Aleatoria.....	51
1.2.5.3	Expresiones Matemáticas del DGD.....	52
1.2.6	COEFICIENTE DE PMD	53
1.2.7	LONGITUD DE BATIMIENTO.....	55
1.2.8	ANÁLISIS MATEMÁTICO DE PMD.....	55
1.2.8.1	Aplicación del Sistema de Jones en Fibra Óptica.....	55
1.2.8.2	Aplicación del Sistema de Stokes-Mueller en Fibra Óptica	57
1.2.9	EL VECTOR PMD	58
1.2.10	PMD DE SEGUNDO ORDEN	59
1.2.11	COMPENSACIÓN DE PMD	61
1.2.11.1	Compensación Óptica.....	62
1.2.11.2	Compensación Electrónica.....	65

CAPÍTULO 2.....	66
IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIO, CÁLCULOS Y SIMULACIÓN.....	66
2.1 ELECCIÓN DEL SIMULADOR.....	66
2.1.1 NLSE SOLVER.....	66
2.1.1.1 Características.....	67
2.1.1.2 Descripción de la Interfaz Gráfica.....	67
2.1.2 OPTSIM.....	69
2.1.2.1 Características.....	69
2.1.2.2 Aplicaciones.....	70
2.1.3 OPTISYSTEM.....	71
2.1.3.1 Características.....	72
2.1.3.2 Aplicaciones.....	73
2.1.4 COMPARACIÓN Y ELECCIÓN.....	74
2.2 EL SIMULADOR OPTISYSTEM.....	75
2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	77
2.2.1.1 Diseño del Proyecto.....	77
2.2.1.2 Dockers.....	77
2.2.1.2.1 Librería de Componentes.....	78
2.2.1.2.2 Navegador de Proyectos.....	79
2.2.1.2.3 Descripción.....	79
2.2.1.3 Barra de Estado.....	79
2.2.1.4 Barra de Menú.....	80
2.2.2 USO Y MANEJO DE OPTISYSTEM.....	80
2.2.2.1 Construcción de un Sistema Básico.....	80
2.2.2.2 Correr una Simulación.....	81
2.2.2.3 Mostrar Resultados en un Visualizador.....	82
2.2.2.4 Edición y Visualización de Parámetros.....	83
2.2.2.5 Edición y Visualización de Parámetros Globales.....	84
2.3 COMPONENTES NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN.....	85
2.3.1 USER-DEFINED BIT SEQUENCE GENERATOR.....	85
2.3.2 OPTICAL GAUSSIAN PULSE GENERATOR.....	87
2.3.3 OPTICAL FIBER.....	88
2.3.4 OPTICAL TIME DOMAIN VISUALIZER (OTDV).....	90

2.3.5	OPTICAL SPECTRUM ANALYZER (OSA)	91
2.3.6	POLARIZATION CONTROLLER	91
2.3.7	POLARIZATION SPLITTER Y POLARIZATION COMBINER	92
2.4	IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO	94
2.5	COMPROBACIÓN DEL SIMULADOR	95
2.5.1	EJEMPLO 1	95
2.5.2	EJEMPLO 2	102
2.6	SIMULACIÓN DE PMD EN FIBRAS NZDSF (ITU-T G.655)	106
2.6.1	COEFICIENTE PMD DE ENLACE (PMD_Q)	106
2.6.2	COEFICIENTE PMD ESTOCÁSTICO DE OPTISYSTEM	107
2.7	DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE PMD	111
CAPÍTULO 3		114
ANÁLISIS DE RESULTADOS		114
3.1	ENTORNO DE SIMULACIÓN DE PMD	114
3.2	ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE PMD	116
3.2.1	GRUPO 1, CASO 1: ϕ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2} ; L = 5000Km ; Vtx= 10 Gbps	116
3.2.2	GRUPO 1, CASO 2: ϕ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2} ; L = 2000Km ; Vtx= 40 Gbps	121
3.2.3	GRUPO 1, CASO 3: ϕ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2} ; L = 1000Km ; Vtx= 80 Gbps	123
3.2.4	GRUPO 1, CASO 4: ϕ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2} ; L = 1000Km ; Vtx= 140 Gbps	126
3.2.5	GRUPO 2, CASO 1: ϕ PMD = 0,1 ps/km ^{1/2} ; L = 5000Km ; Vtx= 10 Gbps	128
3.2.6	GRUPO 2, CASO 2: ϕ PMD = 0,1 ps/km ^{1/2} ; L = 5000Km ; Vtx= 40 Gbps	130
3.2.7	GRUPO 2, CASO 3: ϕ PMD = 0,1 ps/km ^{1/2} ; L = 2000Km ; Vtx= 80 Gbps	132
3.2.8	GRUPO 2, CASO 4: ϕ PMD = 0,1 ps/km ^{1/2} ; L = 2000Km ; Vtx= 140 Gbps	134

3.2.9	RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA TODOS LOS ESCENARIOS.....	135
3.2.10	ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE PMD	137
3.3	ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE COMPENSACIÓN DE PMD	138
3.3.1	SIMULACIÓN DE UN PRE-COMPENSADOR DE PMD	139
3.3.1.1	Pre-compensador: L = 5000 Km ; Vtx= 10 Gbps ; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	141
3.3.1.2	Pre-compensador: L = 2000 Km ; Vtx= 40 Gbps ; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	142
3.3.1.3	Pre-compensador: L = 1000 Km ; Vtx= 140 Gbps ; φ PMD = = 0,3 ps/km ^{1/2}	143
3.3.2	SIMULACIÓN DE UN POST-COMPENSADOR DE UNA ETAPA.....	144
3.3.2.1	Post-compensador de una etapa: L = 5000 Km ; Vtx= 10 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	147
3.3.2.2	Post-compensador de una etapa: L = 2000 Km ; Vtx= 40 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	151
3.3.2.3	Post-compensador de una etapa: L = 1000 Km ; Vtx= 140 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	155
3.3.3	SIMULACIÓN DE UN POST-COMPENSADOR DE DOS ETAPAS	160
3.3.3.1	Post-compensador de dos etapas: L = 5000 Km ; Vtx= 10 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	161
3.3.3.2	Post-compensador de dos etapas: L = 2000 Km ; Vtx= 40 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	165
3.3.3.3	Post-compensador de dos etapas: L = 1000 Km ; Vtx= 140 Gbps; φ PMD = 0,3 ps/km ^{1/2}	170
3.3.4	ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE COMPENSACIÓN PMD	174
CAPÍTULO 4.....		176
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		176

4.1	CONCLUSIONES	176
4.2	RECOMENDACIONES	179
	BIBLIOGRAFÍA	181
	ANEXOS	190
	ANEXO A. RECOMENDACIÓN ITU-T G.655	A-1
	ANEXO B. DATASHEET TERALIGHT NZDSF FIBRE	B-1
	ANEXO C. DATASHEET CORNING LEAF NZDSF FIBRE	C-1

TABLAS

Tabla 1.1 Atributos de G.655.A.	23
Tabla 1.2 Atributos de G.655.B.	24
Tabla 1.3 Atributos de G.655.C.	25
Tabla 1.4 Atributos de G.655.D.	26
Tabla 1.5 Atributos de G.655.E.	27
Tabla 1.6 Vector de Jones correspondiente a diferentes estados de polarización	40
Tabla 1.7 Vectores de Stokes para diferentes tipos de polarización.	44
Tabla 1.8 Coeficiente de PMD para velocidades de transmisión de 10 y 40 Gbps.....	54
Tabla 2.1 Comparación entre los tres simuladores.	74
Tabla 2.2 Esquema de los diferentes escenarios de simulación.	111
Tabla 2.3 Esquema de las diferentes técnicas de compensación a simularse.	112
Tabla 3.1 Resultados obtenidos para el grupo 1, $\varphi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$	136
Tabla 3.2 Resultados obtenidos para el grupo 1, $\varphi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$	137

FIGURAS

Figura 1.1 Estructura interna de la fibra óptica de vidrio.	2
Figura 1.2 Ley de la reflexión de la luz	3
Figura 1.3 Ley de la refracción o ley de Snell	3
Figura 1.4 RIT para diferentes ángulos de incidencia a) ángulo de incidencia menor al crítico, b) ángulo de incidencia igual al crítico, c) ángulo de incidencia mayor al crítico.	5
Figura 1.5 A, B, C, D, modos de propagación dentro de la fibra.	6
Figura 1.6 Fibra multimodo de índice escalonado.	9
Figura 1.7 Fibra multimodo de índice gradual.	9
Figura 1.8 Dimensiones de fibra multimodo y monomodo.	10
Figura 1.9 Ensanchamiento del pulso en diferentes tipos de fibra.	10
Figura 1.10 Tipos de pérdidas de potencia a través de la fibra óptica.	12
Figura 1.11 Curva de atenuación en la fibra y ventanas de transmisión	12
Figura 1.12 Ensanchamiento de pulsos debido a la dispersión.	14
Figura 1.13 Dispersión modal en una fibra multimodo	14
Figura 1.14 Anchura espectral de un haz de luz.	15
Figura 1.15 Ensanchamiento de un pulso debido a la dispersión cromática de material.	16
Figura 1.16 Curva de la dispersión cromática para fibras monomodo estándar. ...	17
Figura 1.17 Dispersión por Modo de Polarización.	18
Figura 1.18 Curva de dispersión en fibras DSF.	19
Figura 1.19 Perfil del índice de refracción para una fibra ZDSF comercial.	20
Figura 1.20 Curva de dispersión en fibras NZDSF	21
Figura 1.21 Perfil del índice de refracción para una fibra NZDSF.	22
Figura 1.22 Fibra mantenedora de polarización PANDA.	29
Figura 1.23 Propagación de un modo sin que exista PMD.	31
Figura 1.24 Ensanchamiento de un pulso debido a la PMD	31
Figura 1.25 Propagación de una onda transversal	32
Figura 1.26 Polarización lineal de una onda EM	33
Figura 1.27 Polarización circular de una onda EM	34
Figura 1.28 Polarización circular de una onda EM	35

Figura 1.29 Elipse de Polarización	38
Figura 1.30 Ejes transversales en fibra no birrefringente y birrefringente.	47
Figura 1.31 Deformación del núcleo de la fibra óptica	48
Figura 1.32 Propagación de un pulso a través de varios segmentos birrefringentes	48
Figura 1.33 Retardo diferencial de grupo	50
Figura 1.34 Distribución maxwelliana del DGD	51
Figura 1.35 Representación de un estado de polarización en base a sus parámetros de Stokes sobre la esfera de Poincaré.....	59
Figura 1.36 Naturaleza estadística de la SOPMD	60
Figura 1.37 Pre-compensador de PMD	62
Figura 1.38 Post-compensador de PMD	64
Figura 1.39. (a) Compensador con retardo fijo, (b) Compensador con retardo variable, (c) Compensador con dos retardos fijos, (d) Compensador con retardo fijo y variable	64
Figura 2.1 Interfaz Gráfica NLSE Solver	68
Figura 2.2 Interfaz gráfica OptSim.....	70
Figura 2.3 Creación de cuenta en Optiwave.com.....	76
Figura 2.4 Diseño del Proyecto de OptiSystem.	77
Figura 2.5 Librería de Componentes de OptiSystem.	78
Figura 2.6 Navegador de Proyectos de OptiSystem.	79
Figura 2.7 Descripción de OptiSystem.	79
Figura 2.8 Barra de Estado de OptiSystem.	80
Figura 2.9 Barra de Menú.....	80
Figura 2.10 Insertar componente la zona de diseño del proyecto.	81
Figura 2.11 Correr una simulación.	82
Figura 2.12 Resultados de un visualizador en el dominio del tiempo.	82
Figura 2.13 Ventana de Propiedades del componente Laser Measured.....	83
Figura 2.14 Propiedades del componente Laser Measured en el área de trabajo.	83
Figura 2.15 Ventana de Parámetros Globales.	84
Figura 2.16 Componente User-defined bit sequence generator.....	85

Figura 2.17 Parámetros del componente User-Defined Bit Sequence Generator.....	86
Figura 2.18 Componente Optical Gaussian Pulse Generator.....	87
Figura 2.19 Parámetros del componente Optical Gaussian Pulse Generator.	88
Figura 2.20 Componente Optical Fiber.....	88
Figura 2.21 Parámetros del componente Optical Fiber.	90
Figura 2.22 Componente Optical Time Domain Visualizer.....	90
Figura 2.23 Componente Optical Spectrum Analyzer.	91
Figura 2.24 Componente Polarization Controller.....	91
Figura 2.25 Parámetros del componente Polarization Controller.	92
Figura 2.26 Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner.	92
Figura 2.27 a) Parámetros del componente Polarization Splitter, b) Parámetros de componente Polarization Combiner	93
Figura 2.28 Entorno básico de simulación.....	94
Figura 2.29 Entorno de trabajo para el ejemplo 1.	97
Figura 2.30 Parámetros globales para el ejemplo 1.	98
Figura 2.31 Parámetros de User-Defined Bit Sequence Generator.....	98
Figura 2.32 Parámetros de Optical Gaussian Pulse Generator.....	99
Figura 2.33 Polarización del pulso gaussiano.	99
Figura 2.34 Longitud del tramo de fibra para el ejemplo 1.	99
Figura 2.35 PMD de la fibra para el ejemplo 1.	100
Figura 2.36 Configuración del parámetro Model Type en Optical Fiber.	100
Figura 2.37 Pulso de entrada para el ejemplo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.....	101
Figura 2.38 Pulso de salida para el ejemplo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.....	102
Figura 2.39 Polarización de 45° para el pulso de entrada.	104
Figura 2.40 Señal de entrada para el ejemplo 2: a) Pulso total, b) Pulso en el eje (x), c) Pulso en el eje (y).....	104
Figura 2.41 Señal de salida para el ejemplo 2: a) Pulso total, b) Pulso en el eje (x), c) Pulso en el eje (y).	105
Figura 2.42 Pulso de salida para el ejemplo 2 en el dominio de la frecuencia.	105
Figura 2.43 Selección de birrefringencia estadística en Optical Fiber.	108

Figura 2.44	Dispersión de un pulso ultra corto para valores $L = 200Km$, $L'_{scatt} = 10Km$ y $\sigma_{scatt} = 0 Km$,	109
Figura 2.45	Dispersión de un pulso ultra corto para valores $L = 200Km$, $L'_{scatt} = 10Km$ y $\sigma_{scatt} = 20 Km$,	110
Figura 3.1	Entorno de simulación de PMD.	115
Figura 3.2	Configuración de Optical Fiber para el caso 1.....	117
Figura 3.3	Señal de entrada para el caso 1 del grupo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.	118
Figura 3.4	Señal de entrada en el dominio de la frecuencia para el caso 1 del grupo 1.	118
Figura 3.5	Señales de entrada y salida para el caso 1 del grupo 1: a) Pulsos totales, b) Pulsos en el eje (x), c) Pulsos en el eje (y).	119
Figura 3.6	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 1 del grupo 1.	120
Figura 3.7	Señal de salida para un pulso de 15 dBm en el caso 1 del grupo 1 ...	120
Figura 3.8	Señal de entrada para el caso 2 del grupo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.	122
Figura 3.9	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 2 del grupo 1.	122
Figura 3.10	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 2 del grupo 1.	123
Figura 3.11	Señal de entrada para el caso 3 del grupo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.	124
Figura 3.12	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 3 del grupo 1.	125
Figura 3.13	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 3 del grupo 1.	125
Figura 3.14	Señal de entrada para el caso 4 del grupo 1: a) en el dominio del tiempo, b) en el dominio de la frecuencia.	126
Figura 3.15	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 4 del grupo 1.	127
Figura 3.16	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 4 del grupo 1.	127

Figura 3.17	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 1 del grupo 2.	129
Figura 3.18	Señal de salida para un pulso con potencia de 15 dBm en el caso 1 del grupo 2.	129
Figura 3.19	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 2 del grupo 2.	130
Figura 3.20	Señal de salida para un pulso con potencia de 15 dBm en el caso 2 del grupo 1.	131
Figura 3.21	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 2 del grupo 2.	132
Figura 3.22	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 3 del grupo 2.	133
Figura 3.23	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 3 del grupo 2.	133
Figura 3.24	Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 4 del grupo 2.	134
Figura 3.25	Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 4 del grupo 2.	135
Figura 3.26	Escenario de simulación con pre-compensador.	139
Figura 3.27	Configuración del componente Gaussian Pulse Generator.	140
Figura 3.28	Configuración del componente Polarization Controller.	140
Figura 3.29	Resultados obtenidos para dos pulsos de 10 Gbps con pre-compensación.	141
Figura 3.30	Resultados obtenidos para dos pulsos de 40 Gbps con pre-compensación.	142
Figura 3.31	Resultados obtenidos para dos pulsos de 140 Gbps con pre-compensación.	143
Figura 3.32	Escenario de simulación con post-compensador de una etapa.	145
Figura 3.33	Configuración de los componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner.	146
Figura 3.34	Configuración del componente Optical Fiber 1.	146
Figura 3.35	Dispersión del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación. ...	148
Figura 3.36	Post-Compensación de la dispersión del pulso de 10 Gbps.	148

Figura 3.37 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	149
Figura 3.38 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps compensado: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	149
Figura 3.39 Post-compensación de la dispersión de un segundo pulso de 10Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	150
Figura 3.40 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 10Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	151
Figura 3.41 Dispersión del pulso de 40Gbps antes de la post-compensación.	152
Figura 3.42 Compensación de la dispersión del pulso de 40Gbps.....	152
Figura 3.43 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps antes de la post-compensación: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	153
Figura 3.44 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps post-compensado: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	153
Figura 3.45 Post-Compensación de un segundo pulso de 40Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación	154
Figura 3.46 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 40Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	155
Figura 3.47 Dispersión del pulso de 140 Gbps antes de la post-compensación.	156
Figura 3.48 Post-compensación de la dispersión del pulso de 140 Gbps.	156
Figura 3.49 Componentes (x, y) del pulso de 140 Gbps antes de la post-compensación: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	157
Figura 3.50 Componentes (x, y) del pulso de 140 Gbps post-compensado: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	157
Figura 3.51 Post-compensación de un segundo pulso de 140 Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	158
Figura 3.52 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso post-compensado para 140 Gbps.	159

Figura 3.53 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 140Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	159
Figura 3.54 Escenario de simulación con post-compensador de dos etapas.	160
Figura 3.55 Dispersión del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas.	162
Figura 3.56 Post-compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 10 Gbps.	162
Figura 3.57 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	163
Figura 3.58 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps compensado en dos etapas: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	163
Figura 3.59 Compensación de dos etapas de dispersión para un segundo pulso de 10 Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	164
Figura 3.60 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 10Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	165
Figura 3.61 Dispersión del pulso de 40 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas.	166
Figura 3.62 Post-Compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 40Gbps.	167
Figura 3.63 Componentes (x, y) del pulso de 40 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	167
Figura 3.64 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps compensado en dos etapas: a) pulso en (x) , b) pulso en (y)	168
Figura 3.65 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso compensado en dos etapas para 40Gbps.	168
Figura 3.66 Compensación de dos etapas para un segundo pulso de 40Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.	169

Figura 3.67 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 40Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.....	170
Figura 3.68 Dispersión del pulso de 140Gbps antes de la compensación de dos etapas.....	171
Figura 3.69 Post-compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 140 Gbps.....	171
Figura 3.70 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso compensado en dos etapas para 140Gbps.	172
Figura 3.71 Post-compensación de dos etapas para un segundo pulso de 140 Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación	172
Figura 3.72 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 140Gbps: a) antes de la compensación, b) después de la compensación.....	173
Figura 3.73 Pre-compensador de cinco etapas.....	175

RESUMEN

En este proyecto se realiza el estudio de la Dispersión por Modo de Polarización PMD (*Polarization Mode Dispersion*) en una fibra monomodo con Dispersión Desplazada No Nula NZDSF (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*) que cumple con la recomendación ITU-T G.655, se explica su origen, impacto y degradación de la señal provocada.

El fenómeno de PMD se debe principalmente a la birrefringencia de la fibra óptica, la cual provoca que las componentes ortogonales relacionadas al estado de polarización de la señal luz lleguen con diferentes retardos temporales al otro extremo de la fibra, produciendo ensanchamiento de los pulsos e incrementando la tasa de bits errados (BER) del sistema.

En el Capítulo 1 se realiza una introducción a los conceptos relacionados con la fibra óptica, estructura, leyes de propagación, alteraciones de la señal, tipos de fibra y una descripción del estándar ITU-T G.655. Además, se realiza una explicación del fenómeno PMD, su naturaleza, causas, efectos sobre la propagación de señales a través de la fibra, representaciones matemáticas y posibles mecanismos de compensación.

En el Capítulo 2 se describen los diferentes software simuladores disponibles en el mercado que permitan realizar la simulación del fenómeno de PMD. Además se realiza la selección del software apropiado que permita cumplir los requisitos establecidos para realizar el trabajo de simulación, una descripción de su funcionamiento y herramientas necesarias para el trabajo y una validación del mismo comparando los resultados de dos simulaciones con los respectivos cálculos teóricos previamente realizados.

En el Capítulo 3 se realizan simulaciones de ejemplos representativos del fenómeno de PMD y sus mecanismos de compensación con el objetivo de determinar el grado de afectación y efectividad de la compensación variando parámetros como longitud del segmento de fibra, velocidad de transmisión, entre otros.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas con la realización de este proyecto en base a la teoría expuesta y a las simulaciones realizadas.

El Anexo A es la recomendación ITU-T G.655 usada en este trabajo, los Anexos B y C son *datasheets* de fibras NZDSF de dos fabricantes diferentes.

PRESENTACIÓN

Este proyecto de titulación se orienta al estudio del fenómeno de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en fibras monomodo que cumplen la recomendación ITU-T G.655.

Debido al rápido desarrollo de la tecnología, los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica deben soportar volúmenes de información cada vez más altos y a mayor velocidad. Este rápido crecimiento conlleva a la aparición de fenómenos ópticos que antes no eran considerados, uno de ellos es la PMD. Es por ello que es de suma importancia conocer y comprender el impacto de este fenómeno en los sistemas modernos, para así, desarrollar técnicas que permitan contrarrestarlo y garantizar confiabilidad.

El objetivo principal de este proyecto es analizar el nivel de dispersión producida en diversos escenarios, variando diferentes parámetros como velocidad de transmisión, longitud de la fibra, entre otros, en base a cálculos teóricos y simulación de los mismos.

Como objetivo secundario se presenta la comparación entre los resultados obtenidos en los diferentes escenarios de simulación basándose en el nivel de dispersión y la efectividad de la compensación, con el fin de poder comprender de mejor manera el efecto de la PMD en la transmisión de información a través de fibra óptica.

El estudio teórico del fenómeno presenta la introducción de algunas definiciones relacionadas a la polarización de la luz y su propagación a través de medios ópticos. Además, se incluye la recopilación de varias expresiones matemáticas obtenidas de las distintas referencias tomadas en consideración. De esta manera, este proyecto puede servir como base para futuras investigaciones relacionadas con el desarrollo de nuevas tecnologías de telecomunicaciones y los fenómenos de dispersión.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN EN FIBRA ÓPTICA

En la actualidad la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión más usado en redes y sistemas de telecomunicaciones de gran capacidad. Características como su amplio ancho de banda, alta inmunidad al ruido y a la interferencia por señales eléctricas, bajo nivel de atenuación en largas distancias, entre otras, hacen de la fibra el medio de transmisión ideal para satisfacer necesidades de conectividad, velocidad y disponibilidad en cualquier punto de una red de telecomunicaciones. Es por eso que, actualmente la fibra óptica ha remplazado en gran medida a los medios de transmisión convencionales como son el cable de cobre y los enlaces de radio fijos de largas distancias [1].

El rápido desarrollo de las técnicas de transmisión ópticas durante los últimos años, ha abierto nuevas posibilidades en el campo de los servicios de telecomunicaciones que a través del cable de cobre no estaban permitidas [2].

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE FIBRA ÓPTICA

1.1.1 DEFINICIÓN DE FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un medio de transmisión constituido principalmente por un filamento transparente hecho de plástico o cristal altamente puro como la sílice (SiO_2); este filamento actúa como una guía de onda y permite transportar información a modo de haces de luz de un extremo a otro. Las características físicas del cable de la fibra, permiten que esta sea flexible y muy resistente a golpes y torsiones [3].

Cada filamento de fibra óptica está compuesto básicamente por la misma estructura, el centro de la fibra llamado núcleo (*core*), es por donde viajan los haces de luz. Este núcleo está cubierto por un manto o revestimiento (*cladding*),

de menor índice de refracción que el núcleo. La diferencia de índices de refracción ($n_2 < n_1$) contribuye a que se produzca reflexión interna total, confinando a los haces de luz a viajar por el interior del núcleo de la fibra [4].

Además, núcleo y revestimiento están rodeados por una cubierta de plástico (*jacket*) que asegura la protección mecánica de la fibra [3].

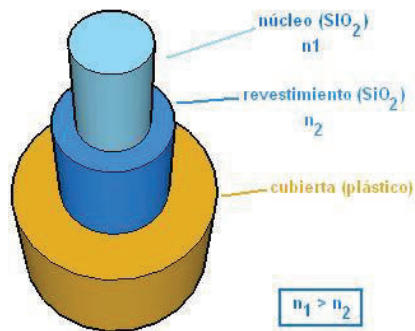


Figura 1.1 Estructura interna de la fibra óptica de vidrio [21].

1.1.2 PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA

La teoría de rayos explica de forma sencilla cómo la luz viaja por el interior de la fibra. Un rayo de luz no es más que la dirección que toman las ondas luminosas a través del núcleo. El uso de esta técnica permite explicar fenómenos como la reflexión y refracción de la luz usando las leyes de la óptica geométrica [4].

1.1.2.1 Ley de la Reflexión

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflectora¹ con un ángulo " θ_1 " respecto a la normal de dicha superficie, este rebota cambiando su dirección y con un ángulo " θ_1' " que posee el mismo valor que θ_1 con respecto a la normal a la

¹ Superficie Reflectora: aquella superficie que es lisa y no tiene la capacidad de absorber los rayos de luz

superficie ($\theta_1 = \theta_1'$). A este fenómeno se lo conoce como la Ley de la Reflexión de la Luz [4] [5].

La figura 1.2 muestra un ejemplo de la Ley de Reflexión, se puede apreciar que los ángulos θ_1 y θ_1' , correspondientes a los rayos incidente y reflejado respectivamente, tienen el mismo valor visto desde la línea normal.

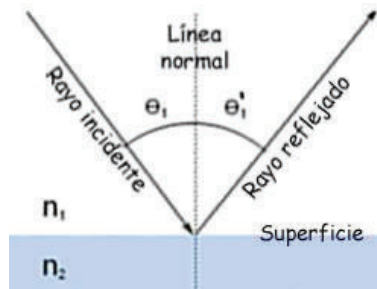


Figura 1.2 Ley de la reflexión de la luz [5].

1.1.2.2 Ley de la Refracción (Ley de Snell)

Cuando un rayo de luz incide en el límite entre dos materiales con diferente índice de refracción, una parte de su energía cumple con la Ley de la Reflexión y la otra atraviesa dicho límite y se transmite al segundo material, a esta porción de energía transmitida se la conoce como rayo refractado [4].

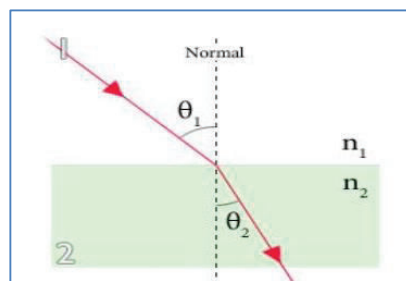


Figura 1.3 Ley de la refracción o ley de Snell [6].

Tal como se aprecia en la figura 1.3, el ángulo que forma el rayo incidente con la normal a la superficie de separación de los medios " θ_1 ", posee un valor diferente

al ángulo del rayo refractado " θ_2 ". La Ley de Snell o Ley de la Refracción establece la relación entre θ_1 y θ_2 de la siguiente manera [7] [4]:

$$n_1 \text{ sen } (\theta_1) = n_2 \text{ sen } (\theta_2) \quad (1.1)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del material 1 y n_2 es el índice de refracción del material 2.

1.1.2.3 Índice de Refracción

Se define al índice de refracción " n " de un medio determinado, como la razón entre la velocidad que tiene la luz al propagarse por el vacío y la velocidad que tiene al propagarse por dicho medio, y se puede calcular por medio de la siguiente ecuación [8]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

Donde " c " es la velocidad de la luz en el vacío y " v " es la velocidad de la luz el medio

El valor del índice de refracción depende de la composición y tipo del material, además de la longitud de onda λ de la señal que se propaga. Como ya se mencionó antes, en fibras de vidrio el índice de refracción del núcleo será mayor al del revestimiento ($n_1 > n_2$).

1.1.2.4 Principio de Reflexión Interna Total (RIT)

Si se tiene una fibra con n_1 y n_2 , los índices de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente y además $n_1 > n_2$, de la Ley de Snell (Ecuación 1.1) se puede deducir que al aumentar el valor de θ_1 , también aumentará θ_2 , y así eventualmente se llegará a un valor de θ_1 para el cual el rayo refractado queda confinado en el límite entre los dos medios ($\theta_2 = 90^\circ$). A este valor de θ_1 se

conoce como Ángulo Crítico " θ_c " y cualquier rayo de luz con un ángulo de incidencia θ_1 superior al ángulo crítico se reflejará totalmente. Este fenómeno se conoce como principio de Reflexión Interna Total (RIT) y permite que los rayos de luz viajen confinados en el núcleo de la fibra [7][4].

La figura 1.4 muestra tres haces de luz que inciden con diferentes ángulos desde el núcleo al revestimiento de la fibra. Se puede apreciar que para ángulos superiores al crítico se cumple el RIT.

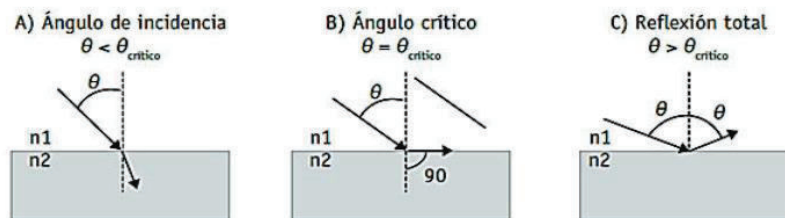


Figura 1.4 RIT para diferentes ángulos de incidencia **a)** ángulo de incidencia menor al crítico, **b)** ángulo de incidencia igual al crítico, **c)** ángulo de incidencia mayor al crítico [9].

La expresión que se utiliza para calcular el valor del ángulo crítico es la siguiente [10]:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.3)$$

1.1.2.5 Modo de Propagación

De acuerdo al principio de Reflexión Interna Total RIT, se puede afirmar que cualquier rayo que viaje por el núcleo de la fibra con un ángulo de incidencia superior al crítico θ_c , se propagará confinado en dicho núcleo. De esta manera, es lógico pensar que diferentes rayos de luz estarán asociados a diferentes ángulos de incidencia y por lo tanto diferentes direcciones de propagación. A cada uno de estos rayos se los conoce como modos de propagación, y representan la dirección que toman las ondas de luz [4].

La figura 1.5 muestra cuatro modos de propagación A, B, C, D con diferentes ángulos de incidencia y por lo tanto diferentes direcciones.

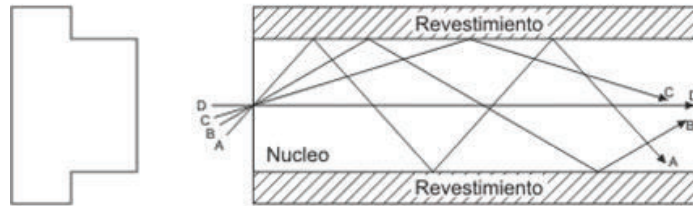


Figura 1.5 A, B, C, D, modos de propagación dentro de la fibra [11].

1.1.2.6 Vector de Onda y Constante de Propagación

En teoría de ondas, se define el vector de onda \vec{k} , como aquel que apunta en la dirección de propagación de la onda, y su magnitud corresponde al número de veces que esta vibra por unidad de distancia. Aplicando estos conceptos en la fibra, se puede apreciar que el ángulo de propagación “ θ ” de un modo determinado, será el mismo ángulo de su vector \vec{k} correspondiente y la magnitud de este vector permite tener una idea de cuántas veces por unidad de longitud el modo rebota dentro de la fibra. Por tal razón se dice que “el vector de onda permite dar un sentido físico a lo que ocurre dentro de la fibra” [2].

La expresión de la magnitud del vector \vec{k} , dentro de la fibra con un índice de refracción n_1 , es la siguiente:

$$k = k_0 n_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \quad (1.4)$$

Donde k_0 es el vector de onda correspondiente a una propagación en el vacío.

El vector de onda posee dos componentes ortogonales correspondientes a los ejes x , z . Cada uno con un significado físico independiente del otro. La componente k_x se refiere al vector de onda de un campo que se propaga en vaivén entre las superficies superior e inferior que confinan el medio, mientras que la componente k_z lleva consigo todas las propiedades del avance longitudinal del

modo dentro de la fibra. La componente k_z se conoce como Constante de Propagación “ β ” y es usada para describir en forma matemática todos los fenómenos de propagación de la luz dentro de la fibra, además de determinar el rango de modos que pueden propagarse dentro de ella [12] [13]. La expresión que permite calcular β es la siguiente [2]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \cos(\theta) \quad (1.5)$$

Cabe recalcar que en el estudio de propagación en fibra óptica no se toma en cuenta k_x sino sólo k_z , por lo que al hablar del vector de onda, se habla de la constante de propagación β [2].

1.1.2.7 Velocidad de Grupo y Velocidad de Fase

Dado el hecho de que un rayo de luz no es puramente monocromático sino que está compuesto por un rango de longitudes de onda denominado anchura espectral “ $\Delta\lambda$ ” y además, sabiendo que la fibra es un material dispersivo (su índice de refracción depende de la longitud de onda), se puede concluir que un rayo de luz cualquiera, se comportará de manera diferente respecto a un rayo monocromático al propagarse por la fibra.

De esta manera, se define como velocidad de fase a la velocidad con que se transmite cada una de las longitudes de onda λ de las que está compuesta la señal. La velocidad de grupo “ V_G ”, será la “velocidad de fase de la envolvente de la señal” y es la que determina la velocidad a la que se transmite la onda completa [2] [14].

Se define a la velocidad de grupo como el inverso de la constante de propagación “ β ” de la onda de luz, así [14].

$$V_G = \frac{1}{\beta} \quad (1.6)$$

Así mismo, a la velocidad de grupo se añade un Retardo de Grupo “ t_G ” y un Índice de Refracción de Grupo “ n_G ”, expresados por las siguientes ecuaciones [10]:

$$t_G = \frac{L}{v_G} \quad (1.7)$$

$$n_G = \frac{c}{v_G} \quad (1.8)$$

1.1.3 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica se clasifica principalmente de acuerdo al número de modos que se pueden propagar a través de ella. Las propiedades modales determinan la capacidad que posee la fibra para transportar información (bits/s) de un extremo a otro, teniendo gran influencia en la tolerancia de la fibra para soportar las perturbaciones inducidas por el entorno de trabajo. De acuerdo al número de modos que acepta la fibra óptica, se la puede clasificar en fibras multimodo y fibras monomodo.

1.1.3.1 Fibras Multimodo

Una fibra multimodo es aquella que permite la propagación de varios modos a través de su núcleo y cada uno siguiendo un camino diferente, por lo que no todos los modos llegan al mismo tiempo al otro extremo y se produce un ensanchamiento del pulso conocido como dispersión modal (la cual que se analizará en la sección 1.1.4.2.1). Por esta razón, las fibras multimodo son usadas en cortas distancias. Para este tipo de fibra el diámetro del núcleo varía típicamente entre 50 y 100 μm y el del revestimiento entre 125 y 140 μm [10] [15].

Tomando en cuenta el perfil del índice de refracción del núcleo, las fibras multimodo se clasifican en fibras de índice escalonado y fibras de índice gradual.

Las fibras de índice escalonado son las más simples de fabricar, su estructura consiste en un núcleo con índice de refracción constante " n_1 ", rodeado de un revestimiento con un índice de refracción " n_2 ", siendo n_2 menor a n_1 .

La figura 1.6 muestra la estructura interna de un segmento de fibra multimodo de índice escalonado.

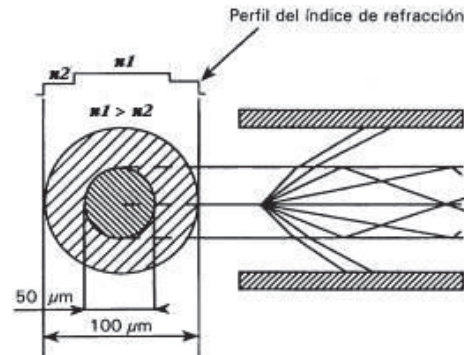


Figura 1.6 Fibra multimodo de índice escalonado [16].

En las fibras de índice gradual, el índice de refracción del núcleo decrece de forma semi parabólica conforme se aleja del centro y se dirige al revestimiento. Esta reducción del índice de refracción provoca que los diferentes modos de propagación viajen con diferentes velocidades a través del núcleo de la fibra. Mientras más lejos esté el rayo de luz del centro de la fibra, más rápido viajará, permitiendo así que todos los modos lleguen al otro extremo casi al mismo tiempo, reduciendo en gran manera la dispersión modal [4].

La figura 1.7 muestra el perfil del índice de refracción en fibras de índice gradual.

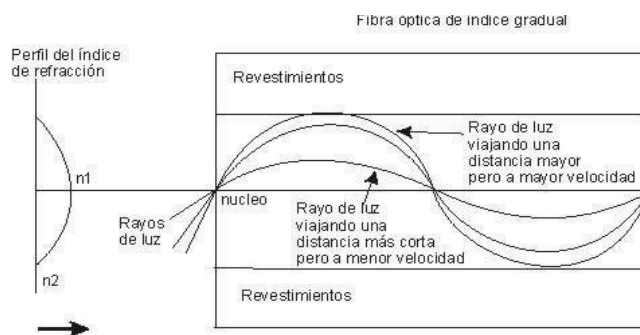


Figura 1.7 Fibra multimodo de índice gradual [17].

1.1.3.2 Fibras Monomodo

Una fibra monomodo es aquella que permite que un solo modo de propagación viaje en línea recta por el centro del núcleo. Al tener un solo modo de propagación, la dispersión modal desaparece. Esta característica las convierte en las fibras ideales para aplicaciones de largas distancias, superiores a los 20 Km. El diámetro del núcleo de las fibras monomodo se reduce al orden de las 10 micras o menos, manteniendo el diámetro del revestimiento en 125 micras. La diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento es menor al 0.3% [18].

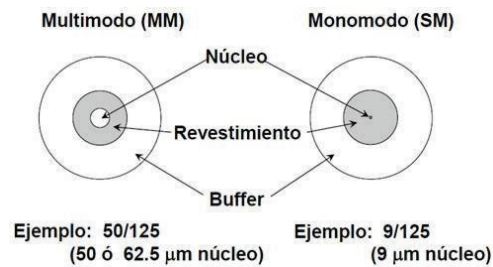


Figura 1.8 Dimensiones de fibra multimodo y monomodo [19].

Las fibras monomodo son diseñadas de acuerdo a la longitud de onda " λ " de trabajo, para minimizar las pérdidas, optimizar el ancho de banda y la máxima capacidad de transmisión. Los valores típicos de ancho de banda en fibras monomodo son de alrededor de algunas decenas de GHz.Km [20].

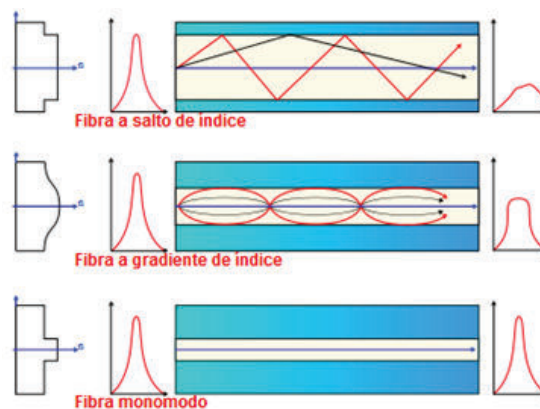


Figura 1.9 Ensanchamiento del pulso en diferentes tipos de fibra [15].

En la figura 1.9 se puede apreciar el ensanchamiento de un pulso en los tres tipos de fibra mencionados, debido a la dispersión modal. Claramente se observa que la fibra monomodo no presenta dispersión modal.

1.1.4 DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL EN LA FIBRA ÓPTICA

La transmisión de luz a través de la fibra no es 100% eficiente, existen varios fenómenos que contribuyen a su degradación, haciendo que esta en el punto de destino, tenga diferentes características respecto a la señal de origen. Los fenómenos más importantes son: atenuación, dispersión ruido e interferencia [21]. Cabe recalcar que en este trabajo solo se describen los dos primeros.

1.1.4.1 Atenuación

A medida que la señal de luz viaja por la fibra, su energía decrece debido a pérdidas de potencia sufridas en el material. Se define como atenuación o pérdida de potencia a la razón entre la potencia de salida de una fibra con respecto a la potencia de entrada después de cierta distancia. Es común representar a la atenuación en decibelios, como lo indica la siguiente expresión [9] [4]:

$$P_{dB} = 10 \log (P_{out}/P_{in}) \quad (1.9)$$

El coeficiente de atenuación para un segmento de fibra óptica de cierta longitud se define como la atenuación por unidad de longitud, y sus unidades son los decibelios por kilómetro, tal como se muestra en la siguiente expresión [21]:

$$\alpha_{dB/km} = \frac{1}{L} [10 \log (P_{out}/P_{in})] \quad (1.10)$$

Existen varios factores que provocan atenuación en la fibra, algunos de estos son: absorción de rayos ultravioletas e infrarrojos, no uniformidades del material del núcleo, impurezas metálicas y de iones hidroxilo (OH^-), macrocurvaturas y microcurvaturas de la fibra.

La figura 1.10 muestra algunas de las causas de pérdidas de potencia en un segmento de fibra.

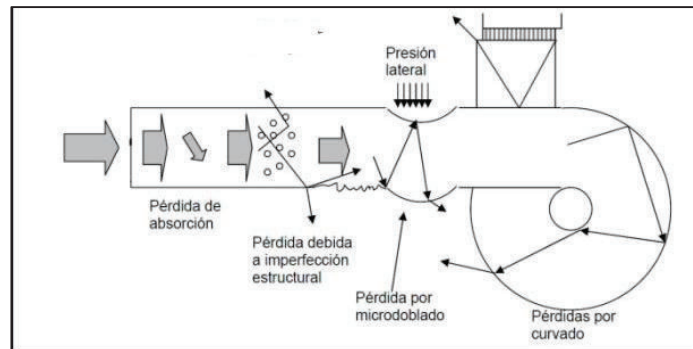


Figura 1.10 Tipos de pérdidas de potencia a través de la fibra óptica [22].

Si se suman los tipos de atenuaciones vistos hasta el momento, se puede construir una gráfica como la de la figura 1.11 denominada curva de atenuación. En ella se puede observar que en las zonas por debajo de los 800 nm y por encima de los 1600 nm existe alta atenuación debido a los rayos ultravioletas e infrarrojos, por lo que no es conveniente trabajar en ellas. Además, existen tres zonas entre los picos de absorción debido a iones OH^- , en los 850, 1330 y 1550 nm donde la atenuación es mínima. Estas zonas se conocen con el nombre de ventanas y determinan las longitudes de onda habituales de trabajo [21].

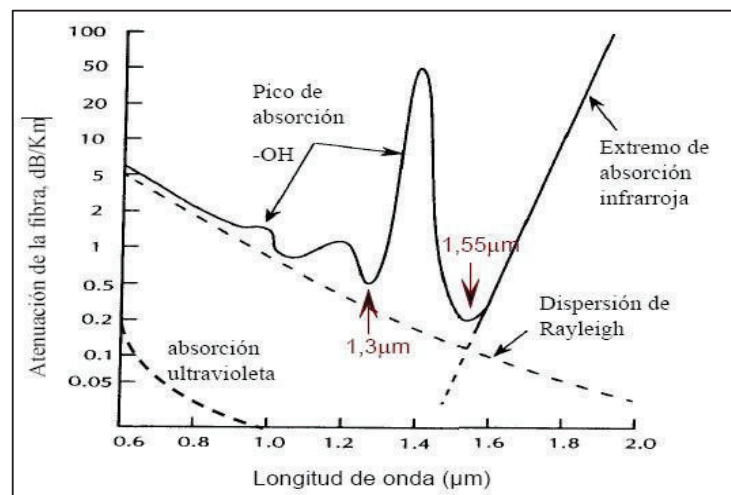


Figura 1.11 Curva de atenuación en la fibra y ventanas de transmisión [23].

1.1.4.2 Dispersión

Además de la atenuación, existen otros fenómenos que afectan a la señal que viaja a través de la fibra, uno de estos es la dispersión. Se define como dispersión a todos los efectos que ocasionan diferencias en el tiempo de propagación de una señal y por lo tanto limitan el ancho de banda de transmisión del medio. En el caso de la luz, la dispersión se da porque la velocidad y el tiempo de propagación de la misma, dependen de su longitud de onda " λ " [10] [24]. Debido a que el diámetro del núcleo de la fibra es mucho mayor que la longitud de onda de la señal, la luz que viaja por la fibra se compone de varios modos de propagación y un espectro formado por diferentes longitudes de onda. Por lo tanto, es posible que cada componente de la señal, viaje por diferentes caminos y se propague a diferentes velocidades a través de la fibra produciendo un ensanchamiento temporal de los pulsos de luz acumulativo con la distancia [21][10]. El término dispersión hace referencia a este ensanchamiento temporal del pulso de luz a la salida de la fibra respecto al pulso de entrada.

Si se tiene un pulso a la entrada de la fibra, de ancho " t_0 " y un pulso a la salida de ancho " t ", siendo $t_0 < t$, la dispersión " Δt ", se define como la raíz de la diferencia entre los cuadrados de t_0 y t [4].

$$\Delta t = (t^2 - t_0^2)^{1/2} \quad (1.11)$$

Ya que la magnitud de la dispersión es acumulativa con la longitud de la fibra, normalmente esta se mide en nanosegundos sobre kilómetro (ns/km).

El ancho de banda y la velocidad de transmisión que puede soportar un segmento de fibra, están limitados por su longitud y dispersión [25].

En la figura 1.12 se puede observar cómo la dispersión limita la capacidad de transmisión de un sistema debido a la distorsión y ensanchamiento de los pulsos de luz. Cuando el valor de dispersión es muy grande, los pulsos se solapan unos con otros haciéndose indistinguibles uno del otro, provocando la llamada interferencia entre símbolos (*Inter-Symbol Interference*, ISI) e incrementando la tasa de bits errados (*Bit Error Rate*, BER) [26].

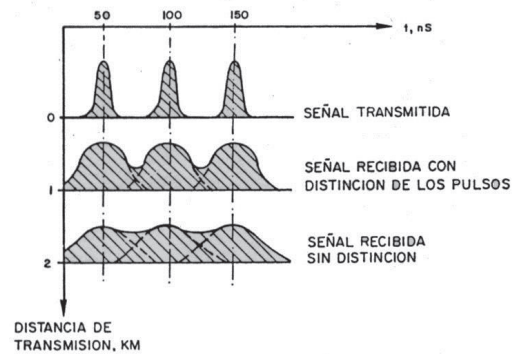


Figura 1.12 Ensanchamiento de pulsos debido a la dispersión [27].

1.1.4.2.1 Dispersión Modal

También llamada dispersión intermodal, es un tipo de dispersión propio de las fibras multimodo. Como se explicó anteriormente, un pulso de luz está compuesto por varios modos de propagación. Cada modo viaja por el núcleo de la fibra con su respectivo ángulo de propagación (y por lo tanto trayectorias diferentes para cada modo), llegando al otro extremo de la fibra en tiempos diferentes y produciendo un ensanchamiento del pulso de luz como se observa en la figura 1.13. Mientras más modos se propaguen, mayor será el ensanchamiento del pulso ya que este no estará completo hasta que todos lleguen al otro extremo de la fibra. A este tipo de dispersión se conoce como dispersión modal [28].

El coeficiente de dispersión modal " ϑ_{GI} ", determina el nivel de dispersión medido en nanosegundos por unidad de distancia.

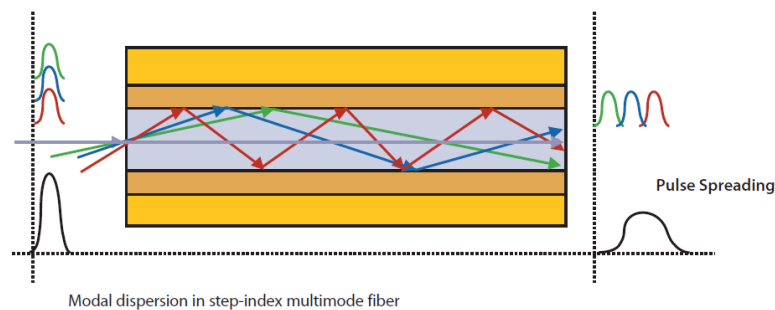


Figura 1.13 Dispersión modal en una fibra multimodo [29].

1.1.4.2.2 Dispersión Cromática

También conocida como dispersión intramodal, es un tipo de dispersión que afecta a las fibras monomodo, ya que en fibras multimodo, su efecto comparado con la dispersión modal es despreciable. Este tipo de dispersión se divide en dispersión cromática de material y dispersión de guía de onda.

La dispersión cromática de material se debe a que un modo de luz no posee una anchura infinitesimal, sino que está compuesto por un rango de longitudes de onda " $\Delta\lambda$ ", denominado anchura espectral, como se muestra en la figura 1.14.

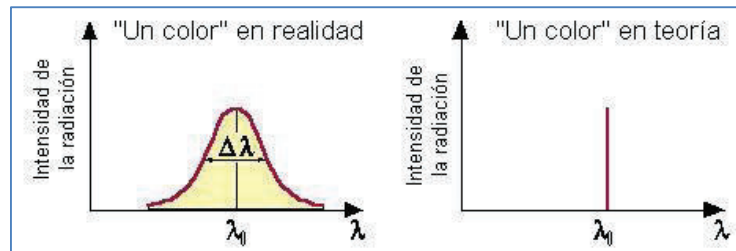


Figura 1.14 Anchura espectral de un haz de luz [30].

Como se mencionó con anterioridad, tanto la velocidad de propagación como el índice de refracción dentro de la fibra dependen de la longitud de onda de la señal. Por lo tanto, longitudes de onda más grandes se propagarán con menor velocidad que longitudes de onda pequeñas. La diferencia entre las velocidades de cada longitud de onda que componen $\Delta\lambda$ genera un ensanchamiento temporal del pulso al otro extremo de la fibra conocido como dispersión cromática de material [4] [10] [21].

El coeficiente de dispersión de material " ϑ_e " se mide en picosegundos sobre kilómetro por nanómetro (ps/km.nm):

La figura 1.15 muestra la dispersión de un pulso debido a la dispersión cromática de material.

La dispersión cromática de guía de onda se debe a las diferentes trayectorias que toman las longitudes de onda que conforman el ancho espectral de un haz de luz.

Para un modo de propagación, la mayor parte de su energía (alrededor del 80%) viaja a través del núcleo, mientras que la otra parte viaja por el revestimiento con diferente índice de refracción y por lo tanto diferente velocidad, produciendo un ensanchamiento temporal del pulso en el otro extremo de la fibra.

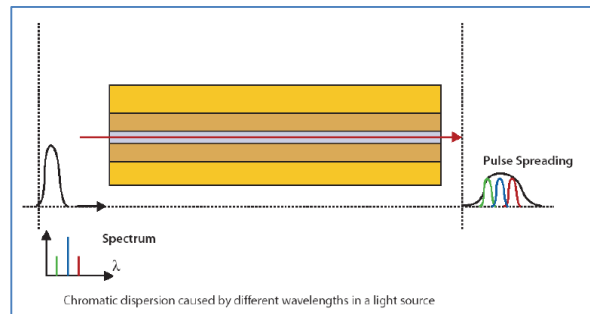


Figura 1.15 Ensanchamiento de un pulso debido a la dispersión cromática de material [10].

Este tipo de dispersión es dependiente de la longitud de onda de la señal y solo tiene importancia en fibras monomodo, ya que en las multimodo, el núcleo de la fibra es mucho mayor a la longitud de onda de la señal [4] [10] [21] [24].

El coeficiente de dispersión cromática de guía de onda “ ϑ_g ” se mide normalmente en picosegundos sobre kilómetro por nanómetro (ps/km.nm).

La dispersión cromática total viene dada por la suma algebraica entre la dispersión cromática de material y la dispersión de guía de onda, cada una con signo opuesto, según siguiente expresión [2][4]:

$$\tau_c = \tau_e + \tau_g \quad (1.12)$$

Donde τ_e y τ_g son los ensanchamientos del pulso debido a la dispersión cromática de material y de guía de onda respectivamente. Los signos opuestos indican que ambas dispersiones actúan en sentido contrario una de la otra, pudiendo llegar a anularse entre sí.

Diferentes estudios han llegado a demostrar que el punto donde ambas dispersiones se anulan totalmente, en fibras monomodo estándar, está ubicado a

una longitud de onda " λ " igual a 1330 nm. Por lo que al trabajar en esta zona, se minimizan los efectos de la dispersión cromática optimizando la transmisión.

La curva de dispersión cromática para fibras monomodo estándar y su punto de anulación se pueden observar en la figura 1.16.

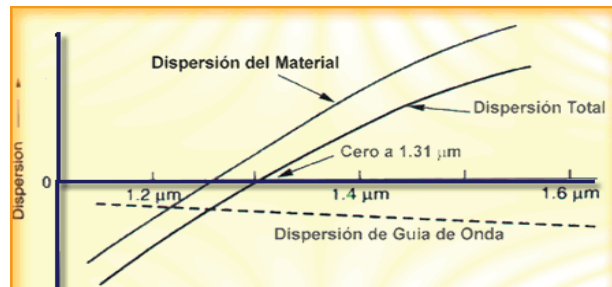


Figura 1.16 Curva de la dispersión cromática para fibras monomodo estándar [9].

Desde hace algunos años, las técnicas de fabricación de la fibra han conseguido juntar su punto de mínima dispersión (1330 nm), con el punto de mínima atenuación (1550 nm). A este tipo de fibras se las conoce como Fibras de Dispersión Desplazada (DSF) y se analizarán en la sección 1.1.5.1 [21] [31].

1.1.4.2.3 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

Este tipo de dispersión es exclusiva de las fibras monomodo y se produce por la diferencia en los índices de refracción que "ve" cada uno de los estados de polarización ortogonales de un modo de propagación, como se muestra en la figura 1.17.

La causa principal es la birrefringencia de la fibra producto de los procesos de fabricación, tensiones y esfuerzos mecánicos aplicados, y demás factores que afectan a la geometría del núcleo de la fibra, haciendo que este no describa una circunferencia perfecta, sino más bien una elipse y por lo tanto el índice de refracción para cada estado de polarización del rayo de luz sea diferente. De esta manera, ambos estados de polarización llegarán al otro extremo de la fibra en

tiempos diferentes, provocando un ensanchamiento temporal del pulso de luz, conocido como Dispersión por Modo de Polarización (PMD) [2].

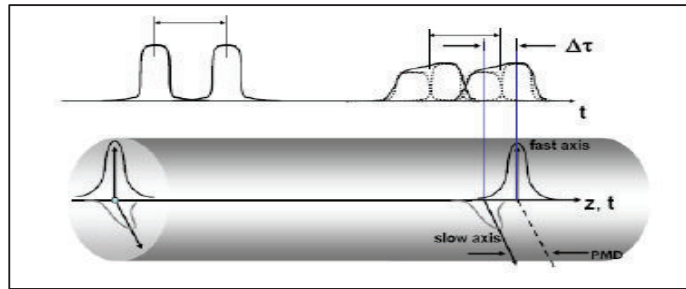


Figura 1.17 Dispersión por Modo de Polarización [10].

El fenómeno de PMD será analizado detalladamente en la sección 1.2.

1.1.4.2.4 Dispersión Total

El valor cuadrático medio de todos los tipos de dispersión vistos hasta el momento da como resultado el ensanchamiento total que sufre el pulso de luz que viaja a través de la fibra [4].

La siguiente ecuación describe el ensanchamiento total del pulso:

$$\tau_T^2 = \tau_m^2 + (\tau_g + \tau_e)^2 + \tau_{PMD}^2 \quad (1.13)$$

Para fibras monomodo se tiene:

$$\tau_T^2 = (\tau_g + \tau_e)^2 + \tau_{PMD}^2 \quad (1.14)$$

1.1.5 FIBRAS DE CARACTERÍSTICAS ESPECIALES

1.1.5.1 Fibras Monomodo de Dispersión Desplazada (DSF)

Como se vio en la sección 1.1.4.2.2, la dispersión cromática de la fibra se divide en dos tipos, la dispersión de material y la dispersión de guía de onda, ambas con

la característica de tener signos opuestos, y poder anularse entre sí en un punto de mínima dispersión. Este punto se encuentra en la segunda ventana, a una longitud de onda de 1330 nm aproximadamente, en fibras monomodo estándar. Además, existe un punto de mínima atenuación para este tipo de fibras, ubicado en la tercera ventana a una longitud de onda aproximada de 1550 nm.

Para lograr obtener el mayor ancho de banda posible en transmisiones efectivas de largas distancias y altas velocidades de transmisión, es de gran interés conseguir que ambos puntos, de mínima atenuación y mínima dispersión cromática, se encuentren lo más cerca posible. Desplazar el punto de mínima atenuación implica un cambio en la composición de los materiales de los que está hecha la fibra, lo cual no es muy factible de realizar; sin embargo, gracias a diferentes técnicas de fabricación, es posible desplazar el punto de mínima dispersión hasta la tercera ventana, variando el valor de la dispersión de guía de onda de la fibra.

Los tipos de fibra para los que el mínimo punto de dispersión cromática se ha desplazado hasta coincidir con el mínimo punto de atenuación se denominan Fibras de Dispersión Desplazada (*Dispersion Shifted Fiber, DSF*) [2] [25] [31].

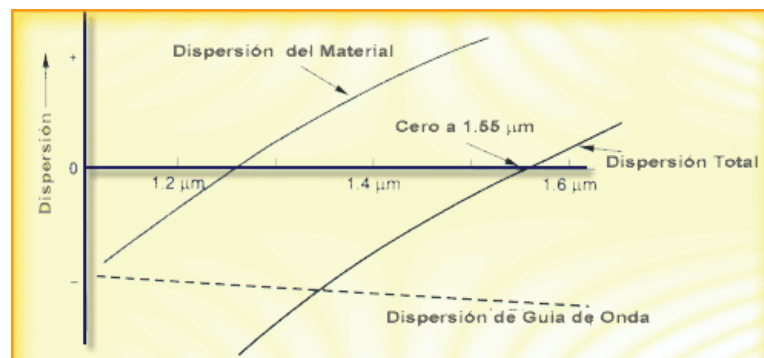


Figura 1.18 Curva de dispersión en fibras DSF [9].

La figura 1.18 muestra la curva de dispersión para una fibra DSF. Se puede apreciar que el punto de mínima dispersión cromática coincide aproximadamente con los 1550 nm.

1.1.5.1.1 Fibras de Dispersión Desplazada Nula (ZDSF)

Como su nombre lo indica, este tipo de fibra posee una dispersión cromática nula en la tercera ventana. La dispersión de guía de onda " τ_g " depende de las dimensiones del núcleo y de los índices de refracción, entre otras cosas. Una de las formas de variar τ_g consiste en modificar de forma controlada el perfil del índice de refracción del núcleo con el objetivo de aumentar el índice de refracción en cierta cantidad " Δn ". De esta forma se consigue aumentar la dispersión de guía de onda, desplazando el punto de mínima dispersión hasta la tercera ventana de 1550 nm. A este tipo de fibras se las conoce como fibras ZDSF (*Zero Dispersion Shifted Fiber*).

Un ejemplo del perfil de índice de refracción para una fibra ZDSF, se muestra en la figura 1.19. Se puede observar que la fibra se ha diseñado de tal manera que está compuesta por un núcleo interior y uno exterior [25] [9].

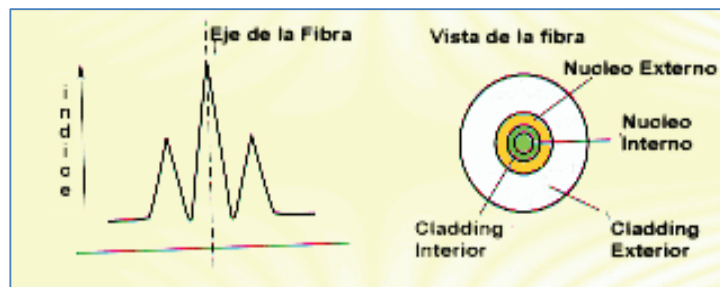


Figura 1.19 Perfil del índice de refracción para una fibra ZDSF comercial [9].

Además del anterior, existen varios modelos de índices de refracción que permiten desplazar la curva de dispersión cromática hasta la tercera ventana. Algunos de estos son los índices de refracción trapezoidal, parabólica, triangular, etc.

Las normativas que rigen el estándar para fibras de dispersión desplazada nula se encuentran en las recomendaciones G.653 y G.654 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T [25] [9].

1.1.5.1.2 Fibras de Dispersión Desplazada No Nula (NZDSF)

Las fibras de dispersión desplazada nula son muy efectivas cuando se transmite una sola longitud de onda de 1550 nm, sin embargo, en sistemas modernos que multiplexan varias longitudes de onda (WDM), pueden no ser muy eficientes ya que varias longitudes de onda pueden mezclarse entre sí generando nuevas longitudes de onda parásitas que degradan el sistema, a este fenómeno se lo conoce como Mezcla de Cuatro Ondas (*Four Wave Mixing*, FWM) y se presenta de manera marcada cuando la dispersión cromática de la fibra es nula.

Además, como se mencionó anteriormente, todo haz de luz posee una determinada anchura espectral " $\Delta\lambda$ " que abarca un rango de longitudes de onda, de las cuales solo una cae dentro del punto de dispersión cromática nula. El resto de longitudes de onda del espectro sufrirán cierto grado de dispersión, provocando efectos negativos, especialmente en los sistemas de alta capacidad DWDM.

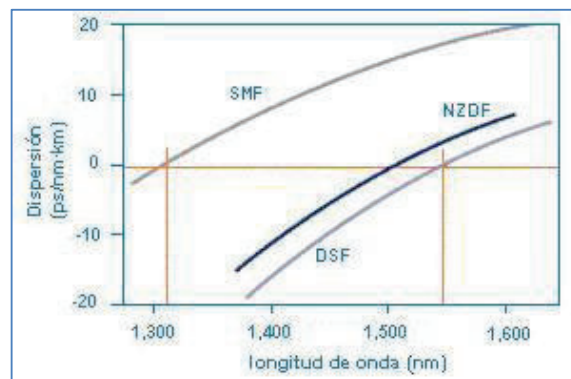


Figura 1.20 Curva de dispersión en fibras NZDSF [32].

Para contrarrestar estos fenómenos, se desplaza el punto de dispersión cromática nula fuera de la zona de 1550 nm. Esto permite obtener una mínima dispersión cromática en la tercera ventana, como se muestra en la figura 1.20. Este tipo de fibra se conoce como Fibra de Dispersión Desplazada No Nula (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*, NZDSF).

Fibras NZDSF son usadas en sistemas WDM o DWDM en los que se transmiten varias longitudes de onda multiplexadas dentro de la fibra y están reguladas por los estándares ITU-T G.655 y G.656, para las cuales se tiene valores de dispersión cromática de 0.1 a 6 ps/Km.nm sin importar el signo [2] [9] [25] [33].

Cabe recalcar que este estudio se realizará con fibras NZDSF G.655, cuyas especificaciones técnicas detalladas se encuentran en el Anexo A.

El perfil del índice de refracción de las fibras NZDSF es bastante parecido al de las fibras ZDSF, una pequeña diferencia radica en la magnitud de los picos de los índices de refracción, como se muestra en la figura 1.21.

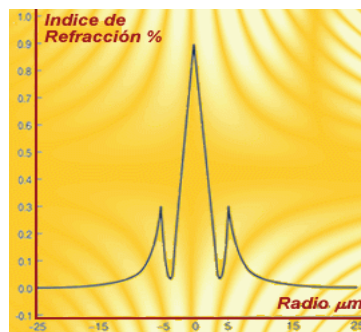


Figura 1.21 Perfil del índice de refracción para una fibra NZDSF [9].

1.1.5.1.3 Descripción del estándar ITU-T G.655

Las fibras de dispersión desplazada no nula están normalizadas por la ITU-T en el estándar G.655, cuya primera versión fue publicada en el año 1996 y su última revisión corresponde al año 2009, aunque se pueden realizar cambios en un futuro. La recomendación describe las características geométricas, mecánicas y de transmisión, además de las especificaciones técnicas para cualquier fibra monomodo NZDSF. Originalmente se desarrolló el estándar para fibras que trabajan en la tercera ventana de 1550 nm; sin embargo, actualmente se contemplan regiones de trabajo en los 1625 y 1470 nm, correspondientes a la cuarta y quinta ventana respectivamente [34].

En esta recomendación, se muestra una combinación de diseños de fibra que permite cubrir un gran número de aplicaciones; sin embargo, solo se muestran las características que proveen una mínima estructura de diseño para su fabricación.

Las fibras G.655 se clasifican en cinco categorías diferentes descritas a continuación:

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Cladding Diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding noncircularity	Maximum	2.0 %
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.50 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1530-1565 nm	λ_{min} and λ_{max}	1530 nm and 1565 nm
	Minimum value of D_{min}	0.1 ps/nm \cdot km
	Maximum value of D_{max}	6.0 ps/nm \cdot km
	Sign	Positive or negative
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(see Note)
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01 %
	Maximum PMD _Q	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTE – An optional maximum PMD coefficient on uncabled fibre may be specified by cables to support the primary requirement on cable PMD _Q if it has been demonstrated for a particular cable construction.		

Tabla 1.1 Atributos de G.655.A [35].

- G.655.A: En esta categoría se describen las características recomendadas necesarias para soportar aplicaciones como las descritas en: G.691 (Interfaces ópticas para sistemas STM-64, STM-256 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos), G.692 (Interfaces ópticas para sistemas

multicanales con amplificadores ópticos), G.693 (Interfaces ópticas para sistemas intraoficina) y G.959.1 (Interfaces de capa física de red de transporte óptica). En relación a G.692, es posible limitar la potencia máxima de inyección en base a las longitudes de onda de los canales y las características de dispersión de la fibra, y minimizar la separación entre canales a un mínimo de 200 GHz. La tabla 1.1, presenta los atributos mínimos que debe cumplir una fibra ITU-T G.655 A.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Cladding Diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding noncircularity	Maximum	2.0 %
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.50 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1530-1565 nm	λ_{min} and λ_{max}	1530 nm and 1565 nm
	Minimum value of D_{min}	1.0 ps/nm-km
	Maximum value of D_{max}	10.0 ps/nm-km
	Sign	Positive or negative
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1565-1625 nm	λ_{min} and λ_{max}	TBD
	Minimum value of D_{min}	TBD
	Maximum value of D_{max}	TBD
	Sign	Positive or negative
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(see Note)
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
	Maximum at 1625 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01 %
	Maximum PMD _Q	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTE – An optional maximum PMD coefficient on uncabled fibre may be specified by cabling to support the primary requirement on cable PMD _Q if it has been demonstrated for a particular cable construction.		

Tabla 1.2 Atributos de G.655.B [35].

- G.655.B: Posee características similares a la categoría anterior, con la diferencia de que la separación entre canales en G.692 ahora tiene un valor mínimo de 100 GHz. Las características de PMD permiten distancias de hasta 400 Km para sistemas STM-64. Los atributos mínimos para que una fibra cumpla con el estándar ITU-T G.655 categoría B se encuentran en la tabla 1.2.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding non-circularity	Maximum	2.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.50 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1530-1565 nm	λ_{min} and λ_{max}	1530 nm and 1565 nm
	Minimum value of D_{min}	1.0 ps/nm km
	Maximum value of D_{max}	10.0 ps/nm km
	Sign	Positive or negative
	$D_{\text{min}} - D_{\text{max}}$	≤ 5.0 ps/nm km
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1565-1625 nm	λ_{min} and λ_{max}	TBD
	Minimum value of D_{min}	TBD
	Maximum value of D_{max}	TBD
	Sign	Positive or negative
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
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 _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD _Q .		
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.		
NOTE 3 – Larger PMD _Q values (e.g., ≤ 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Tabla 1.3 Atributos de G.655.C [34].

- G.655.C: Posee similares características a las categoría anterior además de que soporta aplicaciones DWDM con espaciamento de canales descrito en G.694.1. Las características de PMD permiten distancias de hasta 2000 Km en

sistemas STM-64. Los atributos mínimos para que una fibra cumpla con el estándar ITU-T G.655 categoría C se encuentran en la tabla 1.3.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
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)	$D_{\text{min}}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$
	$D_{\text{min}}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$
	$D_{\text{max}}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$
	$D_{\text{max}}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$
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 _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD _Q .		
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.		
NOTE 3 – Larger PMD _Q values (e.g., ≤ 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Tabla 1.4 Atributos de G.655.D [34].

- G.655.D: Sus características permiten soportar todas las aplicaciones anteriores en longitudes de onda de 1625 y 1470 nm, correspondientes a la cuarta y quinta ventana. Para longitudes de onda mayores a los 1530 nm, la dispersión toma un valor positivo y suficiente para impedir la aparición de efectos no lineales,

especialmente FWM. Para longitudes de onda menores a 1530 nm, el valor de la dispersión es cero, aunque puede usarse la fibra en aplicaciones CDWM a partir de los 1470 nm. Los atributos mínimos para que una fibra cumpla con el estándar ITU-T G.655 categoría D se encuentran en la tabla 1.4.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
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)	$D_{\text{max}}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$
	$D_{\text{max}}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{3.30}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$
	$D_{\text{min}}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$
	$D_{\text{min}}(\lambda)$: 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 _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTE 1 - According to clause 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD _Q .		
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.		
NOTE 3 - Larger PMD _Q values (e.g., $\leq 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Tabla 1.5 Atributos de G.655.E [34].

- G.655.E: Similar a la categoría anterior pero con valores más altos que son importantes en algunos sistemas, como los que requieren menor espaciamiento de canales. Los atributos mínimos para que una fibra cumpla con el estándar ITU-T G.655 categoría E se encuentran en la tabla 1.5.

La recomendación ITU-T G.655 se puede revisar de forma detallada en el Anexo A.

1.1.5.2 Fibras Mantenedoras de Polarización (HI-BI PM)

Las fibras Mantenedoras de Polarización de Alta Birrefringencia (*High Birrefringence Polarization Maintaining Fiber*, HI-BI PM) son un tipo de fibra diseñado con un valor elevado de birrefringencia (aproximadamente de 10^{-4}) cuya función es mantener el estado de polarización de la señal óptica. La birrefringencia de las fibras es la principal causa de la PMD, y posee un carácter aleatorio que depende de muchos factores externos e internos presentes a lo largo de la fibra, los cuales provocan alteración en los estados de polarización de la señal óptica [2]. El fenómeno de PMD se estudia detalladamente en la sección 1.2.

Al fabricar la fibra con un valor elevado de birrefringencia se consigue que la influencia del ambiente (debida a tensiones, esfuerzos mecánicos y cambios de temperatura) sea mínima y por lo tanto no exista esa variación aleatoria tanto de birrefringencia como de estados de polarización de la señal. De esta forma, el haz de luz que viaja a través de la fibra llevará dos modos de polarización completamente definidos sin variaciones y que minimizan los efectos de la PMD.

Actualmente existen dos procesos de fabricación que permiten obtener fibras de alta birrefringencia, el primero se basa en pequeñas modificaciones en la geometría de la fibra, dándole una forma elíptica o cuadrada a su núcleo.

El segundo proceso de fabricación de este tipo fibras se basa en provocar tensiones mecánicas internas en el material del que está constituido el núcleo. Estas tensiones se originan por el uso de dopantes que generen cambios en el coeficiente de dilatación del material durante el enfriamiento provocando aumento en la birrefringencia de la fibra. La birrefringencia provocada por este método es mayor a la birrefringencia por cambios en la geometría del núcleo, teniendo valores de hasta 10^{-3} [36] [37]. El problema principal con este tipo de fibras es la elevada

atenuación debido al complejo proceso de fabricación, teniendo en el mejor de los casos una atenuación de alrededor de 0,22dB/Km, en tercera ventana para longitudes de fibra de alrededor de los 5 Km [2].

En la figura 1.22 se muestra la sección transversal de una fibra mantenedora de polarización de alta birrefringencia conocida como PANDA (*Polarization Maintaining and Absorption Reducing Fibre*). Aquí, se puede observar el uso de materiales que producen tensión en el núcleo para aumentar la birrefringencia.

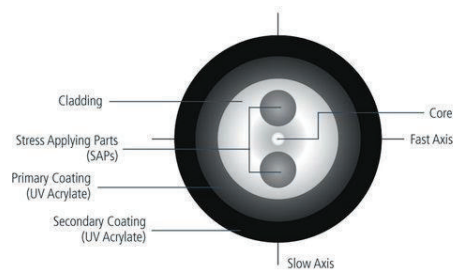


Figura 1.22 Fibra mantenedora de polarización PANDA [36].

1.2 ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN

1.2.1 DEFINICIÓN DE PMD

Si se toma un pedazo de sílice pura sin modificaciones, se puede apreciar que es un material amorfo, es decir que sus propiedades físicas son idénticas independientemente de la posición en que se midan. De esta forma, si dos campos eléctricos con diferente polarización atraviesan el material, ambos viajarán a la misma velocidad “viendo” el mismo índice de refracción. Sin embargo, la sílice que se usa para la fabricación de fibra óptica no es completamente pura, sino que ha sufrido varias modificaciones debido a estiramientos, tensiones, diferencias de temperatura y esfuerzos mecánicos durante el proceso de fabricación. Además, añadiendo que la geometría de la fibra no es ideal y su núcleo no es simétrico ni describe una circunferencia

perfecta, se puede concluir que la sílice de la cual está hecho el núcleo de la fibra es un material birrefringente [2] [38].

Hay que tomar en cuenta que tanto a la entrada como a la salida de un segmento de fibra, un rayo de luz puede descomponer su campo eléctrico en dos estados de polarización ortogonales entre sí, conocidos como Estados Principales de Polarización (*Principal States of Polarization*, PSP). De esta manera, en fibras monomodo, la birrefringencia es una característica del material, la cual provoca que para un rayo de luz que viaja a lo largo de la fibra, cada uno de los PSP “vean” diferentes índices de refracción, y viajen a diferentes velocidades, llegando en tiempos distintos al otro extremo de la fibra y con sus ejes de polarización rotados un determinado ángulo respecto los PSP de entrada [2] [36] [39].

Este retardo entre ambos estados de polarización produce dispersión del pulso de luz, limitando la capacidad de transmisión y el ancho de banda de la fibra, aumentando la tasa de bits errados (BER). A este nuevo tipo de dispersión se lo conoce como Dispersión por Modo de Polarización (*Polarization Mode Dispersion*, PMD).

La diferencia en los tiempos de llegada de ambos estados de polarización se denomina Retardo Diferencial de Grupo (*Differential Group Delay*, DGD) usualmente representado como “ $\Delta\tau$ ”. La magnitud que toma el DGD (medido en picosegundos) no suele tener valores muy elevados por lo que el efecto de PMD no es comparable con el de otras dispersiones y hasta hace pocos años no era tomado muy en cuenta. Sin embargo, se ha demostrado que en sistemas modernos de capacidades superiores a los 2,5 Gbps, los efectos de PMD empiezan a tomar importancia, siendo un problema crítico a partir de los 10 Gbps [2] [40] [41].

En la figura 1.23 se puede observar la propagación de los dos PSP de un rayo de luz a través de un material no birrefringente, ambos llegan al mismo instante al otro extremo de la fibra por lo que no se produce ensanchamiento del pulso ni PMD. En la figura 1.24 se observa una fibra birrefringente en la que cada

componente de polarización “ve” diferente índice de refracción produciendo ensanchamiento del pulso debido a la PMD.

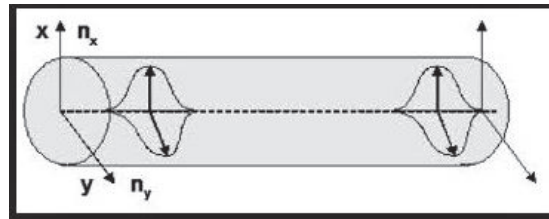


Figura 1.23 Propagación de un modo sin que exista PMD [42].

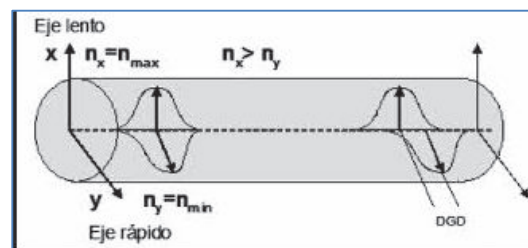


Figura 1.24 Ensanchamiento de un pulso debido a la PMD [42].

La principal diferencia de PMD en comparación con los otros tipos de dispersión, es que estos son relativamente estables y directamente proporcionales a la longitud de la fibra, lo que permite diseñar de antemano mecanismos efectivos de compensación de dispersión. Al contrario, la PMD no es estable ni directamente proporcional a la longitud de la fibra, sino que sus efectos son aleatorios y dependientes de muchos factores internos y externos. Cuando los dos estados de polarización se propagan a lo largo del núcleo, los vectores relacionados al campo eléctrico sufren rotaciones en sus ejes provocando cambios aleatorios en sus estados de polarización, pudiendo estos sumarse o restarse en algunos tramos de la fibra. Además debido a las diferencias en los procesos de fabricación, tensiones y esfuerzos mecánicos aplicados, el valor de la birrefringencia (y por lo tanto la PMD) varía en cortos tramos de longitud y periodos de tiempo de pocas horas, haciendo imposible dar un valor exacto de la magnitud de la dispersión. Por estas razones, se dice que PMD es un fenómeno de naturaleza estadística, que requiere métodos de compensación dinámicos [2] [36].

A continuación se presenta un análisis de la PMD, partiendo de conceptos fundamentales de polarización hasta expresiones matemáticas que ayudan a comprender este fenómeno y los efectos que provoca en la transmisión de información a través de fibra óptica.

1.2.2 POLARIZACIÓN DE LA LUZ

La luz, como todo tipo de radiación electromagnética es generada por la vibración de una carga eléctrica, la cual produce campos eléctricos y magnéticos que oscilan a la misma frecuencia de vibración y dan lugar a una onda electromagnética que se propaga por el espacio. La dirección de propagación de esta onda es perpendicular al plano formado por los vectores campo eléctrico “E” y campo magnético “H” de la onda, que a su vez son perpendiculares entre sí. De esta manera, si se tiene los vectores E y H oscilando en el plano XY como una función del tiempo y el espacio, la dirección de propagación de la onda de luz será a lo largo del eje z, como se muestra en la figura 1.25.

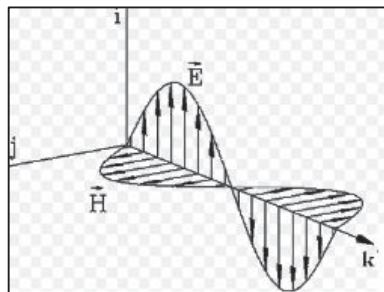


Figura 1.25 Propagación de una onda transversal [43].

Por convencionalismo, en la teoría de ondas electromagnéticas, se toma en cuenta únicamente el campo eléctrico “E”, ya que a partir de este, se pueden obtener todas las expresiones matemáticas para el campo magnético “H”, siendo ambos perpendiculares y proporcionales entre sí. Por lo tanto, se conoce como plano de polarización, al plano de vibración XY del vector campo eléctrico (y magnético) de una onda de luz. Este plano es el que determina el tipo de polarización que tendrá dicha onda [42] [44] [45].

Cuando existe un solo plano de polarización, se dice que la onda está totalmente polarizada, es decir los vectores E y H oscilan en un plano fijo. Caso contrario cuando los vectores E y H vibran en diferentes planos aleatoriamente, se dice que la luz no está polarizada o está parcialmente polarizada. Cabe recalcar que la mayoría de fuentes de luz no se encuentran polarizadas, un vivo ejemplo es la luz natural [36].

1.2.2.1 La Luz Polarizada

La polarización de una onda de luz, y en general de toda onda electromagnética, se clasifica de acuerdo a la forma en la que varía su vector campo eléctrico “E” en el tiempo y el espacio, de esta forma se puede tener varios tipos de polarización [46].

1.2.2.1.1 Polarización Lineal

Cuando el plano de polarización de la onda es fijo e invariante en el tiempo, y a la vez, las componentes (x,y) del vector campo eléctrico “E” están ya sea en fase o contrafase, manteniendo constante su dirección y variando únicamente su amplitud y sentido, se dice que la onda está polarizada linealmente. En este caso, la dirección de propagación de la onda es siempre fija y su amplitud varía sinusoidalmente como se muestra en la figura 1.26 [47] [42].

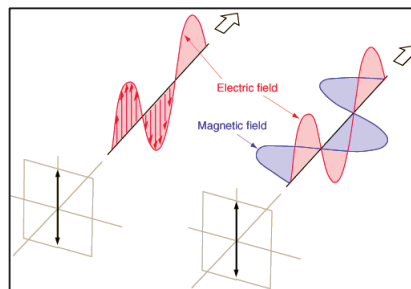


Figura 1.26 Polarización lineal de una onda EM [47].

Las expresiones matemáticas que describen a una onda polarizada linealmente, en función de las componentes (x,y) del vector campo eléctrico son las siguientes [44]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(-kz + \omega t) \quad (1.15)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(-kz + \omega t + \varphi)$$

Siendo: $\varphi = n\pi; \quad n = 0,1,2,3, \dots$

Donde:

$E_{0x,y}$ = Amplitud de las componentes (x, y) del vector E respectivamente.

k = Número de onda

ω = Frecuencia angular

φ = Diferencia de fase entre las componentes (x, y)

1.2.2.1.2 Polarización Circular

Cuando las componentes (x,y) del vector campo eléctrico “E” se encuentran desfasadas 90° , y tienen igual amplitud ($E_{0x} = E_{0y}$), se tiene una polarización circular. En este caso, se puede apreciar que la dirección de los vectores E y H varía formando una circunferencia cuyo eje central es la dirección de propagación de la onda, como se observa en la figura 1.27 [45] [47].

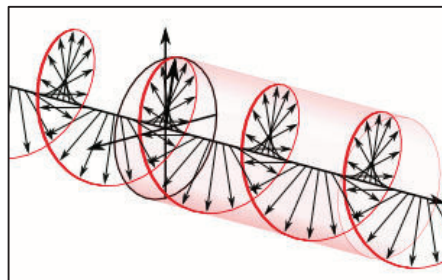


Figura 1.27 Polarización circular de una onda EM [48].

Una onda polarizada circularmente puede representarse matemáticamente de acuerdo a las siguientes ecuaciones [44]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(-kz + \omega t) \quad (1.16)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(-kz + \omega t \pm \frac{\pi}{2})$$

$$E_{0x} = E_{0y} = E_0$$

1.2.2.1.3 Polarización Elíptica

La polarización elíptica se da cuando las componentes (x,y) del vector campo eléctrico “E” se encuentran desfasadas arbitrariamente y a la vez presentan amplitudes arbitrarias. Tanto la dirección y la amplitud de los vectores E y H varían en el tiempo y el espacio, formando una elipse cuyo eje central coincide con la dirección de propagación de la onda, como se ve en la figura 1.28 [47] [45].

Al hablar de una diferencia de fase arbitraria, algunos de sus posibles valores pueden ser: 0 , $\pi/2$, π y sus múltiplos. Por lo tanto, se dice que la polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica.

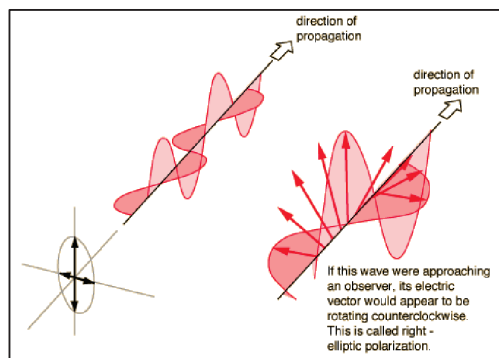


Figura 1.28 Polarización circular de una onda EM [47].

Las expresiones que describen a una onda polarizada elípticamente son las siguientes [44]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(-kz + \omega t) \quad (1.17)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(-kz + \omega t + \varphi)$$

1.2.2.2 La Luz No Polarizada

En el caso de que los vectores E y H vibren aleatoriamente en diferentes planos perpendiculares a la dirección de propagación, se tiene un tipo de luz despolarizada o no polarizada, en este caso los vectores que representan los campos E y H no tendrán una dirección fija y la onda se puede representar como una superficie con infinitos puntos que indican diferentes estados de polarización [36] [42].

En casos de luz parcialmente polarizada, se define como grado de polarización (*Degree of Polarization*, DOP) al porcentaje de luz polarizada respecto a la luz total emitida por una fuente en términos de potencia.

En comunicaciones ópticas es común el uso de fuentes que generan luz altamente polarizada como es el caso de los LASER y luz parcialmente polarizada como los LED.

1.2.3 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN DE LA POLARIZACIÓN

1.2.3.1 Vector Campo Eléctrico

De acuerdo a las leyes del electromagnetismo, todo tipo de onda luminosa puede describirse como una onda transversal en función de su vector campo eléctrico "E", o de su vector campo magnético "H". Es así, que una onda de luz que se propaga por el espacio en la dirección z positiva de un plano XYZ, se puede representar de la siguiente manera en función de su campo eléctrico [46]:

$$E = E_x i + E_y j \quad (1.18)$$

Siendo i, j los vectores unitarios de la dirección que toma el vector campo eléctrico.

Cada componente del vector E , en función de su posición y el tiempo e independientemente del tipo de polarización, se escribe de la siguiente manera [46]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega_0 t - kz + \varphi_x) \quad (1.19)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega_0 t - kz + \varphi_y)$$

Siendo φ_x y φ_y , los retardos de fase correspondientes a las componentes en (x, y) del vector E , respectivamente.

Los mismos vectores expresados en su notación compleja tendrán la siguiente forma [46]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i(\omega_0 t - kz + \varphi_x)} \quad (1.20)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{i(\omega_0 t - kz + \varphi_y)}$$

La potencia total de la onda luminosa será igual a la suma cuadrática de las amplitudes de las componentes del vector campo eléctrico en (x, y) [46].

$$P(t) = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (1.21)$$

Esta forma de representación del vector campo eléctrico describe el comportamiento de cualquier onda electromagnética en función del tiempo y el espacio independientemente del tipo de polarización. Sin embargo, debido a su complejidad matemática, se han diseñado otras formas más sencillas de representar la polarización de las ondas de luz.

1.2.3.2 La Elipse de Polarización

Es una forma gráfica de representar los estados de polarización de una onda electromagnética cualquiera, a partir de las expresiones matemáticas del vector E.

Partiendo de (1.19), si se toma la posición $z = 0$ y además se define a la diferencia de fases de cada componente de acuerdo a la siguiente expresión [49]:

$$\varphi = \varphi_y - \varphi_x \quad (1.22)$$

Se pueden representar las componentes (x, y) del vector E de la siguiente manera [49]:

$$E_x(t) = E_{0x} \cos(\omega_0 t) \quad (1.23)$$

$$E_y(t) = E_{0y} \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Las expresiones en (1.23) representan las ecuaciones paramétricas de una elipse, de donde es posible obtener su ecuación general en base a expresiones trigonométricas [50] [51]:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (1.24)$$

Esta expresión corresponde a la ecuación de la denominada Elipse de Polarización cuyo centro está en el origen del sistema de coordenadas y representa el lugar geométrico que recorre el extremo del vector E al variar t [51].

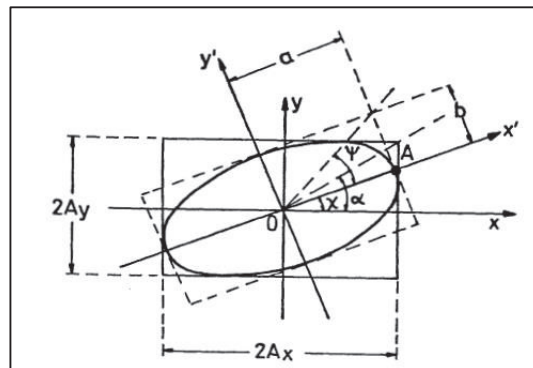


Figura 1.29 Elipse de Polarización [46].

La figura 1.29 muestra la elipse de polarización de una onda electromagnética, el ángulo de inclinación del eje mayor de la elipse con respecto al eje x se denomina Azimut y se lo representa con la letra “ χ ”, mientras que “ Ψ ” es el ángulo elipticidad.

Ambos ángulos son usados para describir cualquier estado de polarización que pueda tomar una onda electromagnética y se calculan de acuerdo a las siguientes ecuaciones [51] [46]:

$$\tan(2\chi) = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos(\varphi) \quad (1.25)$$

$$\tan(2\Psi) = \tan(\varphi) \sin(2\chi) \quad (1.26)$$

La elipse de polarización es una forma simple de representar estados de polarización fijos a partir de los parámetros del vector campo eléctrico “E”. Sin embargo, requiere de cálculos complejos para poder interpretar los fenómenos de polarización y propagación de la luz en medios que alteran estos estados como lo es la fibra óptica.

1.2.3.3 Sistema de Representación de Jones

O también llamado “Cálculo de Jones”, fue ideado por el científico R. C. Jones en 1941 y es usado para representar la polarización de la luz en función de las componentes ortogonales de su campo eléctrico [52].

El sistema de Jones permite representar luz polarizada por medio de una matriz 2x1 que se denomina “Vector de Jones” y cuyos elementos son las componentes normalizadas del campo eléctrico en los ejes (x,y) en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. De esta forma, una onda de luz polarizada se expresa de la siguiente manera.

$$E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i(\omega_0 t - kz + \varphi x)} \\ E_{0y} e^{i(\omega_0 t - kz + \varphi y)} \end{pmatrix} = e^{i(\omega_0 t - kz)} \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi x} \\ E_{0y} e^{i\varphi y} \end{pmatrix} \quad (1.27)$$

El vector de Jones normalizado tiene la forma [46]:

$$\begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi x} \\ E_{0y} e^{i\varphi y} \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

Siendo $e^{i\varphi x}$ y $e^{i\varphi y}$, el retardo de fase de las componentes de E en (x, y) respectivamente.

Este vector determina la amplitud y fase de las componentes del campo E.

Comúnmente se representa el vector de Jones en función de la fase relativa, definida en la expresión (1.22). De esta manera, el vector de Jones quedaría expresado así [46]:

$$E = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi/2} \\ E_{0y} e^{-i\varphi/2} \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

Para cálculos relacionados con el cambio en los estados de polarización de una onda debido a su propagación a través de medios ópticos lineales, comúnmente se normalizan los componentes del Vector de Jones y se restringe el primer elemento a un número positivo, despreciando el retardo relativo de fase. [46] [36]

La tabla 1.6 muestra el Vector de Jones para diferentes estados de polarización.

Polarización	Vector de Jones correspondiente
Polarización lineal Horizontal	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Polarización lineal Vertical	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Polarización lineal a 45° del eje x	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
Polarización lineal a -45° del eje x	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
Polarización circular dextrógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$
Polarización circular levógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$

Tabla 1.6 Vector de Jones correspondiente a diferentes estados de polarización [52].

Existen ciertos medios ópticos lineales como cristales polarizadores, rotadores, y más, que tienen la característica de manipular los estados de polarización de la luz que pasa a través de ellos. El efecto que estos materiales provocan también puede ser analizado por medio del algebra de Jones [52].

Si un haz de luz polarizada pasa a través de un material óptico lineal, la onda de luz resultante será una transformación lineal de la onda incidente, de acuerdo a la siguiente expresión [46]:

$$E_{x_{out}} = A_1 E_{x_{in}} + A_3 E_{y_{in}} \quad (1.30)$$

$$E_{y_{out}} = A_4 E_{x_{in}} + A_2 E_{y_{in}}$$

Donde A_1, A_2, A_3, A_4 son coeficientes complejos relacionados con la naturaleza del material óptico que atraviesa el haz de luz.

De esta manera, la transformación ocurrida puede describirse de acuerdo a la siguiente expresión [46]:

$$E_{out} = (J) E_{in} \quad (1.31)$$

$$\begin{pmatrix} E_{x_{out}} \\ E_{y_{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & A_3 \\ A_4 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x_{in}} \\ E_{y_{in}} \end{pmatrix}$$

Siendo J, la denominada Matriz de Jones, que se usa para representar las propiedades ópticas de los diferentes medios ópticos lineales. Algunos ejemplos de Matrices de Jones para diferentes medios son los siguientes [52]:

$$\text{Polarizador Horizontal: } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Polarizador Vertical: } \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Lineal a } 45^\circ: \quad \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Lineal a } -45^\circ: \quad \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Retardador de fase: } \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi/2} \end{pmatrix} \quad \text{Rotador: } \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

El sistema de Jones simplifica de gran manera los cálculos requeridos para resolver problemas referentes a la polarización de la luz. Sin embargo, solo

funciona para luz totalmente polarizada, en caso de tener luz no polarizada se tiene que recurrir a los cálculos de Stokes [36].

1.2.3.4 Sistema de Representación de Stokes-Mueller

Diseñado por George Gabriel Stokes en 1852, el sistema de representación por parámetros de Stokes describe matemáticamente a la luz polarizada y no polarizada en términos de su intensidad y grado de polarización, siendo usado para cualquier tipo de polarización elíptica.

Se define al Vector de Stokes S , como un vector columna de cuatro elementos reales, como se muestra en la siguiente ecuación [44] [49] [53].

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1.32)$$

De donde:

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (1.33)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \varphi$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \varphi$$

El parámetro S_0 representa la intensidad total de la onda, S_1 representa el predominio de la componente horizontal o vertical del campo E , S_2 indica una inclinación positiva o negativa en el ángulo χ de la elipse de polarización y por último, S_3 indica si la polarización es lineal, elíptica dextrógira² o elíptica levógira³.

² Polarización elíptica dextrógira : cuando la fase relativa de las componentes ortogonales de E , $0 < \varphi < \pi$

³ Polarización elíptica levógira : cuando la fase relativa de las componentes ortogonales de E , $\pi < \varphi < 2\pi$

En caso de tener luz totalmente polarizada, S_0 es igual al valor medio cuadrático de los demás parámetros de Stokes, como se muestra a continuación [36]:

$$S_0 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad (1.34)$$

Para realizar cálculos con los estados de polarización de una onda, comúnmente se usan los parámetros de Stokes normalizados cuyo valor varía entre -1 y 1, estos parámetros se obtienen dividiendo el Vector de Stokes para S_0 de la siguiente manera [36]:

$$s = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} / S_0 \quad (1.35)$$

En caso de tener luz parcialmente polarizada, esta se puede representar como la suma de varios haces de luz independientes y con su propio estado de polarización. Los elementos del vector de Stokes serán la suma de las expresiones de la ecuación (1.33), asociadas a cada uno de los haces de luz independientes superpuestos entre sí.

Para la luz natural, esta suma se anula, salvo para S_0 , obteniéndose el vector de Stokes [46]:

$$s = \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.36)$$

De esta forma se puede describir a un haz de luz parcialmente polarizada como la superposición de un haz polarizado con un no polarizado, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S = S_P + S_N \quad (1.37)$$

$$S = \begin{pmatrix} S_{P0} \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{N0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

La tabla 1.7 muestra los valores de los vectores de Stokes normalizados para diferentes tipos de polarización.

Polarización	Vectores de Stokes
Polarización lineal Horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal Vertical	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a 45° del eje x	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a -45° del eje x	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización circular dextrógira	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Polarización circular levógira	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Tabla 1.7 Vectores de Stokes para diferentes tipos de polarización [49].

Así como en el sistema de Jones, las propiedades físicas de los medios ópticos lineales (polarizadores, retardadores, etc.) se representan por medio de las denominadas matrices de Jones, en el sistema de Stokes, se usan las Matrices de Mueller para representar dichos medios.

Se define a una Matriz de Mueller “M” como la matriz 4x4 en la que cada uno de sus 16 elementos son independientes y representan las propiedades de los diferentes medios ópticos lineales y no lineales, esta matriz tiene la forma [46] [54]:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \quad (1.38)$$

Si una onda de luz representada por un Vector de Stokes atraviesa un medio óptico representado por una Matriz de Mueller, la onda emergente tendrá la siguiente expresión [46]:

$$S_{out} = M S_{in} \quad (1.39)$$

Las matrices de Mueller a diferencia de las de Jones sirven para representar cualquier medio óptico lineal o no lineal, estos incluyen retardadores (lineales, circulares y elípticos), polarizadores totales o parciales, despolarizadores, etc.

1.2.4 DEFINICIÓN DE BIRREFRINGENCIA

La birrefringencia es una propiedad que posee la calcita y algunos cristales cúbicos de carácter anisótropos, es decir que presentan diferentes propiedades en función de la posición y dirección en donde se midan. Si se hace pasar un fino haz de luz a través de un pedazo de calcita, este se descompondrá en dos rayos diferentes cada uno de los cuales “verá” distinto índice de refracción y viajará en una dirección diferente. Si el pedazo de calcita es lo suficientemente grueso, ambos rayos emergerán por separado [38].

De esta manera se puede definir a la birrefringencia como “la propiedad de ciertos cuerpos de desdoblar un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí, como si el material tuviera dos índices de refracción distintos” [55].

1.2.4.1 Birrefringencia en la Fibra Óptica

Como se vio en la sección 1.2.1, debido a los procesos de fabricación, tensiones aplicadas y demás, la fibra óptica es intrínsecamente anisótropa por lo que

presenta cierto grado de birrefringencia. Comúnmente se entiende por birrefringencia, a la diferencia entre los índices de refracción de los ejes ortogonales de la fibra llamados también ejes de birrefringencia. Por lo tanto, cuando un rayo de luz viaja a través de un segmento de fibra, el modo fundamental de propagación se divide en dos estados de polarización ortogonales independientes entre sí, correspondientes a los ejes (x, y) de su campo eléctrico. La energía del modo de propagación fundamental se reparte entre ambos estados [74].

De esta manera y como ya se mencionó, “cada estado de polarización de la luz se propagará en el medio con un valor distinto de índice de refracción, lo que implica que la señal original se comporta como dos ondas independientes que viajan a velocidades diferentes a lo largo de la fibra óptica” [40]. Cada estado de polarización llegará al otro extremo de la sección de fibra en un tiempo diferente al del otro, provocando dispersión por modo de polarización.

El valor de birrefringencia de la fibra se calcula con la siguiente expresión [36]:

$$B = |n_x - n_y| \quad (1.40)$$

Donde:

n_x = Índice de refracción que “ve” el modo de polarización en el eje x

n_y = Índice de refracción que “ve” el modo de polarización en el eje y

Se denomina eje rápido de birrefringencia, al eje del plano XY asociado al menor índice de refracción y por lo tanto mayor velocidad de propagación del modo a través de la fibra. Siendo el eje lento, el asociado al mayor índice de refracción y menor velocidad de propagación. En la figura 1.30 se observan los índices de refracción para fibras no birrefringente y birrefringente, el índice de refracción asociado al eje rápido de la fibra birrefringente se denomina “ n_{min} ” y el del eje lento “ n_{max} ” [40].

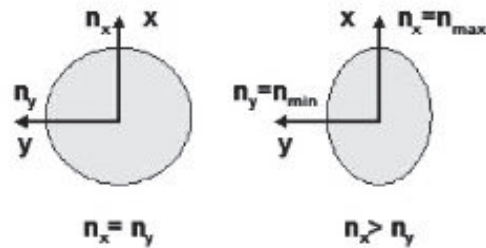


Figura 1.30 Ejes transversales en fibra no birrefringente y birrefringente [40].

La birrefringencia de la fibra se debe a la pérdida de simetría del núcleo debido a cambios moleculares producto del proceso de fabricación, además de tensiones y esfuerzos inducidos durante la instalación, que provocan que el núcleo pierda su geometría y en lugar de ser un círculo perfecto, posea una forma un tanto ovalada [41].

Además de lo ya mencionado, existen otros factores externos que generan cambios en la birrefringencia del núcleo. Algunos de estos son las tensiones provocadas por los cambios en la temperatura del ambiente, curvaturas en la fibra y fuentes cercanas de vibración. Ya que estos factores no son constantes sino que varían con la distancia y en cortos periodos de tiempo, el valor de la birrefringencia de la fibra cambiará en forma aleatoria dependiendo de la hora del día y la longitud en la que se mida [36].

Por lo tanto, se puede concluir que una birrefringencia aleatoria ocasionará un retardo en los tiempos de llegada de cada PSP y un valor de PMD también aleatorios para los pulsos que viajan a través del segmento de fibra.

La figura 1.31 muestra la pérdida de simetría del núcleo de la fibra debido a tensiones externas.

Comúnmente, los fabricantes suelen dar un valor de birrefringencia para un determinado segmento de fibra, este es un valor tentativo que indica la magnitud aproximada que tendrá la birrefringencia, más no el valor real exacto, pues como ya se mencionó, este depende de varios factores [2] [56].

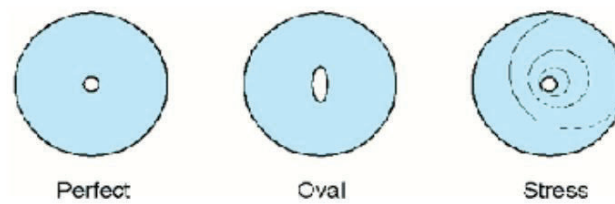


Figura 1.31 Deformación del núcleo de la fibra óptica [56].

Si lo que se desea es mantener el mismo valor de birrefringencia a lo largo de toda la fibra, sin que esta varíe con el tiempo, se pueden usar las denominadas fibras mantenedoras de polarización de alta birrefringencia, descritas en la sección 1.1.5.2.

1.2.4.2 Acoplamiento de Modos

En segmentos de fibra muy cortos o también en fibras Hi-Bi PM, el valor de birrefringencia y la orientación de sus ortogonales son fijos y no varían con la distancia. Sin embargo, esto no sucede en fibras de gran longitud como las que se usan en la mayoría de enlaces. Para este caso, los ejes ortogonales de birrefringencia sufren rotaciones aleatorias a lo largo de la fibra lo cual provoca intercambios de energía y redistribuciones entre los PSP del pulso de luz que se propaga [2] [39].

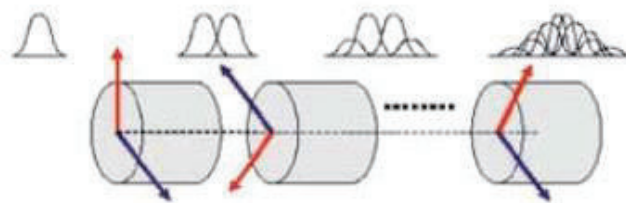


Figura 1.32 Propagación de un pulso a través de varios segmentos birrefringentes [40].

Se puede modelar fibras de gran longitud como una concatenación de varios segmentos de fibra Hi-Bi PM, cuya birrefringencia y dirección de los ejes cambia aleatoriamente, como se muestra en la figura 1.32.

Cuando los PSP de un pulso de luz no coinciden con los ejes de birrefringencia del segmento de fibra, estos rotan sus ejes para acoplarse con los de la fibra, dando lugar a un intercambio de energía entre PSPs. Así, en una fibra de gran longitud, ocurrirán tantos intercambios aleatorios de energía como segmentos birrefringentes estén presentes en ella. De esta forma, los PSP viajarán a lo largo de la fibra adelantándose y retrasándose entre sí, llegando al otro extremo en tiempos impredecibles. A esta concatenación de segmentos aleatorios de fibra se denomina Acoplamiento de Modos y es la segunda causa de la PMD en fibras monomodo [39] [40] [56].

Comúnmente se conoce Longitud de Acoplamiento " h ", a aquella longitud de fibra en la que la mitad de la energía de un PSP es transferida al otro. Si la longitud de acoplamiento es muy grande comparada con la longitud de la fibra, se tiene un acoplamiento débil, es decir puede desprejarse el acoplamiento de modos y la birrefringencia de la fibra será tratada como constante. En caso de que la longitud de la fibra sea muy grande comparada con la longitud de acoplamiento, se tendría un acoplamiento fuerte y se debe considerar el acoplamiento de modos [57] [58].

Cabe recalcar que el valor de h varía de fibra en fibra de acuerdo a su estructura y composición.

1.2.5 RETARDO DIFERENCIAL DE GRUPO (DGD)

Se define como Retardo Diferencial de Grupo (DGD), expresado como " $\Delta\tau$ ", a la diferencia entre los tiempos de retardo de grupo de cada PSP de los que está compuesto un pulso de luz que se propaga a través de la fibra. Esta diferencia temporal causa ensanchamiento de los pulsos o dispersión [59].

En la figura 1.33 se muestra de forma clara el DGD producido en un pulso de luz.

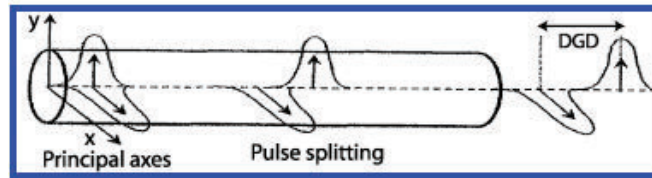


Figura 1.33 Retardo diferencial de grupo [14].

Comúnmente el término PMD hace referencia tanto al fenómeno físico de la dispersión del pulso óptico como al valor del DGD. Sin embargo, el término DGD se usa al hablar del valor de dispersión del pulso medido en un instante de tiempo específico, mientras que el término PMD, se refiere al promedio de todos los valores del DGD medidos dentro de un periodo de tiempo lo suficientemente amplio " $\langle \Delta\tau \rangle$ ".

1.2.5.1 DGD en Fibras con Birrefringencia Constante

Cuando el pulso de luz se propaga a través de un segmento de fibra en la que existe acoplamiento de modos débil o por así decirlo, su birrefringencia es constante, el DGD corresponderá a la diferencia en los tiempos de llegada de cada PSP, después de recorrer cierta distancia " L ".

Sabiendo que el tiempo de llegada de un estado de polarización corresponde a la razón entre la longitud recorrida L y su velocidad de grupo, la diferencia entre los tiempos de llegada de cada estado se determinan por la siguiente expresión [14]:

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{Vg_x} - \frac{L}{Vg_y} \right|$$

$$\Delta\tau = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}|$$

$$\Delta\tau = L (\Delta\beta_1) \tag{1.41}$$

Como se puede observar, el valor del DGD en este tipo de fibras es acumulativo linealmente con la longitud de la fibra.

En algunos textos se relaciona al parámetro $\Delta\beta_1$ con la birrefringencia de la fibra, sin embargo, para evitar confusiones, en este trabajo se define como birrefringencia a la diferencia entre los índices de refracción de los ejes de la fibra tal y como se describe en la ecuación (1.40).

1.2.5.2 DGD en Fibras con Birrefringencia Aleatoria

En fibras con birrefringencia aleatoria (fuerte acoplamiento de modos), no es posible calcular de manera exacta el valor que tendrá el DGD de un pulso que se propaga una determinada distancia, por motivos ya mencionados. Sin embargo, es posible estimar ese valor en base a aproximaciones estadísticas.

Diversos estudios han concluido que el valor del DGD para un segmento de fibra con birrefringencia aleatoria posee una distribución de probabilidad de Maxwell, como se muestra en la figura 1.34. En esta figura se muestran los diferentes valores medidos del DGD en función de su frecuencia relativa, el valor central observado, de 10 picosegundos, corresponde al DGD promedio también conocido como magnitud de la PMD [40] [56] [60].

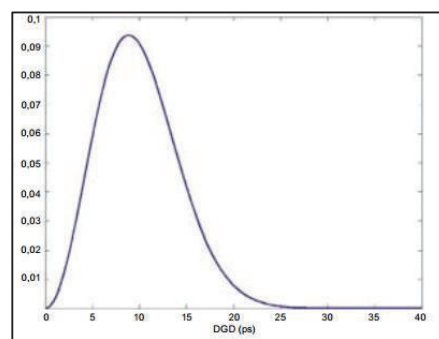


Figura 1.34 Distribución maxwelliana del DGD [61].

La Función Densidad de Probabilidad (*Probability Density Function*, PDF) para una distribución maxwelliana se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación [60]:

$$P(\Delta\tau) = \frac{32}{\pi^2} \frac{\Delta\tau^2}{\langle\Delta\tau\rangle^3} e^{-\frac{4\Delta\tau^2}{\langle\Delta\tau\rangle^2}} \quad (1.42)$$

Esta distribución es controlada únicamente por el parámetro DGD promedio “ $\langle \Delta\tau \rangle$ ”.

Siguiendo la distribución de Maxwell, el valor eficaz (RMS) del DGD se expresa por la siguiente ecuación [60]:

$$\Delta\tau^2_{RMS}{}^{1/2} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \cdot \langle \Delta\tau \rangle \quad (1.43)$$

De esta manera, el DGD tomará diferentes valores dependiendo del momento de la medición pero siempre alrededor del valor central promedio.

Por todo lo anterior, diversos estudios han concluido que el DGD no tiene dependencia lineal con la longitud de la fibra sino con la raíz cuadrada de dicha longitud [2] [40] [60].

1.2.5.3 Expresiones Matemáticas del DGD

La consecuencia del DGD es el ensanchamiento de los pulsos al extremo de salida de la fibra con respecto al pulso a la entrada, este ensanchamiento se define como “ b ” y se calcula con la siguiente expresión [40]:

$$b = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (1.44)$$

Donde τ y τ_0 son los anchos RMS de los pulsos de salida y entrada respectivamente que se pueden calcular con la expresión [40]:

$$\tau = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^2 \cdot P(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt} - \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t \cdot P(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt} \right]^2} \quad (1.45)$$

Siendo $P(t)$ la potencia del pulso.

El DGD en términos del ancho de los pulsos de entrada y salida se expresa como la raíz de la diferencia de ambos, de acuerdo a la siguiente expresión [40]:

$$\Delta\tau = \sqrt{\tau^2 - \tau_0^2} \quad (1.46)$$

La ITU-T recomienda que el DGD máximo para un segmento de fibra debe ser menor al 30% del tiempo de bit “ t_B ” de la señal transmitida, para no llegar a la penalidad de potencia de 1dB⁴. En la práctica, normalmente se establece un valor de DGD igual a la décima parte del tiempo de bit para evitar dicha penalidad, de acuerdo a la siguiente expresión [62]:

$$\Delta\tau = \frac{1}{10} t_B \quad (1.47)$$

Tanto los PSP como el DGD dependen de la longitud de onda “ λ ” de la señal que se propaga, razón por la cual es posible hallar un valor promedio de retardo para un segmento de fibra dentro de un rango de frecuencias. Se define a la PMD promedio como la media lineal de los valores del DGD dentro de una gama de frecuencias lo suficientemente ancha (mayor a 100 nm), y se expresa de la siguiente manera [59]:

$$PMD_{AVG} = \langle \Delta\tau \rangle = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \Delta\tau(f) df}{f_2 - f_1} \quad (1.48)$$

El valor cuadrático medio de PMD dentro de una gama de frecuencias “ f_1 ” a “ f_2 ”, se define como [59]:

$$PMD_{RMS} = \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} = \left[\frac{\int_{f_1}^{f_2} \Delta\tau^2(f) df}{f_2 - f_1} \right]^{1/2} \quad (1.49)$$

1.2.6 COEFICIENTE DE PMD

En fibras con acoplamiento de modos alto, se define al coeficiente de PMD “ φ_{PMD} ”, como la razón entre el valor del DGD promedio a lo largo de la fibra

⁴ Penalidad de Potencia de 1dB: se refiere a la máxima pérdida de potencia recomendada producto del ensanchamiento del pulso por dispersión para evitar una elevada degradación del sistema

respecto a la raíz cuadrada de su longitud expresado en picosegundos sobre raíz de kilómetro ($ps/km^{1/2}$), según la siguiente expresión [14] [63]:

$$\varphi_{PMD} = \frac{\langle \Delta\tau \rangle}{\sqrt{L}} \quad (1.50)$$

Los fabricantes suelen dar un valor determinado de φ_{PMD} , sin embargo, este no es más que el valor promedio de todos los posibles y corresponde al punto medio de la distribución Maxwelliana. Además, debido al uso y la constante exposición factores externos, el valor tiende a aumentar con el tiempo por lo que se recomienda realizar mediciones constantes en fibras ya instaladas [40].

En fibras actuales, el valor de φ_{PMD} varía normalmente entre 0,1 a 1 $ps/km^{1/2}$, por lo que su efecto no es apreciable antes de los 10 Gbps, siendo despreciable frente a la dispersión cromática. Sin embargo, es considerable a mayores velocidades y en grandes distancias.

La tabla 1.8 muestra longitudes de fibra adecuadas para diferentes valores de φ_{PMD} y velocidad de transmisión [2].

φ_{PMD} ($ps/km^{1/2}$)	10 Gbps	40 Gbps
0,5	400 Km	25 Km
0,1	10,000 Km	625 Km

Tabla 1.8 Coeficiente de PMD para velocidades de transmisión de 10 y 40 Gbps [2].

En fibras con débil acoplamiento de modos o también en fibras Hi-Bi PM, el coeficiente de PMD " φ_{PMD} " se define como el valor del DGD para cierta longitud de fibra " L ", dividido para dicha longitud y sus unidades están dadas en picosegundos sobre kilómetro (ps/km), de acuerdo a la siguiente expresión [64] [63]:

$$\varphi_{PMD} = \frac{\langle \Delta\tau \rangle}{L} \quad (1.51)$$

De donde:

$$\varphi_{PMD} = \Delta\beta_1$$

1.2.7 LONGITUD DE BATIMIENTO

El hecho de que la fibra tenga un valor de birrefringencia aleatoria provoca rotación en los principales estados de polarización “PSP” de la señal que se propaga, esta rotación es también aleatoria y depende de la longitud de onda “ λ ” de la señal. Se define a la Longitud de Batimiento “ L_b ” a la distancia a lo largo de la fibra que la luz debe recorrer para que sus PSP sean iguales a los del inicio, es decir los ejes ortogonales de polarización den un giro de 2π radianes. La longitud de batimiento se representa por la siguiente expresión [36] [65]:

$$L_b = \frac{\lambda}{B} \quad (1.52)$$

Donde B es la birrefringencia del segmento de fibra.

Los valores de L_b varían típicamente entre 10 y 100 cm para valores de birrefringencia entre 10^{-6} y 10^{-5} , tomando una longitud de onda de $1 \mu\text{m}$ [36].

1.2.8 ANÁLISIS MATEMÁTICO DE PMD

1.2.8.1 Aplicación del Sistema de Jones en Fibra Óptica

El sistema de Jones sirve para representar los cambios en los estados de polarización de la luz al atravesar cualquier medio óptico lineal. Por lo tanto, al ser la fibra óptica un material birrefringente, es posible representar la propagación de un pulso de luz a través de ella de acuerdo a la ecuación (1.31).

El modelo *Waveplate* o Lámina de Onda ha sido usado por varios investigadores para describir las propiedades ópticas de una fibra birrefringente con excelentes resultados. Este modelo considera una rotación y desfase aleatorio de los estados de polarización de la luz que atraviesa el medio [56] [60]. De este modo, un segmento de fibra estaría compuesto por un retardador de fase dependiente de la frecuencia y un rotador. El efecto del retardador de fase es introducir una diferencia en los tiempos de llegada de cada componente ortogonal de polarización de la señal, además de un cambio en la fase de dichas componentes.

El rotador de fase en cambio produce rotación en los ejes ortogonales de polarización de la señal que se propaga [66].

Matemáticamente una lámina de onda en el dominio de la frecuencia se expresa así [60]:

$$J = A(\omega) B C \quad (1.53)$$

$$J = \begin{pmatrix} e^{-i\omega^* \Delta t/2} & 0 \\ 0 & e^{i\omega^* \Delta t/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Donde θ es el ángulo de rotación de los ejes de birrefringencia de la fibra respecto a los ejes de la señal, φ es la diferencia de fase aleatoria producida entre las componentes ortogonales (x , y), ambos ángulos relacionados con el acoplamiento de modos, ω es la frecuencia angular y Δt es el valor del DGD del segmento de fibra.

De esta forma la ecuación (1.31) se escribe así [60]:

$$\begin{pmatrix} E_{x \text{ out}}(\omega) \\ E_{y \text{ out}}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\omega^* \Delta t/2} & 0 \\ 0 & e^{i\omega^* \Delta t/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x \text{ in}}(\omega) \\ E_{y \text{ in}}(\omega) \end{pmatrix} \quad (1.54)$$

El análisis anterior toma en cuenta un solo segmento de fibra con birrefringencia constante, en caso de acoplamiento de modos aleatorio cada segmento birrefringente tendrá su propia Matriz de Jones y el modelado de la cadena de segmentos birrefringentes se pueden realizar como la concatenación o producto ordenado de las respectivas matrices asociadas a cada segmento.

Si se toma una fibra con k segmentos birrefringentes, la respectiva matriz de Jones será la siguiente [40]:

$$J(\omega) = \prod_{k=1}^K A_k(\omega) \quad (1.55)$$

Donde $A_k(\omega)$ está dado por:

$$A_k(\omega) = \begin{pmatrix} e^{-i\omega^* \Delta t_k/2} & 0 \\ 0 & e^{i\omega^* \Delta t_k/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\varphi_k/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_k/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix} \quad (1.56)$$

En cálculos y simulaciones se suelen escoger valores para $K > 100$ con el objetivo de conseguir un valor estadísticamente aproximado a la realidad de la PMD. [40]

La ecuación 1.31 es usada también para calcular el valor del campo eléctrico de salida " $E_{out}(\omega)$ " en estos casos.

1.2.8.2 Aplicación del Sistema de Stokes-Mueller en Fibra Óptica

Para representar un segmento de fibra óptica usando el algebra de Stokes, se utilizan las denominadas Matrices de Mueller "M". De esta forma, la Matriz de Mueller que describe las características de la fibra óptica birrefringente será la siguiente [67]:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Partiendo de la ecuación (1.39) el pulso de salida se representa por la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} S_{0 \text{ out}} \\ S_{1 \text{ out}} \\ S_{2 \text{ out}} \\ S_{3 \text{ out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{0 \text{ in}} \\ S_{1 \text{ in}} \\ S_{2 \text{ in}} \\ S_{3 \text{ in}} \end{pmatrix} \quad (1.57)$$

Del mismo modo que en el método de Jones, la Matriz de Mueller que representa la concatenación de varios segmentos birrefringentes en una fibra de gran longitud se calcula mediante el producto ordenado de la Matriz de Mueller asociada a cada segmento birrefringente.

El cálculo y determinación de los elementos de la Matriz de Mueller no serán analizados en este trabajo.

1.2.9 EL VECTOR PMD

Otra forma de representar los efectos de la PMD es a partir del vector $\vec{\Omega}$, un vector tridimensional sobre la esfera de Poincaré⁵ que representa la evolución de los estados de polarización de salida de una señal que atraviesa un segmento de fibra óptica, dependiendo de la frecuencia.

El origen de este vector es el centro de la esfera y su extremo apunta al estado de polarización de salida de la señal rotado en sentido anti horario sobre la esfera de Poincaré [36].

La expresión que determina el vector $\vec{\Omega}$ es la siguiente [68]:

$$\frac{d\vec{S}}{d\omega} = \vec{\Omega} \times \vec{S} \quad (1.58)$$

Esta expresión describe el cambio en el estado de polarización de salida de la señal con respecto a la frecuencia “ ω ”. Donde \vec{S} es el estado de polarización inicial representado en los parámetros de Stokes y $\vec{\Omega}$ es el vector dispersión por modo de polarización.

El vector Ω en función de su módulo se representa de la siguiente manera: [36]

$$\vec{\Omega} = |\vec{\Omega}| \cdot \vec{q} \quad (1.59)$$

Donde la magnitud del vector representa al DGD de la fibra y \vec{q} es un vector de Stokes que apunta en la dirección del estado de polarización PSP correspondiente al eje lento de la fibra.

El DGD se puede obtener en base al ángulo de rotación de los estados de polarización de salida con respecto a la frecuencia de acuerdo a la expresión [68]:

$$DGD = |\vec{\Omega}| = \frac{d\theta}{d\omega} \quad (1.60)$$

⁵ Esfera de Poincaré: Esfera de radio igual a la unidad en la que cada uno de sus puntos representa un estado de polarización diferente, en base a los parámetros de Stokes.

En caso de fibras compuestas de varios segmentos birrefringentes (acoplamiento de modos rápido), el vector $\vec{\Omega}$ correspondiente a la sección $n+1$ puede determinarse por la siguiente expresión [69]:

$$\vec{\Omega}_{n+1} = \Delta\vec{\Omega}_{n+1} + B\vec{\Omega}_n \quad (1.61)$$

Donde $\vec{\Omega}_{n+1}$ es el vector PMD de la sección $n+1$, $\vec{\Omega}_n$ es el vector PMD correspondiente a las anteriores n secciones de fibra y B es la matriz de Mueller que representa el cambio en la polarización de salida con respecto a la entrada de la sección $n+1$.

El vector $\vec{\Omega}$ es muy usado en la medición de PMD en fibras y componentes ópticos.

La figura 1.35 muestra la representación de un estado de polarización sobre la esfera de Poincaré.

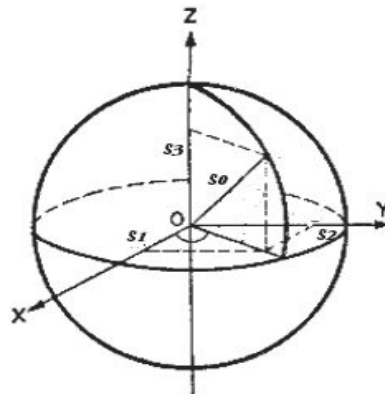


Figura 1.35 Representación de un estado de polarización en base a sus parámetros de Stokes sobre la esfera de Poincaré [51].

1.2.10 PMD DE SEGUNDO ORDEN

Como se vio en la sección anterior, tanto el vector $\vec{\Omega}$ como el DGD son dependientes de la frecuencia “ ω ” de la onda de luz. Esta dependencia es una manifestación de los efectos de la dispersión de orden superior que deben ser

tomados en cuenta siempre y cuando el tiempo de coherencia⁶ de la fuente de luz sea comparable con el DGD producido. Diversos estudios realizados en la última década acerca de los efectos de dispersión de orden superior han sido limitados solo a la dispersión de segundo orden, la cual manifiesta una dependencia compleja del vector de dispersión con respecto a la frecuencia y polarización, además de un tipo de dispersión cromática presente en los PSP [70].

La expresión que indica el efecto de la Dispersión por Modo de Polarización de Segundo Orden (*Second Order Polarization Mode Dispersion, SOPMD*) se obtiene derivando el vector $\vec{\Omega}$ con respecto a la frecuencia angular " ω ", de esta manera [71]:

$$\frac{d\Omega}{d\omega} = \vec{\Omega}_\omega = \Delta\tau_\omega \vec{q} + \Delta\tau \vec{q}_\omega \quad (1.62)$$

Donde el primer componente del vector $\vec{\Omega}_\omega$ causa Dispersión Cromática Dependiente de la Polarización (*Polarization Chromatic Dispersion, PCD*) y el segundo causa Despolarización⁷.

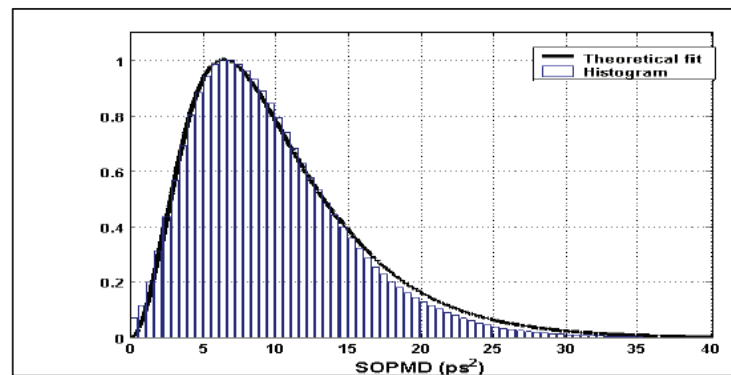


Figura 1.36 Naturaleza estadística de la SOPMD [71].

La SOPMD posee una naturaleza estadística dependiente de la frecuencia de la onda, cuya magnitud es conocida como Velocidad del Vector de Dispersión

⁶ Tiempo de coherencia: Intervalo de tiempo en el que la radiación emitida por el láser mantiene una relación de fase significativa.

⁷ Despolarización: cambio en la polarización de salida de una señal óptica que atraviesa un segmento de fibra

(*Dispersion Velocity Vector*, DVV) y se mide en picosegundos al cuadrado (ps^2). El DVV posee una PDF Maxwelliana igual a la del DGD, como muestra la figura 1.36 [71].

Cabe recalcar que los efectos de la SOPMD y dispersiones de órdenes superiores no serán analizados en este trabajo.

1.2.11 COMPENSACIÓN DE PMD

La PMD es uno de los principales problemas que afectan a las comunicaciones por encima de los 10 Gbps, por lo tanto es necesario algún mecanismo que pueda controlar y contrarrestar su efecto sobre la transmisión de información. El problema principal radica en su naturaleza aleatoria, ya que a diferencia de la dispersión cromática, cuyo efecto es predecible, controlable y sus parámetros poseen muy poca variación, la PMD es totalmente impredecible, su magnitud puede variar de un día a otro o incluso en pocas horas debido principalmente a los cambios de temperatura que alteran la birrefringencia de la fibra y al acoplamiento de modos. Es por estas razones que se requiere un mecanismo de compensación dinámico para controlar y minimizar el valor de la PMD en los enlaces de fibra [36].

Los diferentes métodos usados para la compensación de este fenómeno se pueden dividir en ópticos y eléctricos. Las técnicas ópticas se basan en la separación de los PSP del haz de luz, introduciendo retardos en la propagación de los mismos, mientras que los métodos eléctricos se basan en la separación de la señal eléctrica en el receptor (después de la conversión opto-eléctrica), en un cierto número de ramas a las cuales se atribuye un peso y retardo determinados, estas señales se mezclan a la salida tratando de recomponer el pulso. Debido a su factibilidad, los métodos ópticos son los más usados en sistemas de gran capacidad, ya que pueden implementarse directamente en enlaces de fibra que estén en funcionamiento [72].

1.2.11.1 Compensación Óptica

Un compensador óptico está compuesto por varios segmentos birrefringentes cuyo efecto será el opuesto al de la dispersión de la fibra. Conociendo que un segmento de fibra óptica está formado por varias secciones birrefringentes acopladas entre sí, serían necesarios tantos elementos birrefringentes como secciones acopladas existan, con el fin de poder cancelar el efecto de la PMD inducida. Sin embargo, es imposible disponer de tantos elementos birrefringentes como secciones de fibra existan, además que sería muy difícil controlarlos a todos. Por esta razón, normalmente se usa en un número limitado de estos segmentos [72].

Es posible clasificar a los compensadores de PMD ópticos en base a su Grado de Libertad (*Degree of Freedom*, DOF), el cual define la cantidad de componentes controlables que posee el compensador [73].

El primer método de compensación y el más sencillo de todos, se basa en la pre compensación de la dispersión. Esta técnica consiste en la colocación de un controlador de polarización⁸. La función del controlador es la de alinear los PSP del haz de luz con los ejes de birrefringencia de la fibra, con esto se evita la distorsión debida a la rotación del ángulo de orientación de los PSP de la señal. El DOF de esta técnica es igual a dos, ya que posee dos elementos encargados de rotar los ejes de los PSP, estos elementos son dos retardadores $\lambda/2$ y $\lambda/4$ formados por cristales electro-ópticos, como se muestra en la figura 1.37.

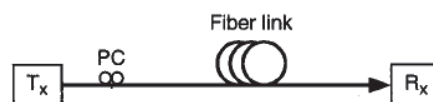


Figura 1.37 Pre-compensador de PMD [73].

⁸ Controlador de polarización: dispositivo que permite sintonizar un estado de polarización determinado para una señal óptica) en el transmisor.

Sin embargo este método no es muy eficiente ya que se necesita conocer la orientación exacta de los ejes de la fibra, lo cual no es sencillo de realizar. Además, en fibras largas, debido a la concatenación de modos, serían necesarios tantos pre compensadores como segmentos birrefringentes que estén acoplados entre sí [2].

Un segundo método usado generalmente en sistemas transoceánicos de altas velocidades consiste en la post compensación de la dispersión. Esta técnica se basa en la colocación de un polarizador-divisor del haz de luz en el receptor cuya función consiste en descomponer el haz de luz en sus dos PSP correspondientes a los ejes rápido y lento de la fibra. Después de la división, cada PSP seguirá un diferente camino. Al PSP correspondiente al eje rápido (el que adelanta al otro) se lo hace pasar por un espejo angular ajustable, cuya función es la de introducir un retardo en la propagación variando su camino óptico para que de esa forma, los retardos correspondientes a cada PSP sean iguales. Una vez logrado esto, ambos PSP se vuelven a mezclar formando así el pulso de luz original. El espejo angular se ajusta de acuerdo al estado de las dos señales entrantes, para lo cual se necesita controlar el espejo por medio de una señal de realimentación. La figura 1.38 muestra el esquema de un post-compensador de PMD. Como se puede observar, el elemento de compensación es controlado por una señal de realimentación y un algoritmo de control en recepción [2] [72].

Existen algunas variantes de los post-compensadores, de acuerdo a su DOF, algunas de las cuales son [73]:

- Un post-compensador compuesto por un retardador temporal fijo, este es el mas simple de fabricar puesto que no necesita de señal de realimentación, aunque no es muy eficiente debido a que el retardo de grupo entre PSP no siempre es el mismo. Su DOF es dos.
- Un post-compensador compuesto por un retardador temporal ajustable, tiene mejor desempeño que el anterior debido a que se puede ajustar el retardo temporal permitiendo una compensación dinámica. Su DOF es tres.

- Un post-compensador compuesto por dos retardadores temporales fijos. Su DOF es cuatro. El uso de las dos etapas permite controlar de mejor manera la dispersión del pulso ya que se aumenta más segmentos birrefringentes, además de ser más efectivos para contrarrestar la PMD de órdenes superiores.
- Un post-compensador compuesto por un retardador temporal fijo y un variable, su DOF es cinco.

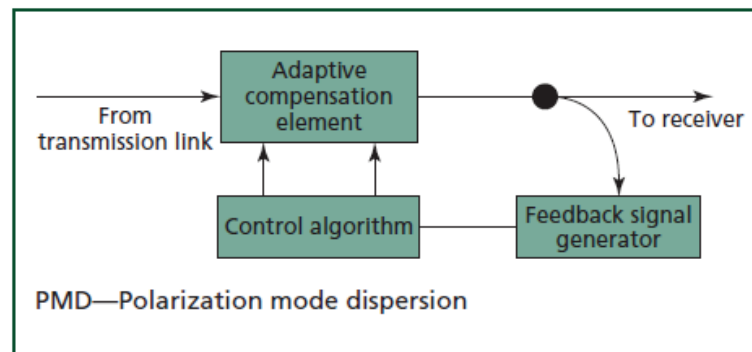


Figura 1.38 Post-compensador de PMD [72].

La figura 1.39 muestra los diagramas de los post-compensadores descritos anteriormente.

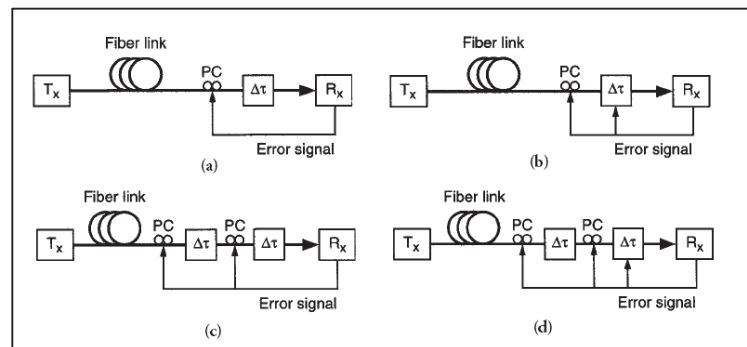


Figura 1.39. (a) Compensador con retardo fijo, (b) Compensador con retardo variable, (c) Compensador con dos retardos fijos, (d) Compensador con retardo fijo y variable [73].

En enlaces modernos de gran capacidad, es común usar métodos de compensación dinámica pues son más efectivos que los métodos pasivos debido

a que pueden ajustar el retardo temporal introducido a cada PSP en base a señales de realimentación y algoritmos definidos por software. Sin embargo, son mucho más costosos y difíciles de fabricar.

1.2.11.2 Compensación Electrónica

Los Compensadores Electrónicos de Dispersión (*Electronic Dispersion Compensators*, EDC) son circuitos electrónicos adaptativos que realizan la compensación por medio de procesamiento digital de señales en la parte del receptor. Debido a la gran capacidad de integración, es posible disponer de un EDC para largas distancias y altas velocidades de transmisión contenido en tan solo un microchip por cada receptor, lo que permite minimizar los costos significativamente. Los EDC se pueden clasificar en analógicos y digitales.

La gran desventaja de la compensación electrónica respecto de la óptica es el tiempo de conversión electro-óptico, el cual limita en gran manera la capacidad de transmisión de la información [2]

CAPÍTULO 2

IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIO, CÁLCULOS Y SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta la simulación del fenómeno de PMD descrito anteriormente, la simulación es una parte importante en todo estudio técnico ya que permite verificar o refutar la teoría expuesta.

2.1 ELECCIÓN DEL SIMULADOR

Actualmente, existen diversos programas computacionales que permiten simular todo tipo de fenómenos ocurridos en la fibra óptica, entre ellos la PMD. A continuación, se realizará una comparación entre tres de los simuladores de enlaces y redes ópticas más conocidos, describiendo sus características principales y posibles aplicaciones, con el objetivo de escoger el más adecuado para cumplir con los objetivos de este trabajo. Los simuladores a analizar son:

- NLSE Solver
- Optsim
- OptiSystem

2.1.1 NLSE SOLVER

Non Linear Schrödinger Equation Solver (NLSE Solver) es un software libre desarrollado por el Profesor Govin Agrawal y su grupo de estudio de la Universidad de Rochester. Se trata de un archivo ejecutable que permite resolver la Ecuación No Lineal de Schrödinger (NLSE) relacionada con los fenómenos no lineales de la fibra. [74]

Cabe recalcar que el objetivo de este trabajo no es explicar la resolución de la NLSE ya que no esta relacionada con el fenómeno de PMD.

2.1.1.1 Características

Las características más importantes de NLSE Solver son las siguientes [75]:

- Es un software libre escrito en lenguaje C++/VC++.
- Opera en todas las plataformas de Windows a partir de Windows 95.
- No requiere instalación pues es un archivo ejecutable de 56 Kbytes.
- Incluye opciones gráficas y de visualización permitiendo exportar los resultados de la simulación.
- Es ideal para todo aquel que quiera aprender óptica no lineal.
- Incluye la opción de modificar varios los parámetros con el fin de observar su efecto en la propagación de un pulso en una fibra óptica.

2.1.1.2 Descripción de la Interfaz Gráfica

Como se puede apreciar en la figura 2.1, el software posee una interfaz gráfica sencilla que permite la interacción con el usuario.

La Barra de Menú consta de tres opciones: *File*, *Advanced*, *Info*, que permiten manejar algunos aspectos del simulador.

La zona de trabajo se divide en cuatro secciones que permiten controlar y editar todos los aspectos y parámetros de la simulación. Estas secciones son: Parámetros de la Fibra, Selección de la Señal de Entrada, Otras Opciones y Opciones de Dibujo [74].

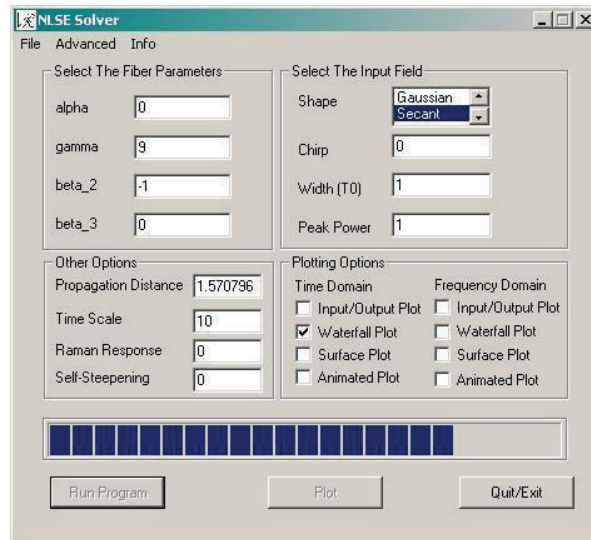


Figura 2.1 Interfaz Gráfica NLSE Solver [74].

- Dentro de la sección Parámetros de la Fibra, se pueden modificar los siguientes valores: coeficiente de atenuación de la fibra, coeficiente no lineal, coeficiente de dispersión de segundo orden (*Group Velocity Dispersion, GVD*)⁹, coeficiente de dispersión de tercer orden (*Third Order Dispersion, TOD*)¹⁰.
- Dentro de la sección Selección de la Señal de Entrada, se puede elegir entre tres tipos de señal que son: Gaussiana, Secante y Súper Gaussiana.
- Dentro de Otras Opciones se puede modificar parámetros como: Distancia de Propagación, Tiempo de Escala, Respuesta Raman¹¹ y Autoempinamiento¹².
- Dentro de Opciones de Dibujo se encuentran diferentes opciones para las gráficas de las señales de entrada y salida.

⁹ GVD: o también conocido como β_2 , indica la variación de la velocidad del pulso con respecto a su frecuencia como consecuencia de la dispersión cromática de material del núcleo de la fibra.

¹⁰ TOD: indica la variación en la dispersión al trabajar cerca de la longitud de onda de corte de cierta fibra óptica. Esta longitud de onda de corte está especificada en la recomendación de la ITU-T de la fibra con la que se trabaje.

¹¹ Respuesta Raman: Relacionada con el efecto Raman, explicado en [98]

¹² Auto-empinamiento: cambio en la forma de los pulsos ópticos debido a un índice de refracción dependiente de la potencia del pulso.

En cuanto a sus aplicaciones, NLSE Solver permite únicamente resolver la NLSE y los fenómenos no lineales asociados a ella. Otro tipo de aplicaciones están fuera de su alcance.

2.1.2 OPTSIM

OptSim es un software desarrollado por RSoft Design Group, que permite el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica. Contiene una librería con más de 400 componentes ópticos y eléctricos y permite la inclusión de componentes diseñados por el usuario.

OptSim posee una interfaz que permite la integración con MATLAB™, permitiendo a los usuarios implementar rutinas que interactúen directamente en la simulación de OptSim. [76] [77]

2.1.2.1 Características

Las características más importantes de Optsim son las siguientes [56] [75] [76]:

- Posee herramientas de diseño en el dominio del tiempo y la frecuencia para todo tipo de enlace óptico.
- La interfaz de MATLAB™ facilita el desarrollo de modelos propios del usuario usando archivos .m y/o el entorno de Simulink™.
- Posee interfaces compuestas por equipos de prueba de laboratorio como Agilent y Luna, que permiten la integración de la simulación y el experimento.
- Las interfaces de diseño con herramientas a nivel de dispositivo, tales como BeamPROP y LaserMOD, permiten un diseño multi-nivel para sistemas opto-electrónicos.

- Posee integración con los lenguajes de programación C/C++ a través de API's (*Application Programming Interfaces*) que facilitan el desarrollo de modelos propios del usuario.
- Cuenta con una extensa librería de componentes predefinidos que agilitan el modelado de sistemas comercialmente disponibles.
- La interfaz gráfica post procesamiento actúa como un instrumento virtual de laboratorio que permite una medida flexible e intuitiva.

La figura 2.2 muestra el entorno de trabajo de OptSim. Como se puede apreciar, incluye una gran variedad de componentes además de los elementos de visualización descritos.

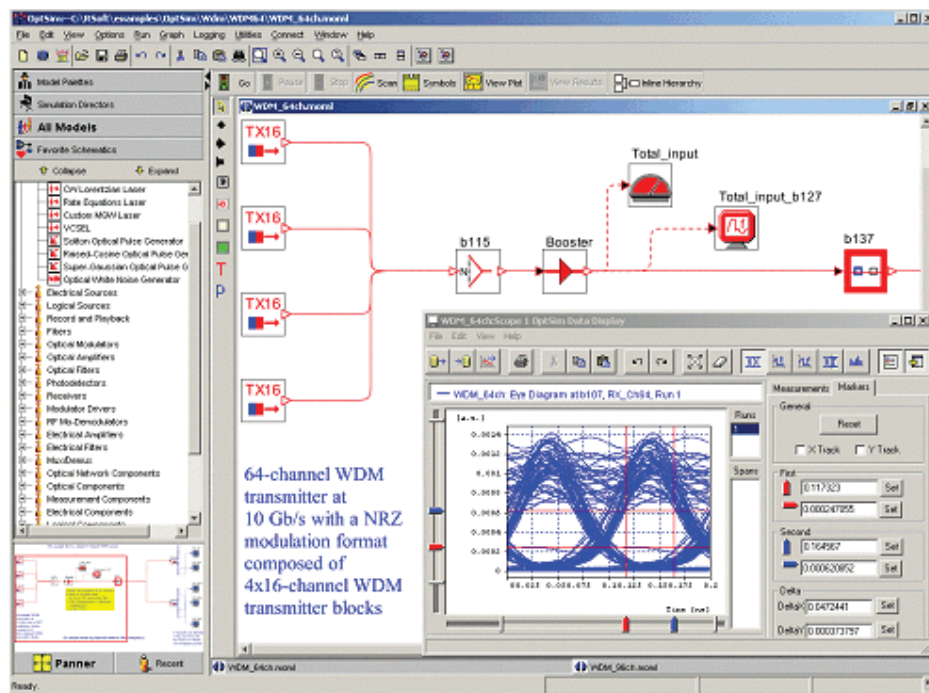


Figura 2.2 Interfaz gráfica OptSim [78].

2.1.2.2 Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones de OptSim incluyen lo siguiente [76]:

- Sistemas de comunicación óptica coherentes, tales como PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM y OFDM.
- Formatos de modulación avanzados como D(Q)PSK, Duobinario, BPSK, m-PAM, m-QAM, etc.
- Sistemas DWDM/CWDM con amplificación óptica EDFA, Raman, SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) y OPA (*Optical Pre-Amplifier*).
- Sistemas FTTx/PON.
- Sistemas *Community Antenna Television*, CATV digital y analógico, radio-sobre-fibra y enlaces fotónicos de microondas.
- OCDMA/OTDM
- Compensación de Dispersión Electrónica (*Electronic Dispersion Compensation, EDC*)
- Giroscopio interferométrico de fibra óptica. (*Fibre Optic Gyroscope, iFoG*)
- Óptica de Espacio Libre (*Free Space Optic, FSO*)
- Transmisión de Solitones

2.1.3 OPTISYSTEM

Optisystem, desarrollado por Optiwave, es un software de simulación de arquitectura de diseño integral que permite a los usuarios planear, probar, simular y optimizar virtualmente enlaces ópticos en la capa de transmisión de redes ópticas modernas. Los tipos de enlaces van desde sistemas de difusión de video hasta *backbones* intercontinentales.

El software posee un ambiente de simulación basado en una distribución jerárquica de componentes y sistemas. Además, se pueden añadir componentes

diseñados por el usuario que son totalmente compatibles con los componentes predefinidos.

Incorpora una Interfaz Gráfica de Usuario (*Guide User Interface*, GUI) que controla el funcionamiento de todos los componentes ópticos, modelos y gráficos de la simulación. Su librería de elementos activos y pasivos incluye una variedad de parámetros reales dependientes de la longitud de onda, que permiten al usuario investigar el efecto de un elemento en particular del sistema [79] [80] [81].

Optisystem es usado en su mayoría por científicos, ingenieros en telecomunicaciones y estudiantes universitarios alrededor del mundo.

2.1.3.1 Características

Las características más importantes de OptiSystem son las siguientes [79]:

- Posee una extensa librería de componentes, los cuales han sido cuidadosamente validados con el fin de obtener resultados de simulación comparables con la realidad.
- Integración con otros programas de Optiwave como OptiAmplifier, OptiBPM, WDM Phasar, OptiFiber y OptiSPICE.
- Representación de señales combinadas, permitiendo el uso de diferentes formatos para las señales ópticas y eléctricas.
- La simulación puede ser realizada con una gran variedad de parámetros. Además, OptiSystem puede optimizar cualquier parámetro con el fin de maximizar su efecto de acuerdo al tipo de simulación. Es posible combinar múltiples parámetros y múltiples optimizaciones.
- Posee herramientas de simulación avanzadas que permiten la visualización de parámetros tales como el *chirping*, diagrama del ojo, estados de polarización, diagrama de constelaciones y análisis de sistemas WDM.

- Se basa en una simulación jerárquica con subniveles para una simulación más flexible y eficiente. Los diferentes niveles de abstracción son: Sistema, Subsistema y Componente.
- Permite el desarrollo de componentes definidos por el usuario, que se pueden obtener a partir de los elementos predefinidos de las librerías o por medio de la integración con MATLAB™ y Simulink™.
- El diseño multi-capa posibilita crear varios diseños en un mismo proyecto, lo que permite elaborar y editar diseños de manera rápida y efectiva.
- Posee una opción de Costo de Materiales basándose en una tabla de costos del sistema diseñado, en la que se detalla cada capa y componente. Es posible exportar esta tabla a otras aplicaciones.

2.1.3.2 Aplicaciones

Optisystem permite el diseño de cualquier tipo de enlace óptico en la capa física y el análisis de redes ópticas en arquitecturas LAN y MAN. Algunas de las aplicaciones de Optisystem son [79] [81]:

- Diseño de redes y sistemas CATV o TDM/WDM.
- Redes Ópticas Pasivas (*Passive Optical Networks*, PON) basadas en FTTx.
- Óptica de Espacio Libre (FSO).
- Sistemas de Radio-Sobre-Fibra (*Radio Over Fiber*, ROF).
- Diseño de anillos SONET/SDH.
- Diseño de transmisores, receptores, canales y amplificadores.
- Diseño de mapas de dispersión.

- Análisis de BER y otras penalidades del sistema con diferentes modelos de recepción.
- Cálculos del presupuesto de enlace.

2.1.4 COMPARACIÓN Y ELECCIÓN

En base a los parámetros expuestos anteriormente, se realiza un cuadro comparativo entre los tres simuladores, con el fin de seleccionar el que más se adecúe a las necesidades de este trabajo, basándose en decisiones de escalabilidad, complejidad, funcionalidad, librerías y veracidad de la simulación.

	NLSE Solver	OptSim	OptiSystem
Software Libre	X		
Librería de Componentes		X	X
Facilidad de Uso	X	X	X
Facilidad de Obtención	X		X
Diseño Multi-Capa		X	X
PARÁMETROS VARIABLES POR EL USUARIO			
Atenuación (α)	X	X	X
Longitud (L)	X	X	X
Frecuencia (f)		X	X
Tipo de Pulso	X	X	X
Valor de Potencia Pico	X	X	X
DC offset (Bias)		X	X
Ancho de Pulso		X	X
λ de Referencia		X	X
PMD		X	X

Tabla 2.1 Comparación entre los tres simuladores.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, tanto OptSim como OptiSystem poseen los elementos necesarios para realizar la simulación de este trabajo. NLSE Solver es un software muy sencillo cuyo único aplicativo es la resolución de efectos no lineales en un sistema muy elemental de fibra óptica, razón por la cual es descartado.

Tanto OptSim como OptiSystem poseen un entorno de simulación de gran alcance, librerías completas con elementos activos y pasivos. Ambas opciones también permiten el uso de diagramas de bloque para la elaboración de sistemas complejos y la simulación de enlaces ópticos con resultados confiables y una variedad de parámetros.

Después de realizar el análisis, se optó por elegir a OptiSystem debido a la facilidad de operación, flexibilidad y estructura jerárquica que posee. Además, la búsqueda y obtención del software de instalación fue más sencilla que para OptSim.

2.2 EL SIMULADOR OPTISYSTEM

Una vez seleccionado el software de simulación OptiSystem, es necesario realizar una descripción de su funcionamiento y de las herramientas más importantes que permitirán la simulación de PMD.

Los requisitos mínimos que permiten el correcto funcionamiento de Optisystem en un ordenador son [82]:

- Procesador Pentium 3 o superior
- Sistema operativo Windows 7 o superior, de 32 o 64 bits
- 128 MB de memoria RAM

Es posible descargar OptiSystem en su versión más actual, OptiSystem 14.1, desde la página de Optiwave en la sección de descargas, siguiendo este enlace:

<http://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/>

Figura 2.3 Creación de cuenta en Optiwave.com [83].

Para ejecutar la versión completa de OptiSystem es necesario adquirir la licencia del software, razón por la cual se trabajará con su versión demo, la cual no posee costo y tiene un periodo de prueba de treinta días. Antes de obtener esta versión es necesario llenar un pequeño cuestionario que se encuentra en el enlace de descarga anterior. Una vez llenado, Optiwave envía un código al usuario para que este pueda ingresar a la sección del *login*, realizar la descarga de cualquier software de Optiwave y más opciones para usuarios registrados. La figura 2.3 muestra el cuestionario que debe llenarse para registrarse en la página de Optiwave.

Con el software ya descargado, es posible instalarlo en cualquier computadora con sistema operativo Windows 7 o superior de 32 o 64 bits.

2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Una vez instalado, se describen los componentes y funcionalidades de la interfaz gráfica de OptiSystem. Esta se divide en cuatro secciones que son:

- Diseño del Proyecto (*Project Layout*)
- Dockers
- Barra de Estado (*Status Bar*)
- Barra de Menú (*Menu Bar*)

2.2.1.1 Diseño del Proyecto

Es el área de trabajo principal en la que se pueden insertar componentes directo de las librerías, editar sus parámetros y realizar conexiones entre ellos, la zona de Diseño de Proyecto se puede ver en la figura 2.4.

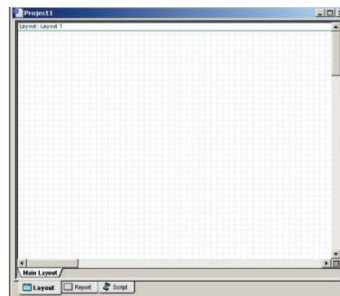


Figura 2.4 Diseño del Proyecto de OptiSystem.

2.2.1.2 Dockers

Se encuentran en la ventana principal y muestran información acerca del proyecto en ejecución. Estos se dividen en [79] [81]:

- Librería de Componentes (*Component Library*)
- Navegador de Proyectos (*Project Browser*)

➤ Descripción (*Description*)

2.2.1.2.1 *Librería de Componentes*

Contiene los componentes ópticos y eléctricos necesarios para realizar la simulación. Cada componente se encuentra en una categoría diferente de acuerdo a sus características y funcionalidades, estos se pueden arrastrar desde la librería hacia la zona de Diseño. En la figura 2.5 se muestran las Librerías de Componentes de OptiSystem.

Cada librería contiene sublibrerías que agrupan de manera adecuada y eficiente a todos los componentes disponibles para la simulación. Las librerías disponibles son:

- *Default*, contiene a todos los componentes predefinidos del programa.
- *Custom*, contiene a los componentes propios del usuario.
- *Favorites*, contiene a los componentes usados con mayor frecuencia.
- *Reused*, muestra una lista de los últimos 10 componentes usados por el usuario.

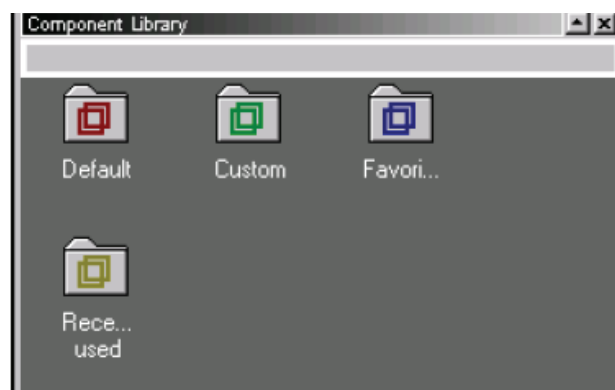


Figura 2.5 Librería de Componentes de OptiSystem.

2.2.1.2.2 Navegador de Proyectos

Organiza los proyectos para lograr resultados más eficientemente y navegar por los sistemas y subsistemas del proyecto actual. El Navegador de Proyectos se puede apreciar en la figura 2.6.

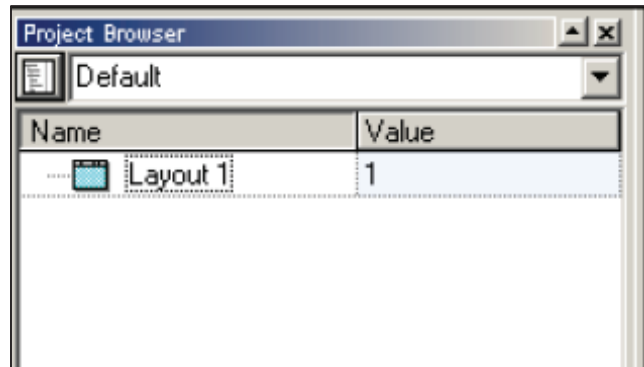


Figura 2.6 Navegador de Proyectos de OptiSystem.

2.2.1.2.3 Descripción

Muestra información detallada acerca del proyecto actual y sus componentes. Además, incluye toda la información técnica detallada que se puede observar al abrir el archivo del proyecto. La figura 2.7 permite observar el área de Descripción.

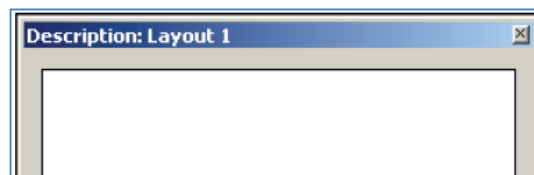
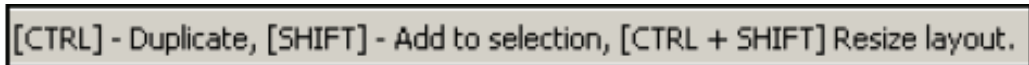


Figura 2.7 Descripción de OptiSystem.

2.2.1.3 Barra de Estado

Muestra información acerca del cálculo progresivo del proyecto. Además, presenta consejos útiles acerca del uso de OptiSystem y otros tipos de ayuda

[79]. Está localizada en la parte inferior de la ventana de Diseño del Proyecto y se muestra en la figura 2.8.



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

Figura 2.8 Barra de Estado de OptiSystem.

2.2.1.4 Barra de Menú

Adicionalmente, Optisystem cuenta con una Barra de Menú en la que se agrupan las diferentes opciones para el proyecto en ejecución, entre estas opciones se encuentran las de crear nuevo proyecto, guardar el proyecto actual, correr y pausar la simulación, entre otras [79].

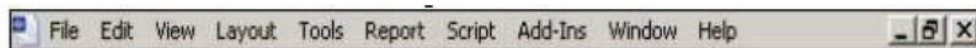


Figura 2.9 Barra de Menú.

2.2.2 USO Y MANEJO DE OPTISYSTEM

A continuación se detallan algunas de las acciones principales y necesarias para la creación y edición de un proyecto en OptiSystem.

2.2.2.1 Construcción de un Sistema Básico

Para la construcción de un sistema básico, se irán colocando los diferentes componentes que forman parte del sistema sobre el área de diseño.

Todos los componentes se encuentran en la parte izquierda de la interfaz gráfica, en la zona de las librerías dentro de la carpeta Default. Para insertar un componente, se debe buscarlo entre las diferentes sub carpetas y una vez hallado, se lo arrastra hasta la zona de diseño del proyecto [79].

De esta forma se van colocando los componentes necesarios para la simulación. La figura 2.10 muestra este proceso de inserción de componentes en la zona de diseño.

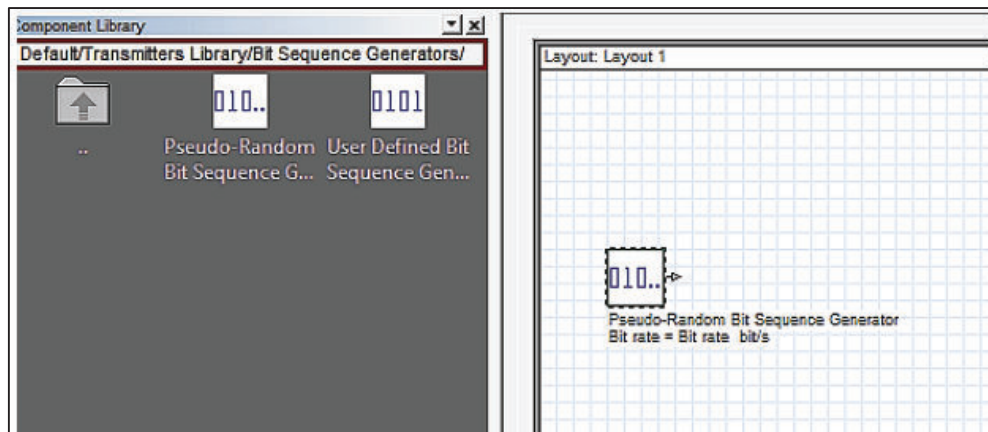


Figura 2.10 Insertar componente la zona de diseño del proyecto.

Una vez ubicados todos los componentes necesarios, se debe conectarlos por medio de “cables”. Para conectar dos elementos, se hace clic en la interfaz de entrada o salida del primer componente y se arrastra con el mouse hasta la entrada o salida del segundo, el camino que sigue el cable es seleccionado por el propio simulador.

2.2.2.2 Correr una Simulación

Una vez armado el sistema con todos los elementos y conexiones necesarias, se corre la simulación, de acuerdo a los siguientes pasos: [79]

- En la barra de menú se selecciona la pestaña *file* y la opción *calculate* (Ver figura 2.11). Una vez hecho esto, se despliega la ventana *OptiSystem Calculations*.
- En la venta *OptiSystem Calculations*, se selecciona la opción *Run Simulation*. Los cálculos resultantes aparecerán en la ventana *Calculation Output*.

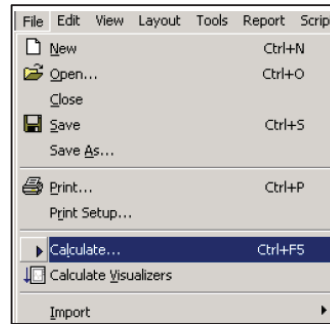


Figura 2.11 Correr una simulación.

2.2.2.3 Mostrar Resultados en un Visualizador

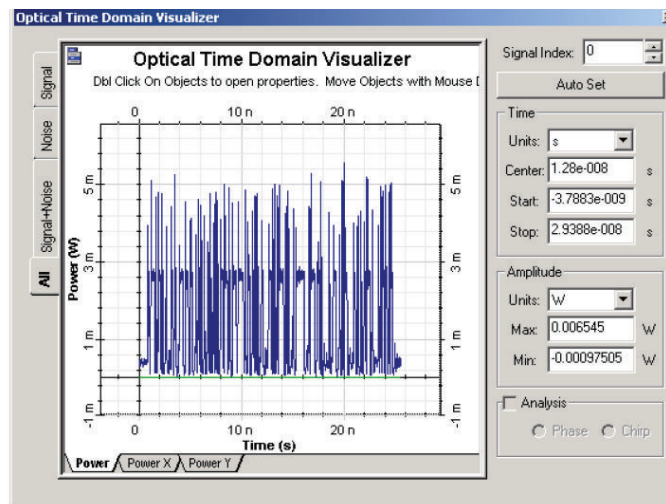


Figura 2.12 Resultados de un visualizador en el dominio del tiempo.

Para mostrar los resultados de una simulación, se debe disponer de un visualizador ubicado en la zona de diseño. Los gráficos y resultados obtenidos de la simulación aparecerán en una ventana emergente al hacer doble clic en dicho simulador. Los diferentes tipos de visualizadores pueden mostrar resultados tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia en diferentes escalas [79].

Esta ventana se muestra en la figura 2.12.

2.2.2.4 Edición y Visualización de Parámetros

Cada componente de las librerías de OptiSystem posee una variedad de parámetros y propiedades editables de acuerdo al tipo y función que desempeñe. Dentro de los parámetros más comunes para los componentes ópticos se encuentran: frecuencia de trabajo, potencia, ancho de banda, etc.

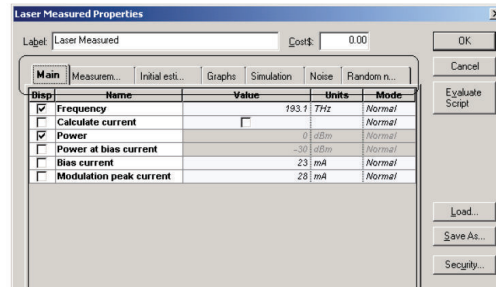


Figura 2.13 Ventana de Propiedades del componente Laser Measured.

Para visualizar y editar cada uno de estos parámetros se hace doble clic sobre el componente del cual se quiere conocer y/o editar sus parámetros. A continuación, se despliega la ventana de propiedades de dicho componente (tal como se muestra en la figura 2.13), en la cual se podrán visualizar y editar los parámetros asociados al componente seleccionado [79].

Es posible mostrar los parámetros asociados a cada componente en el área de diseño del proyecto (ver figura 2.14), marcando la opción *Disp* que aparece en la parte izquierda de la ventana de propiedades.

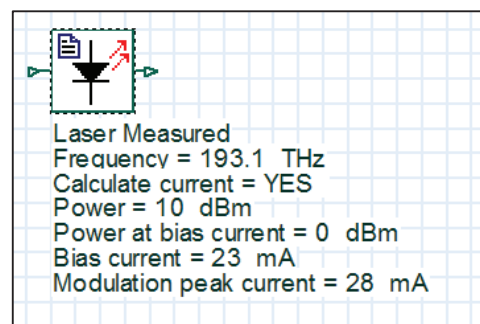


Figura 2.14 Propiedades del componente Laser Measured en el área de trabajo.

2.2.2.5 Edición y Visualización de Parámetros Globales

Los Parámetros Globales, son propiedades comunes para todas las simulaciones y componentes. En todo nuevo proyecto, es necesario definir estos parámetros pues de ellos dependerá la velocidad, exactitud y requerimientos de memoria para una simulación en particular.

Algunos de los parámetros globales como el *bitrate*, la longitud de secuencia de bits y el número de muestras por bit son definidos por el usuario, mientras que otros como la ventana de tiempo, el número de muestras y la tasa de muestreo son calculados por el simulador en base a los parámetros anteriores, de acuerdo a las siguientes ecuaciones [79]:

$$\text{Time Window} = \text{Longitud de secuencia} * 1 / \text{Bit rate} \quad (2.1)$$

$$\# \text{ de muestras} = \text{Longitud de secuencia} * \text{Muestras por bit} \quad (2.2)$$

$$\text{Tasa de muestreo} = \# \text{ de muestras} / \text{Time window} \quad (2.3)$$

Para poder editar los parámetros globales, se debe hacer doble clic en una zona libre del área de Diseño del Proyecto. A continuación, la ventana de edición de parámetros globales se desplegará, tal como se muestra en la figura 2.15.

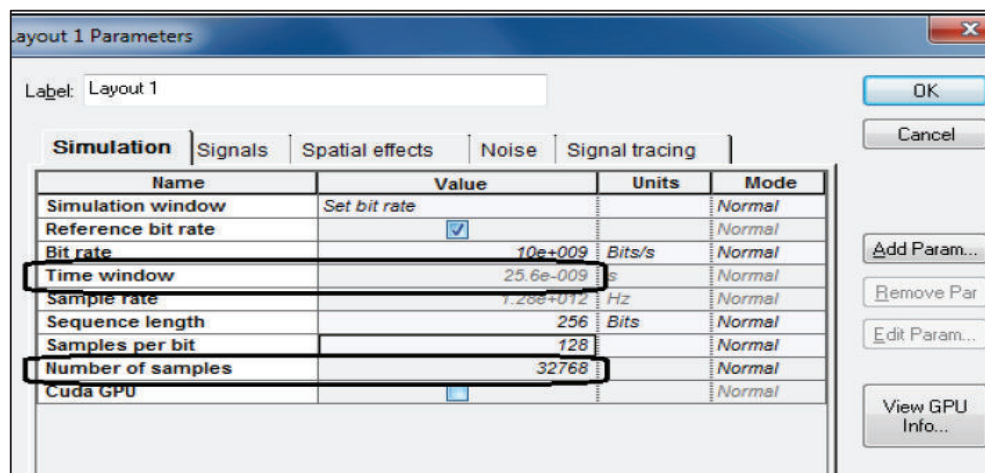


Figura 2.15 Ventana de Parámetros Globales.

2.3 COMPONENTES NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN

A continuación, se describen los elementos que integran el entorno de simulación de este trabajo, con todas sus características y funcionalidades. Esto permitirá comprender de mejor manera el proceso de simulación y los resultados que puedan obtenerse a partir de ella.

Dentro de la lista de componentes en el entorno de simulación se encuentran:

- Una fuente de luz que emitirá los pulsos a ser transmitidos a través del canal de fibra óptica. Parámetros como: el tipo de señal de entrada, la longitud y secuencia de bits, la potencia de transmisión y demás, serán ajustables de acuerdo al caso de simulación.
- El medio de transmisión, constituido esencialmente por un tramo de fibra óptica monomodo de longitud y parámetros variables de acuerdo al caso de simulación.
- Visualizadores ópticos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, que permitirán evaluar la distorsión producida en los pulsos de luz.
- Sistemas de compensación de PMD, compuestos por varios elementos ópticos como: controladores de polarización, tramos de fibra, *splitters*, etc. Usados para poder evaluar las diversas técnicas de compensación de PMD.

Una vez definido el entorno general de simulación, se realiza la descripción detallada de cada componente que formará parte de dicho entorno, con sus respectivos parámetros y características.

2.3.1 USER-DEFINED BIT SEQUENCE GENERATOR



Figura 2.16 Componente User-defined bit sequence generator.

Este componente permite la generación de una secuencia de bits definidos por el usuario. La secuencia puede ser escrita directamente o cargada desde un archivo de texto *.dat* si así se requiere.

Los parámetros editables de este componente son [79]:

- *Bitrate*, definido en bps, Mbps y Gbps.
- *Load from file*, determina si la secuencia de bits se carga o no desde un archivo *.dat*
- *Filename*, es dónde se carga el archivo con la secuencia de bits.
- *Bit sequence*, corresponde a la secuencia de bits definida por el usuario.
- *Number of leading zeros*, determina el número de ceros que irán al inicio de la secuencia, el valor por defecto se calcula por la expresión: $(Time\ Window * 3 / 100) * Bit\ rate$. Su rango es entre cero y mil.
- *Number of trailing zeros*, determina el número de ceros que irán al final de la secuencia, el valor por defecto se calcula por la expresión: $(Time\ Window * 3 / 100) * Bit\ rate$. Su rango es entre cero y mil.

Todos estos parámetros se pueden apreciar en la figura 2.17 a continuación.

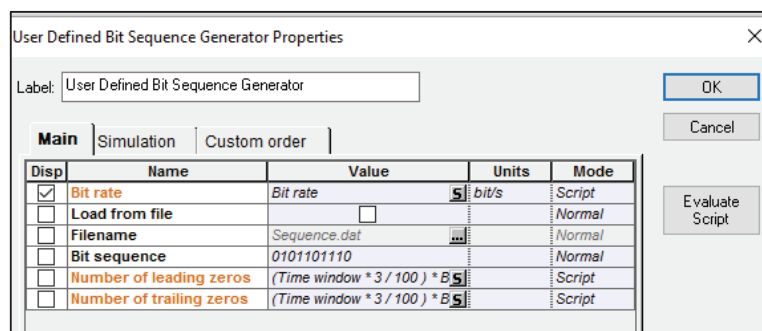


Figura 2.17 Parámetros del componente User-Defined Bit Sequence Generator.

La longitud de la secuencia de bits es un parámetro global y se calcula con la expresión [79]:

$$N = T_W * B_r \quad (2.4)$$

Donde: T_W es el Time Window y B_r , el *Bit rate* del sistema.

Si la secuencia de bits definida por el usuario es menor que N , esta se repetirá hasta que su longitud sea N .

Es posible encontrar el componente *User-defined Bit Sequence Generator* en la librería *Default/TransmittersLibrary/Bit Sequence Generators*.

2.3.2 OPTICAL GAUSSIAN PULSE GENERATOR



Figura 2.18 Componente Optical Gaussian Pulse Generator.

Este componente genera pulsos ópticos Gaussianos o Super Gaussianos de acuerdo a la secuencia de bits de entrada.

Para cada bit, la potencia de entrada viene dada por la siguiente expresión [79]:

$$P(t) = B \left[A_p \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t \cdot k}{T_{FWHM}} \right)^{2N}} + A_{BIAS} \right] \quad (2.5)$$

Donde: A_p es la potencia pico del pulso, A_{BIAS} es el valor del bias, B es el valor del bit (0,1) dependiendo de la secuencia de entrada, k es el coeficiente determinado numéricamente con el fin de generar pulsos del mismo ancho " T_{FWHM} ". N es el orden del pulso, siendo $N=1$ un pulso Gaussiano y $N>1$ un pulso Super Gaussiano.

Los parámetros editables de este componente se agrupan en pestañas de acuerdo al tipo de parámetro, estas pestañas son:

- *Main*, contiene parámetros como la frecuencia, potencia de transmisión, bias, ancho del pulso, posición, orden del pulso y el parámetro *truncated* que determina la superposición de pulsos.

- *Chirp*, contiene parámetros relacionados con el *chirping* del pulso. Se dice que un pulso gaussiano tiene *chirp* cuando su frecuencia varía con el tiempo. Este fenómeno es común en láseres fabricados de semiconductores como el silicio [84].
- *Polarization*, permite determinar los ángulos azimut y elipticidad relacionados con el estado de polarización de la señal óptica.
- *Simulation*, permite habilitar o deshabilitar el componente en la simulación.

Todos estos parámetros se pueden visualizar en la figura 2.19.

La razón por la que se eligió un pulso gaussiano como señal de entrada es debido a su simplicidad y a que su transformada de Fourier es también otro pulso gaussiano, de esta manera, es posible observar fácilmente la distorsión del pulso debido a la dispersión [84].

Es posible encontrar el componente *Optica Gaussian Pulse Generator* en la librería *Default/ Transmitters Library/ Pulse Generators/ Optical*.

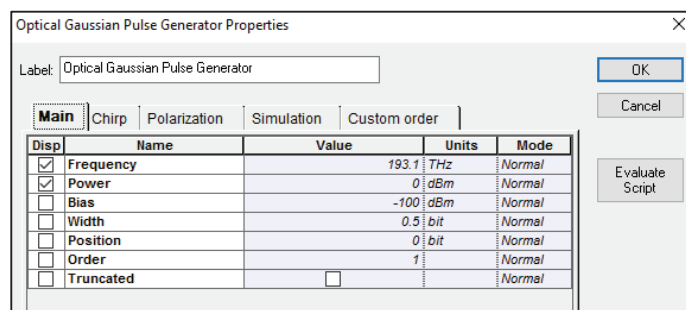


Figura 2.19 Parámetros del componente Optical Gaussian Pulse Generator.

2.3.3 OPTICAL FIBER



Figura 2.20 Componente Optical Fiber.

Este componente simula la propagación de una señal óptica en una fibra monomodo tomando en cuenta las propiedades de dispersión y no linealidades en base a la Ecuación No Lineal de Schrödinger modificada (NLSE). Además, usa un sistema de dos NLSE cuando el estado de polarización de la señal es arbitrario.

Los parámetros asociados al componente *Optical Fiber* están agrupados en categorías de la siguiente manera:

- *Main*, contiene las características más generales de la fibra como la longitud, coeficiente de atenuación y longitud de onda de referencia.
- *Dispersion*, contiene a los parámetros relacionados a la dispersión en la fibra óptica como el coeficiente de dispersión cromática, GVD, dispersión de tercer orden, constantes de propagación, etc.
- *PMD*, contiene a todos los parámetros relacionados a la dispersión por modo de polarización de la fibra como el tipo de birrefringencia, que puede ser determinística o estocástica (acoplamiento de modos), DGD, coeficiente PMD, longitud promedio de la sección de dispersión (*mean scattering section length*) y valor de la desviación de dicha sección (*scattering section dispersion*). Estos dos últimos parámetros, asociados a la concatenación de segmentos de fibra birrefringente.
- *Nonlinearities*, contiene todos los parámetros y coeficientes relacionados a los efectos no lineales de la fibra.
- *Numerical*, contiene parámetros asociados a la resolución de la ecuación NLSE y modelo de propagación de la fibra.
- *Graphs*, contiene parámetros relacionados al trazo de gráficos 3D con sus respectivas escalas.
- *Simulation*, permite habilitar o deshabilitar el componente dentro de la simulación.
- *Noise*, permite adherir ruido gaussiano blanco al canal de fibra.

- *Random Numbers*, relacionado con la generación de secuencias aleatorias durante la inicialización.

La figura 2.21 permite apreciar los parámetros del componente.

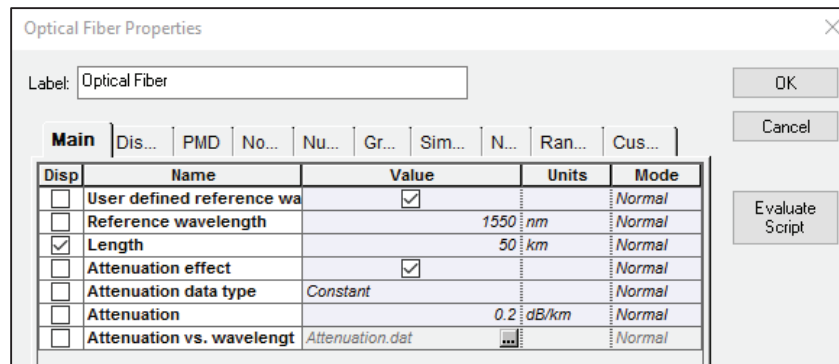


Figura 2.21 Parámetros del componente Optical Fiber.

La combinación de todos estos parámetros permite diseñar cualquier tipo de fibra monomodo ZDSF, NZDSF, Hi-Bi PM, etc.

El componente *Optical Fiber* se encuentra en la librería *Default/Optical Fibers Library*.

2.3.4 OPTICAL TIME DOMAIN VISUALIZER (OTDV)



Figura 2.22 Componente Optical Time Domain Visualizer.

Este componente permite al usuario visualizar señales ópticas en el dominio del tiempo. Es posible visualizar valores de intensidad de la señal, frecuencia, fase y el parámetro *alpha* (relacionado al *chirping*), y las componentes en los ejes (*x*, *y*) de la señal. Sus parámetros editables permiten modificar las escalas, ejes, colores y posición del gráfico, entre otras características que permitan apreciar de mejor manera las señales en el dominio del tiempo.

Es posible encontrar el componente *Optical Time Domain Visualizer* en la librería *Default / Visualizer Library / Optical*.

2.3.5 OPTICAL SPECTRUM ANALYZER (OSA)



Figura 2.23 Componente Optical Spectrum Analyzer.

Este componente permite al usuario visualizar señales ópticas en el dominio de la frecuencia. Es posible visualizar valores de intensidad de la señal, densidad de potencia espectral, fase, retardo de grupo y dispersión para las componentes en los ejes (x,y) de la señal óptica.

Del mismo modo que el visualizador en el dominio del tiempo, es posible ajustar las propiedades del gráfico para apreciar de mejor manera la señal en el dominio de la frecuencia. Además se puede variar el ancho de banda de resolución basándose en filtros rectangulares, gaussianos o *butterworth*.

Es posible encontrar el componente *Optical Spectrum Analyzer* en la librería *Default / Visualizer Library / Optical*.

2.3.6 POLARIZATION CONTROLLER



Figura 2.24 Componente Polarization Controller.

Este componente será usado en la simulación de las técnicas de compensación de PMD. Su función es simular un controlador de polarización, un dispositivo que

transforma el estado de polarización arbitrario de una señal de entrada, a un estado de polarización fijado por el usuario.

Los parámetros configurables del componente *Polarization Controller*, son los ángulos azimut y elipticidad del estado de polarización de salida y el factor de simetría (*Symmetry Factor*). El Factor de Simetría describe el cambio de fase de los componentes en (x, y) del campo eléctrico de la señal de salida con respecto a la entrada. La expresión que permite calcular este factor es la siguiente [79]:

$$sf = \frac{\varphi_{x,out} - \varphi_{x,in}}{\varphi_{y,out} - \varphi_{y,in}} \quad (2.6)$$

La figura 2.25 muestra los parámetros editables del componente *Polarization Controller*.

Es posible encontrar el componente *Polarization Controller* en la librería *Default/ Passives Library/ Optical/ Polarization*.

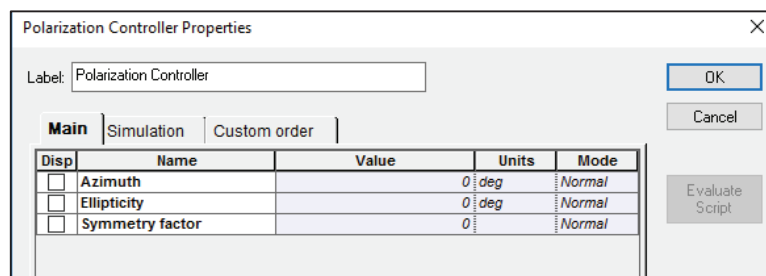


Figura 2.25 Parámetros del componente Polarization Controller.

2.3.7 POLARIZATION SPLITTER Y POLARIZATION COMBINER



Figura 2.26 Componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner.

Estos dos componentes también serán usados para la simulación de las técnicas de compensación de PMD.

La función del componente *Polarization Splitter* es dividir una señal de entrada en sus dos estados de polarización ortogonales (x , y), cada uno en un puerto de salida diferente. De esta forma, cada puerto de salida actúa como un polarizador lineal con un ángulo de 90 grados de diferencia entre ambos puertos.

La función del componente *Polarization Combiner* es combinar dos señales de entrada en una sola señal de salida. Cada puerto de entrada corresponde a un polarizador lineal con una diferencia de 90 grados respecto al otro. La señal de salida será la combinación de ambas entradas con diferente estado de polarización lineal.

El único parámetro configurable en ambos componentes es el denominado *Device Angle*, el ángulo respecto al cual se definen los estados de polarización lineales de las dos señales a la entrada o salida, dependiendo del componente.

En la figura 2.27 se puede observar la configuración de ambos componentes.

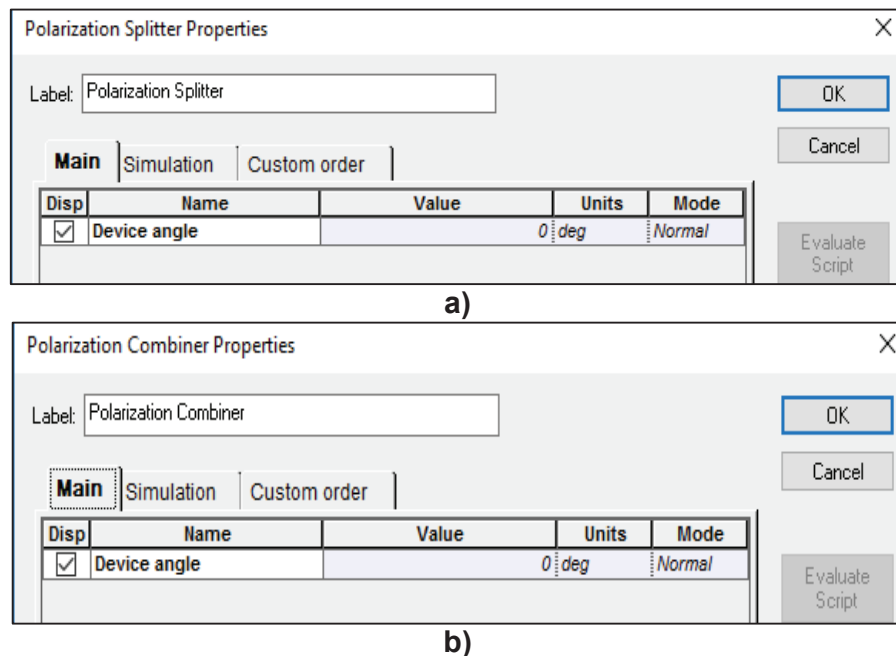


Figura 2.27. a) Parámetros del componente Polarization Splitter, b) Parámetros del componente Polarization Combiner.

Es posible encontrar los componentes *Polarization Splitter* y *Polarization Combiner* en la librería *Default/ Passives Library/ Optical/ Polarization*.

2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO

Una vez analizados cada uno de los componentes que formarán parte del entorno de simulación de PMD, este entorno quedaría definido de la siguiente manera, como se muestra en la figura 2.28.

Los componentes *User-Defined Bit Sequence Generator* y *Optical Gaussian Pulse Generator* conforman la fuente de luz del sistema. El componente *Optical Fiber* representa el medio de transmisión de fibra óptica monomodo NZDSF. Los visualizadores en el dominio del tiempo y la frecuencia permitirán analizar los cambios en la señal de salida respecto a la entrada.

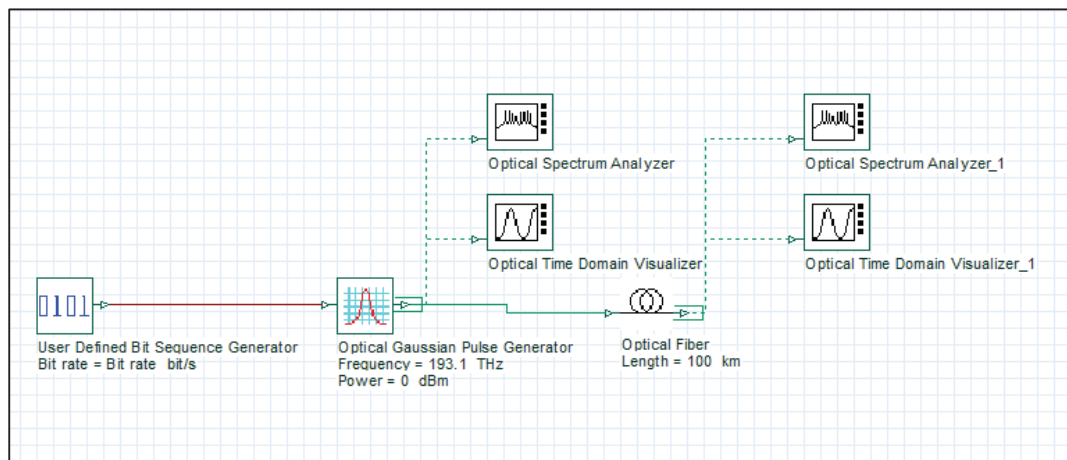


Figura 2.28 Entorno básico de simulación.

Para la simulación se realizará el siguiente proceso: los componentes que conforman la fuente de luz del sistema generarán una señal de luz cuyas propiedades dependen de cada escenario a simularse. Esta señal atravesará el medio de transmisión (fibra óptica), sufriendo dispersión por modo de polarización hasta llegar al otro extremo de dicho medio. La señal luminosa se podrá observar

en los visualizadores, tanto a la entrada como a la salida de la fibra con el objetivo de poder analizar los resultados de la simulación.

El entorno de simulación para las técnicas compensadoras de PMD será definido de acuerdo al tipo de técnica usada, basadas en lo explicado en la sección 1.2.11.

2.5 COMPROBACIÓN DEL SIMULADOR

Antes de realizar la simulación de PMD, se debe comprobar que el simulador muestre resultados coherentes con la teoría expuesta en la sección 1.2. Para ello se han realizado dos ejemplos con cálculos teóricos y su respectiva simulación que permitirán conocer la exactitud y veracidad de OptiSystem.

Estos ejemplos se realizarán sobre fibras Hi-Bi PM en las que el DGD es linealmente dependiente de la distancia. La razón por la que se escogió este tipo de fibras es debido a la facilidad en los cálculos matemáticos ya que en ausencia de acoplamiento de modos, el valor de birrefringencia y la orientación de los ejes de la fibra serán constantes.

Para los cálculos teóricos se utilizará el formalismo de Jones pues es el más sencillo de aplicar y los resultados obtenidos son bastante confiables cuando se trabaja con luz totalmente polarizada.

2.5.1 EJEMPLO 1

Para el primer ejemplo, se propone un tramo de fibra mantenedora de polarización (Hi-Bi PM) de 2 Km de largo y con un coeficiente PMD de 100 ps/km. Cabe aclarar que las propiedades del DGD y del coeficiente de PMD para este tipo de fibras se explican en las secciones 1.2.5.1 y 1.2.6. La señal de entrada, por facilidad de visualización será un único pulso gaussiano de valor “uno” con un *bit rate* de 1 Gbps y polarización completamente horizontal.

Resolución:

Partiendo de la ecuación (1.41), es posible calcular el retardo temporal inducido entre los PSP de un pulso de luz de la siguiente manera:

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

$$\Delta t_{PMD} = 100 \frac{ps}{Km} * 2 Km$$

$$\Delta t_{PMD} = DGD = 200 ps$$

Una vez conocido el DGD, se aplicarán las expresiones del formalismo de Jones para obtener los resultados relacionados a la PMD del pulso.

Un pulso de luz polarizado horizontalmente expresado en su vector de Jones normalizado en el dominio de la frecuencia, se escribe de la siguiente manera [40] [60] [85]:

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La matriz de Jones asociada al tramo de fibra HiBi-PM de acuerdo a la ecuación (1.53) es la siguiente:

$$J = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\frac{200}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\omega\frac{200}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \sin 0 & \cos 0 \end{bmatrix}$$

Para esta matriz, se ha asumido que los ejes de birrefringencia de la fibra están alineados con los ejes ortogonales de los PSP del pulso de luz. Además, se ha despreciado el desplazamiento de fase que podría causar el tramo de fibra.

A continuación se usa la ecuación (1.54) para obtener el pulso de luz a la salida del segmento de fibra, de la siguiente manera:

$$E_{out} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\frac{200}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\omega\frac{200}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \sin 0 & \cos 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{out} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega*100} & 0 \\ 0 & e^{j\omega*100} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{out} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega*100} & 0 \\ 0 & e^{j\omega*100} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{out} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega*100} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Los resultados de este cálculo indican que no existirá dispersión del pulso ya que se mantiene su polarización horizontal. Sin embargo, existirá un retardo de 100 ps respecto al pulso de entrada.

Simulación:

Una vez realizados los cálculos teóricos, se procederá a realizar la simulación del ejemplo con el objetivo de comparar ambos resultados. El entorno de trabajo en el simulador quedaría definido como indica la figura 2.29.

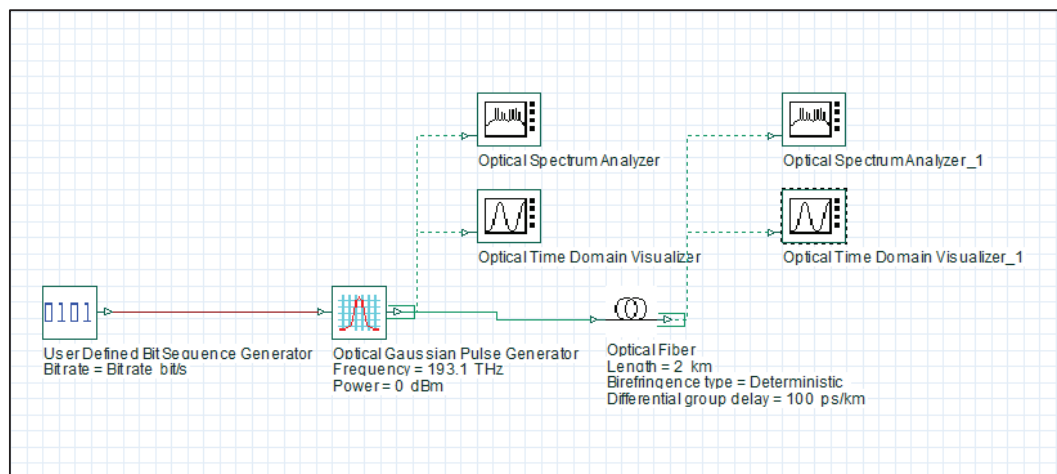


Figura 2.29 Entorno de trabajo para el ejemplo 1.

Tanto el *bit rate* (1 Gbps) como la longitud de la secuencia (que será un solo bit) definidos con anterioridad, se configuran en la ventana de parámetros globales de la simulación como muestra la figura 2.30. El *sample rate* deberá ser igual al *bit rate* ya que se transmitirá un solo bit por símbolo.

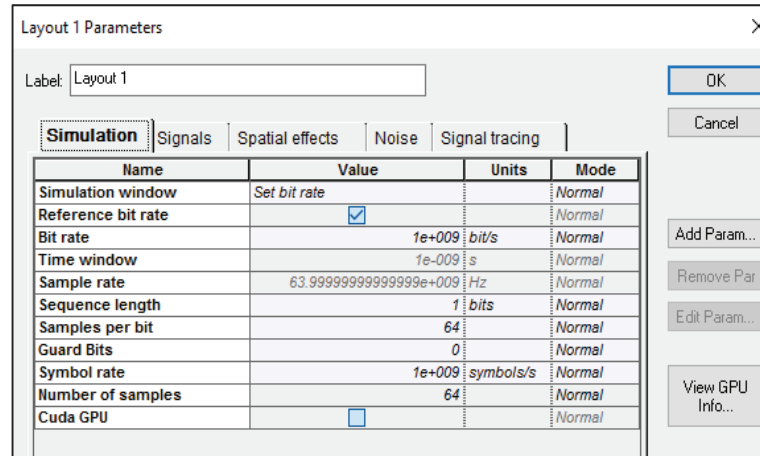


Figura 2.30 Parámetros globales para el ejemplo 1.

En el componente *User-Defined Bit Sequence Generator*, se define la secuencia de bits a ser transmitida, en este caso un solo bit de valor “uno” como se muestra en la figura 2.31.

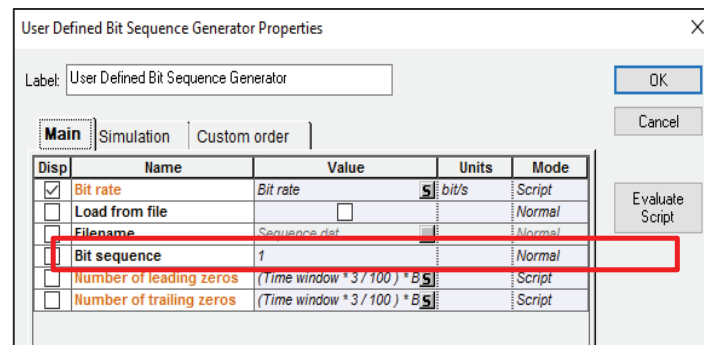


Figura 2.31 Parámetros de User-Defined Bit Sequence Generator.

Para el componente *Optical Gaussian Pulse Generator* se configuran todos los parámetros relacionados al pulso que se va a generar. La frecuencia tendrá un valor de 193.1 THz correspondiente a la tercera ventana¹³. La posición del pulso se ubica al inicio del bit y su ancho será la mitad del mismo, como se muestra en la figura 2.32. los demás parámetros se dejan con sus valores por defecto.

¹³ De acuerdo a la ecuación: $f=c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz igual a $2.997 \cdot 10^8$ m/s. Se obtiene la frecuencia de 193.1THz para una longitud de onda de 1,55 μm .

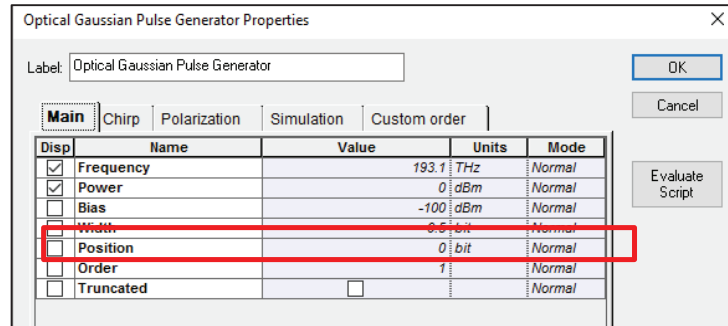


Figura 2.32 Parámetros de Optical Gaussian Pulse Generator.

En la pestaña *Polarization* del mismo componente, se define el valor de los ángulos azimut y elipticidad en “cero” como se muestra en la figura 2.33. Estos valores corresponden a una polarización horizontal.

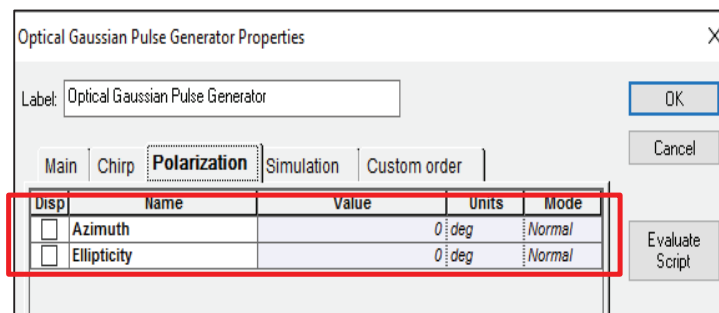


Figura 2.33 Polarización del pulso gaussiano.

Dentro del componente *Optical Fiber* se configuran los parámetros de longitud (figura 2.34) y coeficiente PMD (figura 2.36).

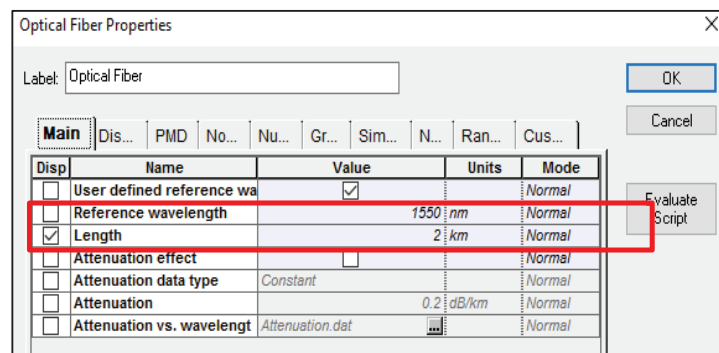


Figura 2.34 Longitud del tramo de fibra para el ejemplo 1.

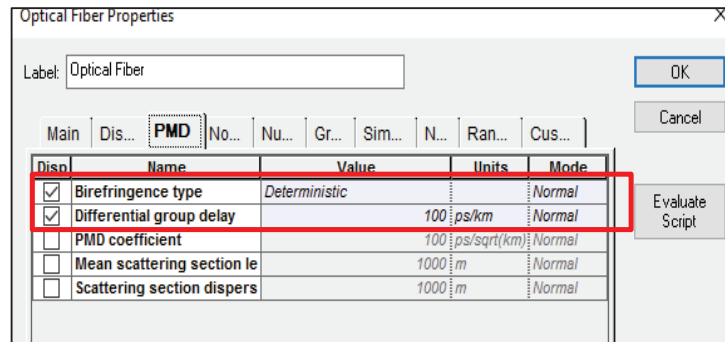


Figura 2.35 PMD de la fibra para el ejemplo 1.

Como se puede apreciar en la figura 2.35, para configurar la fibra con birrefringencia constante, se debe escoger el tipo de birrefringencia “determinística”. Al hacer esto, el único parámetro que puede configurarse es *Differential group delay*, el cual corresponde al coeficiente PMD linealmente dependiente de la distancia. Los demás parámetros se desactivan ya que están asociados con el acoplamiento de modos y el coeficiente PMD estadístico.

Adicionalmente a esto, se desactivarán todos los demás parámetros del componente como: coeficiente de atenuación, dispersión cromática, coeficiente no lineal, etc. con el objetivo de analizar únicamente el efecto de la PMD.

Como último paso en la configuración del componente, en la pestaña *Numerical*, se define el parámetro *Model Type* como “*Vector*” tal como se muestra en la figura 2.36. Este parámetro está relacionado con la resolución de la NLSE con la que trabaja el simulador y permite tomar en cuenta la polarización del pulso.

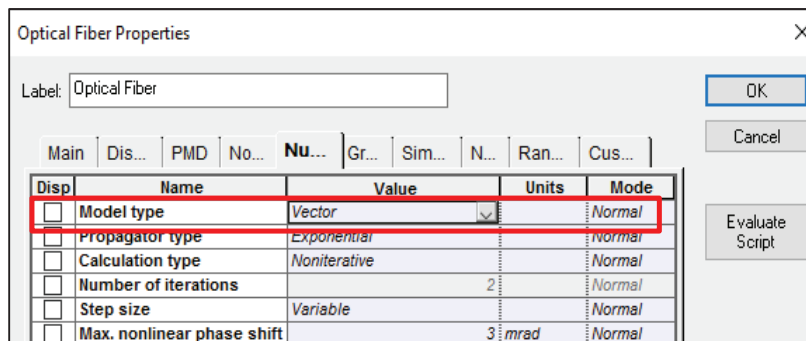


Figura 2.36 Configuración del parámetro Model Type en Optical Fiber.

Con todos los parámetros ya configurados, se corre la simulación para analizar los resultados.

El pulso de entrada se puede visualizar en la figura 2.37, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Como se puede apreciar, la señal de entrada es un pulso gaussiano con ancho de 1 ns correspondiente al tiempo de bit y potencia de 1 mW. En el dominio de la frecuencia, se ve otro pulso gaussiano con una única componente de frecuencia ubicada a una longitud de onda " λ " de 1,55 μm , correspondiente a la frecuencia de 193.1 THz del pulso.

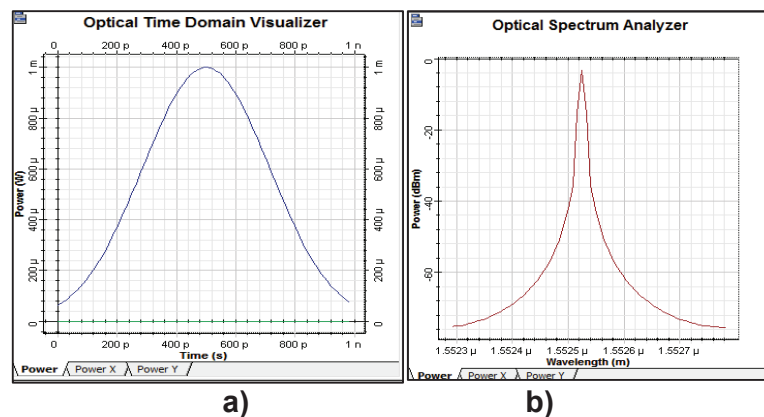


Figura 2.37 Pulso de entrada para el ejemplo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

La señal resultante después de que el pulso atraviesa el tramo de fibra, se puede apreciar en la figura 2.38, en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Como se puede observar, el pulso de salida se ha desplazado 100 ps en el dominio del tiempo, respecto al original. Además, no ha sufrido ningún tipo de dispersión. Estos resultados coinciden a la perfección con los calculados teóricamente, lo que permite tener una idea de 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 nivel de la PMD no genera la aparición de armónicos ni de nuevas componentes de frecuencia en el pulso que se propaga.

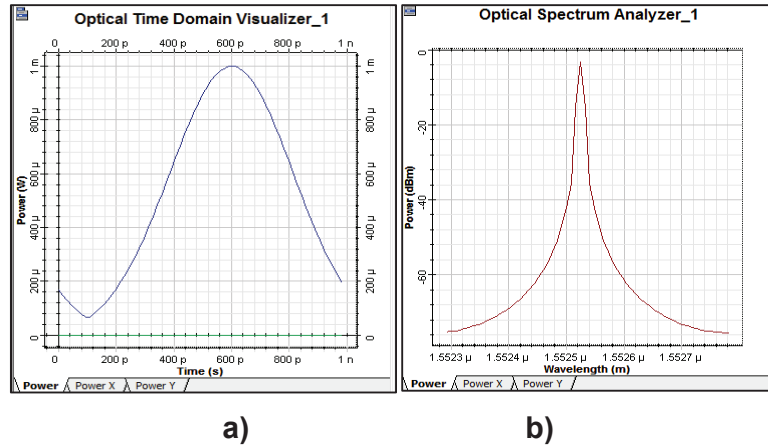


Figura 2.38 Pulso de salida para el ejemplo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

2.5.2 EJEMPLO 2

Los resultados obtenidos en el ejemplo 1 fueron bastante satisfactorios. No obstante, es necesario un segundo ejemplo que asegure la veracidad y exactitud del simulador.

Para este segundo ejemplo se toma en cuenta el mismo pulso de entrada ahora con una polarización lineal de 45 grados. El segmento de fibra será de 5 Km de longitud con un coeficiente PMD de 80 ps/Km.

Resolución:

De igual manera que para el ejercicio anterior, se realizan los cálculos teóricos, para contrastarlos con los resultados de simulación.

Partiendo de las ecuaciones (1.41), (1.53) y (1.54), y se obtienen los siguientes resultados:

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

$$E = \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\frac{400}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\omega\frac{400}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \sin 0 & \cos 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{out} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} e^{-j\omega*200} \\ e^{j\omega*200} \end{bmatrix}$$

De acuerdo a lo obtenido, se puede concluir que el pulso de salida estará compuesto por dos componentes ortogonales (x,y) cada una con la mitad de la potencia total. Estos componentes son los PSP del pulso de luz y están separados 400 ps uno del otro.

Simulación:

Una vez obtenidos los resultados teóricos, se realiza la simulación, configurando los parámetros de cada componente de manera similar al ejemplo anterior.

Las ecuaciones (1.25) y (1.26) permiten determinar el valor de los ángulos azimut y elipticidad para una polarización lineal de 45 grados.

Sabiendo que para este tipo de polarización, las componentes (x, y) del campo eléctrico de la onda tendrán igual amplitud, la expresión para el ángulo azimut queda de la siguiente manera:

$$\tan(2\chi) = \infty$$

$$2\chi = 90^\circ$$

$$\chi = 45^\circ$$

Por definición de polarización lineal se tiene que $\varphi = 0^\circ$ ó $\varphi = 180^\circ$. Por lo tanto, la expresión para el ángulo elipticidad queda de la siguiente manera:

$$\tan(2\Psi) = 0^\circ$$

$$\Psi = 0^\circ$$

Estos valores se asignan a sus ángulos respectivos dentro del componente generador del pulso gaussiano, como muestra la figura 2.39.

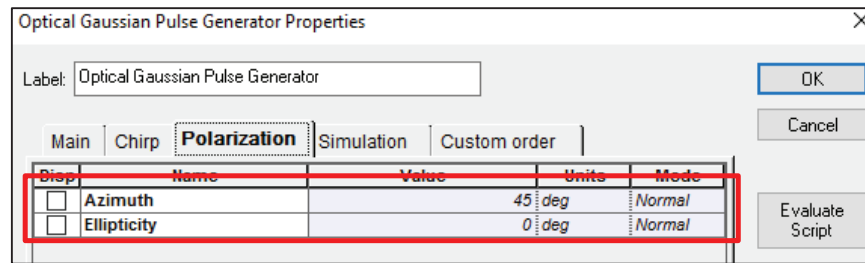


Figura 2.39 Polarización de 45° para el pulso de entrada.

Una vez configurados todos los parámetros, se procede a correr la simulación.

El pulso de entrada en el dominio del tiempo, se puede apreciar en la figura 2.40. En esta también se muestran sus componentes en los ejes (x , y).

Como se puede observar, en caso de polarización lineal a 45° , las componentes en cada eje (x , y), tendrán la misma amplitud y fase, mientras que el pulso total tendrá el doble de amplitud en términos de potencia.

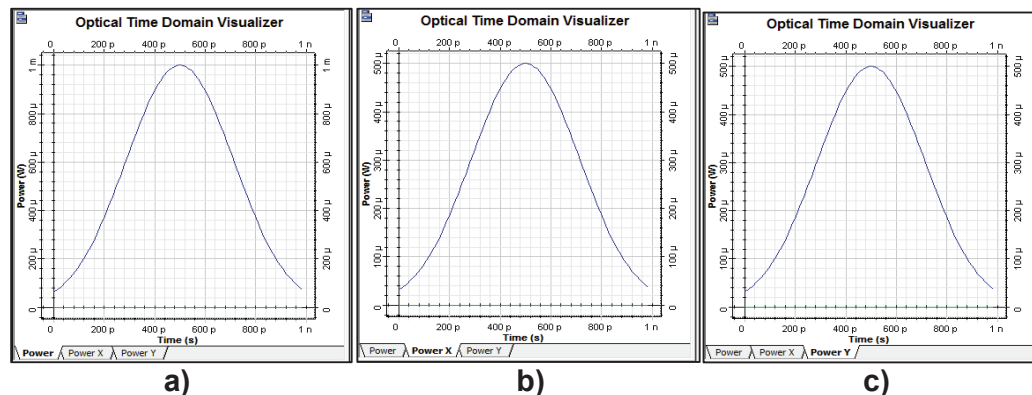


Figura 2.40 Señal de entrada para el ejemplo 2: **a)** Pulso total, **b)** Pulso en el eje (x), **c)** Pulso en el eje (y).

El pulso resultante a la salida del segmento de fibra, se puede apreciar en la figura 2.41. En esta se observa el ensanchamiento que ha sufrido el mismo debido a la dispersión de sus componentes ortogonales (x , y). Esta dispersión tiene un valor de 400 ps correspondiente al DGD inducido. Además, cada componente posee la mitad de la potencia del pulso total.

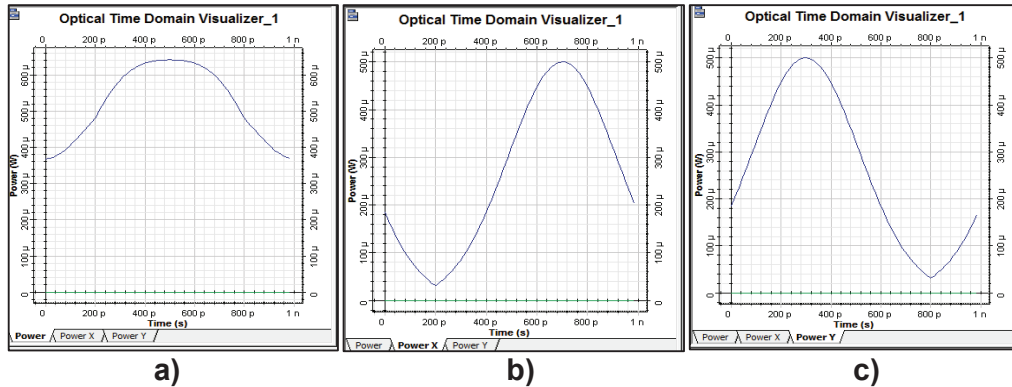


Figura 2.41 Señal de salida para el ejemplo 2: **a)** Pulso total, **b)** Pulso en el eje (x), **c)** Pulso en el eje (y).

De esta manera, el pulso resultante será la suma de sus componentes ortogonales dispersados un valor igual al DGD inducido por la fibra.

En la figura 2.42 se puede observar el pulso de salida en el dominio de la frecuencia. Nuevamente se puede concluir que la magnitud del fenómeno de PMD no afecta a las componentes de frecuencia del pulso de luz.

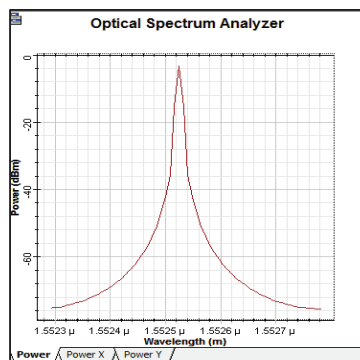


Figura 2.42 Pulso de salida para el ejemplo 2 en el dominio de la frecuencia.

Como se puede observar una vez más, los resultados obtenidos en la simulación coinciden exactamente con los cálculos teóricos. Esto permite concluir que el software de simulación OptiSystem posee las características necesarias y suficientes que permiten obtener resultados precisos y concordantes con la teoría expuesta acerca de PMD.

2.6 SIMULACIÓN DE PMD EN FIBRAS NZDSF (ITU-T G.655)

Como se ha mencionado con anterioridad, el componente *Optical Fiber* de OptiSystem permite emular cualquier tipo de fibra óptica monomodo (sea esta ZDSF, NZDSF, etc), solo con la variación de sus parámetros y características, es por ello que en este trabajo se toman muy en cuenta los valores expuestos en la recomendación ITU-T G.655 acerca de PMD, con el objetivo de simular la propagación de pulsos a través de una fibra NZDSF.

A continuación se describen conceptos importantes relacionados al coeficiente de PMD usados en la recomendación ITU-T G.655 y en el simulador OptiSystem, los cuales permiten un mejor análisis de los resultados obtenidos.

2.6.1 COEFICIENTE PMD DE ENLACE (PMD_Q)

En caso de usar fibra óptica cableada, la recomendación ITU-T G.655 establece un Coeficiente de Dispersión por Modo de Polarización de Enlace (*Polarization Mode Dispersion Link Design Value*, PMD_Q) que se define como “el límite estadístico superior del coeficiente de PMD de los cables de fibra óptica cableada concatenados en un posible enlace de M secciones de cable” [34]. Es decir, normalmente para construir enlaces de varios cientos de kilómetros de fibra óptica cableada, se requiere la unión o concatenación de varios segmentos de fibra, ya que sería demasiado complicada la elaboración de un solo segmento de tal longitud. Debido a la concatenación de varios segmentos de cable (generalmente alrededor de 20) el valor del coeficiente PMD y por lo tanto del DGD, tienden a variar respecto al valor que tendrían en un solo segmento, de esta manera el valor del PMD_Q de un enlace de fibra es el máximo valor que podría tomar el coeficiente PMD para un enlace de M segmentos de fibra cableada concatenados.

Este límite superior se define con respecto a un bajo nivel de probabilidad “Q”, que es la probabilidad de que el valor del coeficiente PMD del segmento de fibras concatenadas supere al valor de PMD_Q .

La recomendación ITU-T G.655 especifica un valor de PMD_Q máximo de $0.5 \text{ ps}/\sqrt{km}$ con $M=20$ cables y $Q=0.01$ para las categorías A, B y un valor de PMD_Q máximo de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{km}$ con $M=20$ cables y $Q=0.01$ para las categorías C, D, E. Además se especifica que el valor del coeficiente PMD para un solo segmento de fibra deberá ser igual o menor que el PMD_Q máximo de la recomendación.

Estos valores son los límites máximos a los que los fabricantes deben regirse con el fin de cumplir con las recomendaciones. Sin embargo, el usuario y fabricante pueden acordar valores de PMD_Q superiores para aplicaciones específicas [59] [34].

En caso de fibra no cableada, el máximo valor permitido que tendrá el coeficiente PMD para una fibra en particular será igual al valor de PMD_Q para fibra cableada según lo que especifica la recomendación [34].

2.6.2 COEFICIENTE PMD ESTOCÁSTICO DE OPTISYSTEM

La naturaleza estadística del coeficiente PMD (y por lo tanto del DGD) ha sido un desafío para la mayoría de simuladores de fibra óptica, con los que se trata de conseguir resultados lo más reales posible. Para lograrlo, se han desarrollado diversos métodos y algoritmos matemáticos, en el caso de OptiSystem, se utiliza el denominado *Coarse-Step Method*, un algoritmo que parte de la combinación de dos ecuaciones NLSE para representar los estados de polarización cambiantes de los pulsos de luz. El mismo permite trabajar con un DGD variable en un ambiente de acoplamiento de modos [86].

El análisis del *Coarse-Step Method* está fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, se tomarán en cuenta algunos parámetros derivados del mismo que permiten trabajar con segmentos de fibra birrefringente concatenados entre sí, de longitudes fijas y variables. Estos parámetros son la Longitud Promedio de la Sección de Dispersión y la Desviación de la Sección de Dispersión.

Para comprender de mejor manera ambos parámetros, se configurará el componente *Optical Fiber* de OptiSystem, con un tipo de birrefringencia estocástica y un coeficiente PMD de $0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$, tal y como se muestra en la figura 2.43. Al hacer esto, se puede observar que se activan tres campos en la ventana de propiedades, que hasta ahora no se habían usado. Estos son el coeficiente PMD (*PMD coefficient*), la longitud promedio de la sección de dispersión (*Mean scattering section length*) y la desviación de la sección de dispersión (*Scattering section dispersion*).

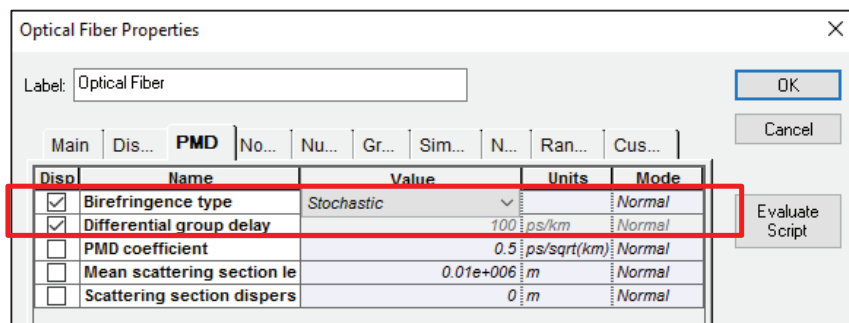


Figura 2.43 Selección de birrefringencia estadística en Optical Fiber.

El parámetro *Mean Scattering Section Length* representado por " L'_{scatt} ", se refiere a la longitud promedio de las secciones birrefringentes concatenadas de fibra. La longitud de una determinada sección será calculada por el simulador, siguiendo una distribución de probabilidad gaussiana cuyo valor medio será el correspondiente a L'_{scatt} , determinado por el usuario.

La curva de distribución en función de la longitud promedio " L'_{scatt} ", y la longitud de cada sección de fibra calculada " L_{scatt} ", se define por la siguiente expresión [58]:

$$f(L'_{scatt}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{scatt}}} e^{-\frac{(L'_{scatt}-L_{scatt})^2}{2\sigma_{scatt}^2}} \quad (2.7)$$

Donde σ_{scatt} corresponde al parámetro configurable *Scattering Section Dispersion* y determina la desviación estándar de la curva de distribución.

La importancia del parámetro σ_{scatt} , se demuestra con el siguiente ejemplo extraído de los manuales de ayuda de OptiSystem. En este se propone la transmisión de un pulso de luz ultracorto¹⁴ de ancho igual al 0.2% del tiempo de bit de la señal, la frecuencia del pulso será de 193.1Thz correspondiente a la tercera ventana y su *bit rate* será de 10 Gbps. De esta manera, cada vez que este pulso ultracorto pase de una sección birrefringente a otra, el cambio de energía entre PSPs, generará un nuevo pulso parcial.

Si se tiene un valor dado para L'_{scatt} y el valor de σ_{scatt} es igual a “cero”, el simulador generará N segmentos de fibra con birrefringencia aleatoria concatenados, de igual longitud. Por lo tanto, el pulso resultante a la salida estará compuesto por N pulsos parciales correspondientes a los N intercambios de energía producidos [61].

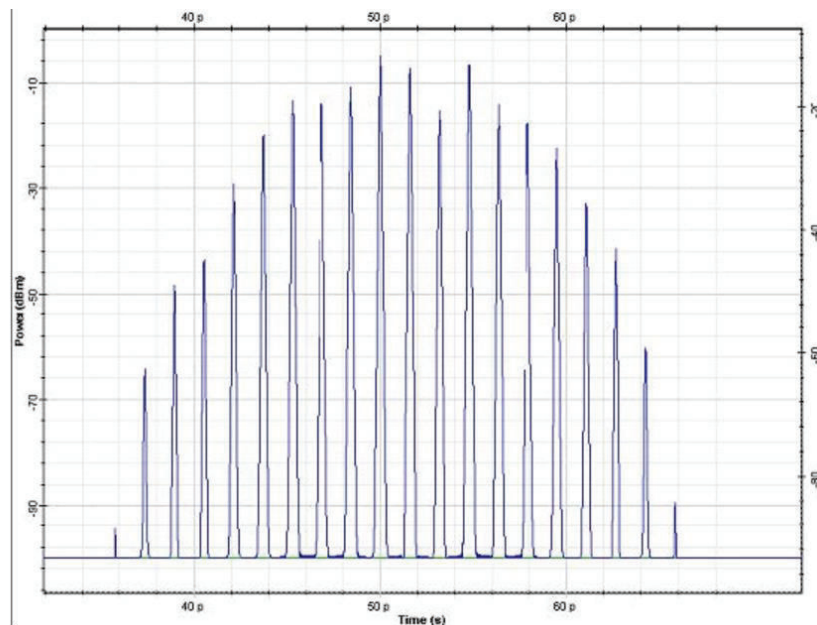


Figura 2.44 Dispersión de un pulso ultra corto para valores $L = 200Km$,

$$L'_{scatt} = 10Km \text{ y } \sigma_{scatt} = 0 Km \text{ [61].}$$

¹⁴ Pulso ultracorto: un pulso cuyo ancho es mucho menor al tiempo de bit de la señal y al DGD inducido por la fibra.

En la figura 2.44 se muestra el pulso resultante con los parámetros: $L = 200Km$, $L'_{scatt} = 10Km$ y $\sigma_{scatt} = 0 Km$. Aquí, se pueden observar los 20 pulsos parciales producidos por los 20 intercambios de energía.

En caso de tener un valor para σ_{scatt} diferente de “cero”, la longitud de cada segmento de fibra concatenado variará de acuerdo a la ecuación (2.7), y el número de intercambios de energía producidos podría ascender hasta 2^N . En la figura 2.45 se muestra el pulso resultante con los siguientes parámetros: $L = 200Km$, $L'_{scatt} = 10Km$ y $\sigma_{scatt} = 2 Km$.

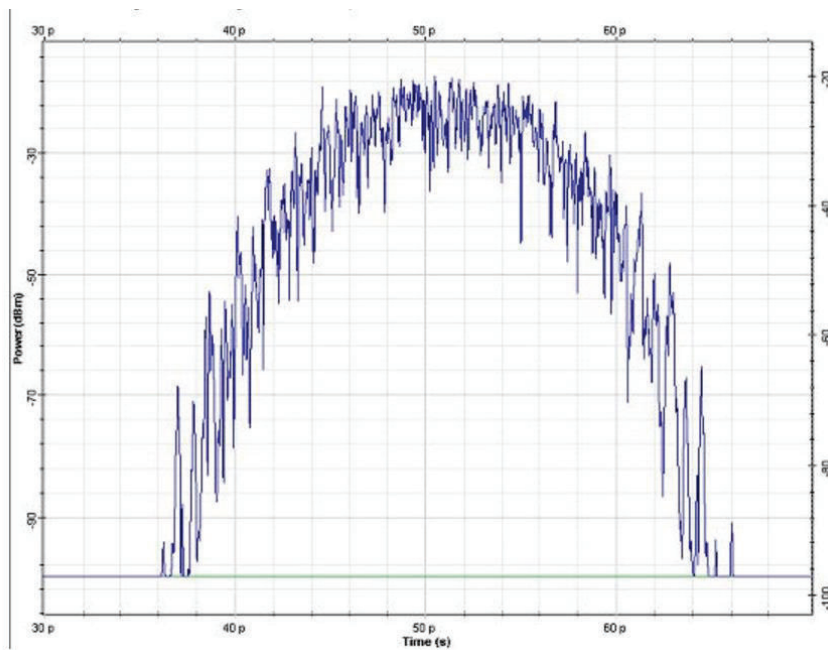


Figura 2.45 Dispersión de un pulso ultra corto para valores $L = 200Km$,

$$L'_{scatt} = 10Km \text{ y } \sigma_{scatt} = 2 Km \text{ [61].}$$

De los dos casos anteriores, se puede concluir que el valor de L'_{scatt} y σ_{scatt} no afecta al ancho del pulso ni a la dispersión, sino sólo a la forma de su envolvente, debido al acoplamiento de modos aleatorio. Por tal razón, en las simulaciones posteriores, se mantendrán ambos parámetros en sus valores predefinidos.

2.7 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE PMD

Una vez que se han definido los elementos necesarios y el entorno de simulación, se procederá a realizar varias simulaciones que permitan comprobar la teoría expuesta en las secciones anteriores. De todas las simulaciones, se escogieron las más representativas y que permiten obtener una idea clara acerca del efecto de la PMD en la transmisión de pulsos ópticos a través de fibras monomodo NZDSF.

De esta manera, los escenarios de simulación quedan definidos como se indica en la tabla 2.2.

Bit rate (Gbps)	ITU-T G.655 cat A,B $\varphi_{PMD} = 0.3 \text{ ps/km}^{1/2}$				ITU-T G.655 cat C,D,E $\varphi_{PMD} = 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$			
	Longitud de la fibra L (Km)				Longitud de la fibra L (Km)			
	100	1000	2000	5000	100	1000	2000	5000
10			X	X				X
40	X	X	X	X		X	X	X
80	X	X	X	X		X	X	X
140	X	X	X		X	X	X	X

Tabla 2.2 Esquema de los diferentes escenarios de simulación.

El estándar ITU-T G.655 contiene cinco categorías determinadas por las características de la fibra, por lo tanto, se han dividido los escenarios de simulación en dos grupos, de acuerdo al coeficiente de PMD. El primer grupo ($\varphi_{PMD} = 0.3 \text{ ps/km}^{1/2}$), comprende a las categorías A y B del estándar, cuyas características y recomendaciones respecto a PMD son similares. De igual manera, el segundo grupo ($\varphi_{PMD} = 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$), está conformado por las categorías C, D y E.

Todas las características mencionadas, se detallan en el estándar ITU-T G.655 en el Anexo A.

Las velocidades de 10 y 40 Gbps corresponden a valores estandarizados usados en la comunicación a través de fibra óptica, correspondientes a sistemas STM-64 y STM-256¹⁵ respectivamente. Las velocidades de 80 y 140 Gbps no son valores estandarizados; sin embargo, han sido utilizados en algunas pruebas en enlaces de gran capacidad [87] [88] y se escogieron con el objetivo de analizar el nivel de dispersión en sistemas que trabajen con capacidades similares.

Las longitudes de fibra fueron escogidas bajo el siguiente criterio: el valor de 100 km muestra un nivel de dispersión relativamente bajo, por lo tanto no tiene sentido trabajar con longitudes menores ya que el nivel de dispersión sería despreciable. Los valores de 1000, 2000 y 5000 km presentan niveles de dispersión considerables que permiten analizar de forma clara el fenómeno de PMD. Ya que a los 5000 km, el nivel de dispersión obtenido es muy alto, llegando incluso a la degeneración total de los pulsos, no se consideran valores superiores.

Para la simulación de las técnicas de compensación de PMD, se implementarán las tres técnicas más importantes de acuerdo a la sección 1.2.11 y para cada técnica se analizarán tres escenarios diferentes como se muestra en la tabla 2.3

Técnica de compensación			
Bit rate (Gbps)	Pre compensación	Post compensación de una etapa	Post compensación de dos etapas
10	X	X	X
40	X	X	X
140	X	X	X

Tabla 2.3 Esquema de las diferentes técnicas de compensación a simularse.

Los escenarios escogidos presentan diferentes niveles de dispersión, por lo que permiten analizar detalladamente cada técnica de compensación.

¹⁵ Módulo de Transporte Síncrono (*Synchronous Transport Module*, STM): estándar de transmisión en redes de fibra óptica SDH ITU-T.

El análisis de los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones, se describe en el capítulo 3.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios especificados en las tablas 2.2 y 2.3. En este análisis se toman en cuenta diversos factores como: el grado de dispersión del pulso, atenuación causada por la dispersión, efectividad en la compensación de la dispersión, etc. Estos resultados permitirán comprobar la teoría expuesta anteriormente y tener una idea clara del efecto que produce la PMD sobre un pulso de luz que se propaga a través de un segmento de fibra NZDSF con una longitud determinada.

3.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN DE PMD

Para esta simulación, se han propuesto valores de coeficiente PMD de 0,3 y 0,1 ps/km^{1/2}. Estos valores son típicos de fabricantes y es muy común encontrarlos en fibras comerciales. El hecho de usar valores comerciales, permite establecer escenarios generales de simulación sin limitarse al tipo de aplicación, uso de fibra cableada y no cableada y demás implicaciones relacionadas a los valores PMD_Q, M y Q especificados en la recomendación ITU-T G.655. El valor de 0,3 ps/km^{1/2} cumple con las especificaciones para las categorías A y B de la recomendación, mientras que el valor de 0,1 ps/km^{1/2} cumple con las especificaciones para las categorías C, D y E.

Los parámetros de la señal de entrada serán similares a los propuestos en la sección 2.5. Inicialmente se trabajará con una secuencia de longitud igual a un bit cuyo valor será “uno”, este modulará un pulso gaussiano con longitud de onda “ λ ” igual a 1,55 μm , potencia de 0 dBm, sin *chirping* y con polarización lineal horizontal. Este pulso atravesará un segmento de fibra óptica que posee las características especificadas en la tabla 2.2 y será analizado a la salida del segmento.

En caso de tener un elevado valor de dispersión del pulso gaussiano, se realizará la simulación con una secuencia de bits de valor “01101011” con el objetivo analizar la interferencia entre símbolos (ISI) y el *Bit Error Rate* (BER). Por otra parte, si el nivel de dispersión es muy bajo, se elevará la potencia a 15 dBm (un nivel de potencia relativamente alto usado en comunicaciones ópticas), con el objetivo de analizar si a dicha potencia se produce mayor nivel de dispersión.

Cabe recalcar que para un valor dado del coeficiente PMD dinámico, el software simula una función de distribución de probabilidad (PDF) Maxwelliana, cuyo valor central corresponde al fijado por el usuario. Es decir, para un caso de simulación en particular, el valor del coeficiente PMD no será fijo, sino estará dentro de un rango de valores definidos por la distribución de probabilidades. Esta función de distribución se representa por la ecuación (1.42).

De esta forma, el entorno de simulación conformado por todos los componentes necesarios queda definido como se muestra en la figura 3.1.

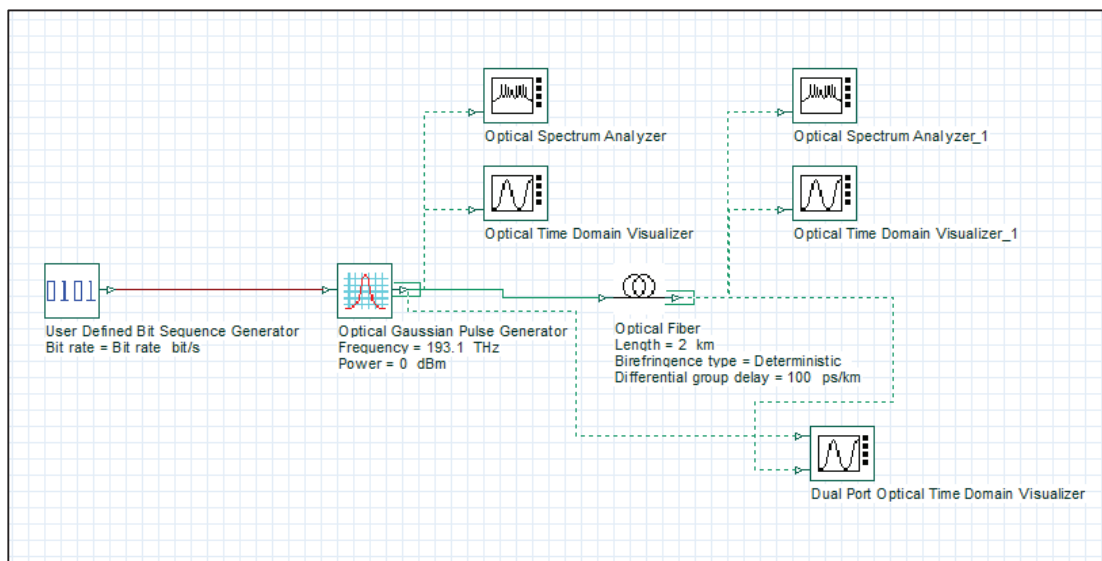


Figura 3.1 Entorno de simulación de PMD.

El entorno de simulación para las técnicas compensadoras de PMD dependerá del tipo de técnica a analizarse, esto se detalla en la sección 3.3.

3.2 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE PMD

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de simulación expuestos en la tabla 2.2. Los escenarios planteados se dividieron en dos grupos de acuerdo al coeficiente PMD, siendo $\varphi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$ para el grupo 1 y $\varphi_{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$ para el grupo 2. Para cada grupo, se muestra el análisis detallado de los resultados de la simulación de los cuatro escenarios más representativos del grupo, mientras que el resumen de resultados de los demás escenarios se muestra en las tablas 3.1 y 3.2 en la sección 3.2.9.

La recomendación ITU-T G.663 para fibras monomodo, establece que el DGD máximo permitido para un enlace de fibra, no debe superar la tercera parte del tiempo de bit de la señal a transmitirse [89]. Este criterio se ha mantenido en posteriores recomendaciones, como es el caso de la ITU-T G.655 [34] [40], por lo tanto se toma como base en este trabajo, para analizar el efecto que tendría la PMD en cada uno de los escenarios planteados.

3.2.1 GRUPO 1, CASO 1: $\varphi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 5000\text{Km}$; $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$

De acuerdo a la ecuación (1.50), se puede calcular el DGD teórico inducido en la fibra, de la siguiente manera:

$$\Delta\tau = \varphi_{PMD} \cdot \sqrt{L}$$

$$\Delta\tau = 0,3 * \sqrt{5000}$$

$$\Delta\tau = 21,21 \text{ ps}$$

Si se compara este valor con el tiempo de bit de la señal de entrada se tiene:

$$t_b = \frac{1}{V_{tx}} = 100 \text{ ps}$$

$$\frac{1}{3}t_b > \Delta\tau > \frac{1}{10}t_b$$

$$33,33 \text{ ps} > 21,21 \text{ ps} > 10 \text{ ps}$$

Según las recomendaciones de la ITU-T, el DGD teórico total debe ser menor a la tercera parte del tiempo de bit, siendo la décima parte un valor comúnmente aceptado. Por lo tanto, se concluye que para este caso, el fenómeno de PMD no afectaría a la transmisión de los pulsos, pues su valor está dentro de los límites establecidos.

Para realizar la simulación, se configuran los parámetros globales y de cada componente necesarios. Esta configuración es similar a la aplicada en la sección 2.5.

En la figura 3.2 se muestra la configuración del componente *Optical Fiber* para un tipo de birrefringencia estadística. Se puede observar que al seleccionar el tipo de birrefringencia como “estocástica” se activan los parámetros *PMD coefficient* (el cual se fija en $0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$), *Mean scattering section length* y *Scattering section dispersion*, para estos últimos (analizados en la sección 2.6.2) no se cambian sus valores por defecto de 50m y 2m respectivamente.

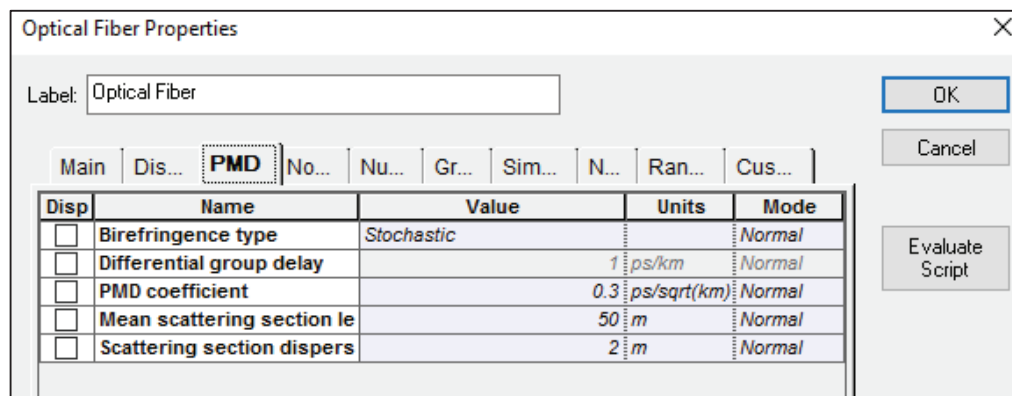


Figura 3.2 Configuración de Optical Fiber para el caso 1.

Una vez fijados todos los parámetros necesarios para recrear las condiciones de este escenario, se corre la simulación.

Los resultados se muestran a continuación:

El pulso de entrada en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia, se puede apreciar en la figura 3.3.

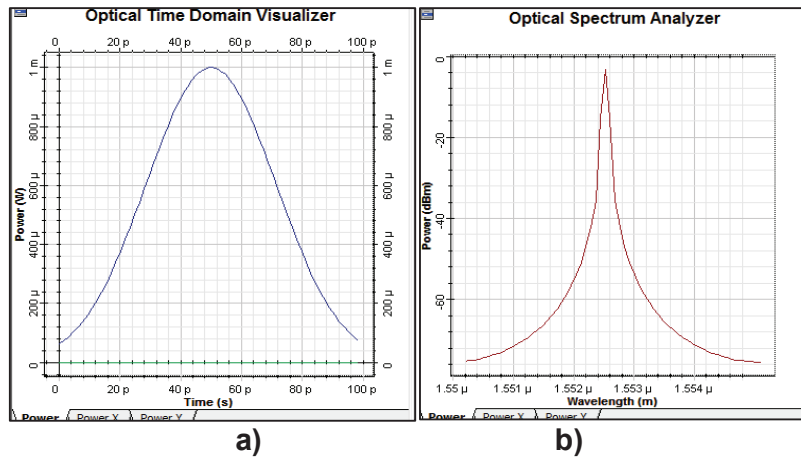


Figura 3.3 Señal de entrada para el caso 1 del grupo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

La señal de salida resultante en el dominio de la frecuencia, se analiza en la figura 3.4. Con esto se comprueba que el fenómeno de dispersión no afecta a las componentes de frecuencia del pulso, para este caso, ya que no existe ningún cambio entre entrada y salida.

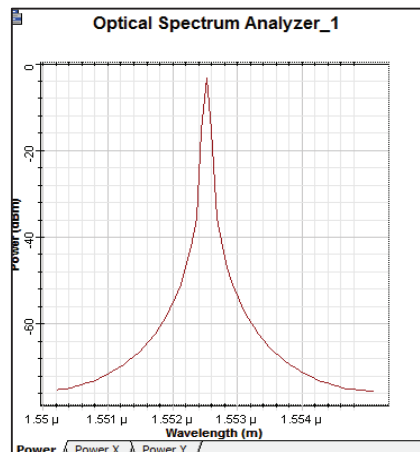


Figura 3.4 Señal de entrada en el dominio de la frecuencia para el caso 1 del grupo 1.

La figura 3.5 muestra la comparación entre las señales de entrada, siendo el pulso en celeste el correspondiente al de entrada y el pulso en azul al de salida. Además, se comparan sus componentes en los planos ortogonales (x,y).

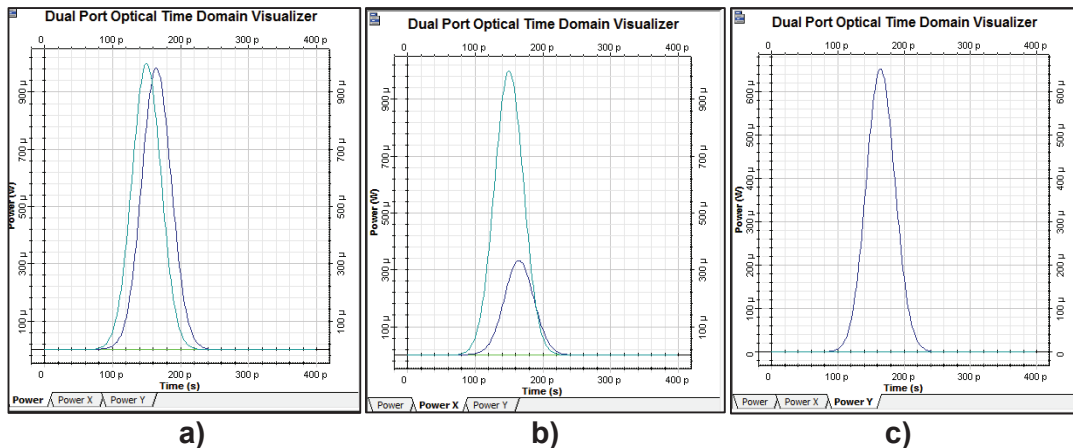


Figura 3.5 Señales de entrada y salida para el caso 1 del grupo 1: **a)** Pulsos totales, **b)** Pulsos en el eje (x), **c)** Pulsos en el eje (y).

Como se puede ver, el pulso ha sufrido una ligera dispersión a través de la fibra. Además, su estado de polarización no se ha mantenido constante, sino la energía se ha distribuido a través de sus PSP debido al acoplamiento de modos de la fibra, comprobando la teoría expuesta en la sección 1.2.

Como ya se explicó en secciones anteriores, el resultado de la simulación no será siempre el mismo, sino que varía aleatoriamente de acuerdo a la distribución maxwelliana del coeficiente PMD. En la figura 3.6 se puede observar la dispersión producida en tres pulsos diferentes, escogidos de entre las múltiples simulaciones realizadas para este escenario, en ella se comparan los pulsos de entrada (celeste) y de salida (azul).

En esta figura, se puede apreciar claramente el carácter aleatorio de la PMD, ya que el valor de dispersión varía de un pulso a otro. Si se mide el ensanchamiento experimentado, se tiene que en el peor de los casos, el pulso a la salida se ha ensanchado un 10% respecto al original y su amplitud se redujo en un 20% (cabe recalcar que el ensanchamiento del pulso a la salida no es igual al DGD).

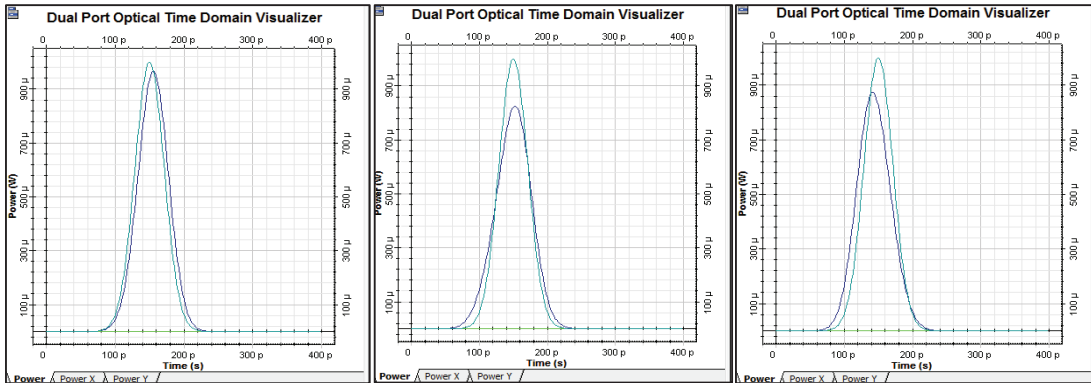


Figura 3.6 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 1 del grupo 1.

La atenuación experimentada por el pulso, es a causa del ensanchamiento del mismo. Un pulso mas ancho implica menor altura ya que la energía en ambos casos será la misma.

Con el objetivo de analizar la relación entre el grado de dispersión y la potencia de la señal de entrada, se eleva la potencia del pulso a 15 dBm , manteniendo los demás parámetros.

El pulso resultante se muestra en la figura 3.7. En ella se puede ver que el aumento en la potencia de entrada no ha influido en el nivel de dispersión del pulso a la salida de la fibra. Por lo tanto se puede concluir que el nivel de potencia de la señal de entrada no tiene relación con el grado de dispersión del pulso de luz, bajo las condiciones establecidas.

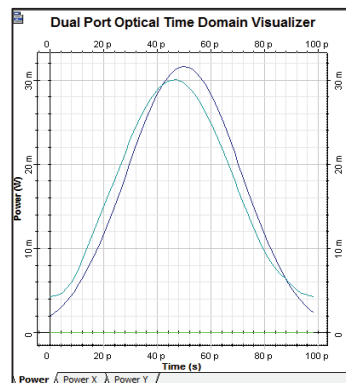


Figura 3.7 Señal de salida para un pulso de 15 dBm en el caso 1 del grupo 1.

Como se puede ver, el nivel de dispersión no ha variado a pesar del incremento de potencia. Por lo tanto, no existe relación entre la potencia de entrada del pulso y su nivel de dispersión. Como conclusión se puede decir, que la PMD no afectará de gran manera a la transmisión de información bajo las condiciones de este escenario.

3.2.2 GRUPO 1, CASO 2: $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 40 \text{ Gbps}$

Para este caso, la velocidad de transmisión ha aumentado a 40 Gbps , por lo tanto el tiempo de bit será de 25 ps .

$$\Delta\tau = 13,42 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau > \frac{1}{3} t_b$$

$$\Delta\tau > \frac{1}{2} t_b$$

$$13,42 \text{ ps} > 12,5 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido en la fibra es mayor a la mitad del tiempo de bit del pulso, superando los límites establecidos por la ITU-T en la recomendación G.663. Por tal motivo, la PMD afectará gravemente a la transmisión de pulsos bajo las condiciones fijadas.

La figura 3.8 muestra el pulso a la entrada de la fibra en el dominio del tiempo y la frecuencia. Como se puede observar, el pulso en el dominio de la frecuencia es el mismo que el anterior puesto que no se han hecho cambios en el espectro del mismo. En el dominio del tiempo, el ancho del pulso ahora es de 25 ps correspondiente a su tiempo de bit.

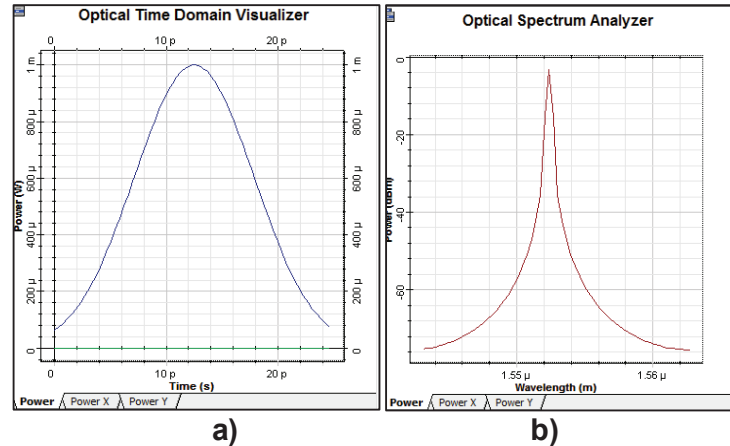


Figura 3.8 Señal de entrada para el caso 2 del grupo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

La figura 3.9 muestra el ensanchamiento a causa de la PMD, de tres pulsos en el dominio del tiempo bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos a la entrada (celeste) y a la salida (azul).

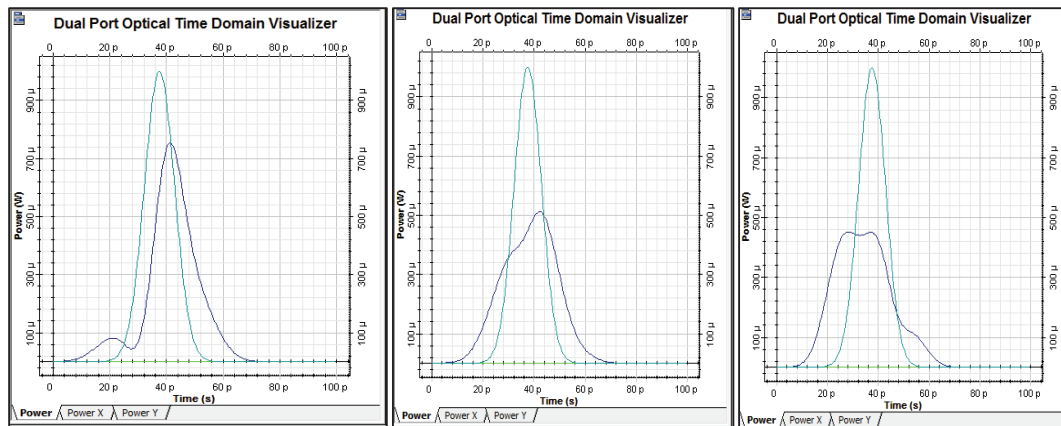


Figura 3.9 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 2 del grupo 1.

Los resultados obtenidos permiten obtener una clara idea de la naturaleza estadística de la PMD. Como se puede observar, la dispersión inducida al pulso, ha causado un ensanchamiento superior al 50% en la mayoría de los casos y una atenuación del mismo valor. Además, se observa que el pulso ha perdido en gran parte la forma de su envolvente original.

La figura 3.10 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits "01101011", bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta se puede observar la señal de entrada de dicha secuencia (celeste) comparada con la señal de salida (azul).

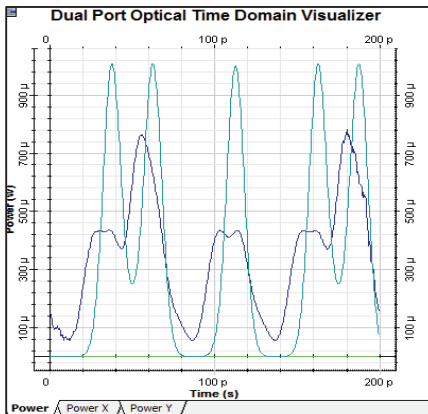


Figura 3.10 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 2 del grupo 1.

Como se puede ver, el nivel de dispersión ha provocado una distorsión significativa en los pulsos transmitidos debido al ISI. Esta dispersión puede causar errores en la transmisión de información, ya que se pueden llegar a confundir los valores de "cero" y "uno" lógicos en la secuencia de bits. En conclusión, para este escenario, la PMD generará errores en la transmisión de pulsos, incrementando el BER e imposibilitando la comunicación. Como adicional se puede decir que un alto nivel de dispersión, implica una gran atenuación.

3.2.3 GRUPO 1, CASO 3: $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 1000\text{Km}$; $V_{tx} = 80 \text{ Gbps}$

Para este caso, la velocidad de transmisión ha aumentado a 80 Gbps , por lo tanto el tiempo de bit será de $12,5 \text{ ps}$.

El DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 9,48 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau \approx \frac{3}{4} t_b$$

$$9,48 \text{ ps} \approx 9,375 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra es casi igual a los tres cuartos del tiempo de bit del pulso, superando los límites establecidos por la ITU-T. Por lo tanto, la PMD tendrá un efecto crítico sobre la calidad de la transmisión en este escenario.

La figura 3.11 muestra el pulso a la entrada en el dominio del tiempo y la frecuencia.

En el dominio del tiempo, el ancho del pulso ahora es de $12,5 \text{ ps}$ correspondiente a su tiempo de bit.

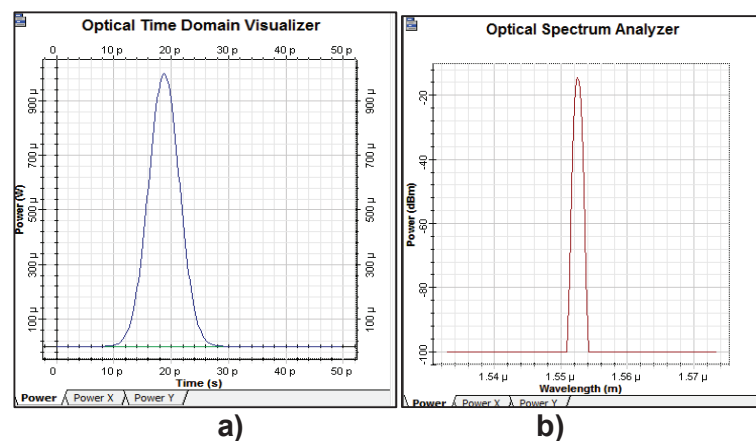


Figura 3.11 Señal de entrada para el caso 3 del grupo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

La figura 3.20 muestra el ensanchamiento de tres pulsos en el dominio del tiempo bajo las mismas condiciones a causa de la PMD, comparando los pulsos a la entrada (celeste) y a la salida (azul).

Como se puede ver, la PMD en este escenario afecta significativamente a los pulsos de luz, provocando un ensanchamiento superior al 50% del tiempo de bit, el mismo que en algunos casos llega a distorsionar la forma de la envolvente original del pulso e incluso provoca un desplazamiento temporal del mismo. Además, se tiene un nivel de atenuación superior al 40%.

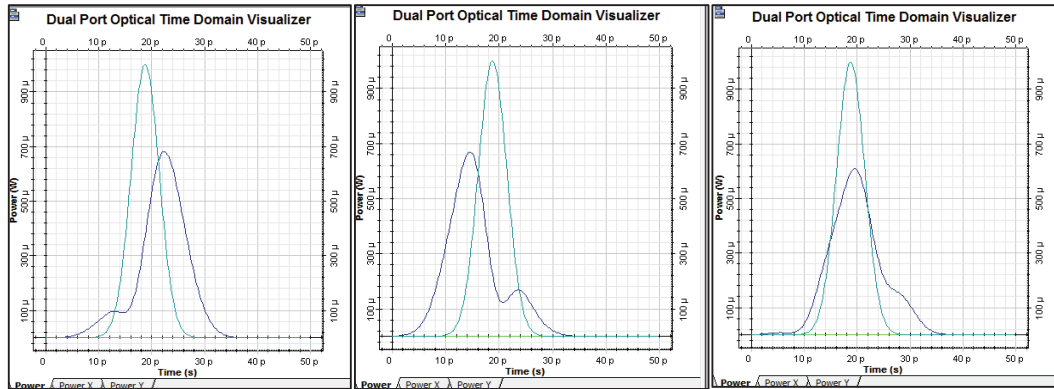


Figura 3.12 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 3 del grupo 1.

La figura 3.13 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits “01101011”, bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta compara la señal de entrada (celeste) y la señal de salida (azul).

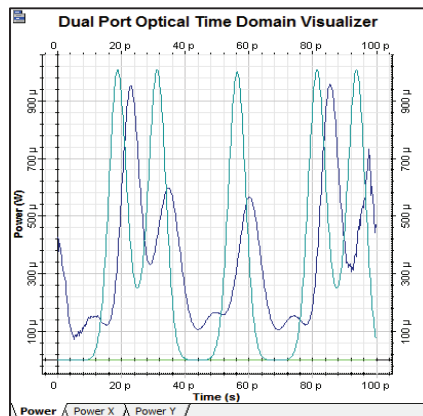


Figura 3.13 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 3 del grupo 1.

Como se puede ver, la secuencia de salida se ha distorsionado a causa del ISI. Este tipo de secuencia podría ser interpretada erróneamente en el extremo receptor del sistema. Por lo tanto, se concluye que la PMD afecta de manera significativa a la calidad de transmisión de información, bajo las condiciones establecidas para este escenario.

3.2.4 GRUPO 1, CASO 4: $\phi\text{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 1000\text{Km}$; $V_{tx} = 140 \text{ Gbps}$

Para este caso, la velocidad de transmisión se ha aumentado a 140 Gbps , por lo tanto el tiempo de bit será ahora de $7,14 \text{ ps}$. Esta velocidad es comparable a la usada en sistemas modernos DWDM de gran capacidad.

El DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 9,48 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau > t_b$$

$$9,48 \text{ ps} > 7,14 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra supera al valor crítico establecido en las recomendaciones de la ITU-T, siendo mayor que el tiempo de bit del pulso. Por esta razón, se deduce que la PMD producirá un efecto bastante crítico sobre la transmisión de los pulsos.

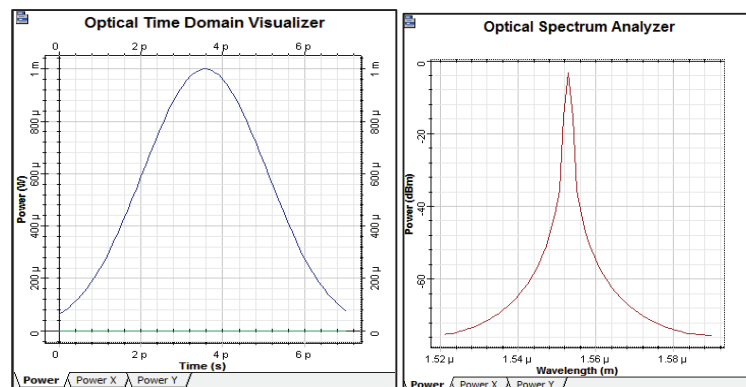


Figura 3.14 Señal de entrada para el caso 4 del grupo 1: **a)** en el dominio del tiempo, **b)** en el dominio de la frecuencia.

La figura 3.14 muestra el pulso a la entrada de la fibra en el dominio del tiempo y la frecuencia. Se puede observar que ahora el tiempo de bit del pulso es de $7,14 \text{ ps}$.

La figura 3.15 muestra el ensanchamiento de tres pulsos diferentes afectados por la PMD bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos de entrada (celeste) con los de salida (azul).

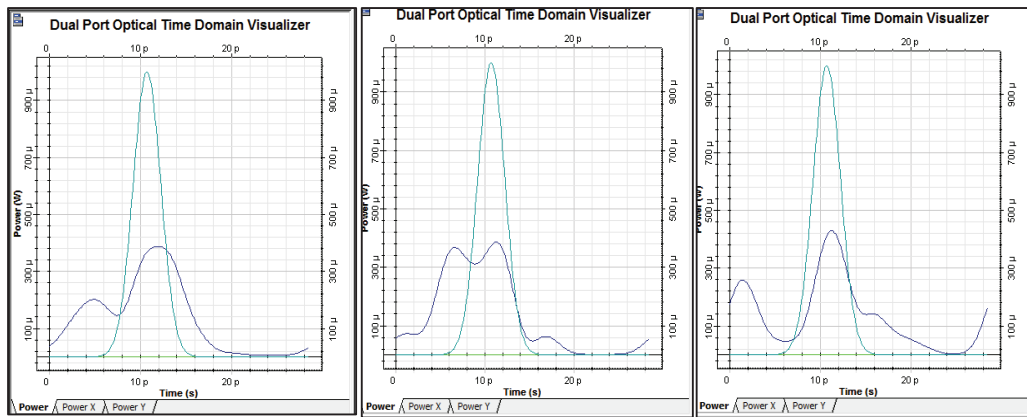


Figura 3.15 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 4 del grupo 1.

Como se puede ver, en la mayoría de los casos el pulso de salida sufre un ensanchamiento sumamente grande, el cual puede llegar a ser tres veces mayor que el ancho original, además experimenta una atenuación del orden del 60%. Adicional a esto, el pulso ha perdido completamente la forma de su envolvente, siendo imposible distinguirlo.

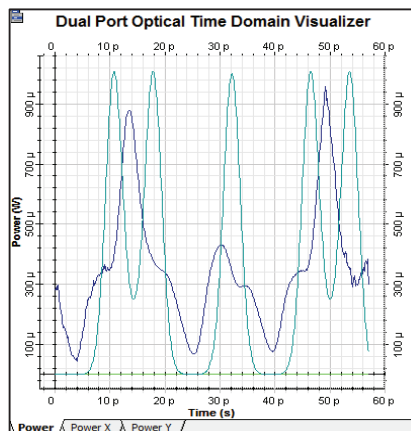


Figura 3.16 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 4 del grupo 1.

La figura 3.16 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits "01101011", bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta se compara la señal de entrada (celeste) con la señal de salida (azul).

Como se puede ver, el alto nivel de dispersión e ISI, ha alterado en gran manera la secuencia de bits, volviéndola imposible de distinguir con respecto a la original. Por lo tanto, se concluye que, debido a la PMD, cualquier tipo de transmisión bajo estas condiciones es imposible de realizarse.

3.2.5 GRUPO 2. CASO 1: $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 5000\text{Km}$; $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$

Para este caso, el DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 7,07 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau < \frac{1}{10} t_b$$

$$7,07 \text{ ps} < 10 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra, es menor que la décima parte del tiempo de bit del pulso a transmitirse. Por lo tanto, se puede asegurar a priori que la PMD no afectará significativamente al pulso bajo las condiciones dadas.

La figura 3.17 muestra el ensanchamiento de tres pulsos diferentes afectados por la PMD bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos de entrada (celeste) con los de salida (azul).

Como se puede ver, la PMD no ha tenido mayor efecto en los pulsos de luz. En el segundo ejemplo se ha producido un desplazamiento de 8 ps del pulso respecto a su posición original. En el tercer caso existe un ensanchamiento del pulso de un 2% respecto al original y una atenuación del 4%. Sin embargo, estos resultados no son críticos y no afectan de manera significativa a la calidad de la transmisión.

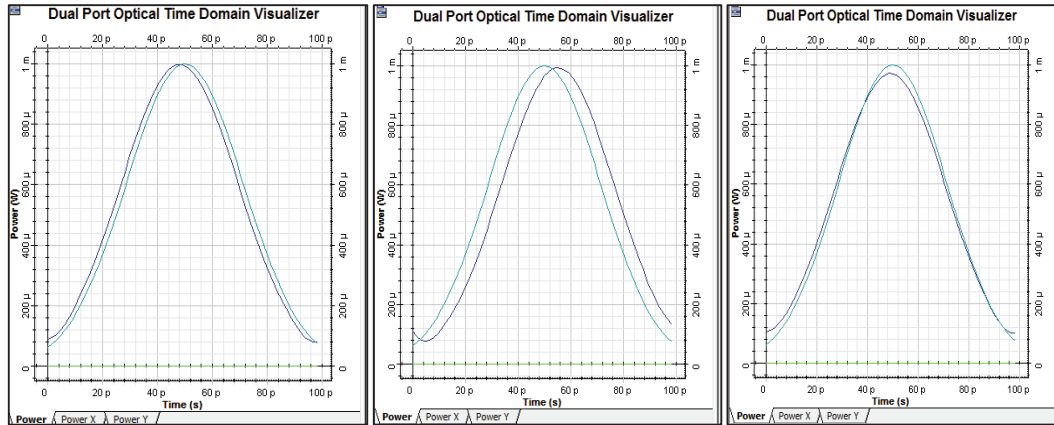


Figura 3.17 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 1 del grupo 2.

La figura 3.18 muestra la señal de salida en el dominio del tiempo, con un aumento de 15 dBm en la potencia de entrada, manteniendo los demás parámetros del puso. En esta se compara el pulso de entrada (celeste) con el de salida (azul).

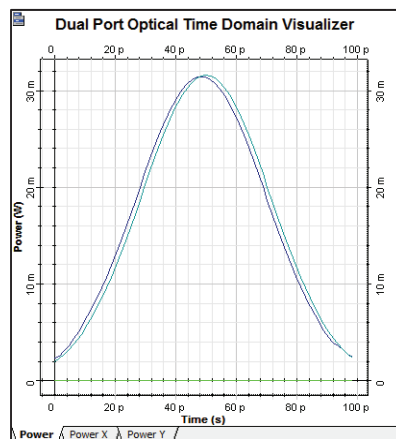


Figura 3.18 Señal de salida para un pulso con potencia de 15 dBm en el caso 1 del grupo 2.

Como se puede ver, el aumento de 15 dBm en la potencia de entrada de la señal, no ha causado ningún efecto en el nivel de dispersión del pulso. Por lo que se concluye que, la PMD no tendrá un efecto significativo en la calidad de la transmisión de pulsos, bajo las condiciones establecidas para este escenario.

Además, el nivel de potencia de entrada no guarda relación con el grado de dispersión producido.

3.2.6 GRUPO 2, CASO 2: $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 5000\text{Km}$; $V_{tx} = 40 \text{ Gbps}$

Para este caso, el DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 7,07 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau < \frac{1}{3} t_b$$

$$7,07 \text{ ps} < 8,33 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra es menor que la tercera parte del tiempo de bit del pulso a transmitirse. Por lo tanto la PMD no tendrá efectos considerables sobre la transmisión de pulsos bajo las condiciones establecidas. La figura 3.19 muestra el ensanchamiento de tres pulsos diferentes afectados por la PMD bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos de entrada (celeste) con los de salida (azul).

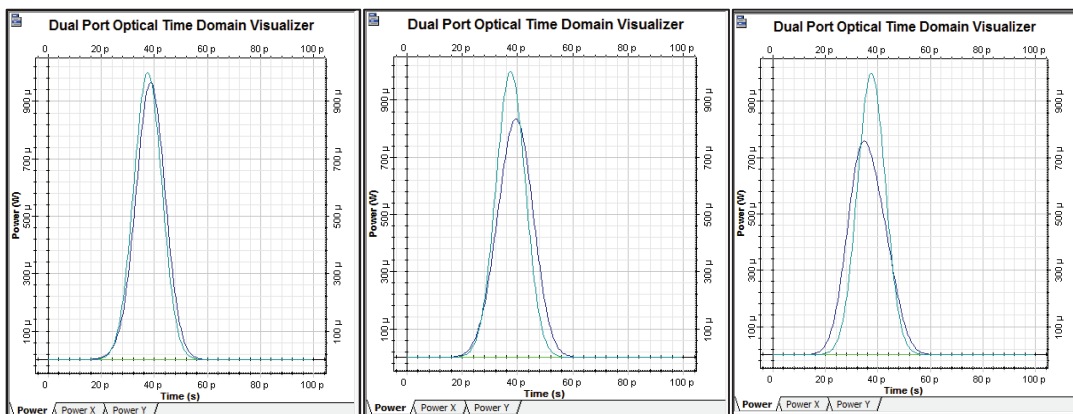


Figura 3.19 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 2 del grupo 2.

Como se puede ver, en el peor de los tres casos, el pulso de salida ha sufrido un ensanchamiento de alrededor del 30% respecto al de entrada y una atenuación del 25%. Sin embargo, en los otros dos pulsos, los niveles de atenuación y dispersión son menores.

La figura 3.20 muestra la señal de salida en el dominio del tiempo, con un aumento de 15 dBm en la potencia de entrada, manteniendo constantes los demás parámetros del pulso. En esta se compara el pulso de entrada (celeste) con el de salida (azul).

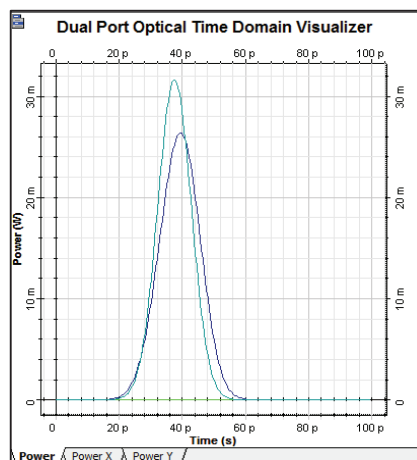


Figura 3.20 Señal de salida para un pulso con potencia de 15 dBm en el caso 2 del grupo 1.

Como se puede ver, el incremento de potencia no ha afectado el nivel de dispersión del pulso, por lo que no se evidencia relación entre estas dos variables.

La figura 3.21 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits "01101011", bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta se compara la señal de entrada (celeste) y la señal de salida (azul).

Como se puede ver, la dispersión producida no ha causado un elevado nivel elevado de ISI, por lo que la señal de salida no es afectada de manera crítica. Por lo tanto, se concluye que la PMD no llega a tener un efecto significativo en la transmisión de pulsos bajo las condiciones de este escenario.

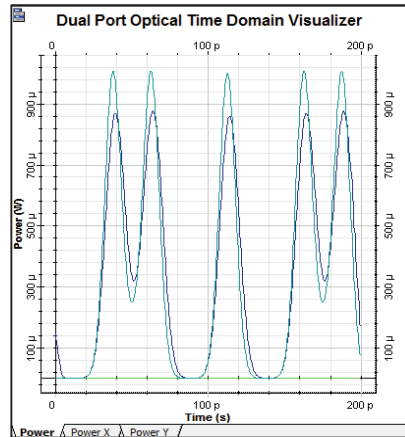


Figura 3.21 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 2 del grupo 2.

3.2.7 GRUPO 2, CASO 3: $\phi_{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 80 \text{ Gbps}$

Para este caso, el DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 4,47 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau > \frac{1}{3} t_b$$

$$4,47 \text{ ps} > 4,16 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra, es mayor a la tercera parte del tiempo de bit de la señal, superando el límite de la ITU-T. De esta manera, la PMD afectará a la calidad de la transmisión en este escenario.

La figura 3.22 muestra el ensanchamiento de tres pulsos diferentes afectados por la PMD bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos de entrada (celeste) con los de salida (azul).

Como se puede ver, la PMD en los dos primeros pulsos no ha causado mayor efecto; sin embargo, ha provocado un ensanchamiento del pulso de alrededor del 40% y un nivel de atenuación del 30%, en el tercer pulso.

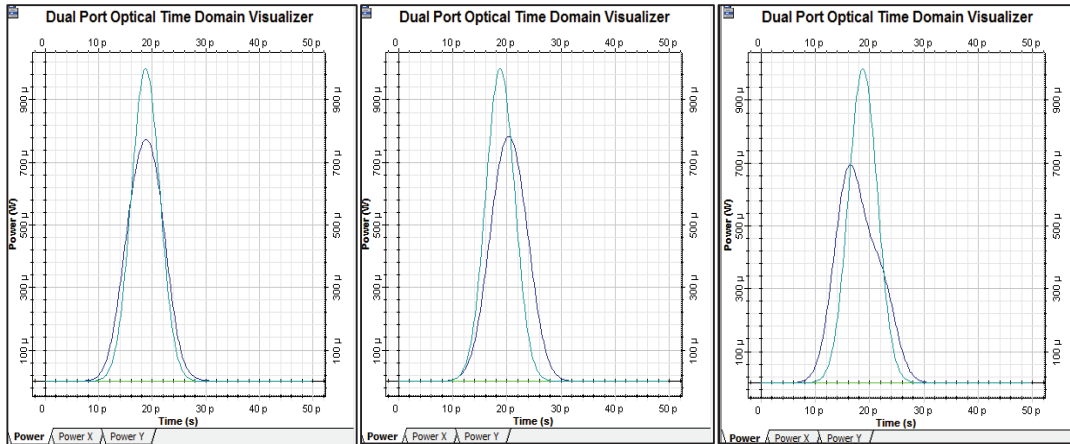


Figura 3.22 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 3 del grupo 2.

La figura 3.23 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits “01101011”, bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta se compara la señal de entrada (celeste) y la señal de salida (azul).

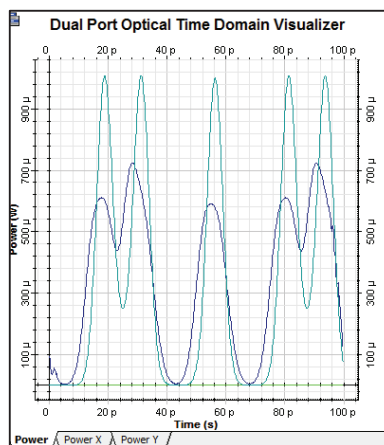


Figura 3.23 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 3 del grupo 2.

Como se puede ver, la señal de salida ha sufrido cierto grado de distorsión respecto a la entrada. Esta distorsión podría llegar a provocar un BER significativo, especialmente en señales multinivel. Por lo tanto, se concluye que el efecto de la PMD puede llegar a ser significativo en la calidad de la transmisión, bajo las condiciones establecidas para este escenario.

3.2.8 GRUPO 2, CASO 4: $\phi\text{PMD} = 0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$; $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 140 \text{ Gbps}$

Para este caso, el DGD inducido por la fibra es:

$$\Delta\tau = 4,47 \text{ ps}$$

Comparando con el tiempo de bit se tiene:

$$\Delta\tau \approx 2/3 t_b$$

$$4,47 \text{ ps} \approx 4,76 \text{ ps}$$

El DGD teórico inducido por la fibra es casi dos tercios del tiempo de bit del pulso. Por lo tanto, la PMD tendrá un efecto crítico en la calidad de la transmisión bajo estas condiciones.

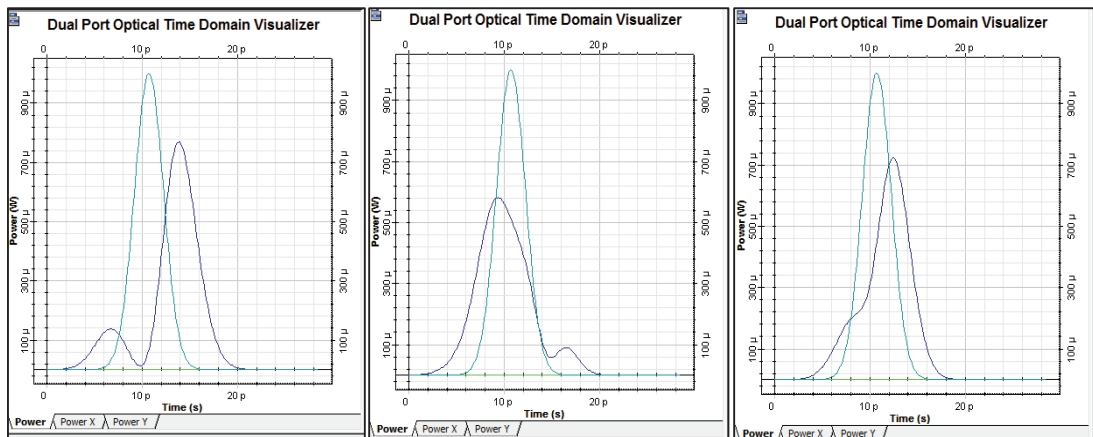


Figura 3.24 Señales de entrada y salida en el dominio del tiempo para tres pulsos diferentes en el caso 4 del grupo 2.

La figura 3.24 muestra el ensanchamiento de tres pulsos diferentes afectados por la PMD bajo las mismas condiciones, comparando los pulsos de entrada (celeste) con los de salida (azul).

De los resultados obtenidos, se puede apreciar que el nivel de dispersión produce un ensanchamiento del pulso mayor al 50%, llegando incluso al 100% respecto a su ancho original. Además, el nivel de atenuación varía entre el 30% y 40%.

La figura 3.25 muestra la dispersión producida en una secuencia de bits “01101011”, bajo las mismas condiciones de este escenario. En esta se compara la señal de entrada (celeste) y la señal de salida (azul).

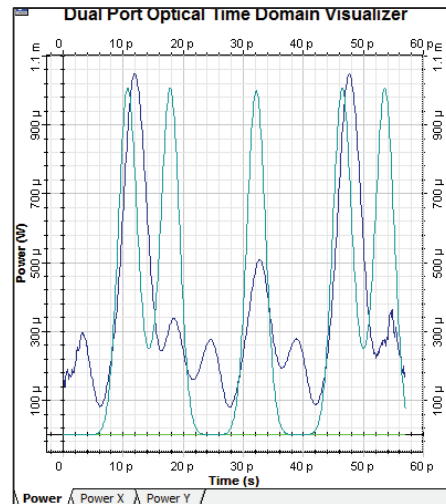


Figura 3.25 Señal de salida para una secuencia de 8 bits en el caso 4 del grupo 2.

Como se puede ver, la secuencia de salida ha sufrido gran distorsión por causa del ISI y la dispersión. Por lo tanto, se concluye que bajo las condiciones establecidas para este escenario, el efecto de la PMD impedirá la transmisión de los pulsos.

3.2.9 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA TODOS LOS ESCENARIOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de todos los escenarios planteados en la tabla 2.2, comparando el tiempo de bit de los pulsos con los DGD teóricos esperados y mostrando los niveles de dispersión y atenuación obtenidos.

La tabla 3.1 muestra los resultados para los escenarios del Grupo 1.

Velocidad de transmisión (Gbps)	Longitud de la fibra (km)	Comparación t_b vs DGD teórico	Nivel de atenuación aprox. (%)	Ensanchamiento del pulso aprox. (%)
10	2000	$\Delta\tau \approx 1/10 t_b$	0-4	0-2
	5000	$\Delta\tau \approx 1/5 t_b$	5-20	5-10
40	100	$\Delta\tau \approx 1/10 t_b$	0-10	0-8
	1000	$\Delta\tau > 1/3 t_b$ $\Delta\tau < 1/2 t_b$	5-20	10-30
	2000	$\Delta\tau > 1/2 t_b$	30-50	40-50
	5000	$\Delta\tau \approx t_b$	40-60	100
80	100	$\Delta\tau > 1/10 t_b$ $\Delta\tau < 1/3 t_b$	5-15	0-10
	1000	$\Delta\tau \approx 3/4 t_b$	40-50	50-70
	2000	$\Delta\tau > t_b$	50-65	>100
	5000	$\Delta\tau > 1,5 t_b$	60-70	>100
140	100	$\Delta\tau > 1/3 t_b$ $\Delta\tau < 1/2 t_b$	40-50	10-30
	1000	$\Delta\tau > t_b$	50-70	>100
	2000	$\Delta\tau \approx 2 t_b$	60-80	>100

Tabla 3.1 Resultados obtenidos para el grupo 1, $\varphi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$

La tabla 3.2 muestra los resultados para los escenarios del Grupo 2.

Velocidad de transmisión (Gbps)	Longitud de la fibra (km)	Comparación t_b vs DGD teórico	Nivel de atenuación aprox. (%)	Ensanchamiento del pulso aprox. (%)
10	5000	$\Delta\tau < 1/10 t_b$	0-4	0-2
40	1000	$\Delta\tau > 1/10 t_b$	0-8	0-10
	2000	$\Delta\tau \approx 1/5 t_b$	5-10	5-10
	5000	$\Delta\tau < 1/3 t_b$	10-25	15-30
80	1000	$\Delta\tau \approx 1/4 t_b$	8-10	5-10
	2000	$\Delta\tau \approx 2/5 t_b$	25-30	20-40
	5000	$\Delta\tau > 1/2 t_b$	40-50	40-60
140	100	$\Delta\tau > 1/10 t_b$	8-10	5-10
	1000	$\Delta\tau \approx 2/5 t_b$	25-35	40-50
	2000	$\Delta\tau \approx 2/3 t_b$	30-40	50-60
	5000	$\Delta\tau \approx t_b$	40-60	100

Tabla 3.2 Resultados obtenidos para el grupo 1, $\varphi_{PMD} = 0, 1 \text{ ps/km}^{1/2}$

3.2.10 ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE PMD

De los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede concluir que para fibras que cumplen con la recomendación ITU-T G.655, la dispersión por modo de polarización (PMD) es un fenómeno que empieza a ser apreciado en velocidades de transmisión a partir de los 10 Gbps, pero no es hasta valores superiores, del orden de los 40 Gbps que su efecto se vuelve considerable, siendo totalmente crítico en velocidades que superen los 100 Gbps.

El efecto de este tipo de dispersión, no solo generó ensanchamiento del pulso, sino también atenuación debida a la redistribución de la energía que experimenta

el mismo. Además, en casos críticos llegó a degenerar totalmente la forma de la envolvente, haciendo imposible distinguir la señal de luz al otro extremo de la fibra. Cabe recalcar que, el valor de la potencia del pulso de entrada no influyó en el nivel de dispersión sufrido por el pulso.

Se puede también apreciar que las fibras que cumplen con las categorías C, D y E de la recomendación ITU-T G.655, soportaron de mejor manera el fenómeno de PMD en comparación a las fibras que solo cumplen con las categorías A y B; ya que las primeras poseen un coeficiente PMD mas bajo.

Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de la PMD (y por lo tanto del DGD), se obtuvieron niveles muy elevados de dispersión, incluso con valores relativamente bajos para el coeficiente, por lo que una buena forma de obtener una transmisión fiable, es asegurar que el DGD teórico no exceda a la tercera parte del tiempo de bit de la señal, tal como se establece en la recomendación de la ITU-T G653 para fibras monomodo.

3.3 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE COMPENSACIÓN DE PMD

En esta sección, se analizan los resultados obtenidos de la simulación de los escenarios propuestos en la tabla 2.3.

Como se puede apreciar, estos escenarios comprenden las diferentes técnicas de compensación ópticas de PMD expuestas en la sección 1.2.11.1. Las técnicas de compensación electrónicas no serán tomadas en cuenta, debido a las limitaciones del simulador en cuanto a componentes electrónicos. De este modo, se analizarán tres técnicas de compensación: pre-compensación, post-compensación de una etapa y post-compensación de dos etapas.

Las simulaciones, para cada técnica, se realizarán en tres escenarios diferentes con distintas longitudes de fibra y velocidades de transmisión, tal y como se muestra en la tabla 2.3. De las múltiples simulaciones realizadas, se escogerán

dos de los resultados más significativos para cada uno de los tres escenarios, con el objetivo de analizar la efectividad de cada técnica y sus posibles limitaciones.

El coeficiente PMD a usarse en todas las simulaciones será de $0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$. Se ha escogido este valor con el objetivo de obtener niveles relativamente altos de dispersión y así realizar un mejor análisis de la efectividad de la compensación.

3.3.1 SIMULACIÓN DE UN PRE-COMPENSADOR DE PMD

La primera técnica a analizarse, es la del pre-compensador de dispersión, el cual se ubica en la zona de transmisión de la señal. Este dispositivo está compuesto esencialmente, de un controlador de polarización que permitirá alinear los PSP del pulso de luz a los ejes de birrefringencia de la fibra y así, evitar la dispersión debido al acoplamiento de modos.

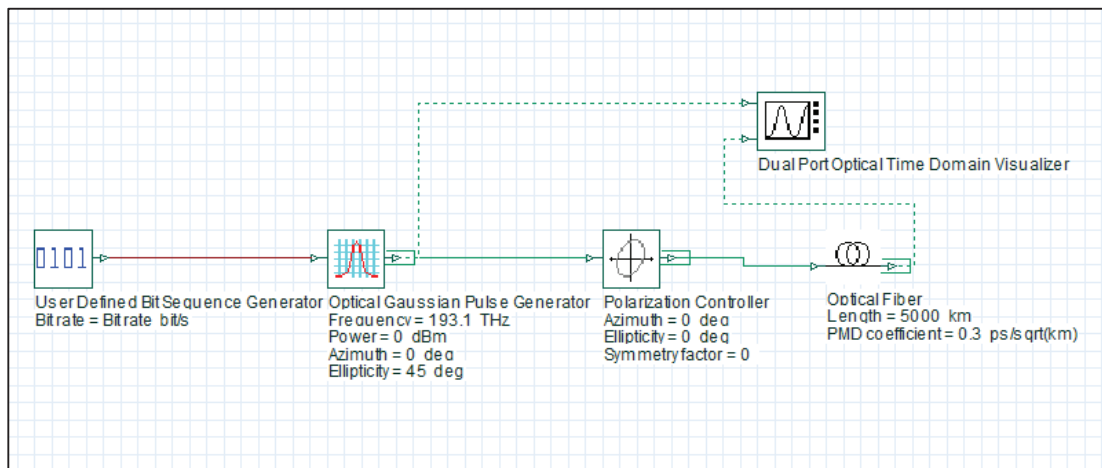


Figura 3.26 Escenario de simulación con pre-compensador.

La figura 3.26 muestra el escenario de simulación para este caso. En ella se puede observar el controlador de polarización ubicado a continuación del generador de pulsos gaussianos.

Una vez definido el entorno de simulación, se configura cada componente de acuerdo a los parámetros establecidos para cada escenario.

Configuración del pre-compensador:

Tal como se puede apreciar en la figura 3.28, el pre-compensador estará compuesto únicamente por un controlador de polarización, determinado por el componente *Polarization Controller*.

Para generar las condiciones de simulación, se configura primero el componente *Gaussian Pulse Generator* con un estado de polarización arbitrario. La figura 3.27 muestra la configuración de dicho componente con un ángulo elipticidad de 45 grados.

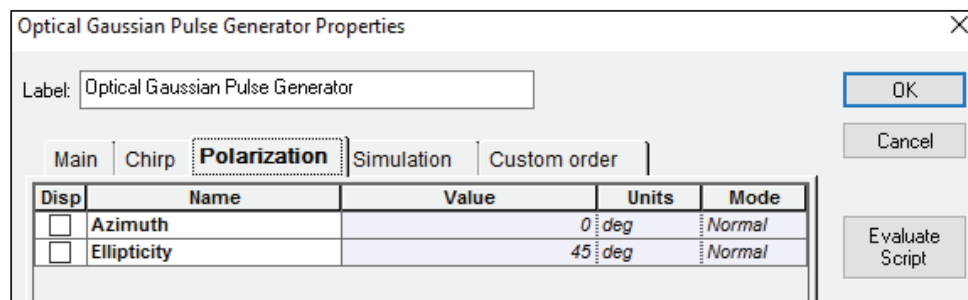


Figura 3.27 Configuración del componente Gaussian Pulse Generator.

Además, es necesario configurar el componente *Polarization Controller* para alinear el estado de polarización del pulso gaussiano con los ejes de birrefringencia del segmento de fibra.

La figura 3.28 muestra la configuración del componente *Polarization Controller* con todos sus parámetros.

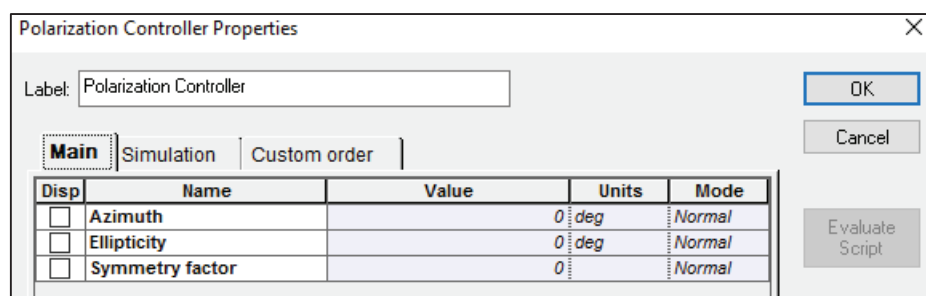


Figura 3.28 Configuración del componente Polarization Controller.

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*. Además, de acuerdo a la ecuación (2.6), se selecciona un factor de simetría “ sf ” igual a “cero” para que no exista cambio de fases en los PSP del pulso gaussiano.

Una vez configurados los elementos del pre-compensador, se realizan las simulaciones para los diferentes escenarios establecidos.

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

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el ejemplo de la sección 3.2.1. Por lo tanto, se configuran los parámetros globales y de cada componente necesarios para recrear dichas condiciones ($L = 5000\text{Km}$, $V_{tx} = 10\text{Gbps}$, $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$).

La figura 3.29 muestra los resultados obtenidos para dos pulsos diferentes, simulados bajo las condiciones establecidas previamente. En ella se comparan los pulsos de entrada en celeste (previo a la dispersión) con los de salida en azul (con dispersión).

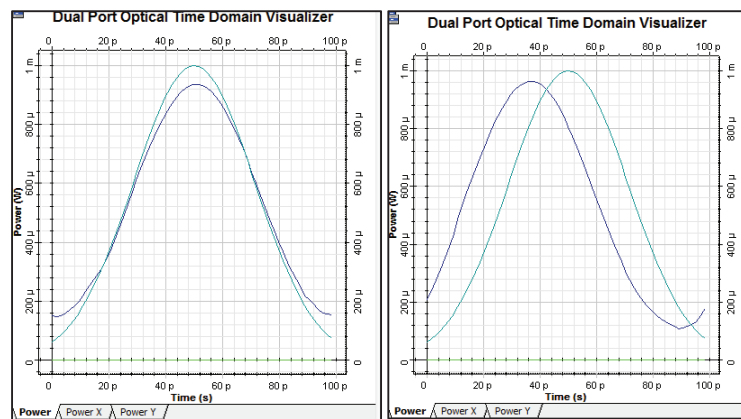


Figura 3.29 Resultados obtenidos para dos pulsos de 10 Gbps con pre-compensación.

Como se puede observar en la figura, la dispersión del pulso usando el pre-compensador, es similar a la dispersión en un ambiente de las mismas características y sin compensación (como en el caso de la sección 3.2.1). El nivel de dispersión provoca un ensanchamiento del pulso de alrededor del 10% respecto al original y un nivel de atenuación del 10%.

Al comparar estos valores con los obtenidos en la sección 3.2.1, se concluye que en este escenario, la pre-compensación no fue efectiva.

3.3.1.2 Pre-compensador: $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 40\text{ Gbps}$; $\varphi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el ejemplo de la sección 3.2.2. Por lo tanto, se configuran los parámetros globales y de cada componente necesarios para recrear dichas condiciones ($L = 2000\text{Km}$, $V_{tx} = 40\text{Gbps}$, $\varphi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$).

Los resultados obtenidos para este escenario se muestran en la figura 3.30. En ella se hace la comparación entre entrada (celeste) y salida (azul) para dos pulsos diferentes simulados bajo las mismas condiciones.

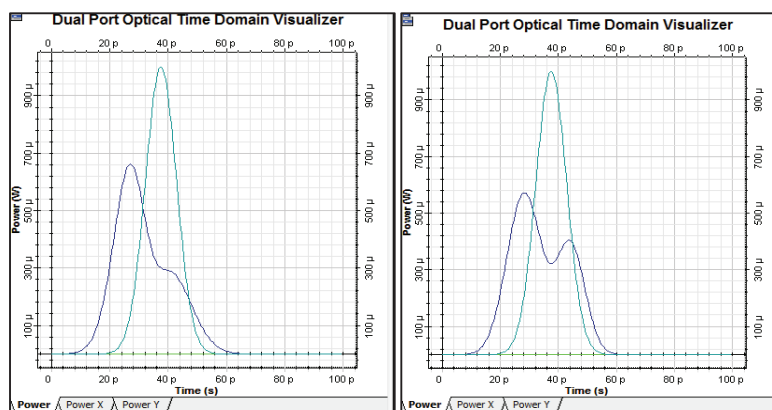


Figura 3.30 Resultados obtenidos para dos pulsos de 40 Gbps con pre-compensación.

El nivel de dispersión, produce un ensanchamiento de alrededor del 50% del pulso a la salida y un nivel de atenuación del mismo valor, incluso se evidencia la

pérdida de la forma de su envolvente. Como se puede observar, estos valores son similares a los obtenidos en un escenario de iguales características y sin compensación (como el de la sección 3.2.2). Por lo tanto, bajo las condiciones de este escenario el uso de pre-compensación tampoco es efectivo.

3.3.1.3 Pre-compensador: $L = 1000\text{Km}$; $V_{tx} = 140\text{ Gbps}$; $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el ejemplo de la sección 3.2.3. Por lo tanto, se configuran los parámetros globales y de cada componente necesarios para recrear dichas condiciones ($L = 1000\text{Km}$, $V_{tx} = 140\text{Gbps}$, $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$).

Los resultados obtenidos para este escenario se muestran en la figura 3.31. En ella se hace la comparación entre entrada (celeste) y salida (azul) para dos pulsos diferentes simulados bajo las mismas condiciones.

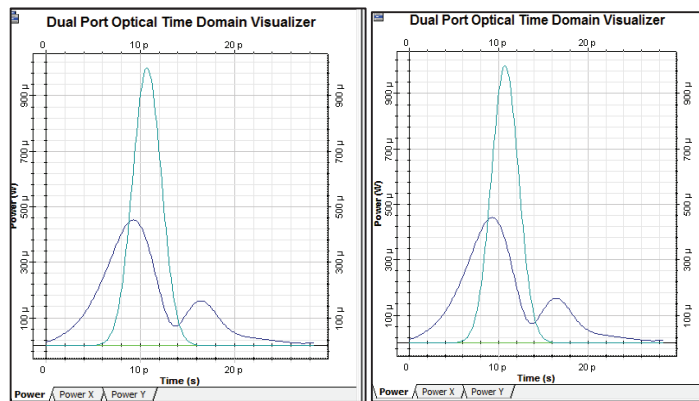


Figura 3.31 Resultados obtenidos para dos pulsos de 140 Gbps con pre-compensación.

Como se puede observar, la dispersión ha provocado que los pulsos a la salida tengan el doble de su ancho original, y sufran una atenuación del 50% aproximadamente. Estas condiciones son incluso peores que las obtenidas en un escenario sin compensación y de iguales características (como el de la sección 3.2.3). De igual manera que en los casos anteriores, el uso del pre-compensador

no ha reducido la dispersión del pulso resultante. Por lo tanto se concluye que el uso de esta técnica no es efectivo para ninguno de los escenarios de simulación escogidos.

Análisis de resultados:

Los resultados obtenidos, son fáciles de explicar basándose en cálculos numéricos:

La función del controlador de polarización es alinear los PSP del pulso con los ejes de birrefringencia de la fibra, como ya se ha mencionado antes. De esta forma se evita la dispersión debido al acoplamiento de modos a la entrada de la fibra. Sin embargo, si se sabe que la longitud de la fibra es $L=5000Km$ y el parámetro $L'_{scatt} = 50m$, entonces existirán 1×10^5 segmentos birrefringentes acoplados entre sí para dicha longitud, en cada uno de los cuales se producirá un intercambio de energía entre los PSP del pulso que se propaga. Del mismo modo, para $L=2000Km$ y $L=1000Km$, se tendrán 4×10^4 y 2×10^4 intercambios de energía respectivamente.

Por lo tanto se concluye que un acoplamiento de la señal a la entrada de la fibra es insignificante comparado con el número de intercambios de energía posteriores.

3.3.2 SIMULACIÓN DE UN POST-COMPENSADOR DE UNA ETAPA

Las siguientes técnicas a analizarse, están basadas en la post-compensación. Tal como se explicó en la sección 1.2.11.1, las técnicas de post-compensación se basan en el uso de divisores de polarización y retardadores temporales, cuya función es lograr que el tiempo de retardo entre ambos PSP de un pulso de luz sea el mismo.

Debido a las limitaciones en cuanto a componentes del simulador, sólo se analizarán técnicas de post-compensación basadas en métodos pasivos. El desarrollo de técnicas dinámicas incluiría el diseño de componentes y algoritmos que exceden el ámbito de este trabajo.

La primera técnica de post-compensación, se basa en el uso de un retardador temporal fijo en el extremo de salida de la fibra óptica. Este retardador está compuesto por un polarizador divisor, un segmento de fibra Hi-Bi PM y un mezclador de polarización, tal como se muestra en la figura 3.32.

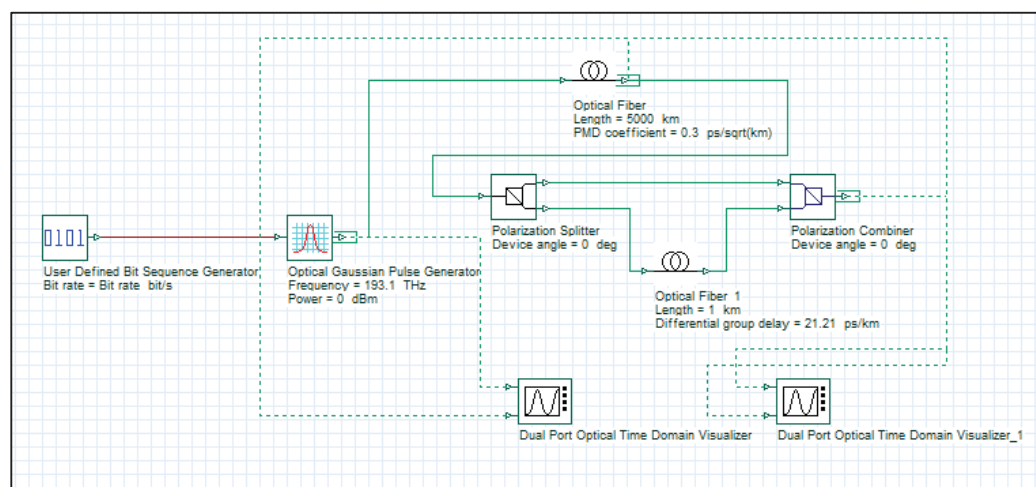


Figura 3.32 Escenario de simulación con post-compensador de una etapa.

El funcionamiento del post-compensador se resume de la siguiente manera:

La función del componente *Polarization Splitter*, es dividir el pulso de luz en sus estados de polarización ortogonales (PSP), enviando cada PSP por un puerto diferente.

El segmento de fibra mantenedora de polarización, tiene la función de introducir un retardo comparable al DGD inducido al PSP que se adelanta y así, igualar los tiempos de retardo de ambos estados de polarización.

Finalmente, la función del componente *Polarization Combiner* es la de volver a combinar ambos PSP para obtener la señal de salida compensada.

Para realizar la configuración del post-compensador de una etapa, es necesario configurar cada uno de sus componentes, como se muestra a continuación:

La figura 3.33 muestra la configuración de los componentes *Polarization Splitter* y *Polarization Combiner*. En ella se puede apreciar, que el único parámetro configurable, llamado *Device angle*, se establece en “cero”.

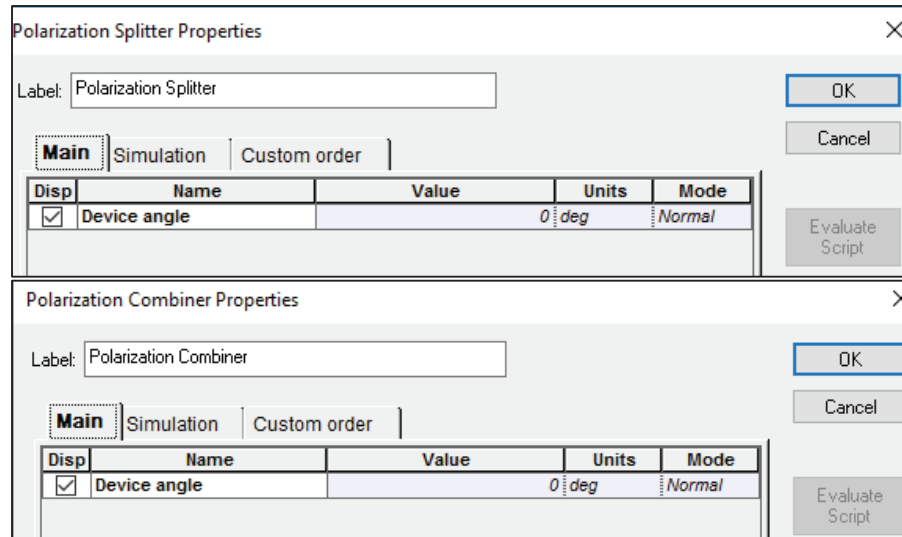


Figura 3.33 Configuración de los componentes Polarization Splitter y Polarization Combiner.

Para configurar el segmento de fibra Hi-Bi PM, es necesario conocer el DGD teórico inducido y así, asignar ese valor al retardo diferencial de grupo del componente *Optical Fiber* correspondiente al post-compensador.

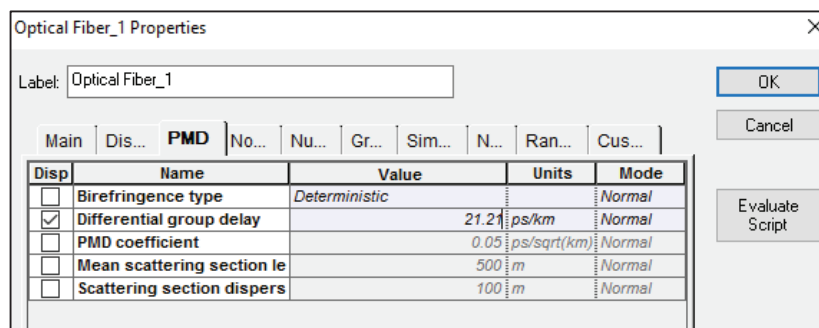


Figura 3.34 Configuración del componente Optical Fiber 1.

Finalmente, se configura el componente con un tipo de birrefringencia determinística, tal como se muestra en la figura 3.34 y se deshabilitan los demás parámetros que no tengan que ver con PMD, para desprestigiar cualquier otro fenómeno.

Una vez configurados todos los parámetros necesarios para el post-compensador, se corre la simulación y se analizan los resultados obtenidos.

Cabe recalcar que en un ambiente real, una de las funciones del post-compensador es determinar cuál de los PSP es el que se adelanta y así poder introducir el retardo temporal. Sin embargo, esto no se puede lograr dadas las limitaciones del simulador, por lo que sólo se tomarán en cuenta los casos en los que la componente en y sea la adelantada y así, poder realizar la compensación.

3.3.2.1 Post-compensador de una etapa: $L = 5000\text{Km}$; $V_{tx} = 10 \text{ Gbps}$; $\phi_{PMD} = 0,3 \text{ ps/km}^{1/2}$

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.1.

El DGD teórico es igual a:

$$\Delta\tau = 21,21 \text{ ps}$$

Este valor será configurado para el segmento de fibra Hi-Bi PM correspondiente al componente *Optical Fiber 1*.

Los resultados de la simulación para este escenario son los siguientes:

La figura 3.35 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación. Como se puede apreciar, el pulso ha sufrido una ligera dispersión (alrededor del 5%) y desplazamiento (6 ps) a causa de la PMD.

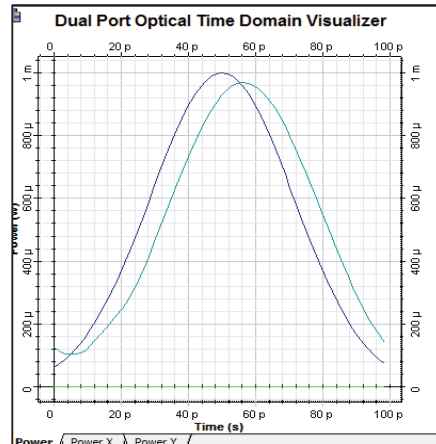


Figura 3.35 Dispersión del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación.

La figura 3.36 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso antes de la compensación (celeste). Como se puede apreciar, el pulso ha retomado su ancho y posición original.

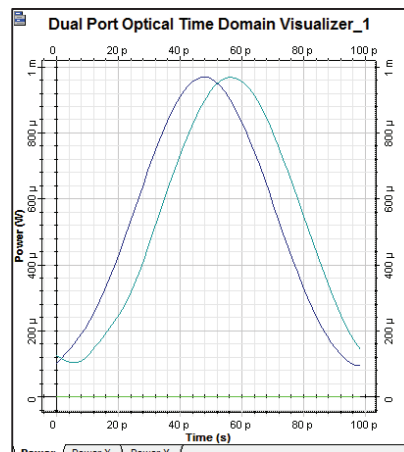


Figura 3.36 Post-Compensación de la dispersión del pulso de 10 Gbps.

La figura 3.37 permite apreciar cómo la componente en y del pulso antes de la compensación (derecha) se ha adelantado alrededor de 10 ps a la componente en x (izquierda).

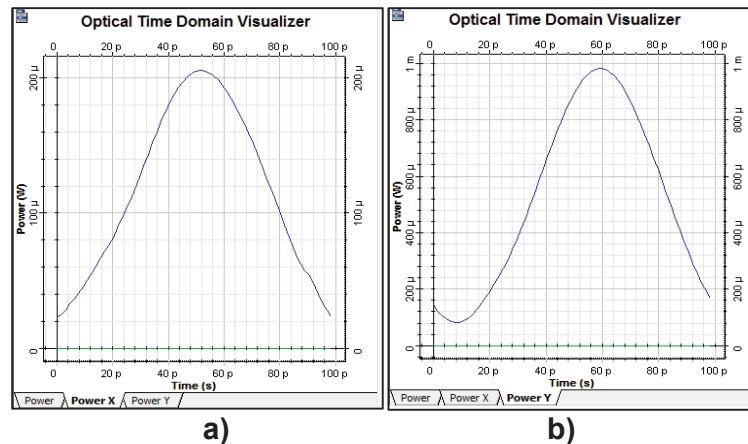


Figura 3.37 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.38 permite apreciar cómo la componente en y del pulso compensado (derecha), se ha colocado al mismo nivel que la componente en x (izquierda) después de la compensación.

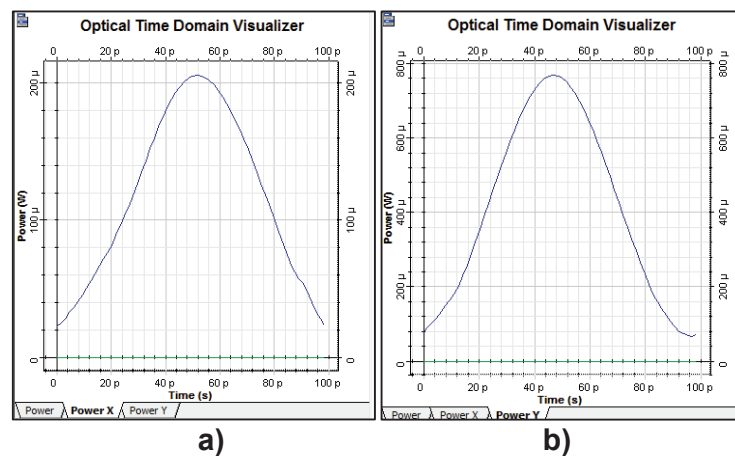


Figura 3.38 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps compensado: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

Como se puede observar en todos los resultados obtenidos, esta técnica de compensación ha sido bastante efectiva, pues el pulso ha recobrado sus parámetros originales. Sin embargo, es necesario realizar más ejemplos de simulación en el mismo escenario para comprobar la efectividad de la compensación.

La figura 3.39 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. La figura de la izquierda compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul).

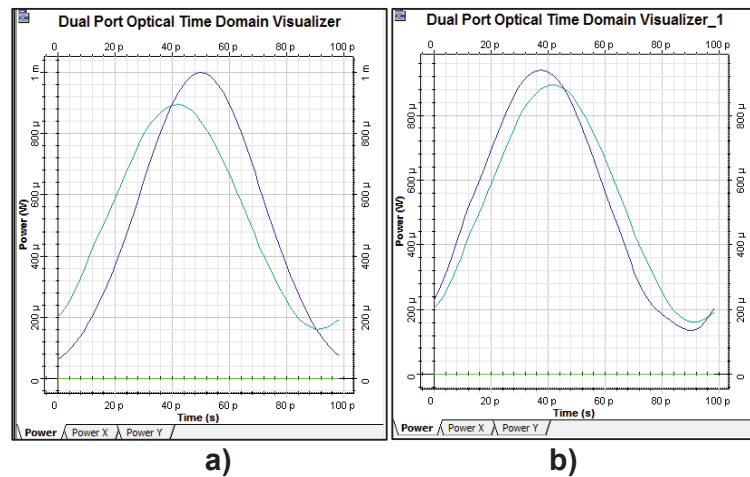


Figura 3.39 Post-compensación de la dispersión de un segundo pulso de 10Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

Como se puede observar, después de la compensación se ha reducido muy poco la dispersión del pulso y su amplitud ha crecido en un 5%. De esta manera el pulso compensado se asemeja más al original, aunque el resultado es menos satisfactorio que el obtenido para el primer pulso.

La figura 3.40 muestra la compensación para una secuencia de bits “0101101”. En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la derecha se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (azul). Se puede observar como el desplazamiento temporal de los pulsos ha sido corregido y se ha reducido la atenuación.

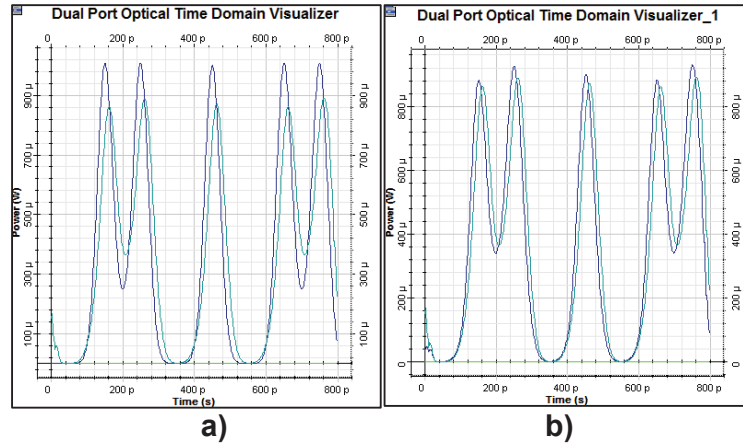


Figura 3.40 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 10Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

En conclusión, esta técnica de post-compensación posee muy buenos resultados al trabajar bajo las condiciones establecidas para este escenario.

3.3.2.2 Post-compensador de una etapa: $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 40\text{ Gbps}$; $\phi_{\text{PMD}} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.2.

El DGD teórico es igual a:

$$\Delta\tau = 13,41\text{ ps}$$

Este valor será configurado para el segmento de fibra Hi-Bi PM correspondiente al componente *Optical Fiber 1*.

Los resultados obtenidos en la simulación de este escenario son los siguientes:

La figura 3.41 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación. Como se puede apreciar, el pulso ha sufrido un gran nivel de dispersión (mayor al 30%) y atenuación (50%) a causa de la PMD. Además, ha perdido parte de la forma de su envolvente original.

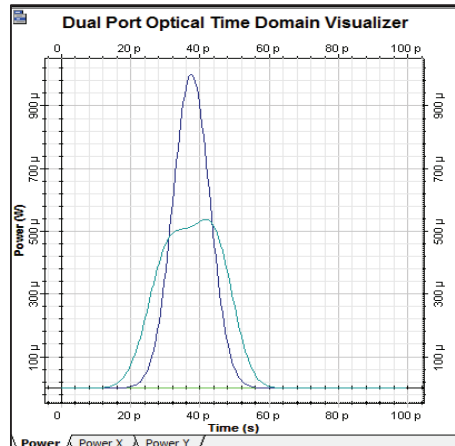


Figura 3.41 Dispersión del pulso de 40Gbps antes de la post-compensación.

La figura 3.42 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso de salida antes de la compensación (celeste). Como se puede apreciar, el pulso ha retomado en gran parte su forma original. Además, el valor de dispersión se ha reducido casi en la mitad y su amplitud ahora es de alrededor del 70% con respecto al pulso original.

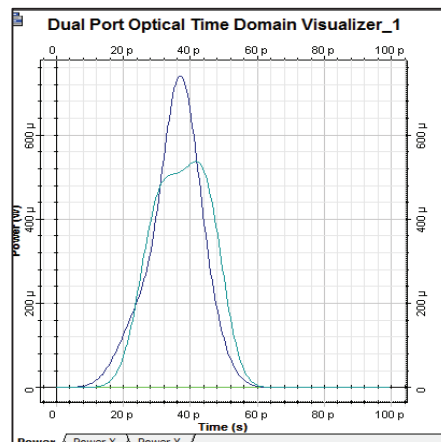


Figura 3.42 Compensación de la dispersión del pulso de 40Gbps.

La figura 3.43 permite observar cómo la componente en y del pulso antes de la compensación (derecha) se ha adelantado alrededor de 10 ps a la componente en x (izquierda).

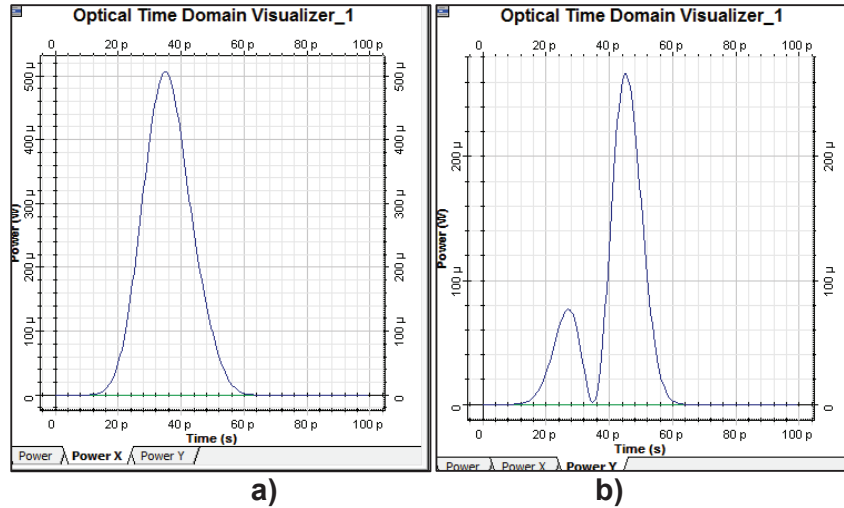


Figura 3.43 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps antes de la post-compensación:
a) pulso en (x), **b)** pulso en (y)

La figura 3.44 permite apreciar cómo la componente en y del pulso compensado (derecha), se ha colocado casi al mismo nivel que la componente en x (izquierda) después de la compensación.

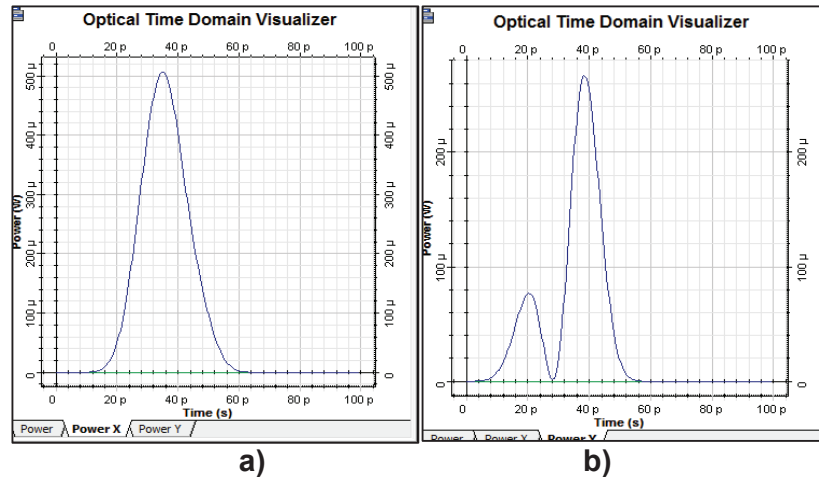


Figura 3.44 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps post-compensado: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y)

Como se puede observar, esta técnica de compensación ha mostrado resultados bastante satisfactorios para este ejemplo.

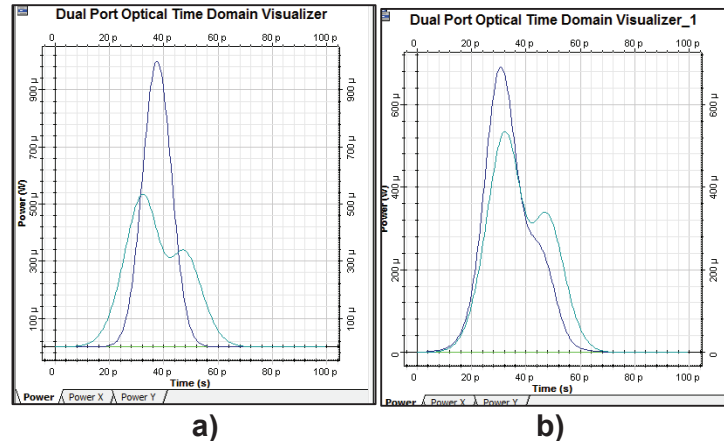


Figura 3.45 Post-Compensación de un segundo pulso de 40Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación

La figura 3.45 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. La figura de la izquierda compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul).

Para este caso se tiene que, después de la compensación se ha reducido la dispersión del pulso (del 50% al 40%) y su amplitud ha crecido (del 55% al 70%) con respecto al pulso original. De esta manera el pulso compensado ha mejorado sus condiciones de amplitud y dispersión. Sin embargo, no posee un nivel de compensación totalmente satisfactorio ya que además, se ha introducido un retardo comparable al 30% del tiempo de bit del pulso.

La figura 3.46 muestra la compensación para una secuencia de bits "0101101". En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la derecha se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (azul). Se puede observar como se han corregido el desplazamiento temporal y la atenuación de los pulsos, de esa forma la secuencia de bits compensada se parece más a la original.

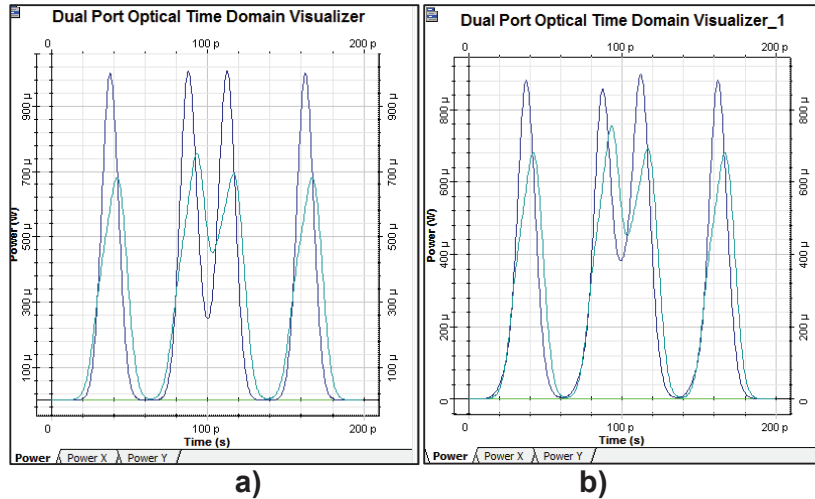


Figura 3.46 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 40Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

En conclusión, esta técnica de post-compensación posee buenos resultados al trabajar bajo las condiciones establecidas para este escenario, en la mayoría de casos. Sin embargo, existe la probabilidad de que la compensación no sea muy efectiva en otros.

3.3.2.3 Post-compensador de una etapa: $L = 1000\text{Km}$; $V_{tx} = 140\text{ Gbps}$; $\phi_{\text{PMD}} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este caso, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.3.

El DGD teórico es igual a:

$$\Delta\tau = 9,48\text{ ps}$$

Este valor será configurado para el segmento de fibra Hi-Bi PM correspondiente al componente *Optical Fiber 1*. Los demás parámetros correspondientes al post-compensador se configuran de manera similar al ejemplo anterior.

Los resultados obtenidos en la simulación de este escenario son los siguientes:

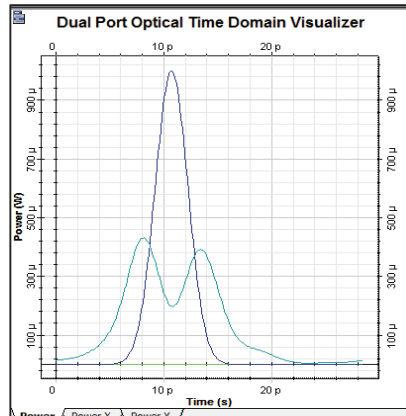


Figura 3.47 Dispersión del pulso de 140 Gbps antes de la post-compensación.

La figura 3.47 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación. Como se puede apreciar, la dispersión del pulso es crítica (comparable con el ancho del pulso) y su atenuación se ha reducido en gran nivel (mayor al 50%). Además, el pulso ha perdido la forma de su envolvente original.

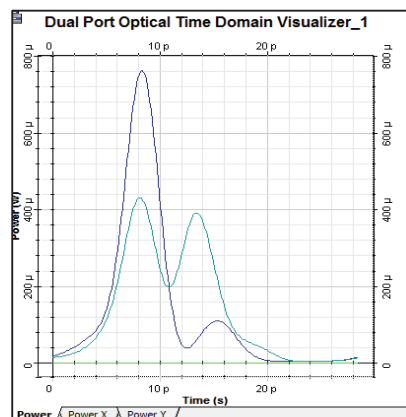


Figura 3.48 Post-compensación de la dispersión del pulso de 140 Gbps.

La figura 3.48 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso de salida antes de la compensación (celeste). Como se puede apreciar, el pulso ha retomado en gran parte su amplitud original (80%). El nivel de dispersión sin embargo, podría causar problemas dada la forma de su envolvente actual. Además, se evidencia un desplazamiento de 3 ps en el pulso compensado.

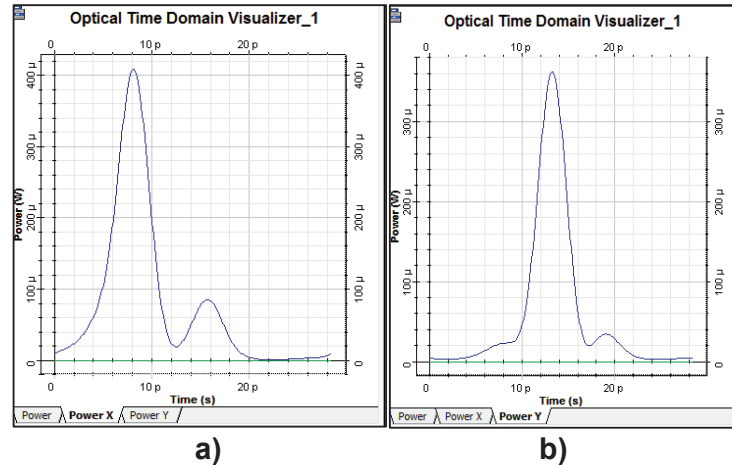


Figura 3.49 Componentes (x, y) del pulso de 140 Gbps antes de la post-compensación: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.49 permite apreciar cómo la componente en y del pulso antes de la compensación (derecha) se ha adelantado alrededor de 5 ps a la componente en x (izquierda).

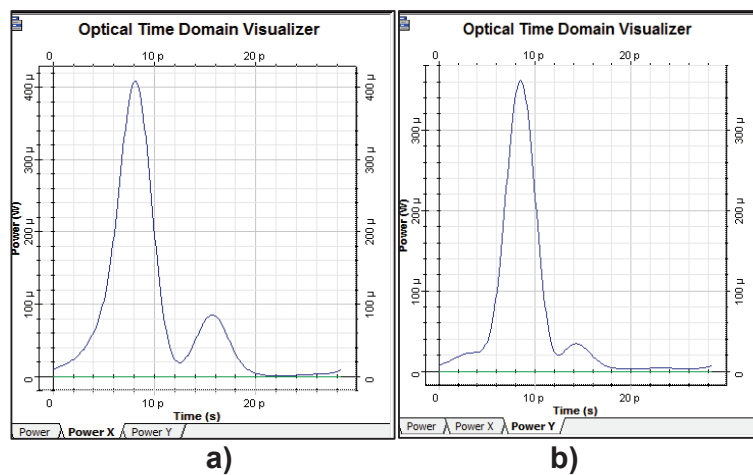


Figura 3.50 Componentes (x, y) del pulso de 140 Gbps post-compensado: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.50 permite observar cómo la componente en y del pulso compensado (derecha), se ha acercado a la componente en x (izquierda), colocándose casi al mismo nivel.

Como se puede observar, esta técnica de post-compensación no ha obtenido resultados muy aceptables en cuanto a la efectividad de compensación para un primer pulso. Sin embargo, es necesario realizar más ejemplos que verifiquen o contradigan estos resultados.

La figura 3.51 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. La figura de la izquierda compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul).

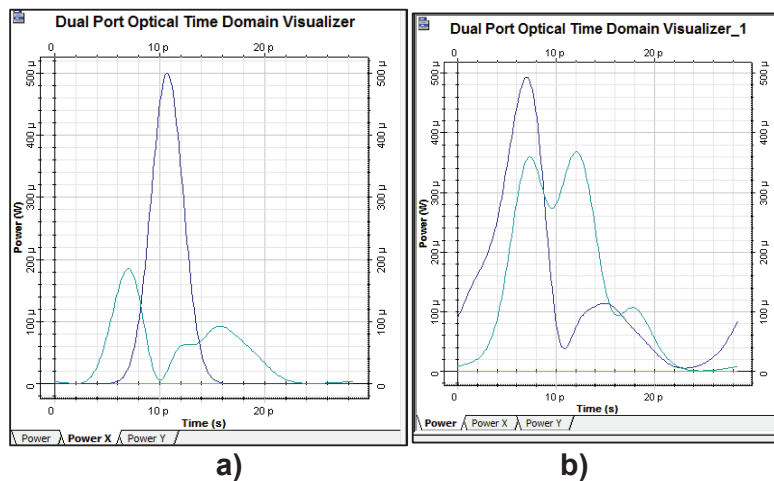


Figura 3.51 Post-compensación de un segundo pulso de 140 Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que si bien se ha realizado una compensación en cuanto a la dispersión y atenuación del pulso de este ejemplo, el nivel de compensación no es el esperado.

En la figura 3.52 se puede apreciar una comparación entre el pulso original (celeste) y el pulso compensado (azul). Claramente se puede observar que la dispersión del pulso compensado sigue siendo crítica.

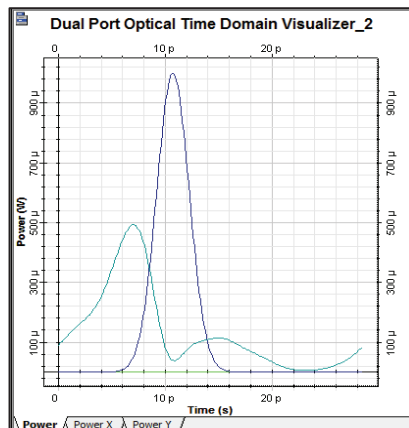


Figura 3.52 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso post-compensado para 140 Gbps.

La figura 3.53 muestra la compensación para una secuencia de bits “0101101”. En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la izquierda se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (celeste). Se puede observar como se trata de corregir la dispersión de los pulsos. Sin embargo, el resultado no es satisfactorio.

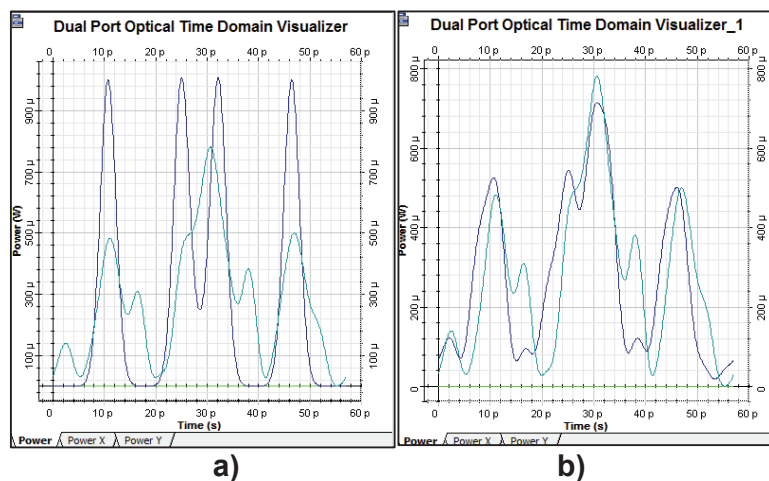


Figura 3.53 Post-compensación de la dispersión de una secuencia de bits de 140Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

En conclusión, para este escenario, la técnica de post-compensación de una etapa no garantiza una buena efectividad de compensación de la PMD.

Análisis de resultados:

De acuerdo a los resultados obtenidos en los tres casos anteriores, se concluye que esta técnica de compensación es efectiva cuando se tiene velocidades del orden de los 10 Gbps, en las que el nivel de dispersión es menor al tiempo de bit del pulso. Sin embargo, mientras más se incrementa la velocidad de transmisión es más difícil realizar la compensación debido a que el DGD del pulso se vuelve comparable al tiempo de bit.

Además, el grado de compensación no siempre será el mismo en ninguno de los casos. Esto es fácil de concluir, ya que como se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo, el DGD inducido varía en forma estadística siguiendo una distribución maxwelliana. Por lo tanto el grado de compensación dependerá del valor de DGD que posea un pulso en particular.

3.3.3 SIMULACIÓN DE UN POST-COMPENSADOR DE DOS ETAPAS

La última técnica de compensación a ser analizada, es la post-compensación de dos etapas, por lo tanto, el post-compensador ahora estará compuesto por dos retardadores temporales fijos.

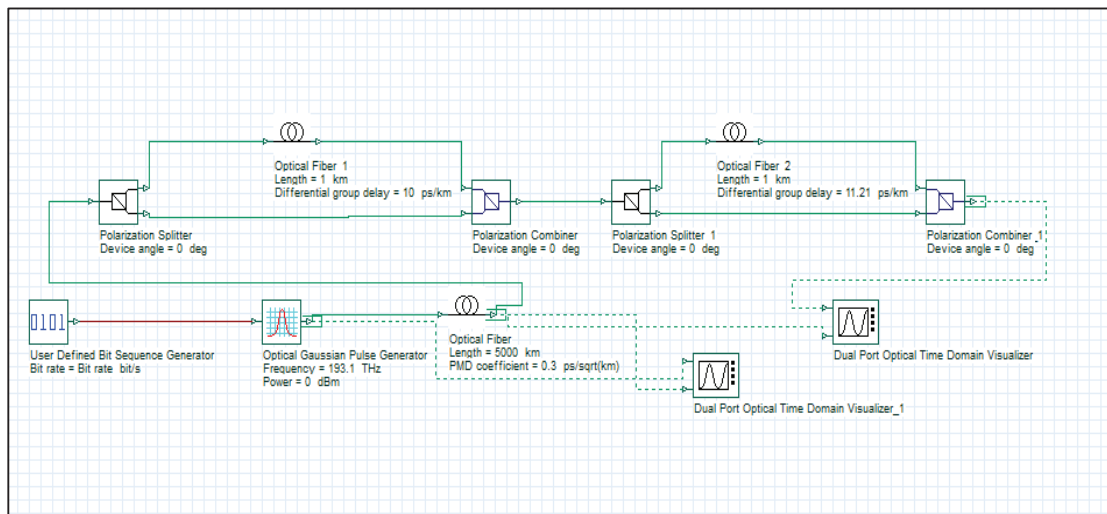


Figura 3.54 Escenario de simulación con post-compensador de dos etapas.

El hecho de usar mayor número de retardadores implica más segmentos birrefringentes y permite una mejor compensación dinámica de la dispersión. Aunque, por el otro lado, se incrementa el grado de complejidad del sistema, siendo más difícil de controlar cada uno de sus componentes.

La figura 3.54 muestra el escenario planteado para esta técnica de compensación. Este escenario no difiere mucho del anterior puesto que solo se ha añadido una etapa más de post-compensación.

Configuración del post-compensador de dos etapas:

La configuración del post-compensador es similar a la de la sección anterior, con el adicional de que ahora se tienen dos segmentos de fibra Hi-Bi PM, cada uno de los cuales introducirá su respectivo retardo temporal. De esta manera, la suma de retardos inducidos por ambos segmentos de fibra mantenedora de polarización deberá ser igual al DGD teórico de acuerdo a la expresión [73]:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \quad (3.1)$$

3.3.3.1 Post-compensador de dos etapas: L = 5000Km ; Vtx= 10 Gbps ; $\phi_{\text{PMD}} = 0,3$ ps/km^{1/2}

En este primer ejemplo, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.1.

El DGD teórico inducido por la PMD de la fibra es:

$$\Delta\tau = 21,21 \text{ ps}$$

De acuerdo a la ecuación (3.1), se han escogido los siguientes valores para los retardos inducidos por cada sección de fibra mantenedora de la polarización:

$$\Delta\tau_1 = 10 \text{ ps}$$

$$\Delta\tau_2 = 11,21 \text{ ps}$$

Cabe recalcar que estos valores fueron escogidos de manera que cada etapa realice un trabajo similar de compensación, con la única condición de que la suma de retardos temporales inducidos por los dos segmentos de fibra mantenedora de polarización debe ser igual al DGD calculado (ver sección 1.2.11.1).

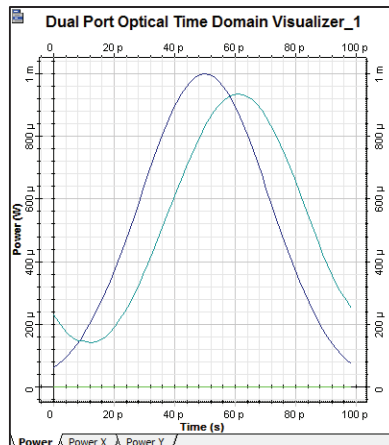


Figura 3.55 Dispersión del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas.

La figura 3.55 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación. Como se puede apreciar, el pulso ha sufrido una pequeña dispersión y se ha desplazado un valor de aproximadamente 10 ps respecto al pulso original correspondiente al 10% del tiempo de bit.

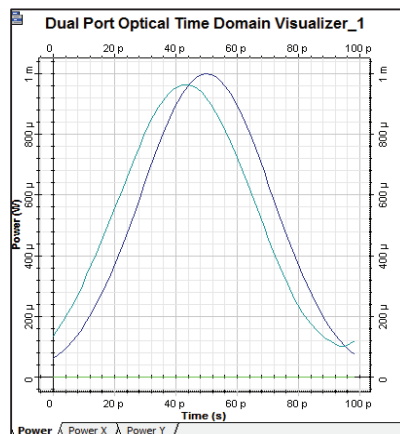


Figura 3.56 Post-compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 10 Gbps.

La figura 3.56 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso de salida antes de la compensación (celeste). Como se puede apreciar, el pulso ha retomado su forma original. Además se observa que el desplazamiento de 10 ps se ha compensado totalmente.

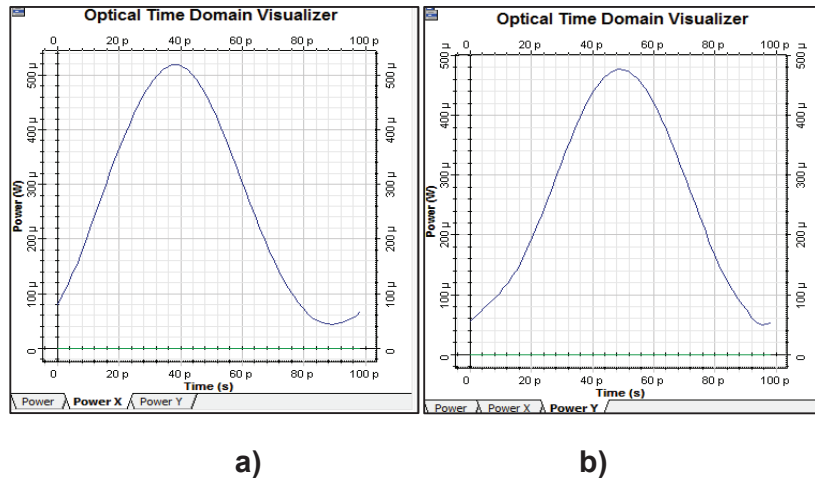


Figura 3.57 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.57 permite apreciar cómo la componente en y del pulso antes de la compensación (derecha) se ha adelantado alrededor de 10 ps a la componente en x (izquierda).

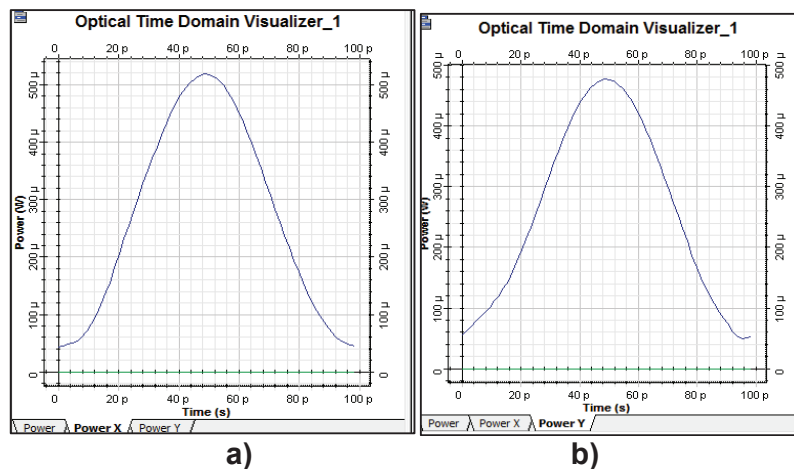


Figura 3.58 Componentes (x, y) del pulso de 10 Gbps compensado en dos etapas: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.58 permite apreciar cómo la componente en x del pulso compensado (izquierda), se ha adelantado, hasta quedar al mismo nivel que la componente en y (derecha).

El adelantamiento de la componente en x se debe al cambio de posición de los segmentos de fibra compensadora respecto a la posición que tenía en el escenario anterior. Cabe recalcar que esto no afecta al nivel de compensación obtenido ni a la dispersión del pulso.

Como se puede observar, los resultados de esta post-compensación de dos etapas han sido bastante satisfactorios.

La figura 3.59 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. En la figura de la izquierda se compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul).

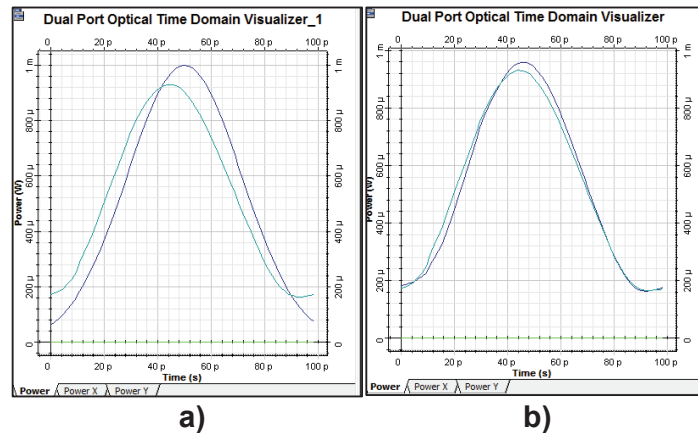


Figura 3.59 Compensación de dos etapas de dispersión para un segundo pulso de 10 Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

Como se puede observar, la compensación no ha sido muy efectiva en este caso. El pulso previo a la compensación se ha desplazado alrededor de 8 ps y tiene una atenuación del 10%. El pulso compensado posee características similares en amplitud y dispersión con respecto al pulso antes de la compensación.

La figura 3.60 muestra la compensación de dos etapas para una secuencia de bits "0101101". En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la izquierda se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (azul). Aunque la dispersión sufrida por los pulsos no es muy grande, se puede observar como se han corregido el desplazamiento temporal y la atenuación.

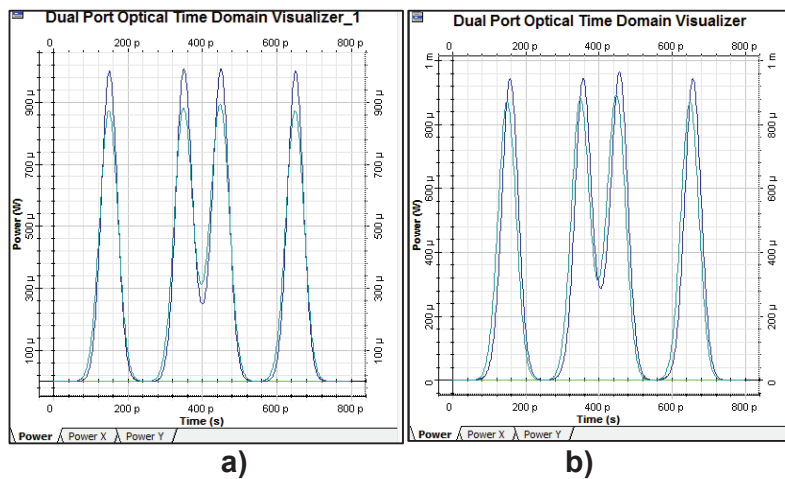


Figura 3.60 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 10Gbps:
a) antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

Del análisis anterior, se puede concluir que aunque esta técnica de post-compensación de dos etapas no fue muy efectiva en el segundo ejemplo (los niveles de dispersión y atenuación entre el pulso sin compensación y el ya compensado son similares), en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados bastante satisfactorios en cuanto a la efectividad de compensación de la PMD.

3.3.3.2 Post-compensador de dos etapas: $L = 2000\text{Km}$; $V_{tx} = 40\text{ Gbps}$; $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este ejemplo, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.2.

El DGD teórico inducido por la PMD de la fibra es:

$$\Delta\tau = 13,41 \text{ ps}$$

Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (3.1), los valores escogidos para los retardos temporales fueron:

$$\Delta\tau_1 = 6 \text{ ps}$$

$$\Delta\tau_2 = 7,41 \text{ ps}$$

De igual manera que en el ejemplo anterior, estos valores fueron escogidos de manera que cada etapa realice un trabajo de compensación similar.

La figura 3.61 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación.

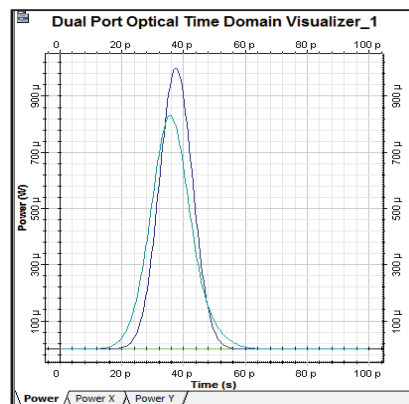


Figura 3.61 Dispersión del pulso de 40 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas.

Como se puede apreciar, el pulso ha sufrido valores de dispersión y atenuación de aproximadamente el 10% y 20% respectivamente.

La figura 3.62 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso de salida antes de la compensación (celeste). Se puede apreciar que el pulso compensado ha mejorado sus niveles de dispersión y atenuación respecto al anterior.

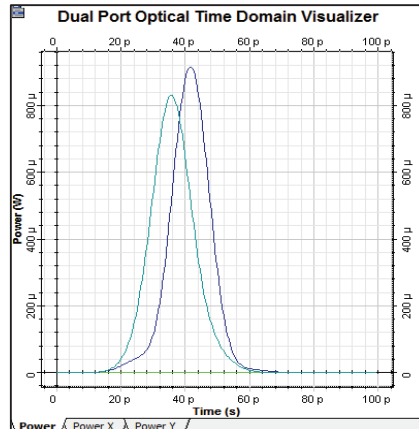


Figura 3.62 Post-Compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 40Gbps.

La figura 3.63 permite apreciar cómo la componente en y del pulso antes de la compensación (derecha) se ha adelantado alrededor de 8 ps a la componente en x (izquierda).

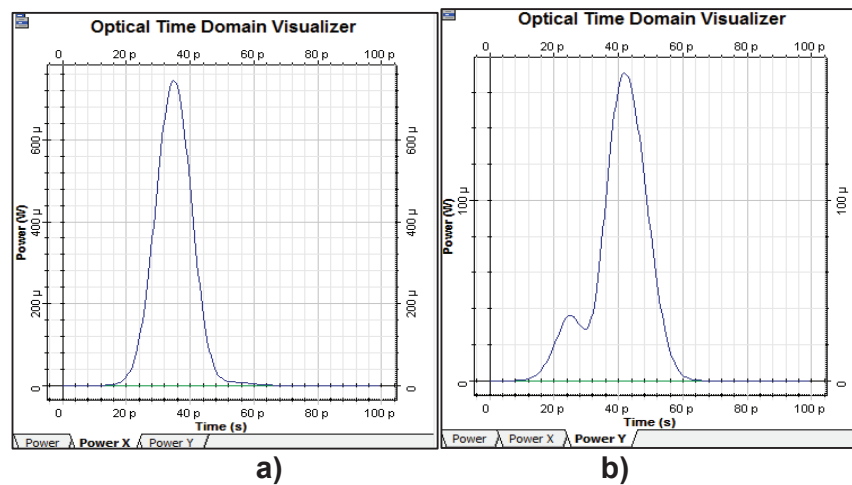


Figura 3.63 Componentes (x, y) del pulso de 40 Gbps antes de la post-compensación de dos etapas: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

La figura 3.64 permite apreciar cómo la componente en x del pulso compensado (izquierda), se ha adelantado, hasta estar al mismo nivel que la componente en y (derecha).

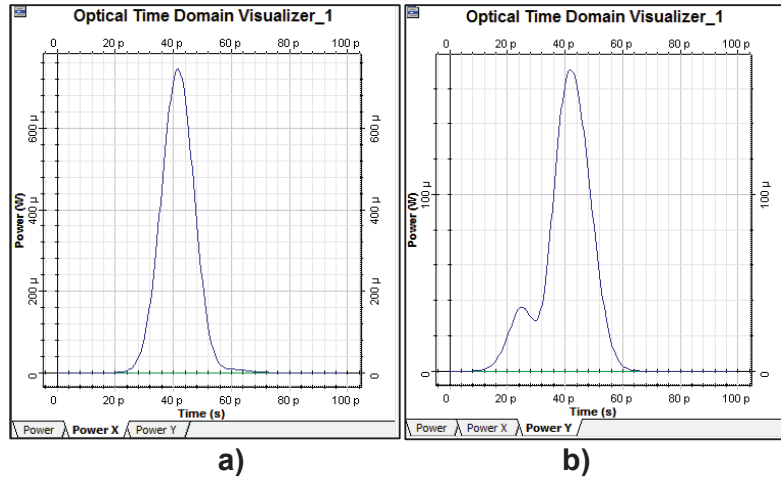


Figura 3.64 Componentes (x, y) del pulso de 40Gbps compensado en dos etapas: **a)** pulso en (x), **b)** pulso en (y).

Como se puede apreciar en la figura 3.65, que compara el pulso original y el ya compensado, el pulso compensado (celeste) se ha desplazado alrededor de 5 ps respecto al original, valor que corresponde al 20% del tiempo de bit del pulso, además su atenuación es de aproximadamente el 10%. Por lo tanto se concluye que el nivel de compensación para este caso ha sido un poco satisfactorio, ya que el pulso compensado no se asemeja del todo al original.

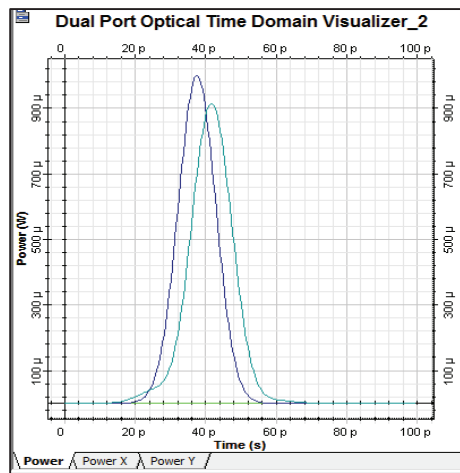


Figura 3.65 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso compensado en dos etapas para 40Gbps.

La figura 3.66 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. En la figura de la izquierda se compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul).

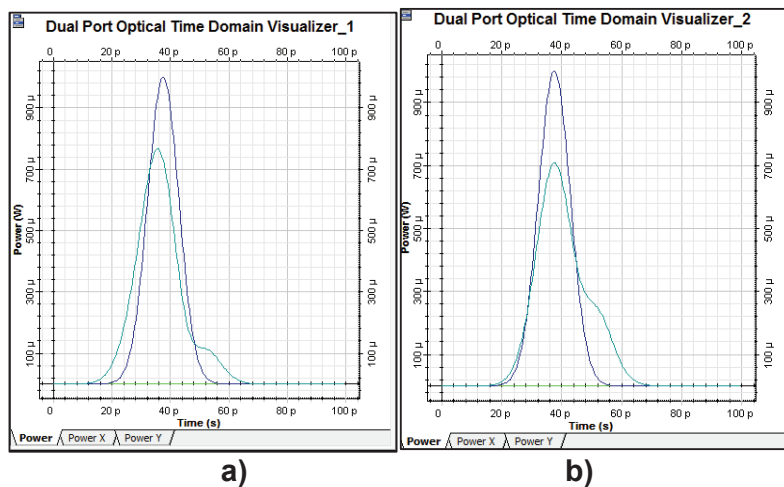


Figura 3.66 Compensación de dos etapas para un segundo pulso de 40Gbps: **a)** antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

Aquí se observa que para el pulso previo a la compensación, el nivel de dispersión es del 20% y la atenuación es superior al 20%, además se evidencia una pérdida en la forma de su envolvente original. Sin embargo, el pulso ya compensado ha recuperado la forma de la envolvente original y los niveles de dispersión y atenuación se asemejan a los del pulso original. Por lo tanto se observa claramente que el nivel de compensación es superior al del primer pulso.

La figura 3.67 muestra la compensación de dos etapas para una secuencia de bits "0101101". En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la derecha se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (celeste). Aquí se puede ver claramente la efectividad de la compensación.

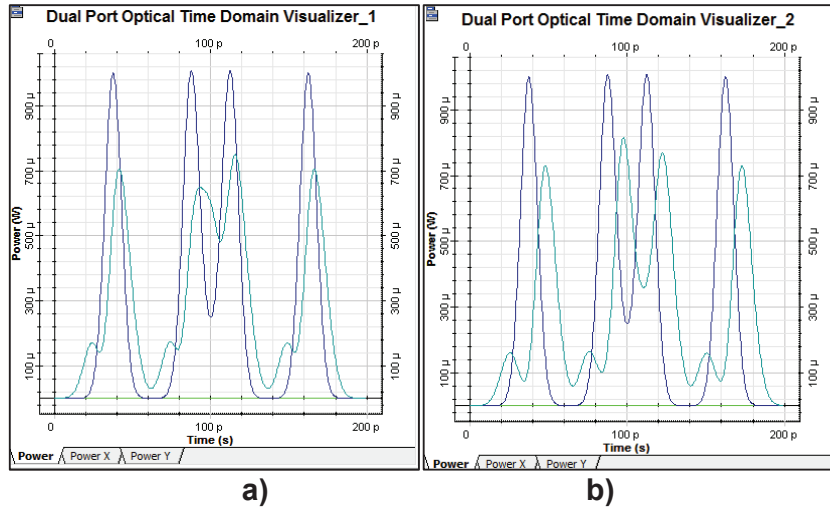


Figura 3.67 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 40Gbps:
a) antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

En conclusión, la técnica de post-compensación de dos etapas ha obtenido buenos resultados en algunas simulaciones. Sin embargo, existen casos en que su efectividad de compensación no es la adecuada, debido a la naturaleza estadística de la PMD. Por lo tanto no es una técnica totalmente confiable para este escenario.

3.3.3.3 Post-compensador de dos etapas: $L = 1000\text{Km}$; $V_{tx} = 140\text{ Gbps}$; $\phi_{PMD} = 0,3\text{ ps/km}^{1/2}$

En este ejemplo, se realizará la compensación de PMD para un escenario con las mismas condiciones que el de la sección 3.2.3.

El DGD teórico inducido por la PMD de la fibra es:

$$\Delta\tau = 9,48\text{ ps}$$

Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (3.1), los valores escogidos para los retardos temporales fueron:

$$\Delta\tau_1 = 4\text{ ps};$$

$$\Delta\tau_2 = 5,48 \text{ ps}$$

De igual manera que en el ejemplo anterior, estos valores fueron escogidos de manera que cada etapa realice un trabajo de compensación similar.

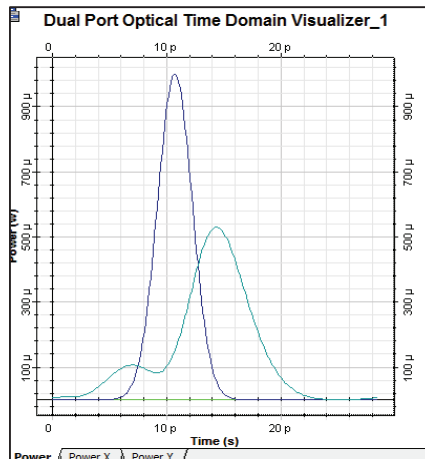


Figura 3.68 Dispersión del pulso de 140Gbps antes de la compensación de dos etapas.

La figura 3.68 muestra la comparación entre el pulso de entrada (azul) y el pulso de salida (celeste) antes de la compensación. Como se puede apreciar, el pulso ha sufrido valores de dispersión y atenuación críticos. Además, se ha perdido la forma de la envolvente original.

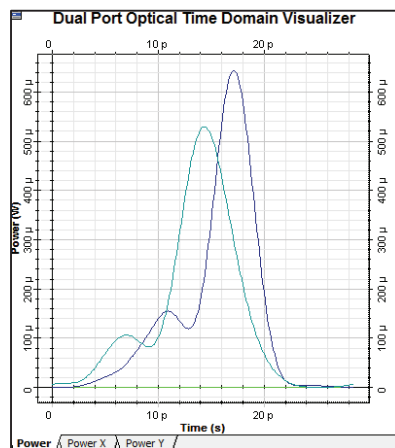


Figura 3.69 Post-compensación de dos etapas de la dispersión del pulso de 140 Gbps.

La figura 3.69 muestra la comparación entre el pulso compensado (azul) y el pulso de salida antes de la compensación (celeste). Si bien el pulso se ha compensado en cierto grado, el nivel de dispersión todavía es alto.

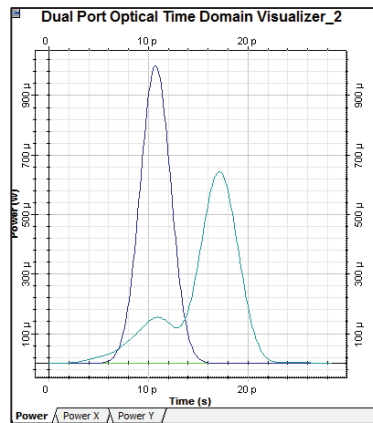
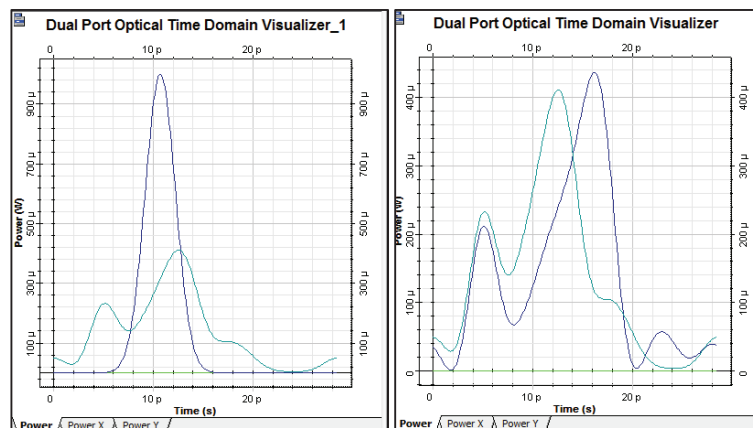


Figura 3.70 Comparación entre el pulso de entrada y el pulso compensado en dos etapas para 140Gbps.

La figura 3.70 muestra la comparación entre el pulso original (azul) y el compensado (celeste). Como ya se mencionó antes, el nivel de dispersión del pulso se mantiene en valores críticos, incluso se puede apreciar que el pulso compensado se ha desplazado bastante respecto al pulso original.



a)

b)

Figura 3.71 Post-compensación de dos etapas para un segundo pulso de 140 Gbps:

a) antes de la compensación, b) después de la compensación

La figura 3.71 muestra los resultados obtenidos para otro pulso simulado bajo las mismas condiciones de este escenario. En la figura de la izquierda se compara el pulso de entrada (azul) con el de salida antes de la compensación (celeste), mientras que la figura de la derecha compara el pulso antes de la compensación (celeste) con el pulso ya compensado (azul). Aquí se observa claramente que el proceso de compensación no ha influido en mucho y la dispersión después de la compensación sigue siendo crítica.

La figura 3.72 muestra la compensación de dos etapas para una secuencia de bits "0101101". En la imagen de la derecha se compara la secuencia de entrada (azul) con la secuencia de salida antes de la compensación (celeste). En la imagen de la derecha se compara la secuencia ya compensada (azul) con la secuencia antes de la compensación (celeste). Aquí se puede ver como la compensación no es efectiva debido al gran nivel de dispersión.

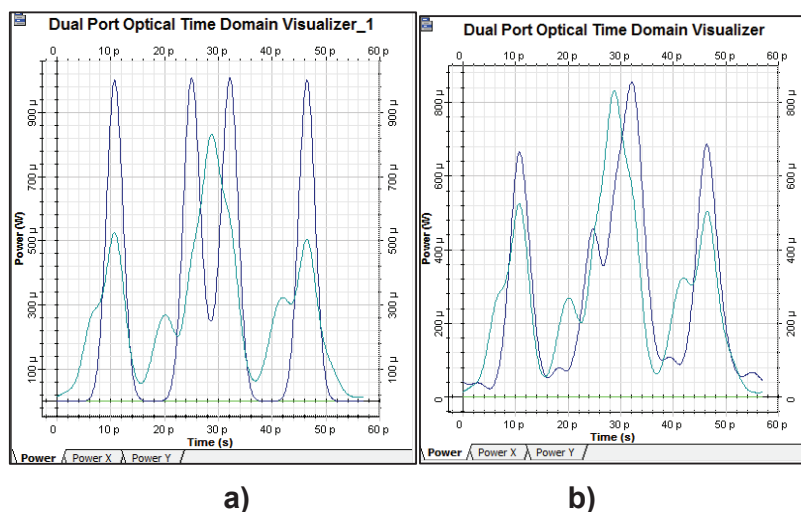


Figura 3.72 Post-compensación de dos etapas de una secuencia de bits de 140Gbps:

a) antes de la compensación, **b)** después de la compensación.

En conclusión, la técnica de post-compensación de dos etapas no es efectiva bajo las condiciones de este escenario, debido a la gran distorsión del pulso. Es por ello que para niveles elevados de dispersión, se usan compensadores basados en algoritmos definidos por software y procesamiento digital de señales.

Análisis de resultados:

De igual manera que para el post-compensador de una etapa, se puede concluir que la efectividad de compensación no será la misma en todos los casos, debido a la naturaleza estadística del DGD. Además, se añade que mientras más alta sea la velocidad de transmisión y el grado de dispersión del pulso, más difícil será la compensación, ya que el DGD se aproxima al tiempo de bit.

Si se comparan los resultados del post-compensador de dos etapas con el de una sola, se pueden apreciar que ambos son similares y funcionan bien en bajas velocidades de transmisión. Sin embargo, a mayores velocidades, el compensador de dos etapas es menos efectivo ya que, mientras más componentes tenga el sistema, más difícil es controlarlos a todos.

3.3.4 ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE COMPENSACIÓN PMD

El análisis de los tres métodos de compensación de PMD simulados anteriormente, permite concluir lo siguiente.

El método del pre-compensador resultó totalmente inefectivo cuando se tienen enlaces que cubren grandes distancias, pues el número de intercambios de energía debido al acoplamiento aleatorio de modos es bastante elevado.

Una posible solución para el problema anterior es dividir la fibra en varios tramos y colocar un pre-compensador a la entrada de cada uno de ellos, como se muestra en la figura 3.73. Sin embargo, debido al alto número de modos acoplados en cada enlace, sería necesario también un alto número de pre-compensadores, lo que implica costos elevados y dificultad en controlar cada uno de estos elementos. Por lo tanto se concluye que la técnica de pre-compensación puede ser útil en enlaces de fibra relativamente cortos (menores a 1 Km), pero no en enlaces que cubren distancias de varios kilómetros.

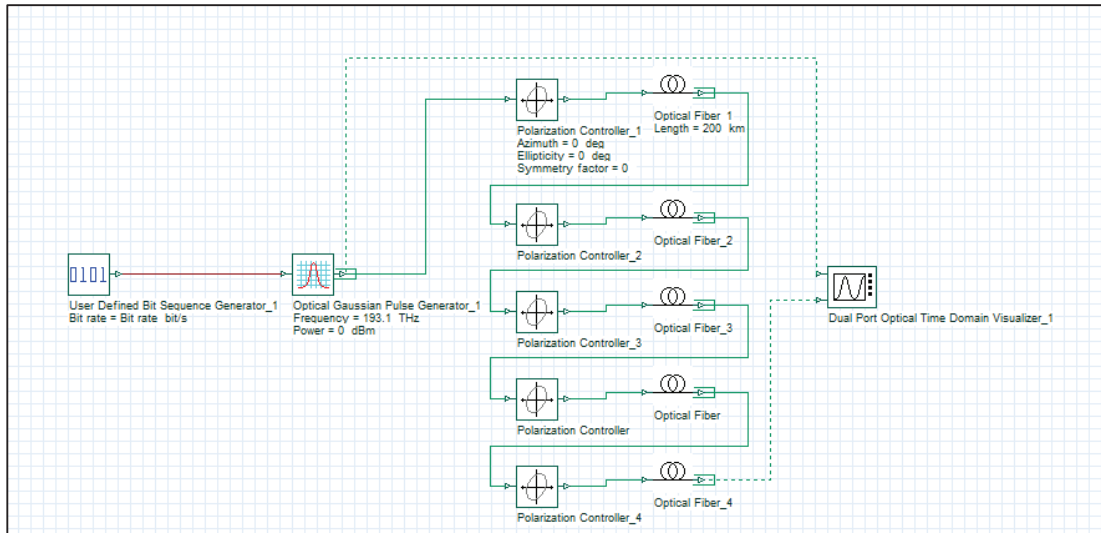


Figura 3.73 Pre-compensador de cinco etapas.

Otra alternativa es el uso de sistemas de post-compensación. Los resultados han demostrado que estos sistemas son mucho más efectivos que la pre-compensación. Sin embargo, la naturaleza estadística de la PMD (y por lo tanto del DGD inducido por la fibra) provocó que el grado de compensación de estos sistemas no siempre sea el mismo, pudiendo existir casos con muy buena compensación y otros con compensación mínima. Además, se ha podido apreciar que a medida que el DGD del pulso se aproxima a su tiempo de bit, la compensación fue mucho más difícil de realizar debido a la degeneración del pulso provocada.

La solución a los problemas de los post-compensadores se basa en el uso de mecanismos dinámicos de compensación. Estos mecanismos incluyen retardadores temporales variables, controlados por algoritmos definidos por software y señales de realimentación. Estas técnicas son las más usadas en los sistemas modernos pues proveen una alta efectividad de compensación de la PMD.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Los tipos de alteraciones de la señal que ocurren en la fibra, descritos en este trabajo, son la dispersión y atenuación. El primero se refiere al ensanchamiento temporal de los pulsos luminosos que atraviesan la fibra. Casos particulares de este fenómeno son la dispersión modal, la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización (PMD). El segundo tiene que ver con los fenómenos de atenuación de la señal. Además existen otros fenómenos de alteración de la señal como el ruido y la interferencia, los cuales no son mencionados en este trabajo.

La dispersión por modo de polarización PMD se origina debido a la birrefringencia de la fibra, una característica propia de los materiales ópticos, que causa que las componentes de polarización de un haz de luz viajen a diferentes velocidades a través de la fibra, llegando en tiempos diferentes al otro extremo y provocando ensanchamiento del pulso, lo que deriva en un aumento de la tasa de bits errados (BER) del sistema.

La dispersión por modo de polarización también se produce a causa del acoplamiento de modos aleatorio ocurrido en la fibra. Este fenómeno se produce en fibras cuya birrefringencia no es constante en toda su longitud y provoca redistribuciones de energía entre los estados de polarización de la señal que se propaga contribuyendo a la dispersión.

La mayoría de fibras ópticas poseen un tipo de birrefringencia estocástica, provocada por diversos factores como tensiones y cambios en la curvatura del núcleo debido a los procesos de fabricación y variaciones en la temperatura del ambiente. Este tipo de birrefringencia causa que el coeficiente PMD de la fibra y el DGD varíen de forma estadística siguiendo una curva de distribución de Maxwell y sus valores tengan proporcionalidad directa con la raíz cuadrada de la longitud de la fibra.

En fibras con birrefringencia constante, la diferencia en los tiempos de llegada de ambos estados de polarización, conocida como Retardo Diferencial de Grupo (DGD), posee una dependencia lineal con longitud de la fibra. Es decir, a mayor longitud, mayor será el DGD y por lo tanto mayor será la dispersión.

Los cálculos de Jones, Stokes y Mueller han sido desarrollados con el objetivo de facilitar el análisis matemático de los fenómenos correspondientes a los cambios de polarización de la luz. Sin embargo, en caso de fibras con acoplamiento de modos, estos cálculos se dificultan debido al carácter aleatorio del acoplamiento.

El uso de fibras monomodo NZDSF permite reducir el efecto de los fenómenos no lineales, especialmente de FWM, un fenómeno que genera la aparición de longitudes de onda parásitas en las fibras de dispersión desplazada nula.

La PMD es un tipo de dispersión que empieza a tener importancia cuando se trabaja con velocidades de transmisión de 10 Gbps o superiores. Sin embargo, en fibras NZDSF de la categoría ITU-T G.655, esta dispersión se vuelve considerable a velocidades del orden de los 40 Gbps o superiores, debido a la magnitud de su coeficiente PMD. A menores velocidades, su efecto es despreciable comparado con el de la dispersión cromática.

Además de dispersión, la PMD causa atenuación en los pulsos de luz debido a la redistribución de energía que experimentan los mismos al momento de ensancharse. Adicional a esto existen casos en los que ocurre un desplazamiento temporal del pulso respecto a su posición original, el cual puede llegar a ser crítico.

En casos de dispersión severa, la forma de la envolvente del pulso sufre un nivel alto de degeneración, dificultando el reconocimiento del mismo en el extremo de recepción. Estos casos se dan cuando el DGD producido es comparable con el tiempo de bit del pulso o superior.

De las simulaciones realizadas se puede concluir que ensanchamientos del pulso menores al 30% son tolerables y no causan gran distorsión de la señal. Valores

superiores al 30% pueden provocar grandes distorsiones y errores en la transmisión.

Para los niveles de potencia usados en este trabajo, que corresponden a valores típicos usados en la práctica, la PMD no ha tenido efecto sobre las componentes de frecuencia de la señal que se propaga. Por lo tanto, la señal vista en el dominio de la frecuencia será la misma a la entrada y salida del segmento de fibra. Sin embargo, a mayor grado de dispersión y diferentes formas de la señal de entrada, podrían aparecer nuevas componentes de frecuencia.

Debido a su naturaleza estadística, el valor del DGD observado en un tiempo determinado puede no ser el mismo en otras mediciones. Un valor medido en una determinada hora del día puede variar en la siguiente.

En las simulaciones desarrolladas se observa que a mayor velocidad de transmisión y mayor longitud de la fibra, mayor será la dispersión. Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de la PMD, pueden existir casos de gran dispersión con velocidades de transmisión y longitudes de fibra relativamente bajas y al contrario, mínima dispersión en escenarios con grandes longitudes de fibra y altas velocidades de transmisión.

Una forma efectiva de prevenir que el nivel de PMD afecte de manera significativa a la transmisión de señales ópticas consiste en asegurar que el DGD teórico del enlace sea menor a la tercera parte del tiempo de bit de la señal, tal y como dice la recomendación ITU-T G.663 para fibras monomodo.

En cuanto a las técnicas de compensación, la pre-compensación de PMD es totalmente inefectiva en enlaces de grandes distancias, ya que el número de pre-compensadores requeridos es sumamente alto, lo que se traduce en un incremento significativo en los costos y la complejidad del sistema.

El uso de técnicas de post-compensación de PMD ópticas pasivas es bastante efectivo cuando el nivel de dispersión, comparado con el tiempo de bit de la señal es relativamente bajo ($DGD \approx 1/2 t_b$). Sin embargo, cuando la dispersión del pulso es comparable con el tiempo de bit, estos métodos se vuelven inefectivos.

El uso de un mayor número de etapas en las técnicas de post-compensación de PMD conlleva un mayor grado de complejidad del sistema, ya que se debe controlar un mayor número de elementos. Sin embargo es más efectivo en la compensación de PMD de órdenes superiores.

El software OptiSystem ha demostrado ser una herramienta muy útil para el estudio del fenómeno de PMD. Las únicas limitaciones encontradas están relacionadas con los componentes electrónicos de las librerías, pues OptiSystem es un simulador de redes y enlaces ópticos. Pese a lo anterior, se obtuvo un análisis bastante satisfactorio del fenómeno estudiado.

4.2 RECOMENDACIONES

El trabajo realizado puede usarse como base para futuros estudios y proyectos de titulación relacionados con el análisis, medición y compensación de PMD, en escenarios con diferentes características. Un tema que aun no ha sido muy analizado corresponde a la PMD de órdenes superiores.

Debido al rápido desarrollo de los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica, las velocidades de transmisión son cada vez más altas, por lo que se recomienda profundizar en el estudio y desarrollo de las técnicas y algoritmos de compensación dinámica de la PMD, ya que estas son las que mejor desempeño han demostrado en los enlaces de gran capacidad.

El uso del software OptiSystem requiere de un previo conocimiento en el campo de las comunicaciones ópticas para poder comprender de mejor manera las funcionalidades y características de cada componente. Además se requiere entrenamiento en el diseño y manejo de diagramas de bloques en entornos de simulación.

Se recomienda el desarrollo de proyectos que implementen la integración de OptiSystem con Matlab o Simulink. De este modo se podrán diseñar componentes

que posean características adicionales a los de las librerías, expandiendo el alcance y las posibles aplicaciones del simulador.

En entornos reales, se recomienda realizar regularmente una medición del coeficiente PMD de los enlaces de fibra, ya que este valor puede aumentar debido al deterioro de la fibra óptica, ocasionando errores en la transmisión de información.

La fibra óptica es el presente y futuro de los sistemas de comunicaciones. Razón por la cual se recomienda seguir realizando proyectos de investigación en este campo, integrando los diferentes fenómenos de dispersión, atenuación, no linealidades y demás, con el objetivo de potenciar las comunicaciones a través de enlaces de fibra óptica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. L. López Reyes and D. Muñoz Rodríguez, *Informe Técnico Comunicaciones Ópticas en la Red de Abonado*. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, 1984.
- [2] J. A. Martín Pereda, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, Primera ed., Isabel Capella, Ed. Madrid, España: Pearson Educación, S. A., 2004.
- [3] Y. Rodríguez. (2006) Fibra Optica. [Online]. <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>
- [4] H. Zanger and C. Zanger, *Fiber Optics Communication and Other Applications*, David Garza, Ed. New York, USA: Macmillan Publishing Company, 1991.
- [5] E-Ducativa. Reflexión de la luz. [Online]. http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/3_reflexin_de_la_luz.html
- [6] A. M. Benavides Cruz. Temas Selectos de Física: Ley de Snell. [Online]. <https://hellsingge.files.wordpress.com/2013/05/1-indice-de-refraccion.pdf>
- [7] E. Vancek, *Sistemas de comunicaciones a través de fibras ópticas*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- [8] R. Nave and M. Olmo. (2010) Refracción de la Luz. [Online]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/geoopt/refr.html>
- [9] Ingenia-T. (2012, Agosto) Fibra Monomodo de Dispersión Desplazada. [Online]. <http://lafibraoptica-peru.com/fibra-monomodo-de-dispersion-desplazada/>
- [10] M. S. Jiménez, *Comunicaciones Ópticas*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, n.d.
- [11] K. Fontes. (2012, Abril) Fibra Optica. [Online]. <http://kavenfontes.blogspot.com/2012/04/fibra-optica.html>
- [12] E. Sanchis and Juan B Ejea, "Propagación de la luz en guías de onda," Universitat de Valencia, Valencia, Noviembre 2008.
- [13] A. G. García, "Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase

en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s," Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., León Guanajuato, Disertación de maestría 2007.

- [14] G. P. Agrawal. (2006) Optical Communication Systems (OPT428). [Online]. <http://www.optics.rochester.edu/users/gpa/opt428b.pdf>
- [15] (2012, Junio) Fibra óptica: Multimodo vs. monomodo. [Online]. <http://cactuspinchudo.tumblr.com/post/25958320332/fibra-%C3%B3ptica-multimodo-vs-monomodo>
- [16] V. A. Ortega. (Mayo, 2010) Tipos de Fibra Óptica. [Online]. http://conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com/2010_05_01_archive.html
- [17] N. Solorio. (2012, Abril) Tipos de fibra óptica. [Online]. <http://anynaomii.blogspot.com/>
- [18] H. C. Sagredo Tejerina, "Bases Para Un Tendido De Fibra Óptica," Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija,.
- [19] CIFP Tartanga. (2014) Fundamentos de las Fibras Ópticas. [Online]. <http://fibraoptica.blog.tartanga.eus/fundamentos-de-las-fibras-opticas/>
- [20] Departamento de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica, "Elementos y Equipos Eléctricos," Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba,.
- [21] B. Rubio Martínez, *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*. Wilmington, USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1994.
- [22] G. Nazareno. P17F: Certificación en fibra Nivel 2. [Online]. <http://www.gonzalonazareno.org/certired/p17f/p17f.html>
- [23] UNEX. Atenuación en una fibra óptica. [Online]. <http://grupoorion.unex.es:8001/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1JMCW1HT7-2CF4LW7-1KBD&partName=actualhtmltext>
- [24] Ingenia-T. (2012, Febrero) La dispersion Óptica. [Online]. <http://lafibraoptica peru.com/la-dispersion-optica/>
- [25] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics*, Tercera ed. New Jersey, USA:

Prentice-Hall, Inc., 1999.

- [26] M. Córdoba, "Procesos de fabricación de fibras ópticas," UNIVERSIDAD DE BELGRANO, Belgrano, Tesina 34, 2003.
- [27] Aldo Martin. Conocimientos previos: Teoría de la luz y transmisión de datos por fibras ópticas. [Online]. <http://perso.wanadoo.es/aldomartin1/caracteristicas.htm>
- [28] P. Hidalgo, Comunicación Digital. Quito, Ecuador, Febrero 2011.
- [29] M. Abdelnaby. (2012, Julio) Dispersion. [Online]. <http://fobasics.blogspot.com/2012/07/dispersion.html>
- [30] R. Arieli. El Significado de "Un Color". [Online]. <http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-1/F1s2t1p2.htm>
- [31] R. Pour Grébol, "Análisis del espectro óptico en las comunicaciones por fibra óptica," *Esp Electronica*, pp. 54-58, Junio 2005.
- [32] GCO. Tutorial de Comunicaciones Ópticas. [Online]. <http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/aplicaciones.htm>
- [33] M. C. España Boquera, *COMUNICACIONES ÓPTICAS Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*, Primera ed. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S. A., 2005.
- [34] International Telecommunications Union, "Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula," G.655, 2009.
- [35] International Telecommunications Union, "Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión d esplazada no nula," G.655, 2003.
- [36] A. Rodríguez Barrios, "Realización de Patrones de Dispersión del Modo por Polarización (PMD)," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Madrid, Proyecto de fin de carrera 2007.
- [37] McGraw-Hill Education. (2015) Características de las Fibras Ópticas. [Online]. https://www.mhe.es/cf/ciclos_informatica/844819974X/archivos/unidad2_recurso2.pdf
- [38] J. Tur and M. R. Martínez, *Todo Sobre las Fibras Ópticas*. Barcelona, España: Marcombo, S. A., 1989.

- [39] Photonics. Polarization Mode Dispersion: Concepts and Measurement. [Online]. <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25153>
- [40] A. Leiva, M. Tarifeño, and R. Olivares, "Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en la Propagación de Pulsos a Través de Fibras Ópticas," *Revista chilena de ingeniería*, vol. 15, no. 3, pp. 336-343, Octubre 2007.
- [41] Ingenia-T. (2012, Septiembre) Dispersion de modo de polarizacion – PMD. [Online]. <http://lafibraoptica Peru.com/las-fibras-opticas-dispersion-del-modo-de-polarizacion/>
- [42] M. Vendrell, *Óptica Cristalina*, Segunda ed. Boston, USA: Free Software Foundation, Inc, 2002.
- [43] Grupo de Innovación Docente en Óptica Física y Fotónica Universitat de Barcelona. (2003) JOptics Curso de Óptica. [Online]. <http://www.ub.edu/javaoptics/grup/creditsEs.html>
- [44] R. Martínez Sosa. (2012, Abril) Ondas: Polarizacion. [Online]. https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Ondas:_Polarizacion
- [45] Wikipedia. (2016, Diciembre) Polarización electromagnética. [Online]. https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica
- [46] J. J. Gil Pérez, "Determinación de parámetros de polarización en representación matricial: contribución teórica y realización de un dispositivo automático," UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, Zaragoza, Tesis doctoral ISSN 2254-7606, 1983.
- [47] M. Olmo and R. Nave. (2010) Clasificación de la Polarización. [Online]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>
- [48] Wikipedia. (2017, Enero) Polarización circular. [Online]. https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_circular
- [49] Facultad de Ingeniería Universidad de la República de Uruguay. Polarización. [Online]. https://www.fing.edu.uy/if/cursos/optica/apuntes_files/Polarizacion.pdf
- [50] Grupo de Innovación Docente en Óptica Física y Fotónica Universitat de Barcelona. (2003) JOptics Curso de Óptica. [Online].

<http://www.ub.edu/javaoptics/teoria/castella/node8.html>

- [51] J. Casas, *Optica*. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza, 1980.
- [52] Wikipedia. (2016, Marzo) Cálculo de Jones. [Online].
https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1lculo_de_Jones
- [53] Wikipedia. (2016, Noviembre) Parámetros de Stokes. [Online].
https://es.wikipedia.org/wiki/Par%C3%A1metros_de_Stokes
- [54] H. E. SAUCEDA FELIX, "Manejo e Interpretación Polarimétrica de las Matrices de Mueller," Julio, Sinaloa, Tesis de Licenciatura 2008.
- [55] D. F. Alzate and A. Cárdenas, "Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica," *Revista en telecomunicaciones e informática*, vol. 1, no. 2, pp. 23-60, Julio 2011.
- [56] L. Rojas, J. Matheus and J. Marín , "Estudio del Fenómeno de Dispersión por el Modo de Polarización de Onda (PMD) en Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica," Universidad de Zulia, Zulia, 2004.
- [57] H, Zamora Farias, "Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en Redes Troncales de Fibra Optica," Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile,.
- [58] A, Sheetal and H, Singh, "Impact of PMD induced penalties on 40 Gb/s duobinary optical communication," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 123, no. 17, pp. 1520– 1524, Enero 2012.
- [59] International Telecommunications Union ITU-T, Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable, Agosto 2015.
- [60] J. P. Elbers, C. Glingener, M. Düser, and E. Voges, "Modelling of polarisation mode dispersion in singlemode fibres," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 22, Octubre 1991.
- [61] Optiwave. PMD-Induced Broadening of Ultra-Short Pulses. [Online].
<https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-pmd-induced-broadening-of-ultra-short-pulses/>
- [62] International Telecommunications Union, "Characteristics of a dispersion-

shifted, single-mode optical fibre and cable," G.653, 2010.

- [63] K. Ondrej. (2010, Abril) Modern telecommunication optical fibers.
- [64] J. Vobian, G. Herchenroder, and K. Mori, "Dispersion-compensating fibers with high birefringence," in *Technical Digest Symposium on Optical Fiber Measurements*, Boulder Colorado, 1996, pp. 93-96.
- [65] J. L. Arce et al., "Determinación de Longitud de Batido Birrefringente de la Fibra Óptica en un Sensor de Presión," in *XI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, vol. 2, Madrid, Septiembre 1996, pp. 149-152.
- [66] Wikipedia, the free encyclopedia. (2017, Enero) Waveplate. [Online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Waveplate>
- [67] D. Tentori, C. Ayala Díaz, and F. Treviño Martínez, "Evaluación de la Birrefringencia de una Fibra Óptica Monomodo Usando el Método de Barrido Espectral, Estudio Comparativo de Dos Metodologías," in *Simposio de Metrología 2008*, Santiago de Querétaro, 2008.
- [68] P. A. Williams and T. Dennis, "Full PMD Vector Measured Directly from Modulated Data Using Linear Optical Sampling," in *Summer Topical Meeting*, Boulder, Colorado, 2009.
- [69] I. T. Lima Jr et al., "Comparison of Polarization Mode Dispersion Emulators," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 12, pp. 1872-1881, Diciembre 2001.
- [70] T. Koch, *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, Ilustrada ed., Ivan Kaminow and Thomas Koch, Eds. Londres, Inglaterra: Academic Press, 2006.
- [71] P. K. Kondamuri, D. L. Harris, R. Huang, J. Pan, and C. Allen, "First- and Second-Order PMD Statistical Properties of Constantly Spun Randomly Birefringent Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 953-1215, Diciembre 2004.
- [72] P. Hok Yong, C. Allen, K. Demarest, R. Hui, and K. Peddanarappagari, "Method and apparatus to compensate for polarization mode dispersion," 6,459,830, Octubre 1, 2002.

- [73] H. Sunnerud, C. Xie, M. Karlsson, R. Samuelsson, and P. A. Andrekson, "A Comparison Between Different PMD Compensation Techniques," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 368-378, Marzo 2002.
- [74] G. P. Agrawal. (2016) Nonlinear Schrödinger Equation Solver. [Online]. <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/agrawal/grouphomepage.php?pageid=software>
- [75] N. Litchinitser and V. Iakhnine. split step method software. [Online]. <http://optical-waveguides-modeling.net/split-step-method-software.jsp#page-top>
- [76] Synopsys, Silicon to Software. (2014, Septiembre) OptSim Product Overview. [Online]. <https://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>
- [77] The MathWorks, Inc. OptSim. [Online]. https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35665.html
- [78] RSoft. Mode SYS. [Online]. https://www.google.com.ec/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwifjcS9taDUAhVBeCYKHcTAAxcQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.cybernet.co.jp%2Fphotonics%2Fproducts%2Fmodesys.html&psig=AFQjCNH8cgRFXAUpjfIBxCY3hY6_RN4blQ&ust=149653596
- [79] Optiwave, OptiSystem Getting Started, 2013.
- [80] L. M. Quintana Gomez and D. Acevedo. OptySystem. [Online]. <https://sx-dtx.wikispaces.com/OptySystem>
- [81] Optiwave. (2011, Julio) OptiSystem. [Online]. <https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/>
- [82] G. E. Poveda Escobar and C. A. Carrera Guerrero, "Estudio y Simulación de la Propagación de Solitones en una Fibra Óptica Monomodo," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Proyecto de titulación 2015.
- [83] Optiwave. Create an Account. [Online]. <https://optiwave.com/register/>
- [84] Grupo de Comunicaciones Ópticas. (2006) Dispersión de pulsos gaussianos

- con chirp. [Online].
http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_2.htm
- [85] J. Gordon, "PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers," *PNAS*, vol. 97, no. 9, pp. 4541-4550, Abril 2000.
- [86] C. Braimiotis, "Numerically optimized implementations mitigations and simulations of Polarization Mode Dispersion in real-time transmissions systems," Aston University, Birmingham, Tesis doctoral 2006.
- [87] A. Paraskevopoulos, S. Voss, and G. Walf, "Scalable (24-140 Gbps) optical data link well adapted for future maskless lithography applications," in *Alternative Lithographic Technologies*, 2009.
- [88] J. Kiniry, "Wavelength division multiplexing: ultra high speed fiber optics," *IEEE Internet Computing*, vol. 2, no. 2, pp. 13-15, Marzo 1998.
- [89] International Telecommunications Union, "Recomendación UIT-T G.663 (2000) – Enmienda 1: Enmiendas al apéndice II," SECTOR DE NORMALIZACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES DE LA UIT, Recomendación 2003.
- [90] G. Beltrán Pérez and E. A. Kuzin, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves," *Revista Mexicana de Física*, no. 47, pp. 421-424, Octubre 2001.
- [92] G. Leandor. (2016, Enero) FIBRA ÓPTICA. [Online].
<http://elcajondelectronico.com/tag/ventana-de-transmision/>
- [93] J. C. Campo Rodríguez. (2013, Julio) Curso: Fibra Óptica. [Online].
<https://es.slideshare.net/pammacdotnet/curso-fibra-optica>
- [94] Universidad del Caribe. Representación del Estado de Polarización en Esfera de Poincaré. [Online].
<http://claroline.ucaribe.edu.mx/claroline/claroline/backends/download.php?url=L21hdGVyaWFsZXNfZGVsX2N1cnNvLzRfQXRyaWJ1dG9zX2RlX3VuYV9PbmRhX0VsZWN0cm9tYWdu6XRpY2FfUGxhbmEvVkVDVE9SRVNFREVfSk9ORVNFVV9TVE9LRVMvVkVDVEVVUI9ERV9zdG9rZXMucGRm&cidReset=true&cidReq>

- [95] O. M. Santa Cruz, "Módulo Introductorio Principios Generales de Fibra Óptica," Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba,.
- [96] B. Castellani et al., "Comparative Analysis of Monitoring Devices for Particulate Content in Exhaust Gases," *Sustainability*, vol. 6, no. 7, pp. 4287-4307, Junio 2014.
- [97] L. Escobar. (2012, Noviembre) PROPAGACIÓN DE ONDAS. [Online]. <http://propagaciondeondascom1.blogspot.com/2012/11/atenuacion-y-absorcion-de-ondas.html>
- [98] H. Guano and P. Molina, "Estudio y Simulación de los Efectos No Lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS)," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Proyecto de titulación 2013.

ANEXOS

ANEXO A. RECOMENDACIÓN ITU-T G.655

International Telecommunication Union

ITU-T

TELECOMMUNICATION
STANDARDIZATION SECTOR
OF ITU

G.655

(11/2009)

SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA,
DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS

Transmission media and optical systems characteristics –
Optical fibre cables

**Characteristics of a non-zero dispersion-shifted
single-mode optical fibre and cable**

Recommendation ITU-T G.655

ITU-T



ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS
TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS

INTERNATIONAL TELEPHONE CONNECTIONS AND CIRCUITS	G.100–G.199
GENERAL CHARACTERISTICS COMMON TO ALL ANALOGUE CARRIER-TRANSMISSION SYSTEMS	G.200–G.299
INDIVIDUAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON METALLIC LINES	G.300–G.399
GENERAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON RADIO-RELAY OR SATELLITE LINKS AND INTERCONNECTION WITH METALLIC LINES	G.400–G.449
COORDINATION OF RADIOTELEPHONY AND LINE TELEPHONY	G.450–G.499
TRANSMISSION MEDIA AND OPTICAL SYSTEMS CHARACTERISTICS	G.600–G.699
General	G.600–G.609
Symmetric cable pairs	G.610–G.619
Land coaxial cable pairs	G.620–G.629
Submarine cables	G.630–G.639
Free space optical systems	G.640–G.649
Optical fibre cables	G.650–G.659
Characteristics of optical components and subsystems	G.660–G.679
Characteristics of optical systems	G.680–G.699
DIGITAL TERMINAL EQUIPMENTS	G.700–G.799
DIGITAL NETWORKS	G.800–G.899
DIGITAL SECTIONS AND DIGITAL LINE SYSTEM	G.900–G.999
MULTIMEDIA QUALITY OF SERVICE AND PERFORMANCE – GENERIC AND USER-RELATED ASPECTS	G.1000–G.1999
TRANSMISSION MEDIA CHARACTERISTICS	G.6000–G.6999
DATA OVER TRANSPORT – GENERIC ASPECTS	G.7000–G.7999
PACKET OVER TRANSPORT ASPECTS	G.8000–G.8999
ACCESS NETWORKS	G.9000–G.9999

For further details, please refer to the list of ITU-T Recommendations.

Recommendation ITU-T G.655**Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable****Summary**

This Recommendation describes the geometrical, mechanical, and transmission attributes of a single-mode optical fibre which has the absolute value of the chromatic dispersion coefficient greater than some non-zero value throughout the wavelength range from 1530 nm to 1565 nm. This dispersion reduces the growth of non-linear effects which are particularly deleterious in dense wavelength division multiplexing systems. The last revision in 2006 adds two new categories of this fibre in Tables D and E. Both of these categories limit the chromatic dispersion coefficient by a pair of bounding curves versus wavelength for the range of 1460 nm to 1625 nm. Although the dispersion can change sign at wavelengths less than 1530 nm, the inclusion of these lower wavelengths is intended to provide information to support coarse wavelength division multiplexing applications which do not have significant non-linear impairments, at channels from 1471 nm and higher. These tables are introduced to distinguish the two main families of ITU-T G.655 fibres that are supported by multiple vendors. Table 1, "G.655.A attributes", Table 2, "G.655.B attributes", and Table 3, "G.655.C attributes", of the 2003 edition have not been changed, of which, only the G.655.C attributes table is included in this current edition. This is the latest revision of a Recommendation that was first created in 1996. This revision adds a new note in the G.655.C, G.655.D and G.655.E attributes tables, allowing higher maximum cabled attenuation for short cables. Jumper cable cut-off wavelength is deleted as well. This revision is expected to improve harmonization with IEC standards.

Source

Recommendation ITU-T G.655 was approved on 13 November 2009 by ITU-T Study Group 15 (2009-2012) under Recommendation ITU-T A.8 procedures.

FOREWORD

The International Telecommunication Union (ITU) is the United Nations specialized agency in the field of telecommunications, information and communication technologies (ICTs). The ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) is a permanent organ of ITU. ITU-T is responsible for studying technical, operating and tariff questions and issuing Recommendations on them with a view to standardizing telecommunications on a worldwide basis.

The World Telecommunication Standardization Assembly (WTSA), which meets every four years, establishes the topics for study by the ITU-T study groups which, in turn, produce Recommendations on these topics.

The approval of ITU-T Recommendations is covered by the procedure laid down in WTSA Resolution 1.

In some areas of information technology which fall within ITU-T's purview, the necessary standards are prepared on a collaborative basis with ISO and IEC.

NOTE

In this Recommendation, the expression "Administration" is used for conciseness to indicate both a telecommunication administration and a recognized operating agency.

Compliance with this Recommendation is voluntary. However, the Recommendation may contain certain mandatory provisions (to ensure e.g., interoperability or applicability) and compliance with the Recommendation is achieved when all of these mandatory provisions are met. The words "shall" or some other obligatory language such as "must" and the negative equivalents are used to express requirements. The use of such words does not suggest that compliance with the Recommendation is required of any party.

INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

ITU draws attention to the possibility that the practice or implementation of this Recommendation may involve the use of a claimed Intellectual Property Right. ITU takes no position concerning the evidence, validity or applicability of claimed Intellectual Property Rights, whether asserted by ITU members or others outside of the Recommendation development process.

As of the date of approval of this Recommendation, ITU had received notice of intellectual property, protected by patents, which may be required to implement this Recommendation. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information and are therefore strongly urged to consult the TSB patent database at <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© ITU 2010

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, by any means whatsoever, without the prior written permission of ITU.

CONTENTS

	Page
1 Scope	1
2 References	2
3 Terms and definitions	2
4 Abbreviations	2
5 Fibre attributes	2
5.1 Mode field diameter	3
5.2 Cladding diameter	3
5.3 Core concentricity error	3
5.4 Non-circularity	3
5.5 Cut-off wavelength	3
5.6 Macrobending loss	3
5.7 Material properties of the fibre	4
5.8 Refractive index profile	4
5.9 Longitudinal uniformity of chromatic dispersion	4
5.10 Chromatic dispersion coefficient	4
6 Cable attributes	5
6.1 Attenuation coefficient	5
6.2 Polarization mode dispersion (PMD) coefficient	6
7 Tables of recommended values	6
Appendix I – Information for link attributes and system design	11
I.1 Attenuation	11
I.2 Chromatic dispersion	11
I.3 Differential group delay (DGD)	12
I.4 Non-linear coefficient	12
I.5 Tables of common typical values	12
I.6 Examples of implementation	13
I.7 Chromatic dispersion coefficient limits for Tables 2 and 3	13
Bibliography	17

Introduction

The following paragraphs provide a summary of the evolution of Recommendation ITU-T G.655, from its first 1996 version to the latest 2009 edition.

- | | |
|------|--|
| 1996 | Edition 1.0. |
| 2000 | Edition 2.0. This revision includes the addition of tables for different levels of system support. |
| 2003 | Edition 3.0. In accordance with the agreement on spectral bands, the description of the L band upper limit is changed from 16xx to 1625 nm. Terms of base subcategory and subcategory are revised to base category and category, respectively. PMD requirements are added for all categories and two categories have reduced limits (compared to 0.5 ps/√km). For the macrobending test, mandrel diameter is reduced to 30 mm radius. As seen above, this Recommendation has evolved considerably over the years; therefore, the reader is warned to consider the appropriate version to determine the characteristics of an already deployed product, taking into account the year of production. In fact, products are expected to comply with the Recommendation that was in force at the time of their manufacture, but may not fully comply with subsequent versions of the Recommendation. |
| 2006 | Edition 4.0. This revision adds two new categories of this fibre in Tables D and E. Both of these categories limit the chromatic dispersion coefficient by a pair of bounding curves versus wavelength for the range of 1460 nm to 1625 nm. Although the dispersion can change sign at wavelengths less than 1530 nm, the inclusion of these lower wavelengths is intended to provide information to support coarse wavelength division multiplexing applications which do not have significant non-linear impairments, at channels from 1471 nm and higher. These tables are introduced to distinguish the two main families of G.655 fibres that are supported by multiple vendors. Tables A, B, and C have not been changed. Tables A and B are not included in this version of this Recommendation, but are in the 2003 edition. |
| 2009 | Edition 5.0. IEC 60794-2-11 (2005) is added as one of the Informative references. The tables have been renumbered. Tables 1, 2, and 3 of edition 5.0 correspond, respectively, to Tables 3, 4, and 5 of edition 4.0. Uncabled fibre PMD coefficient requirements have been added in Tables 2 and 3. A new note has been introduced in Tables 1 to 3, to allow higher maximum cabled attenuation for short cables. |

Recommendation ITU-T G.655

Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable

1 Scope

This Recommendation describes a single-mode fibre with a chromatic dispersion coefficient (absolute value) that is greater than some non-zero value throughout the wavelengths larger than 1530 nm. This dispersion reduces the growth of non-linear effects that can be particularly deleterious in dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems. At lower wavelengths, the dispersion coefficient can cross zero, but chromatic dispersion coefficient values at these wavelengths may be specified to support coarse wavelength division multiplexing (CWDM) systems that do not have significant impairments due to non-linear effects.

These fibres were originally intended for use at wavelengths in a prescribed region between 1530 nm and 1565 nm. Provisions have been made to support transmission at higher wavelengths of up to 1625 nm and lower wavelengths down to 1460 nm.

In clause 7, Tables 2 and 3 distinguish the two main families of ITU-T G.655 fibre implementations that are supported by multiple vendors. The G.655.A, G.655.B and G.655.C attributes tables can be used to define other implementations. The G.655.A and G.655.B attributes tables of the 2003 edition are not included in the current version of this Recommendation.

The geometrical, optical, transmission and mechanical parameters are described below in three categories of attributes:

- fibre attributes are those attributes that are retained throughout cabling and installation;
- cable attributes that are recommended for cables as they are delivered;
- link attributes that are characteristics of concatenated cables, describing estimation methods of system interface parameters based on measurements, modelling, or other considerations. Information for link attributes and system design are in Appendix I.

This Recommendation, and the different performance categories found in the tables of clause 7, is intended to support the following related system Recommendations:

- ITU-T G.691;
- ITU-T G.692;
- ITU-T G.693;
- ITU-T G.695;
- ITU-T G.696.1;
- ITU-T G.698.1;
- ITU-T G.957;
- ITU-T G.959.1.

This Recommendation contains a combination of fibre designs able to cover a broad spectrum of applications. Some re-arrangement might be considered in the future. However, the system compatibility of fibres with different characteristics is not proved and, in general, their simultaneous use in one system might be questioned and should be agreed in advance between the user and manufacturers.

The meaning of the terms used in this Recommendation and the guidelines to be followed in the measurement to verify the various characteristics are given in [ITU-T G.650.1] and [ITU-T G.650.2]. The characteristics of this fibre, including the definitions of the relevant

parameters, their test methods and relevant values, will be refined as studies and experience progress.

2 References

The following ITU-T Recommendations and other references contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this Recommendation. At the time of publication, the editions indicated were valid. All Recommendations and other references are subject to revision; users of this Recommendation are therefore encouraged to investigate the possibility of applying the most recent edition of the Recommendations and other references listed below. A list of the currently valid ITU-T Recommendations is regularly published. The reference to a document within this Recommendation does not give it, as a stand-alone document, the status of a Recommendation.

- [ITU-T G.650.1] Recommendation ITU-T G.650.1 (2004), *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.*
- [ITU-T G.650.2] Recommendation ITU-T G.650.2 (2007), *Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.*

3 Terms and definitions

For the purposes of this Recommendation, the definitions given in [ITU-T G.650.1] and [ITU-T G.650.2] apply. Values shall be rounded to the number of digits given in the tables of recommended values before conformance is evaluated.

4 Abbreviations

This Recommendation uses the following abbreviations:

A_{eff}	Effective area
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DGD	Differential Group Delay
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
GPa	GigaPascal
PMD	Polarization Mode Dispersion
PMD _Q	Statistical Parameter for PMD link
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
TBD	To Be Determined
WDM	Wavelength Division Multiplexing

5 Fibre attributes

Only those characteristics of the fibre providing a minimum essential design framework for fibre manufacturers are recommended in this clause. Ranges or limits on values are presented in the tables of clause 7. Of these, cable manufacture or installation may significantly affect the cabled fibre cut-off wavelength and PMD. Otherwise, the recommended characteristics will apply equally to individual fibres, fibres incorporated into a cable wound on a drum, and fibres in an installed cable.

5.1 Mode field diameter

Both a nominal value and tolerance about that nominal value shall be specified at 1550 nm. The nominal that is specified shall be within the range found in clause 7. The specified tolerance shall not exceed the value in clause 7. The deviation from nominal shall not exceed the specified tolerance.

5.2 Cladding diameter

The recommended nominal value of the cladding diameter is 125 μm . A tolerance is also specified and shall not exceed the value in clause 7. The cladding deviation from nominal shall not exceed the specified tolerance.

5.3 Core concentricity error

The core concentricity error shall not exceed the value specified in clause 7.

5.4 Non-circularity

5.4.1 Mode field non-circularity

In practice, the mode field non-circularity of fibres having nominally circular mode fields is found to be sufficiently low that propagation and jointing are not affected. It is, therefore, not considered necessary to recommend a particular value for the mode field non-circularity. It is not normally necessary to measure the mode field non-circularity for acceptance purposes.

5.4.2 Cladding non-circularity

The cladding non-circularity shall not exceed the value found in clause 7.

5.5 Cut-off wavelength

Two useful types of cut-off wavelength can be distinguished:

- a) Cable cut-off wavelength, λ_{cc} .
- b) Fibre cut-off wavelength, λ_c .

NOTE – For some specific submarine cable applications, other cable cut-off wavelength values may be required.

The correlation of the measured values of λ_c and λ_{cc} depends on the specific fibre and cable design and the test conditions. While in general, $\lambda_{cc} < \lambda_c$, a general quantitative relationship cannot be easily established. The importance of ensuring single-mode transmission in the minimum cable length between joints, at the minimum operating wavelength, is paramount. This may be performed by recommending the maximum cable cut-off wavelength λ_{cc} of a cabled single-mode fibre to be 1480 nm, or for worst-case length and bends, by recommending a maximum fibre cut-off wavelength to be 1470 nm.

The cable cut-off wavelength, λ_{cc} , shall be less than the maximum specified in clause 7.

5.6 Macrobending loss

Macrobending loss varies with wavelength, bend radius and number of turns about a mandrel with a specified radius. Macrobending loss shall not exceed the maximum given in clause 7 for the specified wavelength(s), bend radius, and number of turns.

NOTE 1 – A qualification test may be sufficient to ensure that this requirement is being met.

NOTE 2 – The recommended number of turns corresponds to the approximate number of turns deployed in all splice cases of a typical repeater span. The recommended radius is equivalent to the minimum bend-radius widely accepted for long-term deployment of fibres in practical systems installations to avoid static-fatigue failure.

NOTE 3 – If, for practical reasons, fewer than the recommended number of turns are chosen to be implemented, it is suggested that not less than 40 turns, and a proportionately smaller loss increase be required.

NOTE 4 – The macrobending loss recommendation relates to the deployment of fibres in practical single-mode fibre installations. The influence of the stranding-related bending radii of cabled single-mode fibres on the loss performance is included in the loss specification of the cabled fibre.

NOTE 5 – In the event that routine tests are required, a smaller diameter loop with one or several turns can be used instead of the recommended test, for accuracy and measurement ease. In this case, the loop diameter, number of turns, and the maximum permissible bend loss for the several-turn test should be chosen so as to correlate with the recommended test and allowed loss.

5.7 Material properties of the fibre

5.7.1 Fibre materials

The substances of which the fibres are made should be indicated.

NOTE – Care may be needed in fusion splicing fibres of different substances. Provisional results indicate that adequate splice loss and strength can be achieved when splicing different high-silica fibres.

5.7.2 Protective materials

The physical and chemical properties of the material used for the fibre primary coating and the best way of removing it (if necessary) should be indicated. In the case of single jacketed fibre, similar indications shall be given.

5.7.3 Proofstress level

The specified proofstress, σ_p , shall not be less than the minimum specified in clause 7.

NOTE – The definitions of the mechanical parameters are contained in clauses 3.2.3 and 5.6 of [ITU-T G.650.1].

5.8 Refractive index profile

The refractive index profile of the fibre does not generally need to be known.

5.9 Longitudinal uniformity of chromatic dispersion

Under study.

NOTE – At a particular wavelength, the local absolute value of chromatic dispersion coefficient can vary away from the value measured on a long length. If the value decreases to a small value at a wavelength that is close to an operating wavelength in a WDM system, four-wave mixing can induce the propagation of power at other wavelengths, including, but not limited to, other operating wavelengths. The magnitude of the four-wave mixing power is a function of the absolute value of chromatic dispersion coefficient, the chromatic dispersion slope, the operating wavelengths, the optical power, and the distance over which four-wave mixing occurs.

5.10 Chromatic dispersion coefficient

The chromatic dispersion coefficient, D , is specified with a wavelength range. [ITU-T G.650.1] provides measurement methods. There are two methods for specifying the limits, the original method, which is a box-like specification, and a newer method, in which the dispersion coefficient values are bound by a pair of curves.

NOTE 1 – Chromatic dispersion uniformity should be consistent with the functioning of the system.

NOTE 2 – The requirements on chromatic dispersion follow from WDM system design, which must balance first order chromatic dispersion with various non-linear effects, such as four-wave mixing, cross-phase modulation, modulation instability, stimulated Brillouin scattering, and soliton formation (see [b-ITU-T G.663]). The effect of chromatic dispersion is interactive with the fibre non-linearity, described by the non-linear coefficient.

NOTE 3 – It is not necessary to measure the chromatic dispersion coefficient on a routine basis.

5.10.1 Original specification form

This specification form applies to Table 1 in clause 7, as well as to the G.655.A and G.655.B tables.

The chromatic dispersion coefficient, D , is specified within a wavelength range by stating a range of allowed absolute values of the chromatic dispersion coefficient. The chromatic dispersion coefficient shall not cross zero within the specified wavelength range. The sign of the chromatic dispersion is also specified. The form of the specification is:

$$D_{min} \leq |D(\lambda)| \leq D_{max} \quad \text{for } \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}$$

where:

$$0.1 \text{ ps/nm}\cdot\text{km} \leq D_{min} \leq D_{max} \leq 10.0 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$$

$$1530 \text{ nm} \leq \lambda_{min} \leq \lambda_{max} \leq 1565 \text{ nm}$$

$$D_{max} \leq D_{min} + 5.0 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$$

Values for D_{min} , D_{max} , λ_{min} , λ_{max} , and sign shall be within the ranges given in clause 7. Some examples of implementation are given in Appendix I. Extension to wavelength ranges above 1565 nm and below 1530 nm are under consideration.

NOTE 1 – D_{min} does not necessarily occur at λ_{min} and D_{max} does not necessarily occur at λ_{max} .

NOTE 2 – The sign of D does not change over the above wavelength range for a given fibre, but it may change from one fibre to another within a system.

NOTE 3 – Depending on the system design and transmission type, it may be necessary to specify the sign of D .

5.10.2 Specification based on a pair of limiting curves

This specification form applies to Tables 2 and 3 of clause 7.

For each wavelength, λ , the chromatic dispersion coefficient, $D(\lambda)$, shall be restricted to a range of values associated with two limiting curves, $D_{min}(\lambda)$ and $D_{max}(\lambda)$, for one or more specified wavelength ranges defined in terms of λ_{min} and λ_{max} .

An example set of curves is represented symbolically as a pair of straight lines:

$$D_{min}(\lambda) = a_{min} + b_{min}(\lambda - 1460) \quad (\text{ps/nm}\cdot\text{km})$$

$$D_{max}(\lambda) = a_{max} + b_{max}(\lambda - 1460) \quad (\text{ps/nm}\cdot\text{km})$$

$$D_{min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{max}(\lambda) \quad (\text{ps/nm}\cdot\text{km})$$

The bounding curves may vary from one wavelength range to another.

6 Cable attributes

Since the geometrical and optical characteristics of fibres given in clause 5 are barely affected by the cabling process, this clause will give recommendations mainly relevant to transmission characteristics of cabled factory lengths. Environmental and test conditions are paramount and are described in the guidelines for test methods.

6.1 Attenuation coefficient

The attenuation coefficient is specified with a maximum value at one or more wavelengths in the 1550 nm region. The optical fibre cable attenuation coefficient values shall not exceed the values found in clause 7.

NOTE – The attenuation coefficient may be calculated across a spectrum of wavelengths, based on measurements at a few (3 to 4) predictor wavelengths. This procedure is described in clause 5.4.4 of [ITU-T G.650.1] and an example is given in Appendix III of [ITU-T G.650.1].

6.2 Polarization mode dispersion (PMD) coefficient

When required, cabled fibre polarization mode dispersion shall be specified on a statistical basis, not on an individual fibre basis. The requirements pertain only to the aspect of the link calculated from cable information. The metrics of the statistical specification are found below. Methods of calculations are found in [b-IEC/TR 61282-3] and are summarized in Appendix IV of [ITU-T G.650.2].

The manufacturer shall supply a PMD link design value, PMD_Q , that serves as a statistical upper bound for the PMD coefficient of the concatenated optical fibre cables within a defined possible link of M cable sections. The upper bound is defined in terms of a small probability level, Q , which is the probability that a concatenated PMD coefficient value exceeds PMD_Q . For the values of M and Q given in clause 7, the value of PMD_Q shall not exceed the maximum PMD coefficient specified in clause 7.

Measurements and specifications on uncabled fibre are necessary, but not sufficient to ensure the cabled fibre specification. The maximum link design value specified on uncabled fibre shall be less than or equal to that specified for the cabled fibre. The ratio of PMD values for uncabled fibre to cabled fibre depends on the details of the cable construction and processing, as well as on the mode coupling condition of the uncabled fibre. [ITU-T G.650.2] recommends a low mode coupling deployment requiring a low tension wrap on a large diameter spool for uncabled fibre PMD measurements.

The limits on the distribution of PMD coefficient values can be interpreted as being nearly equivalent to limits on the statistical variation of the differential group delay (DGD), that varies randomly with time and wavelength. When the PMD coefficient distribution is specified for optical fibre cable, equivalent limits on the variation of DGD can be determined. The metrics and values for link DGD distribution limits are found in Appendix I.

NOTE 1 – PMD_Q specification would be required only where cables are employed for systems that have the specification of the max DGD, i.e., for example, PMD_Q specification would not be applied to systems recommended in [b-ITU-T G.957].

NOTE 2 – PMD_Q should be calculated for various types of cables, and they should usually be calculated using sampled PMD values. The samples would be taken from cables of similar construction.

NOTE 3 – The PMD_Q specification should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables.

7 Tables of recommended values

The following tables summarize the recommended values for a number of categories of fibres that satisfy the objectives of this Recommendation. These categories are largely distinguished on the basis of PMD requirements and chromatic dispersion characteristics. See Appendix I for information about transmission distances and bit-rates relative to PMD requirements.

Tables 1, 2 and 3 of this version correspond to Tables 3, 4 and 5 of the 2006 edition, respectively.

Table 1, "G.655.C Attributes", retains the original "box-type" specification for the dispersion coefficient, which allows a reference to negative dispersion fibres that may be suitable as part of dispersion managed links such as those that may be used in submarine systems. This also supports optical interface Recommendations such as [b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.959.1] and [b-ITU-T G.693]. For DWDM systems, channel spacings defined in [b-ITU-T G.694.1] are supported, depending on the minimum dispersion that is selected. The PMD requirement allows operation of STM-64 systems to lengths of up to 2000 km, depending on other system elements.

Table 2, "G.655.D Attribute", defines the chromatic dispersion coefficient requirements as a pair of bounding curves versus wavelength for wavelengths from 1460 nm to 1625 nm. For wavelengths greater than 1530 nm, the dispersion is positive and of sufficient magnitude to suppress most non-linear impairments. For these wavelengths, the applications mentioned in Table 1 are supported. For wavelengths less than 1530 nm, the dispersion crosses zero, but the fibre can be used to support CWDM applications at channels from 1471 nm and higher.

Table 3, "G.655.E Attribute", defines the chromatic dispersion requirements in the same style as Table 2, but has higher values which can be important for some systems, e.g., for those with the smallest channel spacings. The applications mentioned in Table 1 are supported. Fibres meeting these requirements are positive and non-zero at wavelengths above 1460 nm.

NOTE – Many submarine applications can utilize these fibres. For some submarine applications, the full optimization can lead to choosing different limits than are found here. One example could be to allow cable cut-off wavelength values as high as 1500 nm.

Appendix I illustrates various implementation examples that are differentiated on the basis of different chromatic dispersion values, dispersion slope, and different non-linear coefficient link values. These options illustrate possibilities for different tradeoffs between power, channel spacing, link length, amplifier spacing, and bit rate.

Table 1 – G.655.C attributes

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding non-circularity	Maximum	2.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.50 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1530-1565 nm	λ_{min} and λ_{max}	1530 nm and 1565 nm
	Minimum value of D_{min}	1.0 ps/nm·km
	Maximum value of D_{max}	10.0 ps/nm·km
	Sign	Positive or negative
	$D_{max} - D_{min}$	≤ 5.0 ps/nm·km
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1565-1625 nm	λ_{min} and λ_{max}	TBD
	Minimum value of D_{min}	TBD
	Maximum value of D_{max}	TBD
	Sign	Positive or negative
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)

Table 1 – G.655.C attributes

Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
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 _Q	0.20 ps/√km
NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD _Q .		
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.		
NOTE 3 – Larger PMD _Q values (e.g., ≤ 0.5 ps/√km) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Table 2 – G.655.D attributes

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
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	$\frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$
	$D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$
	$D_{max}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$

Table 2 – G.655.D attributes

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
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 _Q	0.20 ps/√km
NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD _Q .		
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.		
NOTE 3 – Larger PMD _Q values (e.g., ≤ 0.5 ps/√km) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Table 3 – G.655.E attributes

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
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	$\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$

Table 3 – G.655.E attributes

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
	$D_{\text{max}}(\lambda)$: 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 ₀	0.20 ps/√km
NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD ₀ value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD ₀ .		
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.		
NOTE 3 – Larger PMD ₀ values (e.g., ≤ 0.5 ps/√km) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.		

Appendix I

Information for link attributes and system design

(This appendix does not form an integral part of this Recommendation)

A concatenated link usually includes a number of spliced factory lengths of optical fibre cable. The requirements for factory lengths are given in clauses 5 and 6. The transmission parameters for concatenated links must take into account not only the performance of the individual cable lengths but also the statistics of concatenation.

The transmission characteristics of the factory length optical fibre cables will have a certain probability distribution which often needs to be taken into account if the most economic designs are to be obtained. The following clauses should be read with this statistical nature of the various parameters in mind.

Link attributes are affected by factors other than optical fibre cables by such things as splices, connectors, and installation. These factors cannot be specified in this Recommendation. For the purpose of link attribute values estimation, typical values of optical fibre links are provided in clause I.5. Clause I.6 contains examples of implementation where the typical values of chromatic dispersion vary from example to example. The estimation methods of parameters needed for system design are based on measurements, modelling, or other considerations.

I.1 Attenuation

The attenuation A of a link is given by:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y$$

where:

- α : typical attenuation coefficient of fibre cables in a link
- α_s : mean splice loss
- x : number of splices in a link
- α_c : mean loss of line connectors
- y : number of line connectors in a link (if provided)
- L : link length

A suitable margin should be allocated for future modifications of cable configurations (additional splices, extra cable lengths, ageing effects, temperature variations, etc.). The above equation does not include the loss of equipment connectors. The typical values found in clause I.5 are for the attenuation coefficient of optical fibre links. The attenuation budget used in designing an actual system should account for the statistical variations in these parameters.

I.2 Chromatic dispersion

The chromatic dispersion in ps/nm can be calculated from the chromatic dispersion coefficients of the factory lengths, assuming a linear dependence on length, and with due regard for the signs of the coefficients (see clause 5.10).

When these fibres are used for transmission in the 1550 nm region, chromatic dispersion accommodation is sometimes employed. In this case, the average link chromatic dispersion is used for design. The relationship is described in terms of the typical chromatic dispersion coefficient and chromatic dispersion slope coefficient at 1550 nm.

Typical values for the chromatic dispersion coefficient, D_{1550} , and chromatic dispersion slope coefficient, S_{1550} , at 1550 nm vary with the specific implementation. Values may be found in clause I.6 for the examples given. These values, together with link length, L_{Link} , can be used to calculate the typical dispersion for use in optical link design.

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (ps/nm)$$

I.3 Differential group delay (DGD)

The differential group delay is the difference in arrival times of the two polarization modes at a particular wavelength and time. For a link with a specific PMD coefficient, the DGD of the link varies randomly with time and wavelength as a Maxwell distribution that contains a single parameter which is the product of the PMD coefficient of the link and the square root of the link length. The system impairment due to PMD at a specific time and wavelength depends on the DGD at that time and wavelength. So, means of establishing useful limits on the DGD distribution, as it relates to the optical fibre cable PMD coefficient distribution and its limits, have been developed and are documented in [b-IEC/TR 61282-3]. The metrics of the limitations of the DGD distribution follow:

- Reference link length, L_{Ref} : A maximum link length to which the maximum DGD and probability will apply. For longer link lengths, multiply the maximum DGD by the square root of the ratio of actual length to the reference length.
- Typical maximum cable length, L_{Cab} : The maxima assured when the typical individual cables of the concatenation or the lengths of the cables that are measured in determining the PMD coefficient distribution are less than this value.
- Maximum DGD, DGD_{max} : The DGD value that can be used when considering optical system design.
- Maximum probability, P_F : The probability that an actual DGD value exceeds DGD_{max} .

NOTE – The determination of the contribution of components other than optical fibre cable is beyond the scope of this Recommendation, but is discussed in [b-IEC/TR 61282-3].

I.4 Non-linear coefficient

The effect of chromatic dispersion is interactive with the non-linear coefficient, n_2/A_{eff} , regarding system impairments induced by non-linear optical effects (see [b-ITU-T G.663] and [ITU-T G.650.2]). Typical values vary with the implementation. The test methods for non-linear coefficient remain under study.

I.5 Tables of common typical values

The values in Tables I.1 and I.2 are representative of concatenated optical fibre links according to clauses I.1 and I.3, respectively. The implied fibre induced maximum DGD values in Table I.2 are intended for guidance in regard to the requirements for other optical elements that may be in the link.

Table I.1 – Link attenuation values

Attenuation coefficient	Wavelength region	Typical link value
(Note)	1530-1565 nm	0.275 dB/km
	1565-1625 nm	0.35 dB/km
NOTE – Typical link value corresponds to the link attenuation coefficient used in [b-ITU-T G.957] and [b-ITU-T G.692].		

Table I.2 – Differential group delay

Maximum PMD _Q (ps/√km)	Link length (km)	Implied fibre induced maximum DGD (ps)	Channel bit rates
No specification			Up to 2.5 Gbit/s
0.5	400	25.0	10 Gbit/s
	40	19.0 (Note 1)	10 Gbit/s
	2	7.5	40 Gbit/s
0.20	3000	19.0	10 Gbit/s
	80	7.0	40 Gbit/s
0.10	> 4000	12.0	10 Gbit/s
	400	5.0	40 Gbit/s

NOTE 1 – This value applies also for 10 Gigabit Ethernet systems.
NOTE 2 – Cable section length is 10 km except for the 0.10 ps/√km, > 4000 km link, where it is set to 25 km, the probability level is $6.5 \cdot 10^{-8}$.

I.6 Examples of implementation

The following are examples of implementations that are designed to optimize various tradeoffs in power, channel spacing, amplifier separation, link length and bit rate. All these examples are primarily variations in the allowed chromatic dispersion, dispersion slope, and non-linear coefficient. These are examples only, which do not preclude other possible implementations. The example identifiers are arbitrary and do not reflect any priority.

Table I.3 – Examples for $\lambda_{min} = 1530$ nm and $\lambda_{max} = 1565$ nm

Example ID	D_{min} (ps/nm·km)	D_{max} (ps/nm·km)	Sign	Typical dispersion coefficient at 1550 nm (ps/nm·km)	Typical dispersion slope at 1550 nm (ps/nm ² ·km)
A	1.3	5.8	+	3.7	0.070
B	2.0	6.0	+	4.2	0.085
C	2.6	6.0	+	4.4	0.045
D	5.0	10.0	+	8.0	0.058
E	1.0	6.0	–	–2.3	0.065

NOTE – Corresponding values of chromatic dispersion for the 1600 nm wavelength region are under consideration.

I.7 Chromatic dispersion coefficient limits for Tables 2 and 3

The equations bounding the chromatic dispersion coefficient versus wavelength are based on two surveys, one for the fibres represented by Table 2 and one for the fibres represented by Table 3. There were five and four vendors respectively. Each provided average and standard deviation as a function of wavelength for wavelengths from 1460 to 1625 nm in 5 nm increments. For wavelength and vendor, the average plus and minus three standard deviation was calculated. Then the minimum and maximum across vendors was calculated. These results were fitted with a line spline using a breakpoint at 1550 nm to minimize the sum of absolute values of the difference while maintaining the principle of including all the data within the envelope.

The results for Tables 2 and 3 are shown in Figures I.1 and I.2 respectively. The solid lines are the limits from clause 7. The rest of the data represent the survey results.

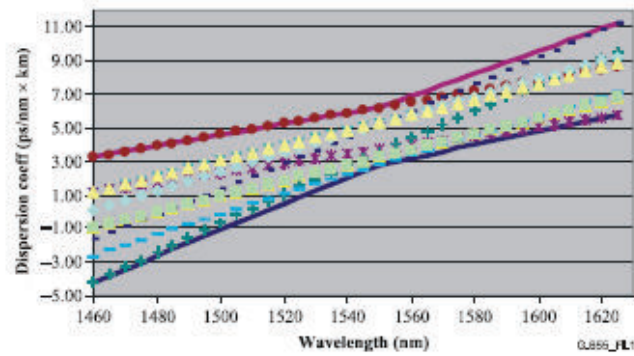


Figure I.1 – Table 2 fibre dispersion boundary

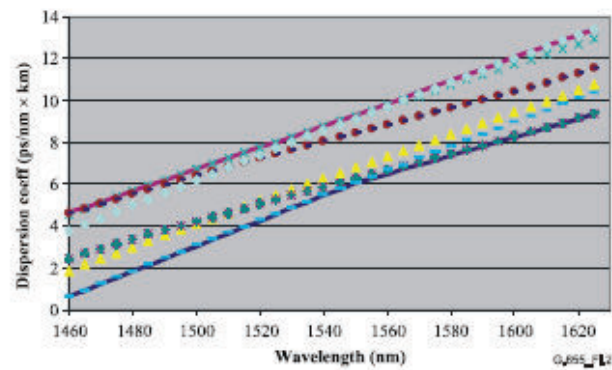


Figure I.2 – Table 3 fibre dispersion boundary

The limits in clause 7 are for individual fibres. The range of values associated with links which are a concatenation of individual fibres can be smaller. For ITU-T G.652 fibres, where the diversity of values from vendor to vendor is reduced, the average plus one standard deviation, which is documented in Supplement 39 to the ITU-T G-series Recommendations, can be used for system limit considerations.

The methodology described above was applied to determine the bounding curves that include all the average plus or minus one standard deviation results. The results are presented graphically in Figures I.3 and I.4. The plus or minus three standard deviation data are also presented for comparison. The equations that bound the plus or minus one standard deviation survey results are in Tables I.4 and I.5.

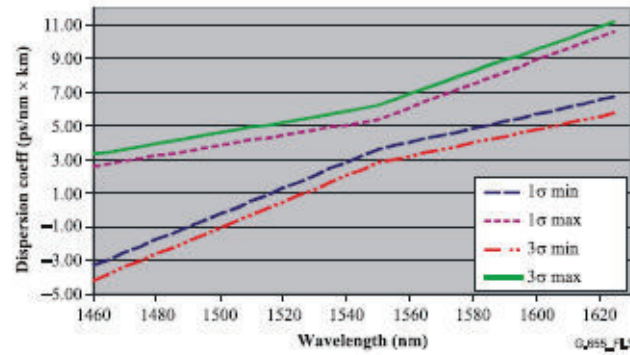


Figure I.3 – Comparison of Table 2 fibre dispersion boundaries

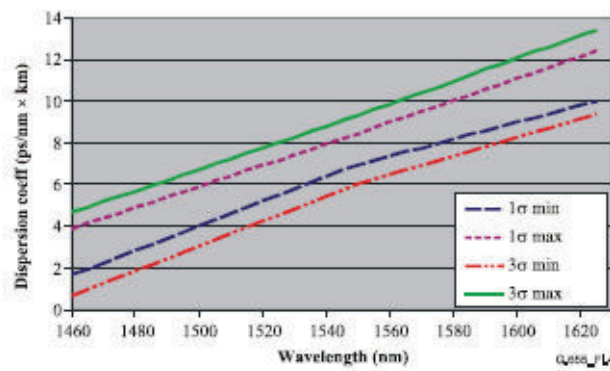


Figure I.4 – Comparison of Table 3 fibre dispersion boundaries

Table I.4 – Table 2 fibre \pm one standard deviation limits

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	$\frac{5.28}{75}(\lambda - 1550) + 5.38$

Table I.5 – Table 3 fibre \pm one standard deviation limit

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	$\frac{3.96}{75}(\lambda - 1550) + 8.45$

Bibliography

- [b-ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2000), *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.*
- [b-ITU-T G.691] Recommendation ITU-T G.691 (2006), *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.*
- [b-ITU-T G.692] Recommendation ITU-T G.692 (1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.*
- [b-ITU-T G.693] Recommendation ITU-T G.693 (2006), *Optical interfaces for intra-office systems.*
- [b-ITU-T G.694.1] Recommendation ITU-T G.694.1 (2002), *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.*
- [b-ITU-T G.695] Recommendation ITU-T G.695 (2005), *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.*
- [b-ITU-T G.696.1] Recommendation ITU-T G.696.1 (2005), *Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications.*
- [b-ITU-T G.698.1] Recommendation ITU-T G.698.1 (2005), *Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces.*
- [b-ITU-T G.957] Recommendation ITU-T G.957 (2006), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.*
- [b-ITU-T G.959.1] Recommendation ITU-T G.959.1 (2006), *Optical transport network physical layer interfaces.*
- [b-IEC 60794-2-11] IEC 60794-2-11 (2005), *Optical fibre cables – Part 2-11: Indoor cables – Detailed specification for simplex and duplex cables for use in premises cabling.*
- [b-IEC/TR 61282-3] IEC/TR 61282-3 (2002), *Fibre optic communication design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.*

SERIES OF ITU-T RECOMMENDATIONS

Series A	Organization of the work of ITU-T
Series D	General tariff principles
Series E	Overall network operation, telephone service, service operation and human factors
Series F	Non-telephone telecommunication services
Series G	Transmission systems and media, digital systems and networks
Series H	Audiovisual and multimedia systems
Series I	Integrated services digital network
Series J	Cable networks and transmission of television, sound programme and other multimedia signals
Series K	Protection against interference
Series L	Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant
Series M	Telecommunication management, including TMN and network maintenance
Series N	Maintenance: international sound programme and television transmission circuits
Series O	Specifications of measuring equipment
Series P	Terminals and subjective and objective assessment methods
Series Q	Switching and signalling
Series R	Telegraph transmission
Series S	Telegraph services terminal equipment
Series T	Terminals for telematic services
Series U	Telegraph switching
Series V	Data communication over the telephone network
Series X	Data networks, open system communications and security
Series Y	Global information infrastructure, Internet protocol aspects and next-generation networks
Series Z	Languages and general software aspects for telecommunication systems

ANEXO B. DATASHEET TERALIGHT NZDSF FIBRE



Single-Mode Fiber

TeraLight™ Optical Fiber

To minimize your chromatic dispersion compensation CAPEX



Issue date: 08/10
Supersedes: 09/09

Draka's TeraLight™ Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF) has set the standard for high bit-rate, multi-wavelength transmission. Its unique optimization of effective area, chromatic dispersion and dispersion slope enables excellent distortion management cost effective operation at 10 and 40 Gbps, tight channel spacing in C- and L-bands, compatibility with the future S-band.

TeraLight™ is optimized for metropolitan backbone and long-haul applications. Its typical chromatic dispersion of 8 ps/nm.km at 1550 nm is optimized to be half that of standard single-mode fiber. It supports 10 Gbps transmission without dispersion compensation for distances of about 200 km, resulting in cost savings compared to standard single-mode fiber. For long-haul applications it results in lower costs for dispersion compensation, while still minimizing cross-channel non-linearities. For 40 Gbps operation, commercially available devices can be used.

The fiber complies with or exceeds the ITU-T Recommendations G.656.E/G.656, the IEC International Standard 60793-2-60 type B4/B5 and can be used in all cable constructions, including loose tube, tight buffered, ribbon and central tube designs. Draka's Advanced Plasma and Vapor Deposition (APVD™) manufacturing process and proprietary ColorLock-XS coating process further enhance fiber purity, reliability, and durability.

Features	Advantages
Optimized for 2.5 and 10 Gbps operation without dispersion compensation in Metropolitan area networks	<ul style="list-style-type: none"> • Cost savings compared to standard single-mode fiber (DCU + potentially EDFA) • Simplifies network design and management • Increase network flexibility • Allows use of cheap transmitter
40 Gbps operation with commercially available dispersion compensation devices	<ul style="list-style-type: none"> • Future safe investment • Close to 100% dispersion slope compensation • Contact Draka for availability
Compatibility with long haul NZDSF	<ul style="list-style-type: none"> • Easy extension of route distances • Consistent fiber type minimizes network complexity
More than 160 channels in C-band alone at 10 Gbps	Maximizing C-band utilization defers costly L-band deployment, providing significant cost savings
320 channels in C-, L- and S-bands at 10 Gbps	Higher capacity and more efficient bandwidth use
S-band compatibility	<ul style="list-style-type: none"> • Future capacity increase • Efficiently supports 1460 – 1625 nm 8 channels CWDM cheap transmission systems

Key Industry Leading Milestones



Draka Communications
fibresales@draka.com
www.draka.com/communications

Netherlands: Tel: +31 (0)40 29 58 700 Fax: +31 (0)40 29 58 710
France: Tel: +33 (0)3 21 79 49 00 Fax: +33 (0)3 21 79 49 33
USA: Toll free: 800-579-9662 Outside US: +1.828.459.9767 Fax: +1.828.459.8267

TeraLight™ Optical Fiber

To minimize your chromatic dispersion compensation CAPEX

Product Type: G.655.E, G.656
Coating Type: ColorLook-XS and Natural

Issue date: 08/10
Supersedes: 09/05

Optical Specifications

Attenuation	
Attenuation at 1310 nm	≤ 0.40 dB/km
Attenuation at 1383 nm*	≤ 1.0 dB/km
Attenuation at 1550 nm	≤ 0.25 dB/km
Attenuation at 1625 nm	≤ 0.28 dB/km

* Including H2-aging according to IEC 60703-2-50, type B.1.3

Other values available on request

Attenuation vs. Wavelength

Maximum attenuation change over the window from reference

Wavelength range (nm)	Reference λ (nm)	(dB/km)
1525 - 1575	1550	≤ 0.03
1550 - 1625	1550	≤ 0.05
1285 - 1330	1310	≤ 0.05

Point discontinuities

No point discontinuity greater than 0.05 dB at 1310 nm and 1550 nm.

Attenuation with Bending

Number of Turns	Mandrel Radius (mm)	Wavelength (nm)	Induced Attenuation (dB)
1	16	1550	≤ 0.5
100	25	1310	≤ 0.05
100	25	1550	≤ 0.05
100	30	1625	≤ 0.05

Cutoff Wavelength

Cable Cutoff wavelength (λ_{ccf}) ≤ 1300 nm

Mode Field Diameter

Wavelength (nm) MFD (μm)

1550 9.2 ± 0.5

Chromatic Dispersion

Wavelength (nm)	Chromatic Dispersion (ps/nm.km)
1440	> 0.1
1530 - 1565	5.5 to 10
1565 - 1625	7.5 to 13.4
1285 - 1330	-10.0 to -3.0

Zero Dispersion Wavelength (λ₀): ≤ 1440 nm

Polarization Mode Dispersion (PMD)

PMD Link Design Value** (ps·√km) ≤ 0.06

Max. Individual Fiber (ps·√km) ≤ 0.20

** According to IEC 60704-3, ED 3 (Q=0.01%)

Geometrical Specifications

Glass Geometry

Cladding Diameter	125.0 ± 1.0 μm
Core/Cladding Concentricity Error	≤ 0.6 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 1.0 %
Fiber Curl (Radius)	≥ 4 m

Coating Geometry

Coating Diameter	242 ± 7 μm
Coating/Cladding Concentricity Error	≤ 12 μm
Coating Non-Circularity	≤ 5 %
Length	Standard lengths up to 25.2 km

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire length is subjected to a tensile proof stress ≥ 0.7 GPa (100 kpsi); 1% strain equivalent

Tensile Strength

Dynamic tensile strength (0.5 meter gauge length):

Aged*** and unaged: median > 3.8 GPa (550 kpsi)

*** Aging at 85°C, 85% RH, 30 days

Dynamic and Static Fatigue

Dynamic fatigue, unaged and aged***: n_d ≥ 20

Static fatigue, aged***: n_s ≥ 23

Coating Performance

Coating strip force unaged and aged****:

- Average strip force: 1 N to 3 N

- Peak strip force: 1.2 N to 8.9 N

**** Aging:

- 0°C and 45°C
- 30 days at 85°C and 85% RH
- 14 days water immersion at 23°C
- Wasp spray exposure (Telcordia)

Environmental Specifications

Attenuation

Environmental Test	Test Conditions	Induced Attenuation at 1310, 1550 nm (dB/km)
Temperature cycling	-60°C to 85°C	≤ 0.05
Temperature-Humidity cycling	-10°C to 85°C, 4-98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	14 days, 23°C	≤ 0.05
Dry Heat	30 days, 85°C	≤ 0.05
Damp Heat	30 days, 85°C, 85% RH	≤ 0.05

Typical Values

Miscellaneous

Dispersion at 1310 nm	-6 ps/(nm.km)
Dispersion at 1550 nm	8 ps/(nm.km)
Dispersion at 1625 nm	12 ps/(nm.km)
Dispersion slope at 1550 nm	0.052 ps/(nm ² .km)
Effective area	63 μm ²
Effective group index @ 1310 nm	1.4682
Effective group index @ 1550 nm	1.4683
Effective group index @ 1625 nm	1.4685
Rayleigh Backscatter Coefficient for 1 ns pulse width:	
@ 1310 nm	-77.4 dB
@ 1550 nm	-80.4 dB
@ 1625 nm	-81.3 dB

ANEXO C. DATASHEET CORNING LEAF NZDSF FIBRE

Corning® LEAF® Optical Fiber Product Information




In the race to satisfy the global demand for bandwidth, Corning® LEAF® optical fiber is the clear winner as the world's most widely deployed non-zero dispersion-shifted fiber (NZDSF). Optimized for long-haul and metro networks, LEAF fiber is a technically advanced product that provides high capacity, broad system flexibility, and superior performance. Additionally LEAF fiber is the industry leader in polarization mode dispersion (PMD) specifications and has the lowest attenuation of any NZDSF on the market today, enabling networks to evolve from the current 10G and 40G and 100G systems of the future.

Optical Specifications

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value (dB/km)
1383	≤ 0.4
1410	≤ 0.32
1450	≤ 0.26
1550	≤ 0.19
1625	≤ 0.21

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1525 – 1575	1550	0.02
1550 – 1625	1550	0.03

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550 & 1625	≤ 0.50
60	100	1550 & 1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1550	≤ 0.05

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1550	9.6 ± 0.4

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm·km)]
1530	2.0–5.5
1565	4.5–6.0
1625	5.8–11.2

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

*Complies with IEC 60794-3:2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

Standards Compliance

- ITU-T G.655 (Tables A, B, C, D)
- IEC Specifications 60793-2-50 Type B4
- TIA/EIA 492-EA00
- Telcordia's GR-20

How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department.
Ph: 1.607.248.2000 (U.S. and Canada)
+44.1244.525.320 (Europe)
Email: cofco@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.

P1107

ISSUED: JULY 2014
SUPERSEDES: JUNE 2014

TL9000/ISO 9001 CERTIFIED



Dimensional Specifications

Glass Geometry		Coating Geometry	
Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature	Coating Diameter	242 ± 5 μm
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μm	Coating-Cladding Concentricity	< 12 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μm		
Cladding Non-Circularity	≤ 0.7%		

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1550 nm and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	23°C ± 2°C	≤ 0.05
Heat Aging	85°C ± 2°C	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.69 GPa).*

*Higher proof test levels available

Length

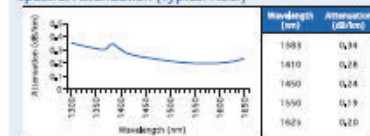
Fiber lengths available up to 25.2 km/spool.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1550 nm.
Effective Area (A _{eff})	1550 nm: 72 μm ²
Effective Group Index of Refraction (N _{eff})	1550 nm: 1.4693
Fatigue Resistance Parameter (Nd)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1550 nm: -81 dB 1625 nm: -82 dB
Chromatic Dispersion	1550 nm at 4 ps/(nm·km) 1625 nm at 10 ps/(nm·km)

Spectral Attenuation (Typical Fiber)



Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1565 \text{ nm}) - D(1595 \text{ nm})}{35} \right) \cdot (\lambda - 1565) + D(1565 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength up to 1565 nm

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1625 \text{ nm}) - D(1565 \text{ nm})}{60} \right) \cdot (\lambda - 1625) + D(1625 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength from 1565 nm to 1625 nm

Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

CORNING

Corning Incorporated
One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831 U.S.A.
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-325-320 (Europe)
Email: cornc@corning.com
www.corning.com/opticalfiber

Corning and LEAF are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, NY.

© 2014 Corning Incorporated. All Rights Reserved.