

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO, SIMULACIÓN Y PRUEBAS DE UN LABORATORIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS USANDO MATLAB COMMUNICATIONS SYSTEM TOOLBOX, SIMULINK Y OPTISYSTEM

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

GEOVANNA STEPHANYE HIDALGO MORETA

stefi_vk_1990@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ROBERTO HERRERA LARA

roberto.herrera.lara@gmail.com

CODIRECTORA: MSc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ

maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, mayo 2016

DECLARACIÓN

Yo, Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta, declaro 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.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta, bajo nuestra supervisión.

Ing. Roberto Carlos Herrera Lara
DIRECTOR DEL PROYECTO

MSc. María Soledad Jiménez
CODIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de probar mis habilidades en este reto, y haberlo culminado con éxito gracias a su inmensa bondad y sabiduría puesta en mí, sin Él no lo hubiese logrado jamás.

Agradezco infinitamente a mis padres, Giovani y María Eugenia, por su comprensión en mi ausencia, su apoyo incondicional en los momentos difíciles de esta prueba y por siempre tener una palabra de aliento o un abrazo enriquecedor para continuar adelante.

A mi hermano Francisco, quien es mi fuente de inspiración más grande para seguir luchando, gracias por el simple hecho de existir, formar parte de mi vida y de todo lo que se viene por delante.

A mis compañeros de clases, por sus consejos, sus ideas y su apoyo en este largo camino de formación y amistad.

Por último, doy gracias a la Escuela Politécnica Nacional y a su facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, por sus enseñanzas no solo en el aspecto profesional sino también en el personal, enseñanzas que pongo y pondré en práctica cada momento de mi vida.

Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios y a mis abuelitos, Lolita y Víctor Hugo. Su amor, su cariño su comprensión, su fuerza y su fe en mí, me motivaron a nunca desfallecer, a perseverar sin importar cuán difícil sea el camino y a continuar siempre viendo adelante.

Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xix
RESUMEN	xx
PRESENTACIÓN	xxii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN A MATLAB Y OPTISYSTEM	1
1.1 Introducción	1
1.2 Importancia de los laboratorios basados en herramientas computacionales	1
1.3 Importancia de las herramientas computacionales en el diseño de sistemas de comunicaciones ópticas.....	3
1.4 Matlab	4
1.4.1 Introducción a Matlab	4
1.4.2 Interfaz gráfica de Matlab	6
1.4.3 Interfaz gráfica de Simulink	7
1.4.4 Communication System toolbox	8
1.5 OptiSystem	10
1.5.1 Introducción a OptiSystem.....	10
1.5.2 Interfaz gráfica de OptiSystem.....	10
1.6 Práctica 1: Inducción a los simuladores.....	13
1.6.1 Objetivo de la práctica	13

1.6.2	Desarrollo de la práctica	13
1.6.2.1	Inducción al Communication System toolbox de Matlab	13
1.6.2.2	Inducción a OptiSystem	17
	Referencias del Capítulo I	21
CAPÍTULO II	22
CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	22
2.1	Introducción	22
2.2	Práctica 2: Parámetros de transmisión de la luz	23
2.2.1	Objetivo de la práctica	23
2.2.2	Marco teórico	23
2.2.2.1	Propagación de la luz en la fibra óptica	23
2.2.2.2	Parámetros de transmisión de la luz	25
2.2.3	Desarrollo de la práctica	28
2.2.3.1	Análisis de resultados	29
2.2.3.2	Aplicaciones de la práctica	30
2.2.4	Conclusiones y recomendaciones	31
2.3	Práctica 3: Modos de propagación	32
2.3.1	Objetivo de la práctica	32
2.3.2	Marco teórico	32
2.3.2.1	Fibras ópticas multimodo	32
2.3.2.2	Fibras ópticas monomodo	34
2.3.3	Desarrollo de la práctica	36
2.3.3.1	Interfaz gráfica para fibras multimodo	36
2.3.3.2	Interfaz gráfica para fibras monomodo	38
2.3.3.3	Análisis de resultados	40
2.3.3.4	Aplicaciones de la práctica	41
2.3.3.5	Posibles variaciones de la práctica	42

2.3.4	Conclusiones y recomendaciones	42
2.4	Práctica 4: Parámetros dinámicos.....	43
2.4.1	Objetivo de la práctica	43
2.4.2	Marco teórico	43
2.4.2.1	Atenuación	43
2.4.2.2	Dispersión	45
2.4.2.3	Efectos no lineales	47
2.4.3	Desarrollo de la práctica	48
2.4.3.1	Escenario para el análisis del efecto de atenuación en fibras multimodo.....	49
2.4.3.2	Escenario para el análisis de efecto de atenuación en fibras monomodo.....	50
2.4.3.3	Escenario para el análisis de la dispersión cromática en fibras ópticas.....	52
2.4.3.4	Escenario para el análisis de la automodulación de fase.....	54
2.4.3.5	Esquema para el análisis de la modulación de fase cruzada.....	55
2.4.3.6	Escenario para el análisis de la mezcla de cuatro ondas.....	56
2.4.3.7	Análisis de resultados	57
2.4.3.8	Aplicaciones de la práctica.....	63
2.4.3.9	Posibles variaciones de la práctica	63
2.4.4	Conclusiones y recomendaciones	64
	Referencias del Capítulo II.....	65
	CAPÍTULO III	66
	TRANSMISORES ÓPTICOS	66
3.1	Introducción	66
3.2	Práctica 5: Fuentes de emisión de luz	67
3.2.1	Objetivo de la práctica	67

3.2.2	Marco teórico	67
3.2.2.1	Parámetros de emisión de luz.....	67
3.2.2.2	Fuentes led	68
3.2.2.3	Fuentes láser	71
3.2.3	Desarrollo de la práctica	73
3.2.3.1	Esquemas para el análisis de fuentes led.....	74
3.2.3.2	Esquemas para el análisis de fuentes láser.....	78
3.2.3.3	Análisis de resultados	82
3.2.3.4	Aplicaciones de la práctica.....	83
3.2.3.5	Posibles variaciones de la práctica	84
3.2.4	Conclusiones y recomendaciones	84
3.3	Práctica 6: Modulación directa vs. Modulación externa	86
3.3.1	Objetivo de la práctica	86
3.3.2	Marco teórico.....	86
3.3.2.1	Modulación directa	88
3.3.2.2	Modulación externa.....	89
3.3.3	Desarrollo de la práctica	91
3.3.3.1	Escenario para el análisis de enlace con modulación directa	91
3.3.3.2	Escenario para el análisis de enlace con modulación externa ...	93
3.3.3.3	Análisis de resultados	95
3.3.3.4	Aplicaciones de la práctica.....	97
3.3.4	Conclusiones y recomendaciones	98
3.4	Práctica 7: Técnica de multiplexación-WDM.....	99
3.4.1	Objetivo de la práctica	99
3.4.2	Marco teórico.....	99
3.4.2.1	Multiplexación por división de onda	101
3.4.3	Desarrollo de la práctica	103

3.4.3.1	Multiplexación por división de onda	103
3.4.3.2	Análisis de resultados	106
3.4.3.3	Aplicaciones de la práctica	109
3.4.3.4	Posibles variaciones de la práctica	109
3.4.4	Conclusiones y recomendaciones	109
3.5	Práctica 8: Técnica de multiplexación-OTDM	111
3.5.1	Objetivo de la práctica	111
3.5.2	Marco teórico	111
3.5.3	Desarrollo de la práctica	113
3.5.3.1	Multiplexación por división de tiempo óptico	113
3.5.3.2	Análisis de resultados	116
3.5.3.3	Aplicaciones de la práctica	118
3.5.3.4	Posibles variaciones de la práctica	119
3.5.4	Conclusiones y recomendaciones	119
	Referencias del Capítulo III	120
	CAPÍTULO IV	122
	RECEPTORES ÓPTICOS	122
4.1	Introducción	122
4.2	Práctica 9: Detectores PIN y APD	123
4.2.1	Objetivo de la práctica	123
4.2.2	Marco teórico	123
4.2.2.1	Diagrama del ojo	123
4.2.2.2	Tasa de bit errado (BER)	125
4.2.2.3	Detectores ópticos	126
4.2.2.4	Detectores PIN	127
4.2.2.5	Detectores APD	129
4.2.3	Desarrollo de la práctica	130

4.2.3.1	Escenario para el análisis de un fotodetector pin.....	130
4.2.3.2	Escenario para el análisis de un fotodetector apd.....	132
4.2.3.3	Análisis de resultados	133
4.2.3.4	Aplicaciones de la práctica.....	135
4.2.3.5	Posibles variaciones de la práctica	135
4.2.4	Conclusiones y recomendaciones	136
4.3	Práctica 10: Performance de un receptor.....	137
4.3.1	Objetivo de la práctica	137
4.3.2	Marco teórico.....	137
4.3.3	Desarrollo de la práctica	141
4.3.3.1	Escenario con fotodetector PIN.....	142
4.3.3.2	Escenario con preamplificador	144
4.3.3.3	Escenario con fotodetector APD	145
4.3.3.4	Análisis de resultados	146
4.3.3.5	Aplicaciones de la práctica.....	148
4.3.3.6	Posibles variaciones de la práctica	149
4.3.4	Conclusiones y recomendaciones	149
4.4	Práctica 11: Diseño de un sistema de comunicaciones ópticas.....	150
4.4.1	Objetivo de la práctica	150
4.4.2	Marco teórico.....	150
4.4.2.1	Capacidad de transmisión.....	150
4.4.2.2	Presupuesto de potencia	151
4.4.2.3	Calidad del sistema de comunicaciones ópticas.....	152
4.4.3	Desarrollo de la práctica	154
4.4.3.1	Selección de los componentes del sistema.....	154
4.4.3.2	Cálculo del balance de tiempos del sistema	155
4.4.3.3	Cálculo del presupuesto de potencia, diseño inicial.....	156

4.4.3.4	Cálculo del presupuesto de potencia, rediseño del sistema.....	158
4.4.3.5	Análisis de resultados	160
4.4.3.6	Aplicaciones de la práctica	163
4.4.3.7	Posibles variaciones de la práctica	163
4.4.4	Conclusiones y recomendaciones	163
4.5	Práctica 12: Sistema de comunicaciones ópticas con modulación QAM digital.....	165
4.5.1	Objetivo de la práctica	165
4.5.2	Marco teórico	165
4.5.3	Desarrollo de la práctica	167
4.5.3.1	Escenario de un sistema con modulación QAM.....	167
4.5.3.2	Análisis de resultados	170
4.5.3.3	Aplicaciones de la práctica.....	172
4.5.4	Conclusiones y recomendaciones	172
	Referencia del Capítulo IV	173
	CAPÍTULO V	175
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	175
5.1	Conclusiones	176
5.2	Recomendaciones	178
	Anexos	180

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Interfaz gráfica de Matlab.....	6
Figura 1.2 Interfaz gráfica de Simulink.....	7
Figura 1.3 Communications System Toolbox.....	8
Figura 1.4 Componentes básicos de Simulink	8
Figura 1.5 Interfaz gráfica de OptiSystem	11
Figura 1.6 Layout de OptiSystem	11
Figura 1.7 Herramienta de búsqueda de OptiSystem	12
Figura 1.8 Componentes básicos de OptiSystem	12
Figura 1.9 Bloque de simulación del oscilador de diente de sierra.....	14
Figura 1.10 Bloque de simulación de señal modulante	14
Figura 1.11 Combinador y comparador del modulador PWM.....	15
Figura 1.12 Esquema de un modulador por ancho de pulsos PWM	15
Figura 1.13 Oscilador para el esquema de modulación	16
Figura 1.14 PWM al 50% de ciclo de trabajo.....	16
Figura 1.15 PWM al 25% de ciclo de trabajo.....	17
Figura 1.16 Modulador PWM a) 0% ciclo de trabajo b) 100% ciclo de trabajo.....	17
Figura 1.17 Esquema de un transmisor	18
Figura 1.18 Esquema de un canal de comunicaciones	18
Figura 1.19 Parámetros del componente Optical Fiber	19
Figura 1.20 Esquema de un receptor	19
Figura 1.21 Esquema de un sistema de comunicaciones ópticas básico.....	20
Figura 1.22 Pantalla adicional para ejecutar la simulación.....	20
Figura 1.23 Presentación de resultados a la salida del transmisor	21
Figura 1.24 Presentación de resultados a la salida del enlace.....	21

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Espectro óptico	23
Figura 2.2 Estructura básica de la fibra óptica	24
Figura 2.3 Reflexión total	25

Figura 2.4 Efecto de refracción	26
Figura 2.5 Ángulo crítico	26
Figura 2.6 Ángulo de aceptación.....	27
Figura 2.7 Fibra óptica plástico-plástico	28
Figura 2.8 Fibra óptica vidrio-vidrio	29
Figura 2.9 Fibra óptica vidrio-plástico.....	29
Figura 2.10 Múltiples modos de propagación en el núcleo	32
Figura 2.11 Fibra multimodo de índice escalonado.....	33
Figura 2.12 Fibra multimodo de índice gradual	34
Figura 2.13 $M=f(dn)$ para 850nm para una fibra multimodo de vidrio.....	37
Figura 2.14 $M=f(dn)$ para 850nm para una fibra multimodo de plástico	37
Figura 2.15 $M=f(dn)$ para 1330nm para una fibra multimodo de vidrio.....	37
Figura 2.16 $M=f(dn)$ para 1550nm para una fibra multimodo de vidrio.....	37
Figura 2.17 Parámetros correctos para una fibra monomodo a 1330 [nm]	38
Figura 2.18 Longitud de onda menor a la longitud de onda de corte	39
Figura 2.19 Diámetro del núcleo mayor al diámetro máximo	39
Figura 2.20 Parámetros correctos para una fibra monomodo a 1550 [nm]	40
Figura 2.21 Atenuación vs. Longitud de onda	44
Figura 2.22 Anchura espectral	46
Figura 2.23 Dispersión cromática.....	46
Figura 2.24 Atenuación en fibras multimodo	49
Figura 2.25 Espectro a la salida de la fuente	50
Figura 2.26 Espectro a la salida del enlace.....	50
Figura 2.27 Atenuación en fibras monomodo.....	51
Figura 2.28 Espectro a la salida de la fuente	51
Figura 2.29 Espectro a la salida del enlace.....	51
Figura 2.30 Esquema de un enlace óptico con dispersión	52
Figura 2.31 Señal óptica a la salida del transmisor.....	53
Figura 2.32 Señal a la salida de la fibra	53
Figura 2.33 Enlace óptico con fibra compensadora de dispersión	53
Figura 2.34 Señal a la salida de la fibra compensadora.....	54
Figura 2.35 Automodulación de fase.....	54
Figura 2.36 Ensanchamiento de pulso por efecto SPM	55

Figura 2.37 Modulación de fase cruzada	55
Figura 2.38 Ensanchamiento de pulsos en canal WDM.....	56
Figura 2.39 Mezcla de cuatro ondas	56
Figura 2.40 Generación de espectros de potencia no deseados	57
Figura 2.41 SPM al aumentar la distancia.....	62
Figura 2.42 XPM al aumentar la distancia.....	62

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Emisión de ondas de luz en un diodo led.....	68
Figura 3.2 Potencia óptica vs corriente eléctrica	72
Figura 3.3 Bloques de simulación de una fuente led.....	74
Figura 3.4 Parámetros del bloque Gain.....	75
Figura 3.5 Parámetros del bloque TransferFcn	75
Figura 3.6 Esquema de una señal eléctrica ingresando a una fuente led	76
Figura 3.7 Parámetros del bloque led	76
Figura 3.8 Representación gráfica de los resultados de la fuente led	77
Figura 3.9 Fuente óptica led.....	77
Figura 3.10 Espectro óptico de una fuente led	78
Figura 3.11 Bloques de simulación de una fuente láser	78
Figura 3.12 Parámetros del bloque Gain.....	79
Figura 3.13 Parámetros del bloque TransferFcn	79
Figura 3.14 Esquema de una señal eléctrica ingresando a una fuente láser	80
Figura 3.15 Parámetros del bloque láser	80
Figura 3.16 Representación gráfica de los resultados de la fuente láser	81
Figura 3.17 Fuente óptica láser.....	81
Figura 3.18 Espectro óptico de una fuente láser	81
Figura 3.19 Espectro óptico de una fuente led a 100 [Gbps]	83
Figura 3.20 Espectro óptico de una fuente láser a 100 [Gbps].....	83
Figura 3.21 Estructura de un transmisor óptico.....	87
Figura 3.22 Modulación directa	88
Figura 3.23 Modulación externa	89
Figura 3.24 Interferómetro Mach Zehnder.....	90
Figura 3.25 Esquema de un transmisor con modulación directa.....	92

Figura 3.26 Señal eléctrica a la entrada de la fuente	92
Figura 3.27 Señal con modulación directa	92
Figura 3.28 Señal recibida por el detector PIN.....	93
Figura 3.29 Esquema de un transmisor con modulación externa Mach-Zenhder	94
Figura 3.30 Señal a la entrada de la fuente	94
Figura 3.31 Señal con modulación externa	94
Figura 3.32 Señal recibida por el detector PIN.....	95
Figura 3.33 Espectro óptico con modulación directa.....	96
Figura 3.34 Espectro óptico con modulación externa.....	96
Figura 3.35 Modulación directa a 10 [Gbps].....	97
Figura 3.36 Modulación directa con 0 [dBm] de potencia.....	97
Figura 3.37 Ortogonalidad de portadoras.....	100
Figura 3.38 Diagrama de un sistema de trasmisión con WDM.....	101
Figura 3.39 Esquema de un sistema óptico con WDM.....	104
Figura 3.40 Espectro óptico del canal 1	104
Figura 3.41 Espectro óptico del canal 8	104
Figura 3.42 Espectro óptico a la salida del multiplexor	105
Figura 3.43 Espectro óptico a la entrada del demultiplexor.....	105
Figura 3.44 Espectro óptico del canal 1 a la salida del demultiplexor	106
Figura 3.45 Espectro óptico del canal 8 a la salida del demultiplexor	106
Figura 3.46 Secuencia de bits enviada por el canal 1	107
Figura 3.47 Secuencia de bits recibida para el canal 1	107
Figura 3.48 Ausencia del canal 8	108
Figura 3.49 Nuevos espectros no deseados	108
Figura 3.50 Confusión del demultiplexor	108
Figura 3.51 Señal recibida en el canal 1 y 8.....	108
Figura 3.52 Diagrama de un sistema de 4 canales con OTDM.....	112
Figura 3.53 Esquema del transmisor y secuencia de bits para el canal 2.....	113
Figura 3.54 Esquema del demultiplexor OTDM.....	114
Figura 3.55 Esquema de un sistema de 4 canales usando OTDM	115
Figura 3.56 Espectro óptico de un sistema con OTDM	115
Figura 3.57 Combinación de los 4 canales en el tiempo óptico.....	115
Figura 3.58 Secuencia a transmitirse del canal 2.....	116

Figura 3.59 Secuencia demultiplexada del canal 2	116
Figura 3.60 Recuperación errónea del canal 2.....	117
Figura 3.61 Combinación de 4 canales con codificador NRZ.....	118
Figura 3.62 Secuencia recuperada por el demultiplexor para el canal 2.....	118

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Parámetros del pulso	124
Figura 4.2 Diagrama del ojo	125
Figura 4.3 Estructura de un detector PIN	128
Figura 4.4 Estructura de un detector APD.....	129
Figura 4.5 Esquema de un sistema óptico con detector PIN.....	131
Figura 4.6 Diagrama del ojo del detector PIN.....	131
Figura 4.7 Esquema de un sistema óptico con detecto APD	132
Figura 4.8 Diagrama del ojo del detector APD	133
Figura 4.9 Señal eléctrica a transmitirse	134
Figura 4.10 Señal a la salida del detector PIN	134
Figura 4.11 Señal a la salida del detector APD.....	134
Figura 4.12 Responsividad vs. Longitud de onda.....	138
Figura 4.13 Estructura de un receptor óptico para una seña digital	140
Figura 4.14 Esquema de un enlace óptico con receptor PIN	142
Figura 4.15 Medidores de potencia óptica	142
Figura 4.16 Diagrama del ojo y BER de un enlace óptico con receptor PIN	143
Figura 4.17 Diagrama del ojo y BER de un enlace óptico con ruido	143
Figura 4.18 Preamplificador en el enlace óptico.....	144
Figura 4.19 Diagrama del ojo para enlace con preamplificador	145
Figura 4.20 Esquema de un enlace óptico con receptor APD.....	145
Figura 4.21 Diagrama del ojo para enlace con receptor APD	146
Figura 4.22 Señal eléctrica a transmitirse	147
Figura 4.23 Recepción con detector PIN.....	147
Figura 4.24 Recepción con preamplificador	148
Figura 4.25 Recepción con APD	148
Figura 4.27 Diagrama de bloques de un enlace óptico punto a punto	150
Figura 4.26 Esquema de un enlace óptico punto a punto	157

Figura 4.27 Resultados del diagrama del ojo y del BER	157
Figura 4.28 Analizador de potencia óptica	158
Figura 4.29 Enlace con amplificadores intermedios	158
Figura 4.30 Diagrama del ojo y del BER corregidos.....	159
Figura 4.31 Analizador de potencia óptica	159
Figura 4.32 Diagrama del ojo y del BER con sobrecarga.....	160
Figura 4.33 Señal eléctrica a transmitirse	162
Figura 4.34 Recepción con $BER=1.80 \times 10^{-06}$	162
Figura 4.35 Recepción con $BER=8.80 \times 10^{-70}$	162
Figura 4.36 Recepción con $BER=3.34 \times 10^{-05}$	162
Figura 4.37 Diagrama de constelación de un sistema 16-QAM	166
Figura 4.38 Esquema de un sistema óptico con modulación 16-QAM	168
Figura 4.39 Espectro óptico de potencia a la salida del transmisor.....	169
Figura 4.40 Analizador de potencia óptica	169
Figura 4.41 Diagrama de constelación para un sistema 16-QAM	170
Figura 4.42 Espectro óptico de potencia para un sistema con ruido	170
Figura 4.43 Analizador de potencias para un sistema con incremento de ruido óptico.....	171
Figura 4.44 Diagrama de constelación para un sistema con ruido.....	171

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Tipo de licencia para activar Matlab	5
--	---

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Resumen de resultados de parámetros de transmisión	30
Tabla 2.2 Fibras multimodo vs Fibras monomodo.....	35
Tabla 2.3 Resultados de la atenuación en fibras multimodo	50
Tabla 2.4 Resultados de la atenuación en fibras monomodo.....	51

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Características de las fuentes led.....	69
Tabla 3.2 Parámetros para ecuaciones del diodo led	70
Tabla 3.3 Características de las fuentes láser.....	71
Tabla 3.4 Parámetros para ecuaciones del diodo láser	73
Tabla 3.5 Led vs. Láser.....	83

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Características de un fotodetector Si y Ge	127
Tabla 4.2 Detector PIN vs Detector APD	133
Tabla 4.3 Parámetros de los diferentes tipos de detectores	139
Tabla 4.4 Sensibilidad de los diferentes tipos de detectores.....	139
Tabla 4.5 Parámetros del detector PIN	142
Tabla 4.6 Parámetros del detector ADP.....	145
Tabla 4.7 Comparación de resultados para un enlace de 150 [km]	147
Tabla 4.8 Valores típicos de OSNR según la capacidad del sistema.....	153

RESUMEN

El presente proyecto aborda el diseño de material didáctico orientado a la implementación de un laboratorio de comunicaciones ópticas basado en el uso de herramientas computacionales de simulación. Las herramientas computacionales a usar son *Matlab* en combinación con el *Communication System Toolbox* y el paquete de simulación *OptiSystem*.

Los laboratorios son parte esencial en la formación de los estudiantes de ingeniería siendo por si solos la vía por la que ellos asimilan, entienden y ponen en práctica los conocimientos recibidos en clase de manera objetiva al resolver los retos y tareas designadas. Sin embargo, en el ámbito de las comunicaciones, los altos costos de los equipos limitan que se disponga de laboratorios completos que permitan experimentar en escenarios realistas y prácticos. Estas limitaciones se ven agravadas al momento de contar con laboratorios que no contribuyan a la formación de los estudiantes en ingeniería, en donde las prácticas de laboratorio se limiten a realizar tareas que no tengan directa aplicación en problemas reales.

Hoy en día el uso de herramientas computacionales de simulación es la piedra angular en los sistemas de comunicaciones ópticas. Usando herramientas de software se pueden generar experiencias de simulación muy enriquecedoras mediante las cuales los ingenieros de diseño pueden optimizar el rendimiento del sistema implementado, mejorando así el costo y eficiencia del servicio. Desde el punto de vista pedagógico este proyecto de titulación busca ser una alternativa interesante a la hora de acompañar la cátedra de sistemas de comunicaciones ópticas con un laboratorio, cuyo costo de implementación sea asequible.

Esta propuesta se ve respaldada por las prácticas aquí desarrolladas, donde el principal objetivo fue acercarse a las necesidades del ingeniero en su vida profesional, reforzando conocimientos teóricos con la definición de retos de diseño, los cuales sean simulados y sobre los cuales se interpreten resultados en situaciones optimizadas, subdimensionadas y sobredimensionadas. De este modo el estudiante de ingeniería agrega como complemento a su formación una serie de conocimientos prácticos orientados a su vida profesional.

El primer capítulo de este proyecto presenta una descripción de las herramientas computacionales que se van a utilizar, *Matlab* y *OptiSystem*, en el cual se realiza una práctica introductoria para familiarizarse con los simuladores y sus librerías.

El segundo capítulo está orientado al medio de transmisión de información de los sistemas de comunicaciones ópticas, la fibra óptica. En este capítulo, mediante diferentes prácticas, se analiza los principales parámetros de transmisión, los índices de refracción gradual y escalonado, y los parámetros dinámicos como la atenuación, la dispersión y los efectos no lineales

El tercer capítulo, está enfocado en el estudio de los transmisores ópticos y sus componentes, realizando prácticas que permitan el análisis de las diferentes fuentes de luz, las técnicas de modulación y las técnicas de multiplexación utilizadas en sistemas de comunicaciones ópticas para la transmisión de luz.

El cuarto capítulo se orienta al estudio de los receptores ópticos, en el cual se realizan prácticas para comprender y analizar el comportamiento de los detectores PIN y APD mediante el análisis del diagrama del ojo, los tiempos de respuesta, el rango dinámico y la relación señal a ruido. En este capítulo, se presenta el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto como aplicación de todos los temas presentados anteriormente.

El quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas de cada una de las prácticas a lo largo de este proyecto de titulación.

Finalmente, se incluyen una sección de Anexos en los cuales se incluyen tablas de índices de refracción y coeficientes de dispersión utilizados en las prácticas. Además, se incluye una guía de prácticas utilizando *OptiSystem*. Esta guía es proporcionada por *Optiwave* para hacer referencia y ampliar o variar las prácticas propuestas en este proyecto de titulación.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto de titulación ha sido desarrollado como un compendio de prácticas de sistemas de comunicaciones ópticas orientadas al uso de herramientas computacionales dedicadas. Este listado de prácticas ha sido concebido teniendo en cuenta el pensum de la materia de Comunicaciones Ópticas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional en combinación con pensums de universidades clase A del país. Los objetivos a cubrir con esta serie de prácticas han sido diseñados siguiendo los lineamientos de *Criteria for Accrediting Engineering technology Programs* de la *Accreditation Board for Engineering and Technology* (ABET).

Estos criterios buscan encaminar las habilidades adquiridas del ingeniero de Telecomunicaciones en el análisis, diseño e implementación de sistemas de comunicaciones y redes de datos. La vía propuesta para alcanzar estos objetivos es la experimentación intensiva de escenarios de simulación a través de laboratorios basados en herramientas computacionales y paquetes de software para la simulación de sistemas de comunicaciones ópticas.

Cada práctica propuesta aborda un escenario realista enfocado en las posibles situaciones a afrontar en el ámbito profesional del estudiante de ingeniería, permitiendo el análisis de los componentes de un sistema de comunicaciones, su interacción, la influencia de parámetros de diseño y las técnicas de optimización del enlace de comunicaciones basado en fibra óptica, transmisores ópticos y finalmente receptores ópticos.

Las prácticas tienen su correspondiente análisis de resultados y conclusiones que permiten la comprensión del comportamiento de los componentes del enlace óptico. Este análisis se realiza mediante gráficos y resultados matemáticos obtenidos del simulador en comparación con los resultados teóricos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A MATLAB Y OPTISYSTEM

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la importancia del uso de laboratorios en la formación de ingenieros, además, la opción de la utilización de herramientas computacionales para fines prácticos que permitan a los estudiantes de ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, la aplicación de los conocimientos de comunicaciones ópticas en escenarios de diseño que sean aplicables en la vida profesional, con el fin de complementar lo aprendido en clases con lo práctico.

Este capítulo engloba las características, funciones y aplicaciones orientadas a comunicaciones ópticas de las herramientas computacionales, *Matlab* y *OptiSystem*, que se harán uso a lo largo de este proyecto de titulación. Adicionalmente, se presenta una práctica introductoria que permite la interacción entre el estudiante de ingeniería y la interfaz gráfica de las herramientas computacionales. Además, se realiza un escenario en *Matlab* utilizando *Simulink* y un escenario en *OptiSystem* con el fin de familiarizarse con los componentes y bloques que contienen las bibliotecas, tanto para el diseño como para la visualización y análisis de resultados de las prácticas.

1.2 IMPORTANCIA DE LOS LABORATORIOS BASADOS EN HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

El diseño e implementación de laboratorios exigen que se aborden de manera consciente una serie de objetivos relativos a los fines del laboratorio, como mantenerlo activo y funcional, cómo actualizarlo y lo más importante, de donde se financiarán todos estos requerimientos. Los laboratorios como tal, significan una inversión continua y mantenida en el tiempo, sobre la cual las universidades deben encontrar la forma en la que sea económicamente asequible y se pueda autofinanciar.

En Ecuador, cumplir con todos estos requerimientos en el diseño e implementación de laboratorios de comunicaciones ópticas no resulta tarea sencilla. Primeramente, hay que tener en cuenta que Ecuador como país no produce tecnología para estas aplicaciones, por lo tanto, tener un laboratorio costoso que no pueda producir réditos en proyectos con el medio externo no resulta rentable.

La primera respuesta sería abordar los conceptos y experiencias de diseño en laboratorios tradicionales de ingeniería, en el caso de comunicaciones ópticas, con generadores de señales, instrumentación de mediciones y diagnóstico del canal de comunicaciones e infraestructura necesaria para que las experiencias a desarrollar sean lo más cercanas a la realidad (velocidades superiores a los gigabytes) que enfrentará el estudiante de ingeniería en su vida profesional [2]. Sin embargo, esto implica un costo muy alto (varios cientos de miles de dólares) para poder mantener una infraestructura que no podrá autosustentarse.

Los laboratorios de comunicaciones ópticas al igual que cualquier laboratorio exigirá de manera continua la reposición de instrumental quemado, actualización de la instrumentación de mediciones, entre otros gastos. Una alternativa a todas estas exigencias es trabajar con herramientas computacionales para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas.

Los laboratorios basados en software tienen entre sus principales ventajas el factor económico. Si bien sus detractores aducen que este tipo de laboratorios cuentan con limitaciones en cuanto a los resultados obtenidos con laboratorios basados en hardware, en la actualidad, los avances agigantados en recursos computacionales y velocidad de procesamiento han permitido que las versatilidades, funcionalidades y capacidades de simulación de las herramientas de software vayan un paso más allá, siendo capaces de generar experiencias de laboratorio similares a las de los laboratorios de hardware, sin la necesidad de una elevada inversión económica.

Los ingenieros aprenden de manera más efectiva cuando realizan proyectos por sí mismos, cuando experimentan o presencian físicamente los efectos de un fenómeno, cuando se equivocan y corrigen sobre la marcha su error, de esta

manera existe más atracción, más motivación a realizar prácticas y estudios afrontando retos de diseño y aplicando de manera efectiva la teoría aprendida [5].

Este tipo de actividades se convierten en cotidianas del día a día en un laboratorio, teniendo en cuenta los costos a enfrentar en las equivocaciones y errores, los equipos echados a perder y los tiempos de reposición ya sea de elementos consumibles de laboratorio o instrumentación. El hacer este tipo de tareas en software resulta sumamente atractivo y económicamente conveniente, ya que en el mercado la licencia de un paquete de software no sobrepasa los diez mil dólares, precio que puede ser mejorado si lo adquiere una universidad, este valor frente a los cientos de miles de dólares que puede llegar a costar un laboratorio en hardware resulta por demás conveniente.

Desde este punto de vista, la alternativa de laboratorios basados en herramientas computacionales resultan ser una de las mejores opciones para países como Ecuador, permitiendo llevar a cabo una formación completa en las carreras de ingeniería, con la posibilidad de que el estudiante aprenda de manera intensiva a reconocer los posibles problemas y soluciones con experiencias de laboratorio, prácticas y diseños simulados usando software.

Finalmente, hay que recalcar que el contenido presentado en este proyecto de titulación tiene un carácter orientativo, como una propuesta que de ser tenida en cuenta sirva de guía para el diseño, implementación y puesta en marcha de un laboratorio de Comunicaciones Ópticas en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

1.3 IMPORTANCIA DE LAS HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

En la actualidad los sistemas de comunicaciones han alcanzado un nivel de complejidad muy elevado donde la tecnología que interactúa en el procesamiento y transmisión de datos no puede ser abordada de manera directa en hardware. Las etapas de diseño de sistemas de comunicaciones completos requieren necesariamente de la simulación y optimización en software antes de que los modelos diseñados pasen al hardware.

Estas etapas son conocidas como *Software-in-the-Loop* o de ser el caso *Model-in-the-Loop* y finalmente, pasadas estas etapas se pueden realizar la etapa de *Hardware-in-the-Loop*. La idea principal de estas etapas en la implementación de sistemas de comunicaciones electrónicas es mediante una serie de pruebas intensivas, garantizar los parámetros de funcionamiento del dispositivo diseñado, corregir posibles errores en el diseño, optimizarlo y mejorarlo.

La asimilación adecuada de los fundamentos de los sistemas de comunicaciones ópticas requiere por tanto una combinación de conocimientos teóricos con el complemento de herramientas de simulación de software. En la actualidad, todos los sistemas complejos de ingeniería requieren el apoyo de las herramientas *Computer Aided Engineering* para poder experimentar de manera fiable sin elevar los costos de producción. Este tipo de aplicabilidad se generaliza para todas las ingenierías teniendo en cuenta el concepto de presentar un producto final óptimo, ya sea un prototipo, diseño o estudio.

Desde el punto de vista de la enseñanza de sistemas de comunicaciones ópticas, los simuladores representan una opción sumamente importante, debido a su carácter altamente interactivo con el usuario, permitiéndole en este caso, a los estudiantes asimilar los conceptos por prueba y error, o a su vez siguiendo el paradigma de aprender haciendo.

1.4 MATLAB

1.4.1 INTRODUCCIÓN A MATLAB

Matlab es una de las herramientas computacionales comerciales más utilizadas que ofrece *The Mathworks* para ingeniería. *Matlab* al ser un software pagado, requiere de una licencia de activación, sin embargo, por ser una herramienta necesaria para la formación de ingenieros, la mayoría de universidades mantienen un convenio con *The Mathworks* para utilizar esta herramienta, su simulador y todos sus *Toolbox* en sus laboratorios virtuales.

A continuación la *Tabla 1.1* presenta los diferentes tipos de activación de licencias que utiliza *The Mathworks* para *Matlab*:

Tipo de activación	Descripción
<i>Standalone Named User</i>	El software se instala en los computadores y no utiliza recursos de red. Debido a que esta es una opción por usuario, el privilegio de derecho de uso es asignado por una organización a una persona específica. El nombre de usuario designado podrá instalar y utilizar el software en un número determinado de equipos, siempre y cuando el usuario sea la única persona que utilice el software.
<i>Designated Computer</i>	El software se instala en un equipo en particular y no utiliza recursos de red. Los privilegios de usuario están disponibles para uso no simultáneo.
<i>Network Named User</i>	El software se instala en un lugar céntrico de la red. Se mantiene una lista de usuarios con nombre que están autorizados para operar el software. Este tipo de instalación tiene la ventaja de facilitar la gestión central del software.
<i>Network Concurrent User</i>	Cuenta el número de usuarios simultáneos, si el número de usuarios simultáneos supera el número de licencias compradas, el uso se le niega a cualquier usuario que trate de iniciar el software.

Tabla 1.1 Tipo de licencia para activar Matlab [6]

La ventaja de usar *Matlab* radica en generar *scripts* que pueden ser utilizados en su entorno de simulación, *Simulink*. Además, utiliza un lenguaje de programación de alto nivel generando ficheros para realizar bucles, condicionales y bifurcaciones que son útiles para cualquier tipo de programa. Entre las aplicaciones más relevantes de *Matlab* y *Simulink* están [1]:

- Generación de *scripts* en lenguaje de alto nivel.
- Generación de interfaces gráficas de usuario.
- Generación de *plots* en 2D y 3D para análisis gráfico.
- Análisis de la tasa de bit errado (BER).
- Análisis de las diferentes técnicas de modulación y demodulación.
- Generación de diagramas de ojo y constelaciones.

Las últimas versiones de *Matlab* permiten la co-simulación con otras herramientas computacionales como por ejemplo *OptiSystem* utilizando los *scripts* o bloques funcionales de *Matlab* en diseños realizados y simulados en el entorno de *OptiSystem*.

1.4.2 INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB

Matlab presenta una interfaz gráfica interactiva y amigable permitiendo al usuario distribuirla de la mejor manera posible. Por defecto se despliega cuatro ventanas principales como muestra la *Figura 1.1*:

- **Ventana de comandos:** en la cual se ejecutan las órdenes y se presentan los resultados, además permite visualizar mensajes de advertencia o de error al momento de compilar los ficheros.
- **Ventana de historial:** guarda todos los comandos ejecutados en la ventana de comandos en el orden según se vayan ejecutando.
- **Ventana de directorio actual:** muestra el directorio en el cual están los ficheros que se están ejecutando.
- **Ventana de trabajo o *workspace*:** almacena las variables definidas y sus valores, los cuales pueden ser modificables en esta ventana.

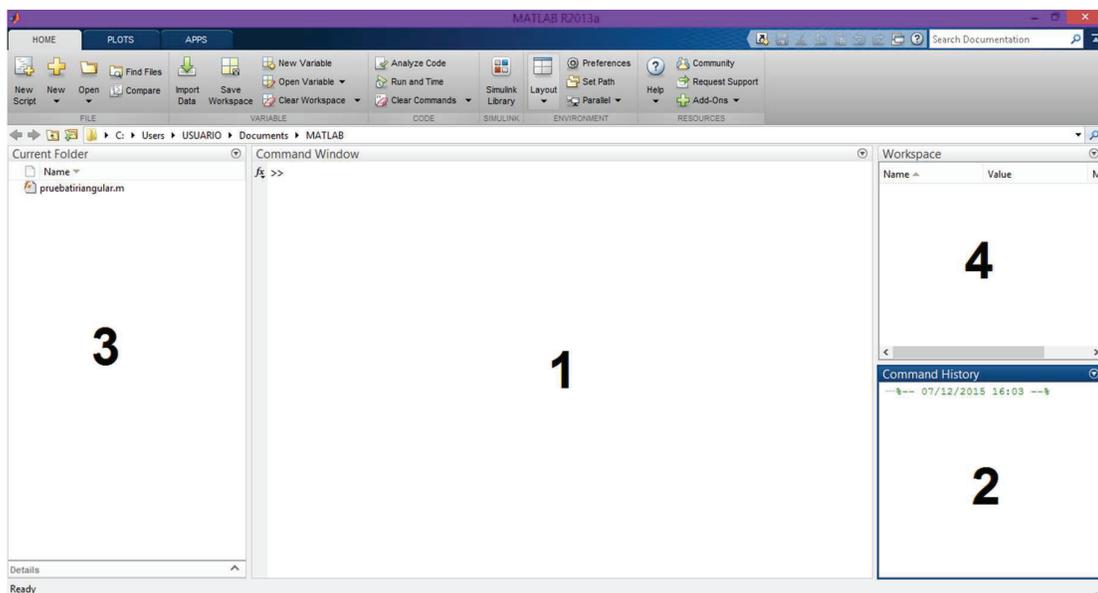


Figura 1.1 Interfaz gráfica de Matlab

Adicionalmente, *Matlab* presenta una herramienta de ayuda, a la cual se puede ingresar por medio del acceso directo  o tecleando el comando *help* en la ventana de comandos. Esta herramienta es muy útil ya que contiene ejemplos prácticos para entender mejor los comandos y las diferentes funciones de *Matlab*.

1.4.3 INTERFAZ GRÁFICA DE SIMULINK

Simulink es la herramienta de simulación que presenta *The MathWork* dentro del paquete de *Matlab*. Es una interfaz gráfica, en la cual se tiene por separado las diferentes librerías, donde se encuentran los componentes de simulación.

Entre los componentes que *Simulink* contiene, se puede encontrar bloques para realizar la simulación, medición, visualización y monitoreo de enlaces ópticos mediante el uso del *Communications System Toolbox*. La *Figura 1.2* muestra las librerías que se encuentran en *Simulink* y su entorno de trabajo.

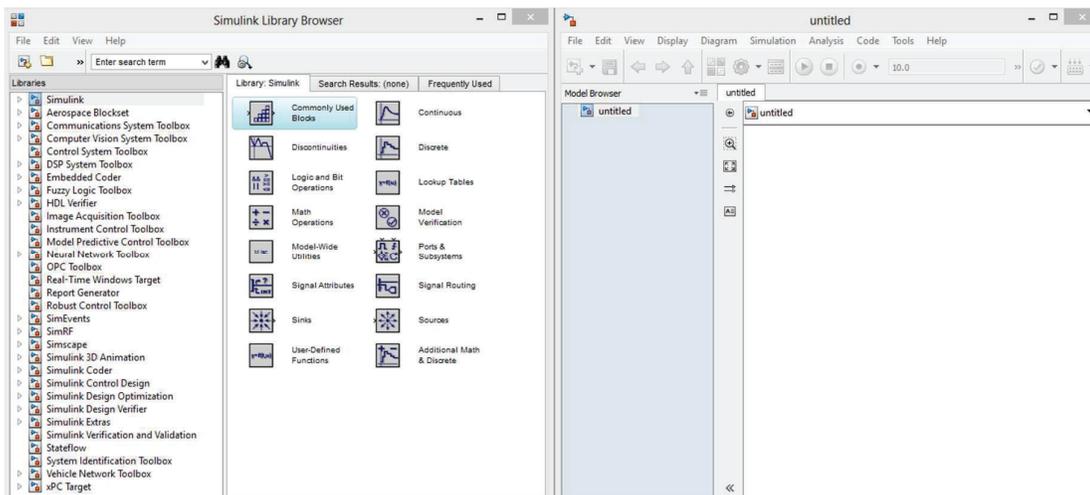


Figura 1.2 Interfaz gráfica de Simulink

Entre las características más importantes de *Simulink* están:

- Editor gráfico para crear y gestionar diagramas de bloques jerárquicos.
- Bloques predefinidos para modelar sistemas continuos y discretos.
- Motor de simulación con *solvers* de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- *Scopes* y *data displays* para ver los resultados de la simulación.
- Bloque *Matlab Function* para importar algoritmos de *Matlab* a *Simulink*.

Para acceder a *Simulink*, en la interfaz de *Matlab* se encuentra un acceso directo, se debe dar *click* en el ícono , o también se puede acceder mediante la ejecución del comando *simulink* en la ventana de comandos. Dentro de las librerías de *Simulink* se presenta la librería de *Communications System Toolbox* la cual proporciona los componentes necesarios para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones presentes en la *Figura 1.3*:

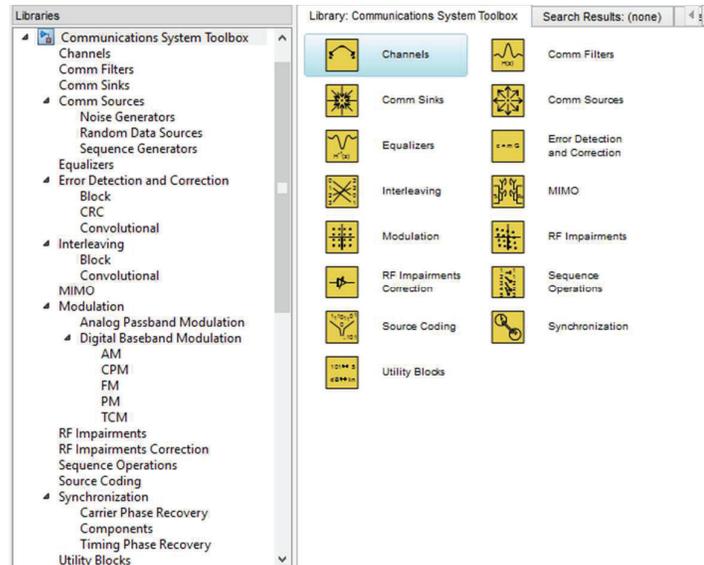


Figura 1.3 Communications System Toolbox

Simulink está compuesto por una infinidad de componentes, cada uno de los cuales puede ser modificado, tanto sus variables como sus parámetros constantes. Inclusive se tienen bloques que permiten la interacción con *scripts* realizados tanto en *Matlab*. La *Figura 1.4* muestra los componentes básicos en *Simulink* para comunicaciones.

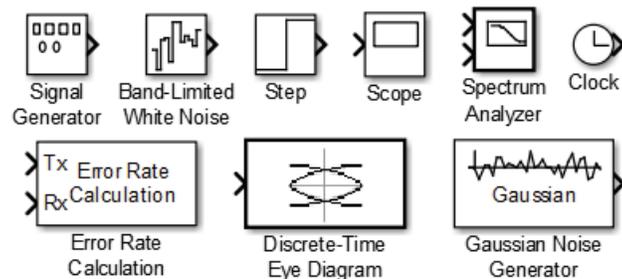


Figura 1.4 Componentes básicos de Simulink

1.4.4 COMMUNICATION SYSTEM TOOLBOX

Communication Systems Toolbox es una librería que permite el análisis, diseño y verificación de un sistema de comunicaciones en *Matlab* y *Simulink*. Entre sus principales características se encuentran las siguientes [4]:

- Herramientas de medición y análisis, incluyendo analizador de tasa de bit errado (BER), diagramas de constelación y diagramas del ojo.

- Algoritmos para el diseño de la capa física de sistemas de comunicaciones, incluyendo codificación de canal, modulación, multiplexación por división frecuencia ortogonal (OFDM), técnicas con múltiples entradas múltiples salidas (MIMO), ecualización y sincronización.
- Modelos de canal incluyendo ruido blanco Gaussiano aditivo (AWGN), desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh, desvanecimiento de Rice, desvanecimiento multitrayecto MIMO.
- Modelos de factores de deterioro de RF, incluyendo no linealidades, ruido de fase, ruido térmico, desplazamientos de fase y frecuencia.

Communication System Toolbox proporciona un amplio conjunto de algoritmos para los componentes de transmisión y recepción de un sistema, los cuales evitan la necesidad de crear bloques de construcción a partir de cero. Estos algoritmos proporcionan parámetros bien definidos, los cuales pueden modificarse de acuerdo a los requerimientos del esquema. Los algoritmos incluyen [4]:

- Múltiples entradas múltiples salidas (MIMO)
 - Diversidad de transmisión, codificación de bloque espacio-tiempo.
 - Multiplexación espacial y diversidad de recepción.
 - Receptores MIMO incluyendo decodificador por esfera.
- Técnicas multiportadora
 - Modulador OFDM y demodulador OFDM.
 - Ecualización de canal.
- Codificación de canal, detección y corrección de errores
 - Convolutiva (APP, codificador convolutiva, decodificador Viterbi, codificador turbo, decodificador turbo)
 - Bloque de codificador (Reed-Solomon, BCH, LDPC)
 - Comprobación de redundancia cíclica (CRC, CRC-N)
- Modulación
 - Digital: FSK, PSK, OQPSK, DPSK, MSK, PAM, QAM, TCM, PCM.
 - Analógica: AM, FM, Broadcast FM, PM, SSB, and DSBSC.
- Generadores de señal y operadores
 - Generador de datos binarios (Barker, Gold, Hadamard, Kasami)
 - Dispositivos de entrelazado y codificadores.

1.5 OPTISYSTEM

1.5.1 INTRODUCCIÓN A OPTISYSTEM

OptiSystem es una herramienta computacional de carácter comercial de gran alcance creado por *Optiwave* y utilizada a nivel profesional. Esta herramienta permite planificar, probar, visualizar y simular diseños de enlaces ópticos. *Optiwave* permite al estudiante de ingeniería utilizar el software en la opción de demostración, sin embargo, al igual que *Matlab*, las universidades que utilizan esta herramienta computacional mantienen un convenio para activar las licencias refiriéndose al número de usuarios simultáneos. Para este proyecto de titulación se utilizó la licencia Demo, la cual habilita todas las opciones de *OptiSystem* por 30 días utilizando la última versión del simulador, es decir, *OptiSystem* 13.0 [3].

OptiSystem permite realizar diseños no solamente con los componentes que vienen cargados con el software de instalación, sino también permite modificar los parámetros de los componentes y crear nuevos que se ajusten mejor al diseño que se esté realizando. Dentro de las aplicaciones más relevantes de esta herramienta computacional para sistemas de comunicaciones ópticas están [7]:

- Diseño de redes usando Multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y Multiplexación por dominio de tiempo óptico (OTDM).
- Diseño de anillos de redes ópticas síncronas SONET y SDH.
- Diseño de los componentes de un sistema de comunicaciones ópticas; transmisores, canal de comunicación, amplificadores y receptores.
- Diagramas del ojo, estimación del BER, constelaciones.

1.5.2 INTERFAZ GRÁFICA DE OPTISYSTEM

OptiSystem presenta un área de trabajo amplia, agradable e intuitiva, en especial si se está familiarizado con el uso de herramientas computacionales para la simulación de circuitos eléctricos y electrónicos tales como *Proteus Professional*, *MultiSim* o *CircuitMaker*. La *Figura 1.5* muestra la interfaz gráfica presente al ejecutar el software de simulación *OptiSystem*. Esta interfaz contiene una ventana de trabajo, un área donde se puede visualizar las carpetas de la biblioteca de componentes y por último, el menú de herramientas.

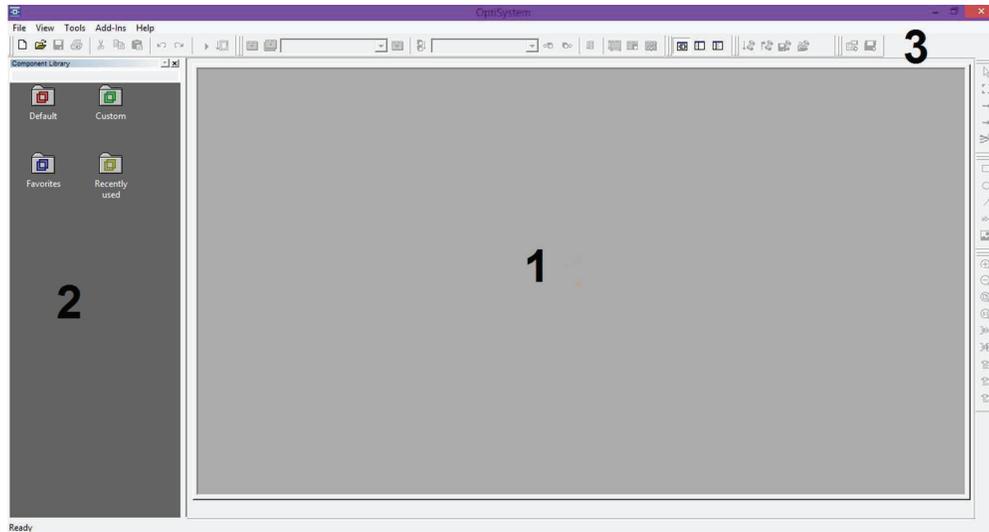


Figura 1.5 Interfaz gráfica de OptiSystem

La ventana de trabajo *Layout* que muestra la *Figura 1.6* es donde se realizan las simulaciones de los sistemas de comunicaciones ópticas. Este espacio de trabajo permite colocar los dispositivos que van a formar parte del diseño y realizar las interconexiones necesarias.

El *layout* de *OptiSystem* permite colocar tantos componentes como sea necesario, considerando que mientras más elementos tenga el diseño, más tiempo requiere el software para simularlo y obtener resultados. *OptiSystem* permite trabajar en varios proyectos a la vez, sin la necesidad de ejecutar nuevamente el simulador.

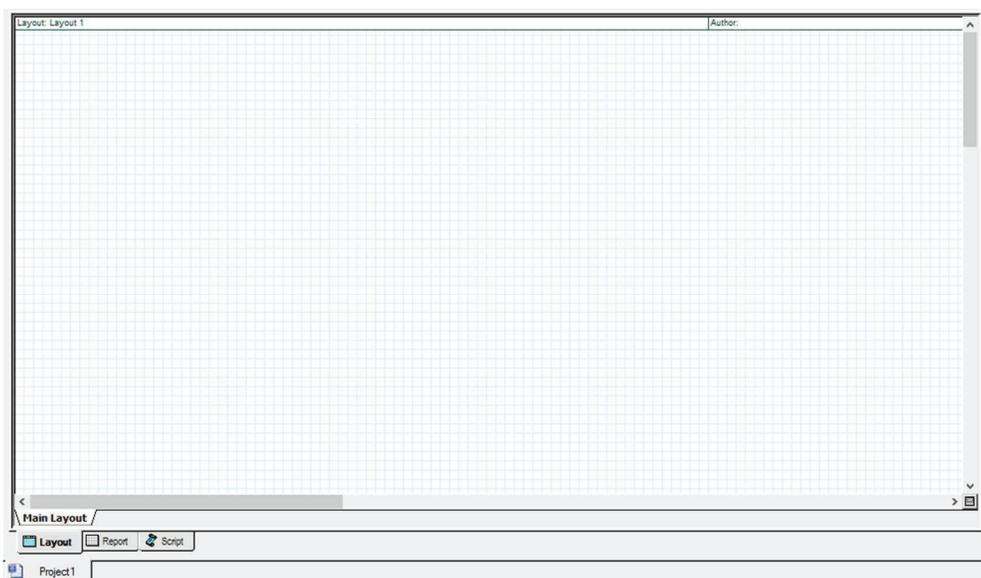


Figura 1.6 Layout de OptiSystem

La biblioteca contiene varios componentes tanto eléctricos como ópticos de manera jerárquica y organizada, lo que hace fácil de utilizar y de encontrar por el usuario. Además, *OptiSystem* posee una herramienta de búsqueda por nombre de componente, como muestra la *Figura 1.7*.

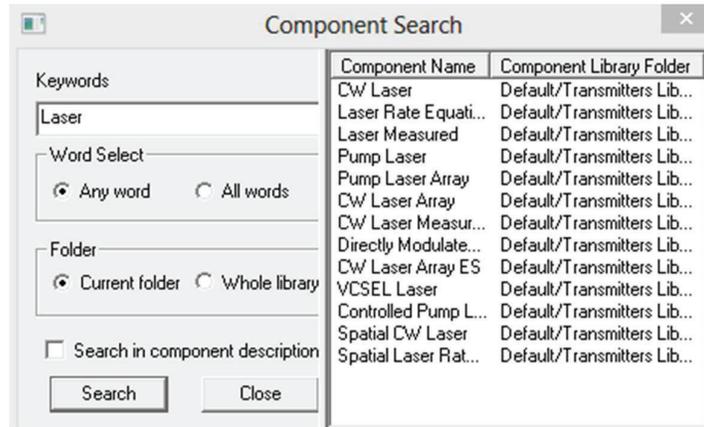


Figura 1.7 Herramienta de búsqueda de OptiSystem

A continuación, la *Figura 1.8* muestra los componentes eléctricos y ópticos comúnmente utilizados en *OptiSystem* para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas.

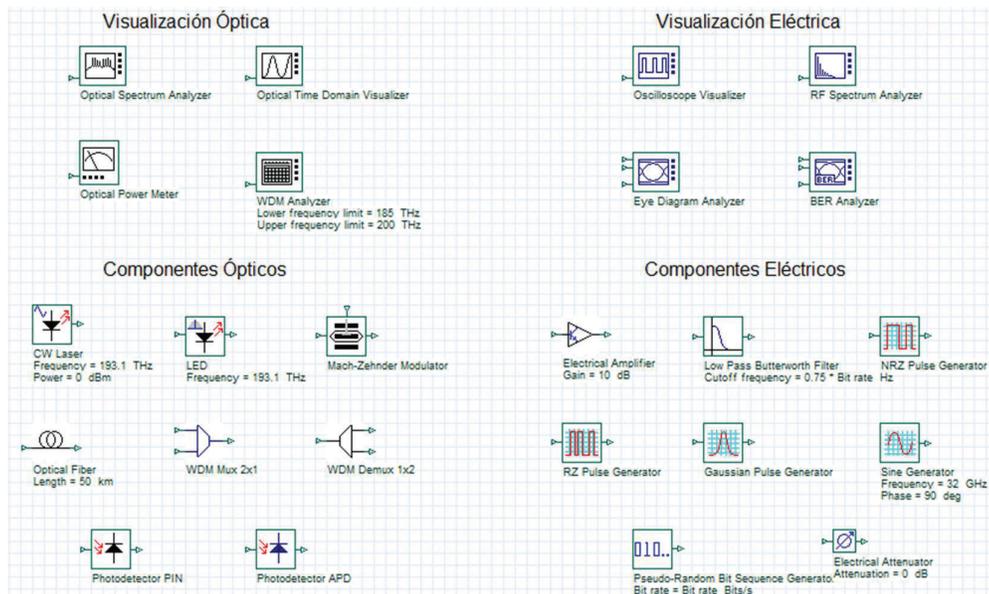


Figura 1.8 Componentes básicos de OptiSystem

1.6 PRÁCTICA 1: INDUCCIÓN A LOS SIMULADORES

1.6.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Conocer los componentes del *Communication System Toolbox* de *Matlab* utilizados en comunicaciones ópticas.
- Realizar el esquema de un modulador PWM como ejemplo de inducción al simulador *Simulink*.
- Conocer los componentes que *OptiSystem* ofrece para la simulación de sistemas de comunicaciones ópticas.
- Realizar el esquema de un sistema de comunicaciones ópticas utilizando *OptiSystem* como ejemplo de inducción.

1.6.2 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica, se propone dos escenarios a manera de tutorial para comprender y familiarizarse con las herramientas computacionales.

- El primer escenario permite la inducción al uso de los componentes del *Communication System Toolbox* realizando un esquema para un modulador de ancho de pulso. En este escenario se realiza el análisis gráfico del funcionamiento del modulador.
- El segundo escenario permite la inducción al uso de la herramienta computacional *OptiSystem*. Este escenario propone realizar un esquema de un sistema de comunicaciones ópticas, utilizando los componentes necesarios de la biblioteca de *OptiSystem*.

1.6.2.1 Inducción al *Communication System Toolbox* de *Matlab*

El primer escenario utiliza la interfaz gráfica de *Simulink* para poder realizar la simulación de un modulador por ancho de pulsos (PWM).

Communication Sytem Toolbox presenta los bloques necesarios tanto para el modulador como para la visualización de los resultados. El modulador de ancho de pulso (PWM) permite modificar el ciclo de trabajo de una señal modulante para enviar información a través del enlace de datos o para controlar la cantidad de potencia enviada a una carga. Para realizar este modulador se presenta los componentes necesarios detallados a continuación:

- **Oscilador de onda dientes de sierra:** el *Communication System Toolbox* posee un bloque de simulación conocido como *Signal Generator* para generar diferentes señales de entrada. Para este caso, se utiliza una señal diente de sierra con una amplitud de 5 [V] a una frecuencia de 1 [KHz]. Este bloque representa el oscilador, el cual determina la frecuencia de la señal modulada. En conjunto con el comparador genera una señal de pulsos periódicos que representará la señal portadora del sistema. Los parámetros se los pueden modificar en la ventana que se abre al dar doble *click* en el bloque de simulación como muestra la *Figura 1.9*.

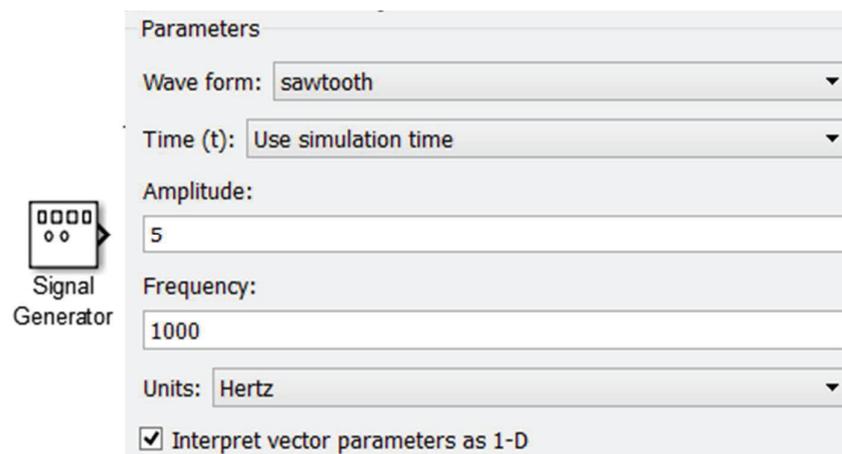


Figura 1.9 Bloque de simulación del oscilador de diente de sierra

- **Porcentaje del ciclo de trabajo:** la modulación PWM expresa su variación en porcentaje del ciclo de trabajo. Para realizar esto se utiliza dos bloques de señal constante llamados *Constant* y un bloque de adición llamado *Sum*. Este bloque permite variar el ciclo de trabajo modificando el valor de la constante en relación a la amplitud de la señal diente de sierra. Sus parámetros pueden ser modificados dando doble *click* en los bloques de simulación, como muestra la *Figura 1.10*.

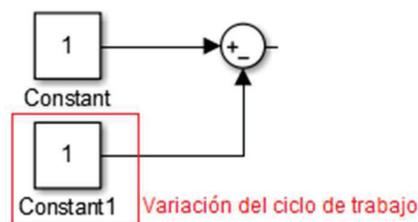


Figura 1.10 Bloque de simulación de señal modulante

- **Combinador y comparador:** el *Communication System Toolbox* presenta un bloque llamado *Sum* que realiza la combinación de la señal del generador y la resultante de la resta de las señales contantes.

El comparador utiliza el bloque llamado *Compare To Zero*, si la señal que ingresa al comparador es mayor que cero mostrará un pulso positivo (bit 1), por el contrario, si la señal es menor que cero no muestra señal (bit 0). La *Figura 1.11* muestra el bloque de combinador y comparador del modulador.



Figura 1.11 Combinador y comparador del modulador PWM

Para visualizar los resultados, uno de los bloques comúnmente usados es el bloque de *Scope* que permite el análisis gráfico de los resultados del sistema. El usuario puede modificar los parámetros de visualización como dimensión de ejes, colores de visualización, rango de valores entre otros.

Una vez conectado todos los elementos como muestra la *Figura 1.12*, se ejecuta la simulación dando *click* en el botón de *play* , y si la simulación no tiene errores permitirá visualizar los resultados.

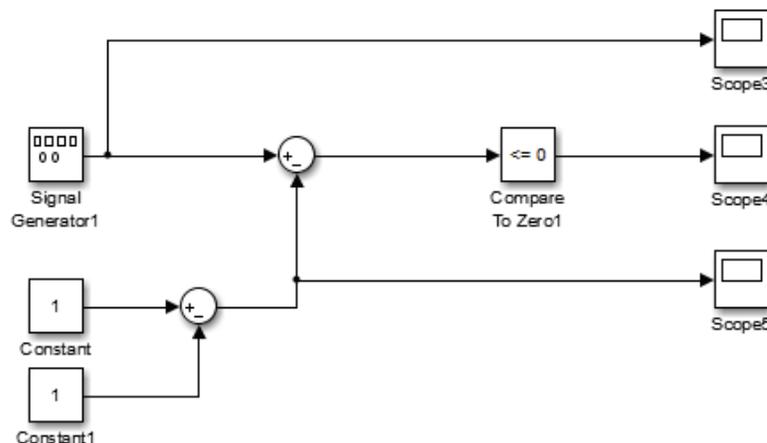


Figura 1.12 Esquema de un modulador por ancho de pulsos PWM

En caso de que se presente algún error en el esquema, *Simulink* muestra una pantalla adicional indicando el bloque y los parámetros que están errados facilitando al usuario la corrección de los mismos.

La *Figura 1.13* muestra la señal diente de sierra con una amplitud de 5 [V] y una frecuencia de 1 [KHz]. Esta señal determina la frecuencia de operación de la señal modulada en PWM.

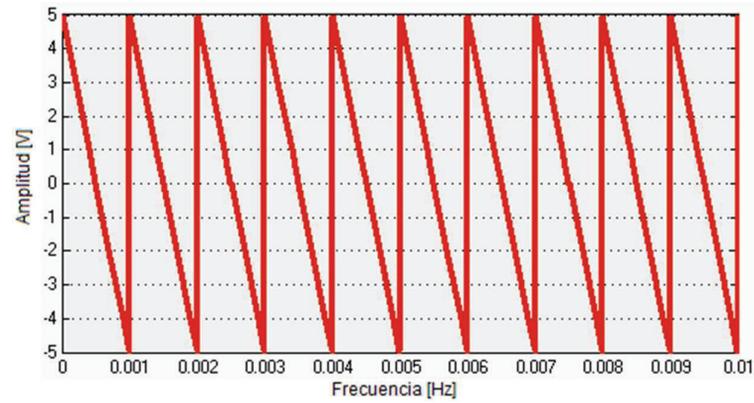


Figura 1.13 Oscilador para el esquema de modulación

Dependiendo de los parámetros del segundo bloque de señal constante, el ciclo de trabajo varía, de tal manera que al tener un valor de 1, la resultante de la señal constante es igual a 0 [V] por lo que se tiene un ciclo de trabajo del 50%, como muestra la *Figura 1.14*

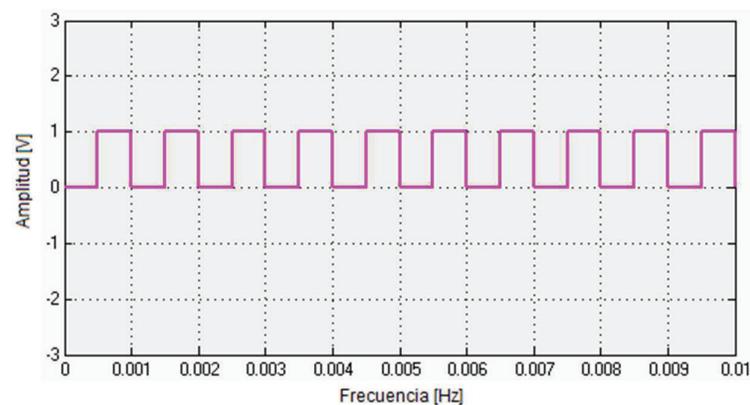


Figura 1.14 PWM al 50% de ciclo de trabajo

Al variar el valor del segundo bloque de la señal constante a 3.5, el resultado del modulador presenta una señal de pulsos con un ciclo de trabajo del 25%, como muestra la *Figura 1.15*. Los parámetros de la señal constante para obtener diferentes porcentajes de ciclo de trabajo depende del valor de amplitud de la señal diente de sierra.

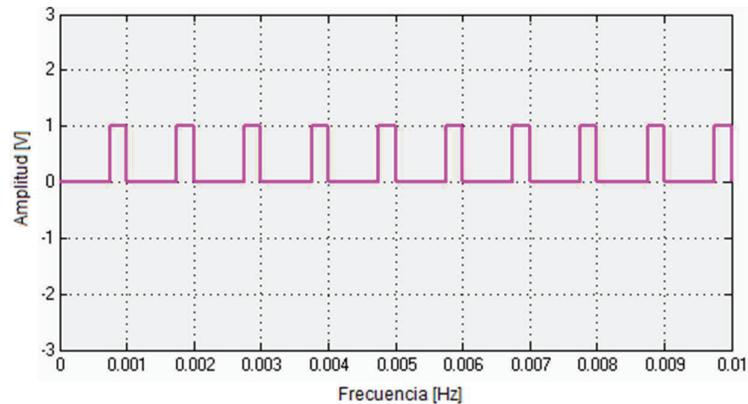


Figura 1.15 PWM al 25% de ciclo de trabajo

Así, para este ejercicio si el segundo bloque constante alcanza un valor de 6, el resultado de la modulación presentaría una señal al 0% de ciclo de trabajo. Por otro lado, si el valor del segundo bloque de señal constante es de -4 la modulación presentaría una señal de pulsos al 100% de ciclo de trabajo. La *Figura 1.16* muestra los dos casos para un modulador PWM operando al 0% y al 100% del ciclo de trabajo.

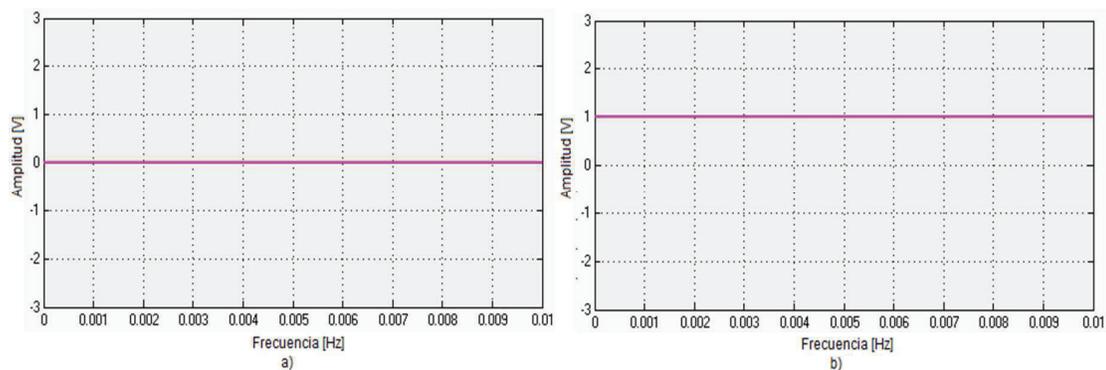


Figura 1.16 Modulador PWM a) 0% de ciclo de trabajo b) 100% de ciclo de trabajo

1.6.2.2 Inducción a OptiSystem

El segundo escenario utiliza la interfaz gráfica de *OptiSystem* para poder realizar la simulación de un enlace óptico básico transmisor, enlace, receptor, como ejemplo de inducción para familiarizarse con la herramienta de simulación *OptiSystem*. Para empezar un nuevo proyecto, en la barra de herramientas se debe dar *click* en el icono de nuevo , de esta manera el área de trabajo se tornará blanca y permitirá ubicar los componentes necesarios para el diseño.

Para el esquema del transmisor se necesita de cuatro componentes, los cuales se los puede encontrar por carpeta o por medio de la herramienta de búsqueda mencionada en el marco teórico. La *Figura 1.17* muestra el esquema de conexión para un transmisor óptico:

- Generador de secuencia de bits: Componente *Pseudo-random bit sequence generator 2.5 [Gbps]*
- Generador de pulsos: Componente *NRZ pulse generator*.
- Fuente de luz óptica tipo láser: Componente *CW Laser*.
- Modulador: Componente *Mach Zehnder Modulator*.

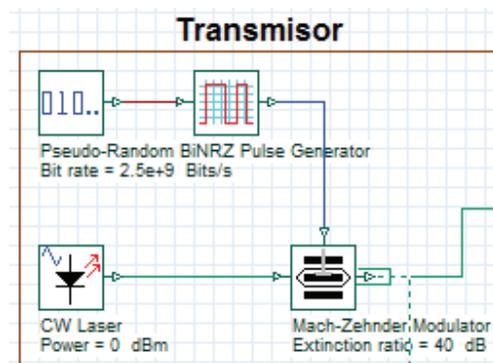


Figura 1.17 Esquema de un transmisor

OptiSystem presenta la facilidad de realizar la interconexión entre los componentes de manera automática una vez ubicados en el área de trabajo.

Para el canal de comunicaciones se presenta un enlace con fibra óptica monomodo. Para esta parte del esquema se requiere de dos componentes interconectados como muestra la *Figura 1.18*:

- Fibra óptica monomodo: Optical fiber 1550 [nm] y 10 [km]
- Atenuador: Optical Attenuator

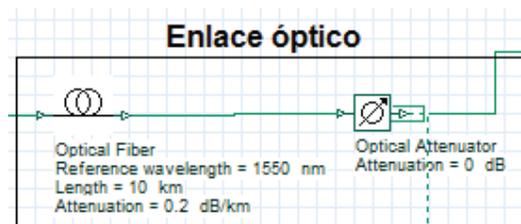


Figura 1.18 Esquema de un canal de comunicaciones

Para poder modificar los parámetros de los componentes, sólo se debe dar doble *click* sobre cada uno de ellos. Esta acción abre una ventana adicional como muestra la *Figura 1.19*, donde se puede modificar los parámetros necesarios, como por ejemplo, para la fibra óptica se puede cambiar la distancia, la longitud de onda, la atenuación entre otros parámetros.

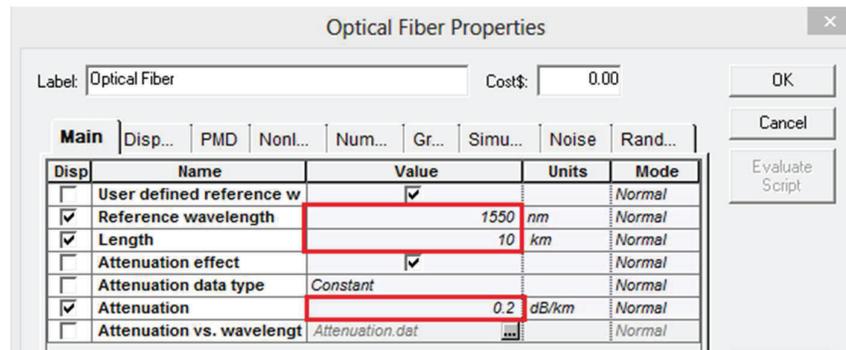


Figura 1.19 Parámetros del componente Optical Fiber

El diseño de un receptor óptico básicamente requiere de dos componentes adicionales interconectados como muestra la *Figura 1.20*, para este caso se utiliza un receptor con detector PIN:

- Detector: Componente *Photodetector PIN*
- Filtro pasabajos: Componente *Low Pass butterworth filter*

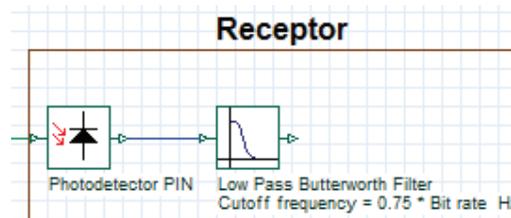


Figura 1.20 Esquema de un receptor

Para poder visualizar y monitorear los resultados, se puede emplear varios componentes que *OptiSystem* posee. Para este escenario se utiliza dos de los componentes más utilizados para el análisis de sistemas de comunicaciones:

- Analizador de espectro de potencia: *Optical spectrum analyzer*
- Medidor de potencia óptica: *Optical power meter*

La *Figura 1.21* muestra el esquema final de diseño interconectando el transmisor, el canal de comunicaciones, el receptor y los componentes de visualización. Para ejecutar la simulación, se debe dar *click* en el icono de *play* ▶, se abre una ventana adicional en la cual se debe dar *click* en el icono de *play* ▶ nuevamente y esperar hasta que el simulador termine de procesar la información.

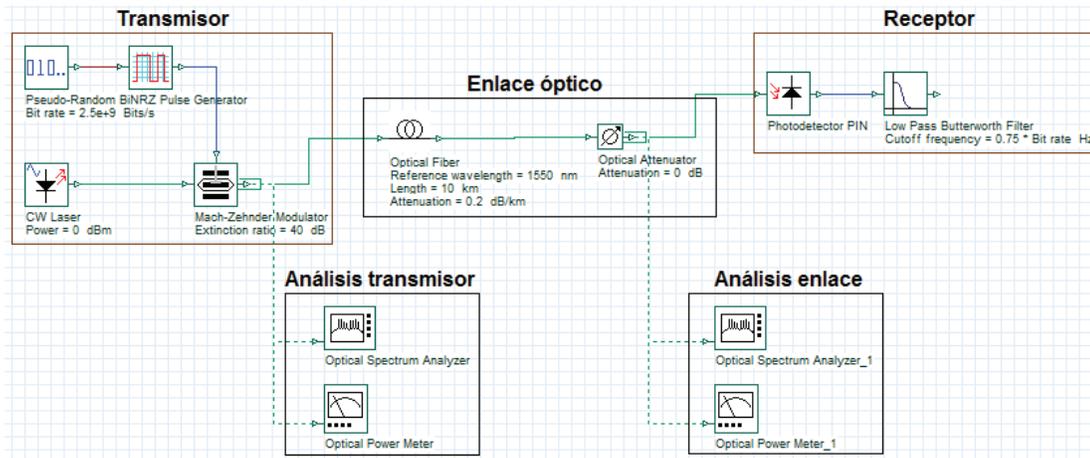


Figura 1.21 Esquema de un sistema de comunicaciones ópticas básico

Además, *OptiSystem* presenta en pantalla el proceso que realiza para ejecutar la simulación como muestra la *Figura 1.22*, lo que permite detectar errores de manera más sencilla y directa. Dependiendo de la cantidad de componentes que el diseño requiera, el proceso puede tardar varios minutos.

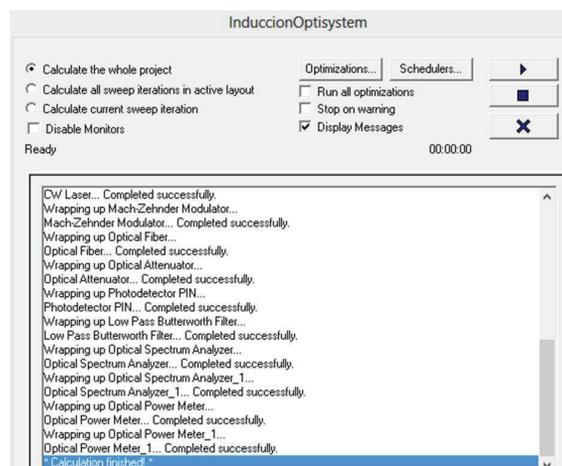


Figura 1.22 Pantalla adicional para ejecutar la simulación

El objetivo de esta práctica además de conocer el simulador es visualizar los efectos de un diseño básico. La *Figura 1.23* permite verificar que el transmisor

esté operando a la longitud de onda correspondiente, en este caso 1550 [nm], y muestra la potencia que ingresa al canal tanto en [W] como en [dBm].

La *Figura 1.24* verifica que el sistema opera a las mismas longitudes de onda del transmisor y muestra la potencia en [W] y [dBm], esta potencia se disminuye debido a la longitud del canal, y al parámetro de atenuación de 0.2 [dB].

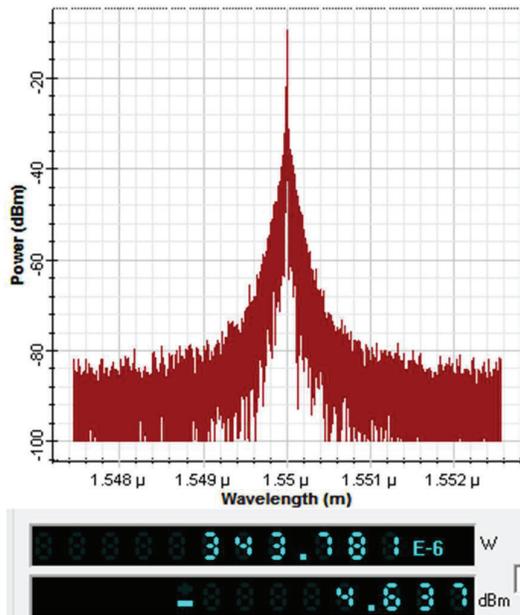


Figura 1.23 Presentación de resultados a la salida del transmisor

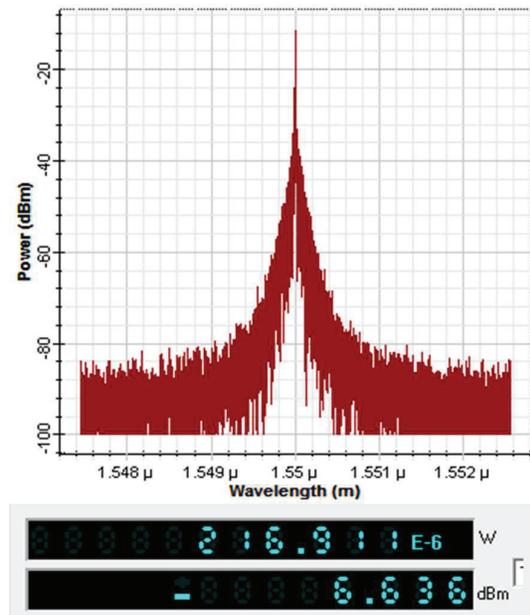


Figura 1.24 Presentación de resultados a la salida del enlace

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO I

- [1] Arellano, Miguel, "Matlab & Simulink para Ingeniería Nivel 1", Universidad de Ciencias y Humanidades, 2013
- [2] Leva, A., "A Hands-On Experimental Laboratory for Undergraduate Courses in Automatic Control" IEEE Transactions on Education, Vol.64, No.2, 2003, pp.263–272.
- [3] Licencia DEMO de Optiwave para OptiSystem 13.0 <http://optiwave.com/evaluation-license-agreement/>.
- [4] MathWorks Documentantation "Getting Started with Communications System Toolbox".
- [5] RV. Krickas & J.Krivickas, "Laboratory Instruction in Engineering Education" Global J. of Engng. Educ. Vol.11, No.2, 2007.
- [6] Tipos de activación de licencia de The MATHWorks para Matlab y Simulink <http://www.mathworks.com/help/install/license/activation-types.html>.
- [7] Warren L. G. Koontz and Divya Mandloi, "Application of optical system simulation software in a fiber optic telecommunications program".

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

2.1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicaciones ópticas, el medio de transporte de información es la luz. En este capítulo se presentan tres prácticas que permiten el estudio y análisis del comportamiento de los fotones al viajar por la fibra óptica. La luz responde a los fenómenos de reflexión y refracción (Ley de Snell), por lo que el análisis parte de este concepto.

En la primera práctica se analiza los parámetros físicos de la fibra óptica entre los cuales están, el índice de refracción, el ángulo de aceptación, el ángulo crítico y la apertura numérica. Este análisis permite determinar los parámetros necesarios de las características físicas de las fibras ópticas para que la luz viaje a través de ella, evitando pérdidas de información en el trayecto.

La segunda práctica permite el análisis de las fibras ópticas según la cantidad de modos propagados. En esta práctica, se presentan las características, diferencias, ventajas y desventajas de las fibras multimodo y monomodo. Además, se enfoca en el análisis de la cantidad de modos propagados en función de la longitud de onda de operación en las fibras multimodo y en los requerimientos mínimos para que la fibra óptica monomodo transmita un único modo de propagación considerando el diámetro del núcleo y la longitud de onda de operación.

Finalmente, la tercera práctica hace referencia a los parámetros dinámicos que afectan la transmisión de la luz en las fibras ópticas a grandes distancias o en sistemas multiplexados. En esta práctica se analiza el efecto de la atenuación, de la dispersión cromática y de los efectos no lineales mediante el análisis del espectro de potencia óptica, con el fin de minimizar sus consecuencias.

2.2 PRÁCTICA 2: PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN DE LA LUZ

2.2.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender el concepto y la influencia de los parámetros de transmisión en un enlace óptico.
- Comparar los resultados de los parámetros de transmisión para fibras construidas de material diferente mediante el uso de una interfaz gráfica realizada en *Matlab*.
- Determinar los parámetros necesarios para que la luz se transmita por la fibra óptica con la menor pérdida posible.

2.2.2 MARCO TEÓRICO [1][3][6][9]

2.2.2.1 Propagación de la luz en la fibra óptica

Un sistema de comunicaciones ópticas presenta varias ventajas entre las cuales están, su alta capacidad por el ancho de banda que utiliza, su alcance a grandes distancias por su pequeño coeficiente de atenuación, su tolerancia a la interferencia electromagnética y la posibilidad de ser utilizada cerca de líquidos y gases volátiles, por el hecho de no transportar electrones sino fotones; sin embargo, todas estas ventajas se ven en ocasiones opacadas por el alto costo de los equipos terminales en especial para altas velocidades de transmisión de información.

El rango de frecuencias comprendido entre los 0.3 [THz] y los 30 [PHz], correspondiente en longitud de onda a 10 [nm] y 1 [mm], es conocido como la región óptica o espectro óptico. Los sistemas de comunicaciones ópticas utilizan el rango de luz infrarroja, de luz visible y de luz ultravioleta, como muestra la *Figura 2.1*, siendo el rango 770 [nm] a 1600 [nm] el más utilizado en enlaces de comunicaciones ópticas.

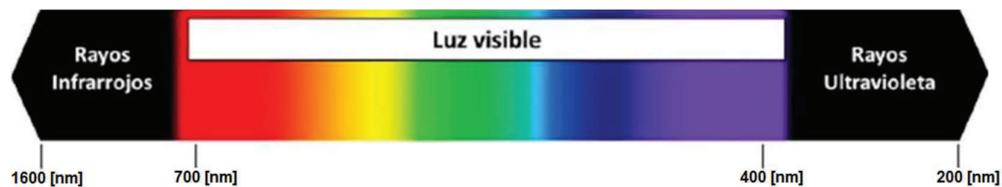


Figura 2.1 Espectro óptico [8]

La luz se propaga por un medio diferente del vacío, con un índice de refracción mayor a 1. La velocidad de propagación de la luz (v_p) tiene una relación inversa con el índice de refracción (n), por lo tanto, la velocidad en el medio es menor que la velocidad en el vacío y se la expresa por la (ec 2.1) [10]:

$$v_p = \frac{c}{n} \quad (\text{ec 2.1})$$

Al considerar que la velocidad de la luz en el medio es menor, la longitud de onda (λ) también se reduce proporcionalmente. La frecuencia, por otro lado, no varía y no es afectada por los cambios de medios. El índice de refracción depende del material, cuando el material es más denso presenta un índice de refracción mayor, por lo tanto, la velocidad de propagación de la luz en el medio disminuye.

Las fibras ópticas están compuestas principalmente por un núcleo, un revestimiento o manto que recubre el núcleo y la cubierta protectora que protege al manto, como muestra la *Figura 2.2*.

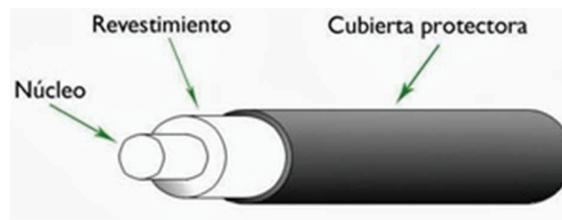


Figura 2.2 Estructura básica de la fibra óptica [11]

Tanto el manto como el núcleo presentan diferentes índices de refracción que determinan la velocidad a la que viaja la luz por el medio de transmisión. El núcleo tiene un índice de refracción ligeramente más alto que el del manto, de modo que la luz se guía a lo largo del eje de la fibra por reflexión interna total.

La transmisión de luz a través de la fibra óptica puede ser estudiada mediante el examen de las trayectorias de los rayos dentro del núcleo. Un análisis más complejo hace uso de la teoría electromagnética. Las ondas de luz viajan en la fibra óptica en forma de modos, cada modo se propaga por un camino diferente dentro de la fibra. Las fibras ópticas transportan ondas de luz, por lo que los parámetros de transmisión se rigen al comportamiento de la luz dentro de la fibra.

2.2.2.2 Parámetros de transmisión de la luz

La fibra óptica utiliza la luz para llevar información de un extremo a otro, en el transcurso de este viaje existen varios parámetros que pueden afectar la transmisión y generar una recepción errónea de la información. El principio fundamental de la transmisión en la fibra óptica está presente en las leyes de reflexión y refracción a las cuales la luz se somete el momento de ser transmitida.

- **Ley de reflexión:** cuando un haz de luz incidente que está viajando en un medio de una densidad particular (n_2), se enfrenta a un medio de densidad diferente (n_1), sufre una desviación o reflexión hacia su propio medio, este haz se lo conoce como haz reflejado. El efecto de reflexión total en el cual el haz de luz no atraviesa el medio es mostrado en la *Figura 2.3* y se produce cuando los ángulos que forman los haces incidente y reflejados con referencia a la normal del plano de separación son iguales, por lo cual se cumple que [10]:

$$\theta_{incidente} = \theta_{reflejado} \quad (ec\ 2.2)$$

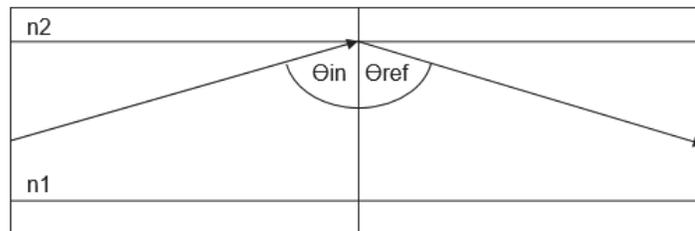


Figura 2.3 Reflexión total [10]

- **Ley de refracción o de Snell:** cuando un haz de luz incidente que está viajando en un medio de una densidad particular (n_2), se enfrenta a un medio de densidad diferente (n_1), experimenta una desviación en su trayectoria y atraviesa al otro medio, este haz se lo conoce como haz refractado. La ley de Snell determina que la relación entre los índices de refracción de los medios es inversa a los senos de sus ángulos con relación a la normal del plano de separación, por lo cual se cumple con la siguiente expresión [10]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} \quad (ec\ 2.3)$$

Hablando explícitamente de la fibra óptica, n_1 es el índice de refracción del núcleo, θ_1 el ángulo del haz de luz incidente, n_2 el índice de refracción del manto y θ_2 el ángulo del haz de luz refractado, como muestra la *Figura 2.4*.

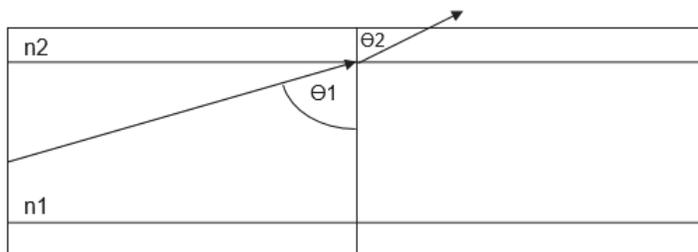


Figura 2.4 Efecto de refracción [10]

- **Ángulo crítico (θ_c):** dependiendo de la relación de los índices de refracción de los medios, se presenta un nuevo concepto conocido como ángulo crítico. El ángulo crítico representa el mínimo ángulo de incidencia para que el haz de luz viaje a través del núcleo de la fibra y no se pierda información en el manto. El ángulo crítico se produce cuando el ángulo de refracción θ_2 es igual a 90° , es decir, el haz reflejado está en el borde entre el núcleo y el manto, como muestra la *Figura 2.5*.

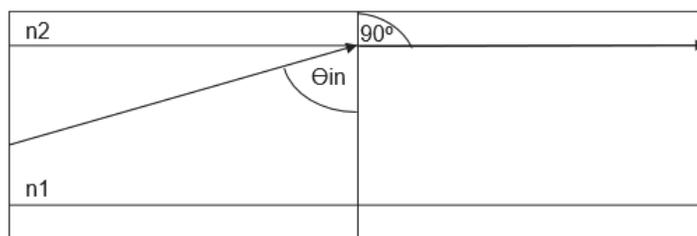


Figura 2.5 Ángulo crítico [10]

Aplicando la ley de Snell, se tiene que el ángulo crítico es igual a [10]:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (\text{ec 2.4})$$

Por lo tanto, para que el haz de luz viaje por el núcleo y no se pierda información por el manto se debe cumplir con dos condiciones [10]:

$$n_1 > n_2 ; \theta_1 > \theta_c \quad (\text{ec 2.5})$$

- **Ángulo de acoplamiento o aceptación (θ_{oa}):** la ley de refracción también participa en el proceso de incidencia de la luz desde la fuente hasta la fibra óptica. Debido a que existe un espacio de aire entre la fuente de luz y la fibra, el haz de luz debe pasar de un medio a otro cumpliendo con [10]:

$$\sin(\theta_o) = n_1 \sin(\theta_R) \quad (\text{ec 2.6})$$

Donde θ_R es igual al complementario del ángulo de incidencia θ_1 , y θ_o es el ángulo del haz entrante a la fibra óptica, como muestra la *Figura 2.6*, además el aire presenta un índice de refracción n_o menor al del núcleo.

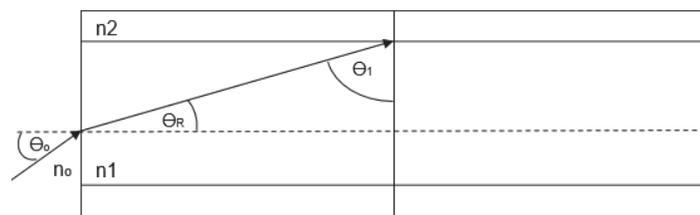


Figura 2.6 Ángulo de aceptación [10]

Lo que se debe procurar hacer es que la mayor cantidad de luz incidente ingrese del aire al núcleo de la fibra, para esto se requiere de un nuevo concepto, llamado ángulo de máximo acoplamiento o aceptación, el cual determina el ángulo máximo posible para que la luz se refracte al núcleo.

Por lo tanto, siendo $n_o < n_1$ para que se refracte la mayor cantidad de haces de luz, se debe cumplir que el ángulo del haz de luz fuera de la fibra sea menor al ángulo de aceptación [10]:

$$\theta_o < \theta_{oa} \quad (\text{ec 2.7})$$

- **Apertura numérica (AN):** determina la cantidad de luz que puede aceptar la fibra en su núcleo, este término tiene relación con el ángulo de aceptación y con los índices de refracción de núcleo (n_1) y manto (n_2) [10].

$$AN = \sin(\theta_{oa}) \quad (\text{ec 2.8})$$

Conociendo la ley de Snell (ec 2.2) y las relaciones antes descritas, se puede demostrar que [10]:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{ec 2.9})$$

Cuando los materiales de núcleo y manto se asemejan en sus índices de refracción, la apertura numérica disminuye, el ángulo de aceptación es más pequeño, por lo que se exige una fuente de luz más directiva.

2.2.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone la implementación de una interfaz gráfica generada en *Matlab* que permita realizar el análisis de los parámetros de transmisión de luz.

- La interfaz gráfica debe permitir el ingreso de los valores de los índices de refracción del núcleo y del manto para realizar los cálculos (*Ver Anexo 3*).
- El resultado de los parámetros de transmisión se deben obtener automáticamente así como la velocidad de propagación en el medio.
- Se propone variar el índice de refracción dependiendo del material utilizado para la fabricación de la fibra óptica, para esta práctica se utiliza vidrio y plástico.

Las fibras ópticas de plástico usualmente presentan un índice de refracción de 1.46 para el núcleo y 1.40 para el manto. La *Figura 2.7* muestra los resultados de los parámetros de transmisión de la luz para estas condiciones.

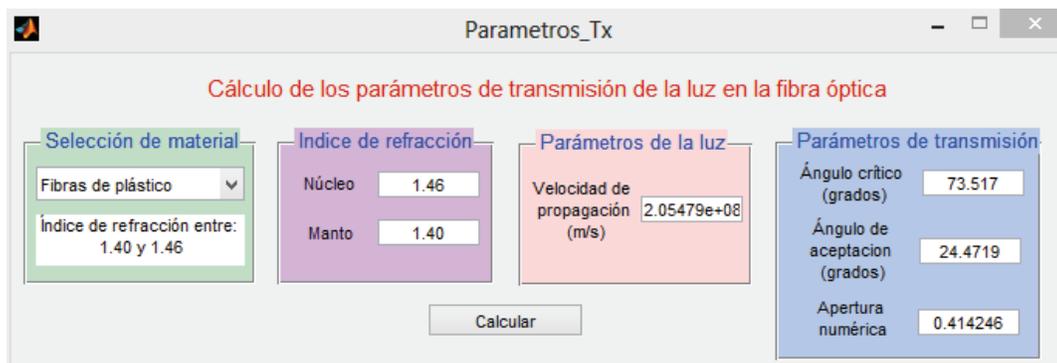


Figura 2.7 Fibra óptica plástico-plástico

Las fibras ópticas también pueden ser fabricadas de vidrio las cuales típicamente presentan un índice de refracción de 1.52 para el núcleo y 1.50 para el manto, la diferencia entre los índices de refracción es menor que en las fibras ópticas de plástico y esto afecta a los parámetros de transmisión de la luz, como muestra la *Figura 2.8*.

Figura 2.8 Fibra óptica vidrio-vidrio

Las fibras ópticas pueden combinar su construcción teniendo un núcleo de vidrio y un manto de plástico, en estas condiciones usualmente el índice de refracción del núcleo es de 1.52 mientras que el índice de refracción del manto es de 1.40. Los parámetros de transmisión de luz para este caso se muestran en la *Figura 2.9*.

Figura 2.9 Fibra óptica vidrio-plástico

2.2.3.1 Análisis de resultados

La interfaz gráfica permitió mostrar la variación de los parámetros de transmisión de luz en las fibras ópticas según su material de construcción.

La velocidad con la que la luz viaja depende exclusivamente del índice de refracción del núcleo, independiente de la cantidad de haces de luz que ingresen a la fibra óptica. Considerando que el índice de refracción del plástico es menor que el del vidrio, y que la relación entre la velocidad de propagación y el índice de refracción es inversamente proporcional, los haces de luz en el núcleo viajarán más rápido en las fibras ópticas de plástico que en las de vidrio.

Núcleo	Manto	Velocidad	Ángulo crítico	Ángulo aceptación	Apertura numérica
Plástico	Plástico	2.054e8	73.517	24.472	0.414
Vidrio	Plástico	1.974e8	67.081	36.295	0.592
Vidrio	Vidrio	1.974e8	80.695	14.227	0.246

Tabla 2.1 Resumen de resultados de parámetros de transmisión

De acuerdo a la *Tabla 2.1*, al tener el núcleo y el manto de diferente material, vidrio y plástico, los parámetros de transmisión de la luz requieren menos exigencia como muestra la *Figura 2.9*, los haces de luz para ingresar a la fibra requieren un ángulo de aceptación de 36.29° , y la apertura numérica de la fibra óptica es de 0.59. Sin embargo, se debe considerar que en la implementación práctica, las fibras de vidrio deben presentar una apertura numérica de un máximo de 0.5 para que los haces de luz viajen por el núcleo.

Por otra parte, al tener el manto y el núcleo del mismo material, por ejemplo de vidrio requiere de más exigencias teniendo un ángulo crítico de 80.69° y un ángulo de aceptación de 14.27° por lo que se necesita una fuente de luz mucho más directiva para evitar pérdidas en el aire y en el manto, como por ejemplo una fuente con diodo láser.

2.2.3.2 Aplicaciones de la práctica

Esta práctica tiene como aplicación la selección del material de la fibra óptica que se va a emplear en el sistema, ya que permite el estudio de los parámetros de transmisión de luz y su comportamiento en la fibra óptica. De esta manera se puede comprender las diferencias entre los materiales utilizados para la construcción de fibras ópticas y el límite de los parámetros para su operación.

Los parámetros de transmisión de luz, además de determinar el material de la fibra óptica, también determinan ciertos requerimientos de los demás componentes del sistema para que el enlace opere óptimamente. Así por ejemplo, para fibras de vidrio, en especial fibras monomodo, la fuente debe ser directiva para que pueda acoplarse con mayor facilidad debido al ángulo de aceptación que presentan.

Las fibras ópticas de plástico son más flexibles a diferencia de las fibras de vidrio, y su campo de utilización está en la industria, principalmente la industria automotriz, sin embargo, son usadas para cortas distancias y bajas velocidades debido a la elevada atenuación que presentan [12].

2.2.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El material con el que la fibra óptica es construida determina los parámetros de transmisión de la luz, del cual dependerá también el tipo de fuente que se utilice en el sistema de comunicaciones ópticas para emitir la luz.
- La fabricación de las fibras ópticas puede variar, teniendo en el mercado fibras con núcleo y manto de vidrio o plástico y fibras ópticas combinadas donde el manto es de plástico y el núcleo de vidrio.
- Las fibras con fabricación combinada, presentan menos exigencias para los parámetros de transmisión debido a que la diferencia entre los índices de refracción es mayor.
- El índice de refracción del material del núcleo siempre debe ser mayor que el del manto para poder asegurar que la luz viaje dentro de la fibra óptica, específicamente dentro del núcleo, cumpliendo también con las condiciones de los ángulos crítico (ec 2.5) y de aceptación (ec 2.7).
- A menor ángulo de aceptación, la fuente de luz que se utilice para el sistema debe ser más directiva permitiendo que la mayor cantidad de haces de luz con información ingresen a la fibra óptica y no se pierdan en el aire.
- Según los análisis realizados, las fibras construidas con núcleo y manto de plástico permiten que la luz viaje a mayor velocidad y sus parámetros de transmisión no son tan exigentes, sin embargo, estas fibras son utilizadas en distancias cortas porque presentan mayor atenuación que las fibras de vidrio.

2.3 PRÁCTICA 3: MODOS DE PROPAGACIÓN

2.3.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender la relación entre el índice de refracción del núcleo y los modos de propagación en la fibra.
- Comparar la cantidad de modos de propagación en una fibra multimodo que opera a diferente longitud de onda mediante el uso de una interfaz gráfica generada en *Matlab*.
- Determinar los parámetros necesarios para que la fibra monomodo opere de manera óptima.

2.3.2 MARCO TEÓRICO [2][4][6][9]

Los sistemas de comunicaciones ópticas no requieren únicamente cumplir con las condiciones de ángulo crítico, de aceptación, y apertura numérica para garantizar al 100% que la luz ingrese y viaje por el núcleo de la fibra óptica. Esto dependerá del tamaño del núcleo, de la cantidad de modos que este permite y de su perfil de índice de refracción.

Los modos de propagación determinan las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra óptica. De acuerdo a la cantidad de modos de propagación, las fibras se clasifican en fibras multimodo y fibras monomodo, a su vez se las puede clasificar según el perfil de índice de refracción en fibras de índice escalonado y gradual.

2.3.2.1 Fibras ópticas multimodo

Las fibras multimodo pueden propagar varios haces de luz a la vez, cada haz presenta su propio modo de propagación, es decir, cada modo sigue un camino diferente dentro de la fibra óptica, como muestra la *Figura 2.10*. El número de modos de propagación depende del tamaño del diámetro del núcleo y del perfil del índice de refracción, para un diámetro mayor habrá mayor número de modos.

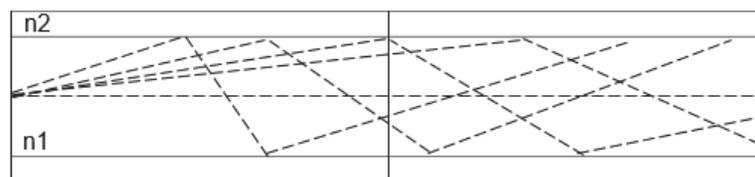


Figura 2.10 Múltiples modos de propagación en el núcleo [3]

La cantidad máxima de modos en el núcleo está determinado por [10]:

$$M = 0.5 \left(\frac{\pi d_n AN}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{ec 2.10})$$

Donde M es la cantidad máxima de modos, d_n es el diámetro de núcleo y λ la longitud de onda a la que se propaga. Las fibras multimodo son utilizadas en aplicaciones de instalaciones de corta distancia, sin embargo, gracias a la dimensión de su núcleo que se encuentra entre 50 [μm] y 62.5 [μm] y a su amplia apertura numérica, no se requiere de elementos de alta precisión, por lo que, comúnmente, utiliza fuentes led, las cuales no son tan directivas como las fuentes láser, esto hace que el enlace no sea tan costoso.

La manera en la que los modos se propagan en una fibra óptica multimodo depende también del índice de refracción. Por lo tanto, se pueden clasificar en dos tipos de fibras multimodo por índice de refracción:

- **Fibra multimodo de índice escalonado:** se caracteriza porque tanto el índice de refracción del núcleo como el del manto permanecen constantes, como muestra la *Figura 2.11*, lo que permite que los haces de luz viajen a una misma velocidad.

Este tipo de fibras presentan una amplia apertura numérica, permitiendo el ingreso de un mayor número de haces de luz, sin embargo, cada haz de luz tomará una trayectoria distinta y llegará en tiempos distintos al receptor, por lo que se produce un ensanchamiento en el pulso conocido como dispersión modal. Sus consecuencias son disminución de ancho de banda y baja velocidad de transmisión.

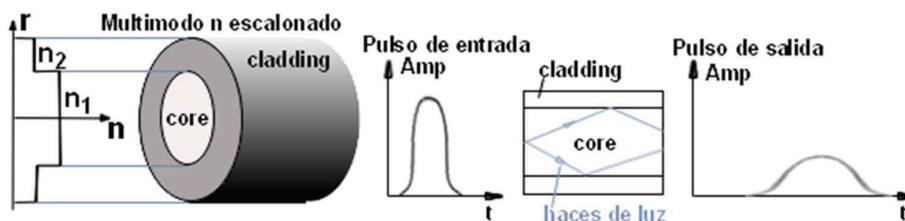


Figura 2.11 Fibra multimodo de índice escalonado [7]

- **Fibra multimodo de índice gradual:** permite mejorar el problema de la dispersión modal, presentando un índice de refracción no constante en el núcleo, el cual disminuye gradualmente según se vaya acercando al

manto, como muestra la *Figura 2.12*. De esta manera se consigue aumentar la velocidad para los modos con trayectorias más largas y disminuir la velocidad para los modos con trayectorias más cortas.

La apertura numérica es menor que la de la fibra de índice escalonado, por lo que no permite tantos haces de luz y en consecuencia transmite menos energía, sin embargo, alcanza un ancho de banda mayor y eleva la velocidad de transmisión.

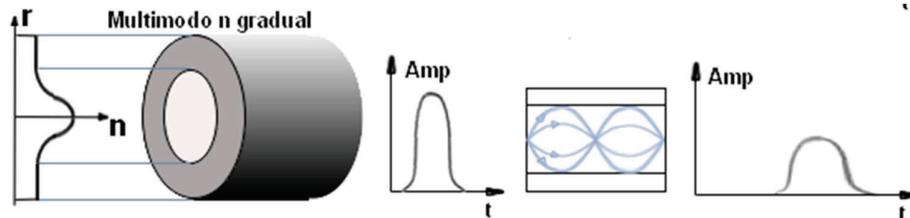


Figura 2.12 Fibra multimodo de índice gradual [7]

2.3.2.2 Fibras ópticas monomodo

A diferencia de las fibras multimodo, estas fibras transmiten un solo haz de luz, es decir, presentan un solo modo de propagación, eliminando por completo la dispersión modal, y mejorando el ancho de banda y la velocidad de transmisión.

Comúnmente son de índice escalonado conocidas como fibras monomodo estándar, las cuales presentan un diámetro de núcleo más pequeño entre 4 [μm] a 10 [μm] y un índice de refracción del manto menor al del núcleo en un 1%. Sin embargo, existen fibras monomodo de índice de refracción distinto como por ejemplo de índice W, α o doble ranurado.

Las fibras monomodo deben cumplir con tres condiciones principales para poder propagar un único modo por el núcleo y operar en óptimas condiciones. La primera condición hace referencia al tamaño del diámetro del núcleo, el cual debe cumplir con [10]:

$$d_n \leq \frac{2.4\lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (\text{ec 2.11})$$

Donde d_n es el diámetro del núcleo, λ la longitud de onda de operación, n_1 el índice de refracción del núcleo y n_2 el índice de refracción del manto.

Si el diámetro del núcleo es mayor al de la (ec 2.11), se transmitiría más de un modo de propagación, causando que se produzca un ensanchamiento de pulso debido a la dispersión modal.

La ecuación anterior determina el diámetro máximo para que el núcleo pueda propagar únicamente un modo. Es recomendable utilizar diámetros menores al máximo para dejar un margen de seguridad.

La segunda condición hace referencia a la frecuencia normalizada (v), la cual debe ser menor que 2,405 para garantizar que solo un modo se propague. La frecuencia normalizada es un parámetro adimensional que cumple con [10]:

$$v = \frac{\pi d_n AN}{\lambda} \quad (\text{ec 2.12})$$

Donde d_n es el diámetro del núcleo, λ la longitud de onda de operación, y AN la apertura numérica de la fibra óptica. Según la (ec 2.12), para reducir el valor de la frecuencia normalizada (v) se debe reducir la apertura numérica y/o el diámetro del núcleo lo que complica el acoplo de la fibra con la fuente de luz. Debido a sus condiciones, las fibras monomodo operan con fuentes de luz directivas, como láser, y con elementos de precisión por lo que el enlace es más costoso que con fibras multimodo.

Finalmente, la longitud de onda de corte (λ_c) determina la longitud mínima a la cual la fibra óptica puede operar para transmitir un solo modo, longitudes de onda menores propagarían dos o más modos. La longitud de onda de corte cumple con la siguiente ecuación [10]:

$$\lambda_c = \frac{\pi d_n AN}{2.4} \quad (\text{ec 2.13})$$

Característica	Fibra multimodo	Fibra monomodo
Diámetro del núcleo	50 [μm] y 62.5 [μm]	4 [μm] a 10 [μm]
Apertura numérica	Mayor	Menor
Distancia máxima	~2 [km]	~100 [km]
Velocidad de operación	~1.2 [Gbps]	~100 [Gbps]
Fuente de luz	Led	Láser
Conectorización	Sencilla, no requiere de electrónica de precisión	Compleja, requiere de electrónica de precisión y es más costosa

Tabla 2.2 Fibras multimodo vs Fibras monomodo [11]

La *Tabla 2.2* presenta algunas de las características más relevantes que diferencian las fibras multimodo de las fibras monomodo.

2.3.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Esta práctica propone realizar en *Matlab* dos interfaces gráficas que permitan analizar los modos de propagación en fibras multimodo y fibras monomodo.

- Las interfaces deben permitir el ingreso de los índices de refracción del núcleo y del manto y la longitud de onda de operación para los cálculos.
- La primera interfaz permitirá el análisis para fibras multimodo obteniendo como resultado la gráfica de la función $M = f(d_n)$.
- Se propone variar la longitud de onda de operación para analizar la cantidad de modos que se propaga por la fibra multimodo.
- Se propone variar el material de construcción de la fibra para determinar la cantidad de modos que se propaga por la fibra multimodo.
- La segunda interfaz permitirá el análisis para fibras monomodo, y los parámetros requeridos para que opere óptimamente.
- La interfaz debe calcular automáticamente el valor del diámetro máximo del núcleo y las gráficas de $v = f(d_n)$ y $\lambda = f(d_n)$.
- La interfaz debe permitir ingresar valores del diámetro del núcleo y la longitud de onda para obtener la frecuencia normalizada y la longitud de onda crítica.
- Se propone variar tanto la longitud de onda de trabajo como el diámetro del núcleo para analizar el comportamiento de las fibras monomodo.

2.3.3.1 Interfaz gráfica para fibras multimodo

La interfaz gráfica utiliza los parámetros para una fibra óptica multimodo de vidrio. Sus índices de refracción son de 1.52 para el núcleo y 1.50 para el manto. El análisis se basa en la cantidad de modos que propaga la fibra según la longitud de onda de operación. Por lo tanto, se genera la gráfica de la función $M = f(d_n)$.

La *Figura 2.13* muestra la función para una fibra óptica operando a 850 [nm]. Si a la misma longitud de onda se varían los índices de refracción debido al uso de un material diferente para la construcción de la fibra óptica, como por ejemplo, fibras de plástico con índices de refracción de 1.46 para el núcleo y 1.40 para el manto

(Ver Anexo 3), los resultados de la gráfica $M = f(d_n)$ también varían como se muestra en la *Figura 2.14*.

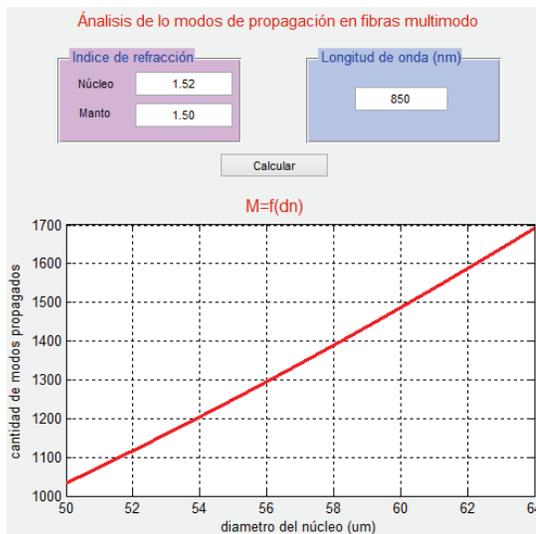


Figura 2.13 $M=f(d_n)$ para 850nm para una fibra multimodo de vidrio

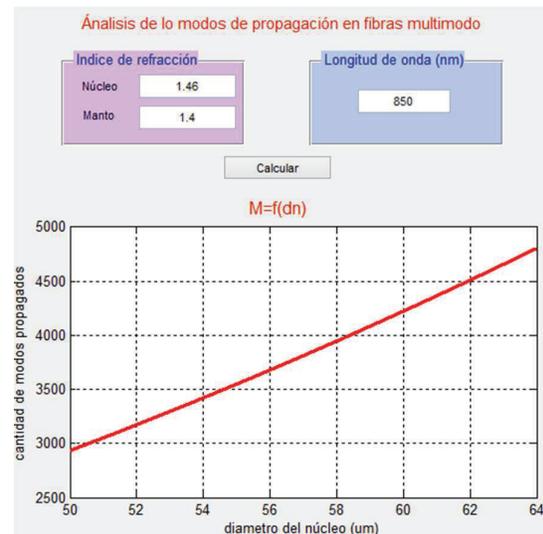


Figura 2.14 $M=f(d_n)$ para 850nm para una fibra multimodo de plástico

Si los valores de los índices de refracción se mantienen para una fibra óptica multimodo de vidrio y se varía la longitud de onda de operación, la cantidad de modos propagados también variará. La *Figura 2.15* muestra los resultados de la función $M = f(d_n)$ para una longitud de onda de 1330 [nm], mientras que la *Figura 2.16* muestra los resultados para una longitud de onda de 1550 [nm].

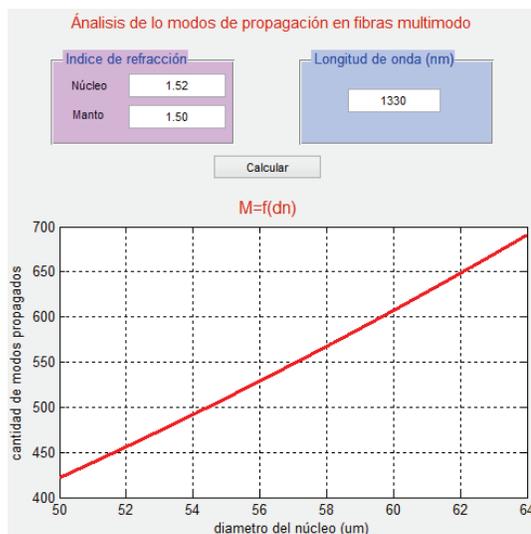


Figura 2.15 $M=f(d_n)$ para 1330nm para una fibra multimodo de vidrio

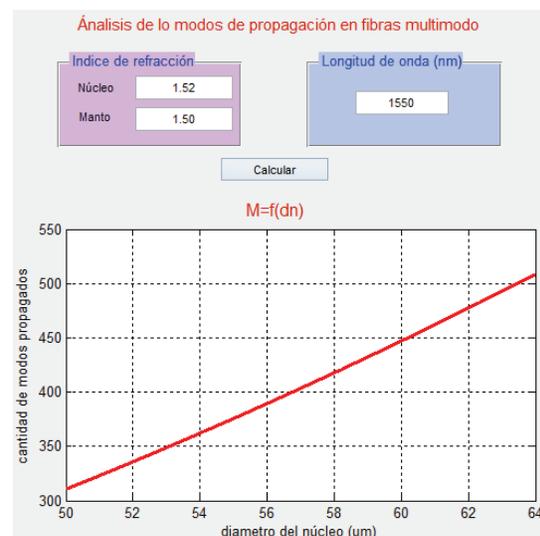


Figura 2.16 $M=f(d_n)$ para 1550nm para una fibra multimodo de vidrio

2.3.3.2 Interfaz gráfica para fibras monomodo

La interfaz gráfica permite el análisis de las fibras monomodo que operan en longitudes de onda de 1330 [nm] a 1610 [nm]. Para este ejercicio, se utiliza fibra óptica monomodo de vidrio con índices de refracción para el núcleo de 1.52 y para el manto de 1.51 (Ver Anexo 3).

La interfaz gráfica verifica el diámetro máximo del núcleo para transmitir un solo modo, y genera las funciones para la frecuencia normalizada $v = f(d_n)$ y para la longitud de onda de corte y $\lambda_c = f(d_n)$. Además, permite variar el diámetro del núcleo o la longitud de onda y verificar si la fibra óptica opera de manera óptima.

Al tener una fibra óptica monomodo de vidrio que opere a 1330 [nm] de longitud de onda, el núcleo de la fibra debe ser menor o igual a 5.837 [μm]. Por lo tanto, si se fabrica una fibra óptica de 5 [μm] para estas condiciones se propagará un solo modo, como muestra la *Figura 2.17*.

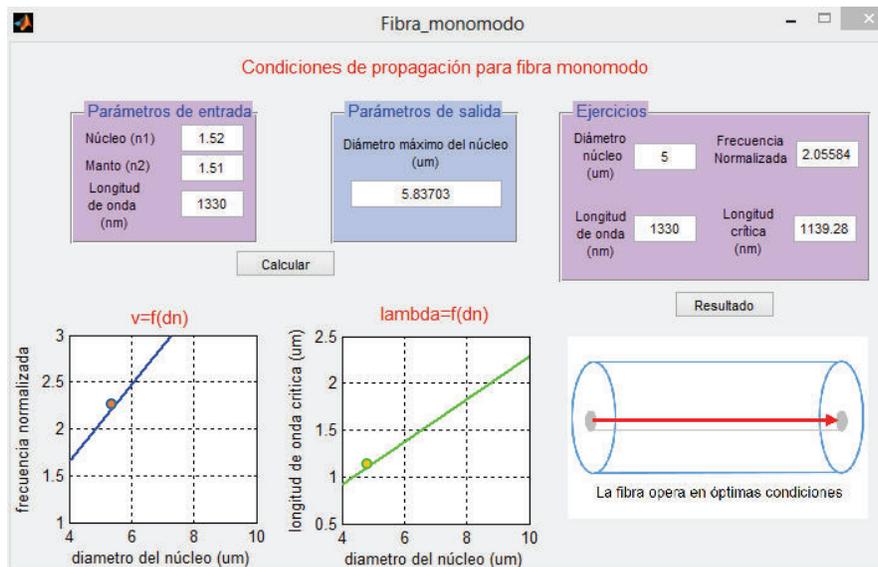


Figura 2.17 Parámetros correctos para una fibra monomodo a 1330 [nm]

Los modos de propagación dentro de una fibra óptica monomodo son sensibles a la longitud de onda de trabajo, si se varía la longitud de onda para las condiciones antes mencionadas y se utiliza una longitud menor a la longitud de onda de corte, como por ejemplo 1110 [nm], la fibra óptica ya no operará como monomodo, tal como muestra la *Figura 2.18*.

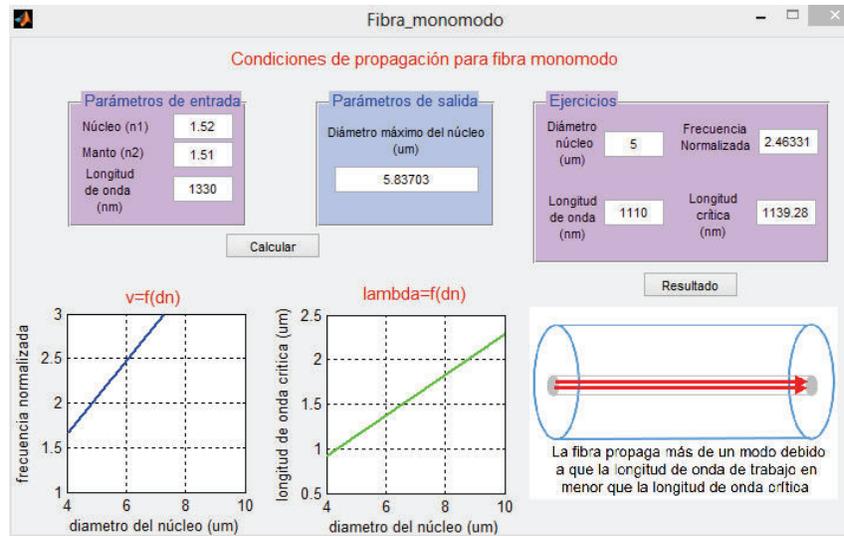


Figura 2.18 Longitud de onda menor a la longitud de onda de corte

Sin embargo, el parámetro determinante para que una fibra óptica opere como monomodo es el diámetro del núcleo. Si éste supera el diámetro máximo determinado, como muestra la *Figura 2.19*, no podrá operar como monomodo. Por ejemplo, para este ejercicio el diámetro (d_n) considerado es de 6 μm .

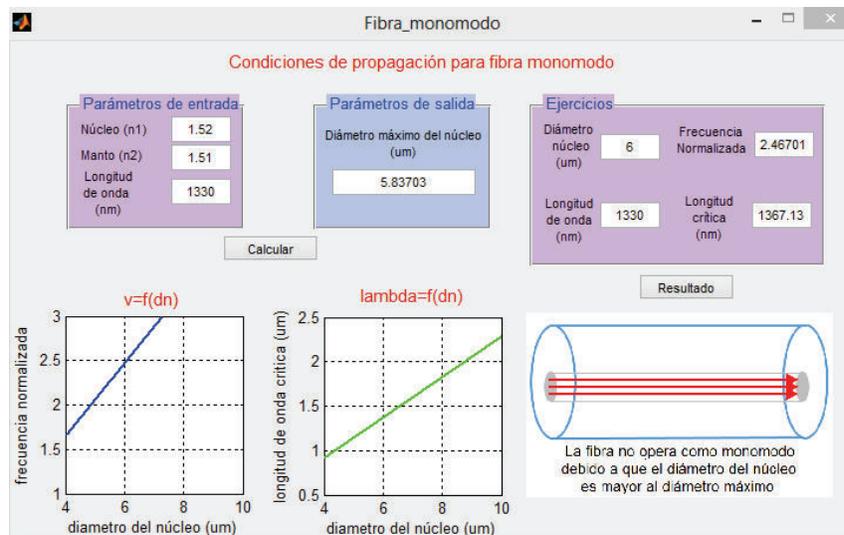


Figura 2.19 Diámetro del núcleo mayor al diámetro máximo

Las fibras monomodo pueden operar a longitudes de onda de 1550 [nm], para lo cual deben cumplir ciertos requerimientos. La *Figura 2.20* muestra la interfaz gráfica para una fibra monomodo operando a 1550 [nm], su diámetro debe ser

menor a 6.802 [μm], por lo que una fibra óptica de diámetro igual a 6 [μm] permitiría que actúe como monomodo.

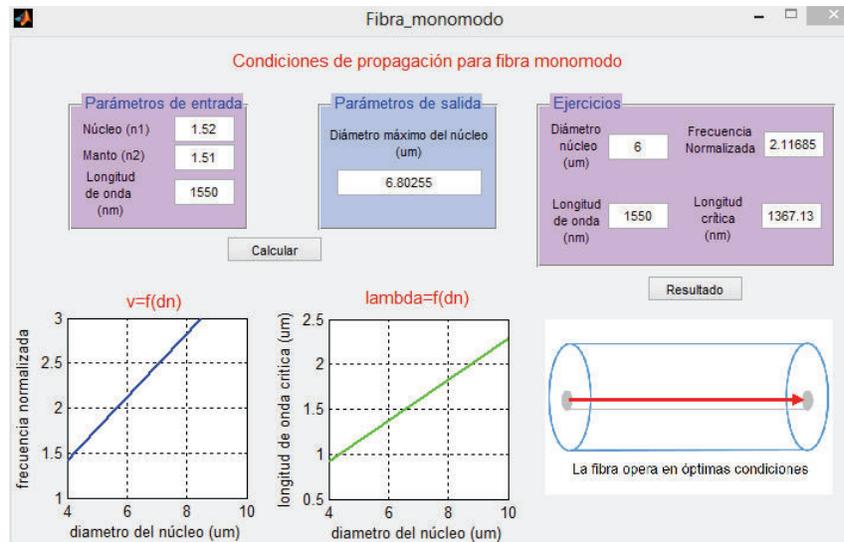


Figura 2.20 Parámetros correctos para una fibra monomodo a 1550 [nm]

2.3.3.3 Análisis de resultados

El análisis de las fibras multimodo se basó en la relación del número de modos que se propagan, el diámetro del núcleo y la longitud de onda a la que la fibra óptica trabaja. La relación entre la cantidad de modos y el diámetro del núcleo es directamente proporcional, lo que significa que a mayor diámetro del núcleo, mayor es la cantidad de modos que se propagarán.

Respecto a la longitud de onda de trabajo, se tiene una relación inversamente proporcional a la cantidad de modos de propagación. La interfaz gráfica demostró que una fibra multimodo operando a 850 [nm] propaga entre 1000 y 1700 modos, mientras que una fibra multimodo operando a 1330 [nm], entre 400 a 700 modos. Si el material de la fibra óptica varía, es decir, varían los índices de refracción, también varía la cantidad de modos propagados por la fibra. Así las fibras ópticas de vidrio operando a 850 [nm] propagan menos modos que las fibras ópticas de plástico, las cuales propagan entre 3000 a 4500 modos.

El análisis de las fibras monomodo se basó en cumplir las tres condiciones para que la fibra propague un único modo y eliminar de esta manera la dispersión modal presente en las fibras ópticas multimodo.

Al trabajar a una longitud de onda de 1330 [nm] el diámetro máximo del núcleo es de 5.83 [μm] como muestra la *Figura 2.17*, cualquier valor menor permite la propagación de un solo modo.

El gráfico de la frecuencia normalizada en conjunto con el gráfico de la longitud de onda de corte determinaron los rangos máximos de operación para la fibra monomodo, por ejemplo si el diámetro es de 5 [μm], la frecuencia normalizada es de 2.05 cumpliendo con ser menor que 2.405, y la longitud de onda de corte sería de 1139 [nm], razón por la cual la propagación es de un solo modo.

Los resultados obtenidos al variar la longitud de onda de trabajo haciéndola menor a la longitud de onda de corte demostraron que la fibra propaga más de un modo, teniendo así la presencia de dispersión modal. Al variar el tamaño del diámetro del núcleo incumpliendo con el valor máximo, hizo que la frecuencia normalizada supere los 2.405 necesarios para propagar un solo modo, en estas condiciones la fibra tampoco operó como monomodo.

El mismo análisis se realizó para una fibra óptica operando a una longitud de onda de 1550 [nm], a diferencia del análisis anterior, el diámetro máximo del núcleo es de 6.80 [μm] como muestra la *Figura 2.20*, lo cual permite tener un rango de tolerancia de 1.5 [μm] con relación a las gráficas de frecuencia normalizada y longitud de onda de corte del esquema anterior.

2.3.3.4 Aplicaciones de la práctica

Las fibras monomodo son usadas en conjunto con fuentes láser para enlaces de alta capacidad y grandes distancias, considerando que pueden operar en longitudes de onda de 1330 [nm] a 1550 [nm]. Mientras que las fibras multimodo comúnmente usadas con fuentes led son para enlaces de cortas distancias y bajas capacidades por los diferentes trayectos que toman los modos dentro de la fibra y la dispersión modal que presenta.

Esta práctica permite el análisis tanto de las fibras multimodo como de las fibras monomodo a base de una interfaz gráfica, de esta manera se puede determinar el comportamiento de los modos de propagación dentro de la fibra óptica al variar el material del núcleo y del manto o al variar la longitud de onda de operación.

Además, con la ayuda de esta práctica se puede determinar los parámetros necesarios para que las fibras monomodo puedan propagar un solo modo dentro de ella, eliminando el efecto de la dispersión modal propio de las fibras multimodo.

2.3.3.5 Posibles variaciones de la práctica

- En la interfaz gráfica para fibras multimodo, se puede variar el índice de refracción del núcleo y del manto utilizando núcleo de vidrio y manto de plástico y analizar los resultados para las diferentes longitudes de onda.
- En la interfaz gráfica para fibras monomodo, se puede hacer el análisis una longitud de onda de 1550 [nm] variando el diámetro del núcleo y la longitud de onda de operación.

2.3.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El uso de interfaces gráficas para realizar el análisis de los modos de propagación tanto en fibras ópticas multimodo como en las fibras ópticas monomodo permiten variar determinados parámetros y comparar entre si los resultados obtenidos.
- Las fibras ópticas multimodo operan en longitudes de onda de 850 [nm] a 1330 [nm] y son utilizadas en distancias máximas de 2 [km].
- Las fibras multimodo presentan dispersión modal por la propagación de varios modos en el núcleo, lo que causa ensanchamiento en el pulso de recepción, reducción de ancho de banda y menor velocidad de transmisión.
- Si la fibra óptica multimodo opera a longitudes de onda mayores, la cantidad de modos propagados disminuye, sin embargo, en longitudes de onda de 1550 [nm] se presentan otros parámetros como la presencia de iones OH^- que limitan la operación de estas fibras.
- Las fibras monomodo operan en longitudes de onda de 1330 [nm] a 1550 [nm] y son utilizadas para enlaces de grandes distancias. Hoy en día, estas fibras pueden ser utilizadas en banda L donde la longitud de onda es de 1650 [nm]
- Las fibras monomodo requiere del uso de fuentes directivas como el láser y un diámetro de núcleo pequeño para propagar un único modo.
- Las fibras monomodo eliminan el efecto de la dispersión modal, pero esto se logra cumpliendo principalmente con el diámetro máximo del núcleo.

2.4 PRÁCTICA 4: PARÁMETROS DINÁMICOS

2.4.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Simular escenarios que permitan el análisis de los parámetros dinámicos de un enlace óptico utilizando *OptiSystem*.
- Analizar el espectro óptico de potencia para fibras multimodo y monomodo en escenarios con atenuación.
- Comparar los resultados obtenidos en el dominio del tiempo óptico para un enlace con dispersión.
- Determinar las consecuencias de los efectos no lineales en la fibra óptica analizando su espectro óptico.

2.4.2 MARCO TEÓRICO [1][3][5][10]

Los sistemas de comunicaciones no son ideales, existen ciertos parámetros que degradan la señal transmitida hasta llegar a su destino, estos efectos si no son contrarrestados a tiempo pueden generar retardos y ensanchamiento de pulso, interferencias entre canales, consumo excesivo de ancho de banda, bajas velocidades de transmisión y pérdida de información.

Para un sistema de comunicaciones ópticas, se tiene dos tipos de parámetros que afectan la señal, los parámetros lineales: atenuación y dispersión, y los parámetros no lineales: automodulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM).

2.4.2.1 Atenuación

La atenuación (α), en conjunto con la dispersión, son los factores limitantes en un enlace de comunicaciones ópticas ya que reducen la potencia y ensanchan el pulso transmitido hasta su llegada al receptor.

La atenuación se define como la relación entre la potencia de salida (P_{out}) y la potencia de entrada (P_{in}), siendo la atenuación la pérdida de potencia en el canal de comunicaciones. En comunicaciones ópticas la atenuación es expresada en relación a la longitud del cable de fibra (L) [10]:

$$\alpha_{dB/Km} = 10 \frac{\log \frac{P_{out}}{P_{in}}}{L} \quad (\text{ec 2.14})$$

Este parámetro es producido por dos fenómenos fundamentales, los cuales son acumulativos con la distancia.

- **Absorción:** es debido a las impurezas de la fibra, las cuales dependen del material. Hay materiales que absorben más la luz a ciertas longitudes de onda y lo transforman en calor. Existen tres tipos de pérdidas de absorción las cuales dependen de la longitud de onda.
 - Absorción ultravioleta: decrece exponencialmente al aumentar la longitud de onda, siendo despreciable a los 1000 [nm].
 - Absorción infrarroja: se hace presente a partir de los 1400 [nm].
 - Absorción por iones OH⁻: tienen su mayor pico a los 1400 [nm].
- **Reflexión difusa o scattering (L_R):** El scattering de Rayleigh y Mie son anomalías físicas microscópicas en el material, lo que genera difracción y pérdida de luz en el manto. Estas pérdidas son relevantes en longitudes de onda de 400 [nm] a 1100 [nm] y dependen de la relación entre los índices de refracción del núcleo y del manto [2]:

$$L_R = [0.75 + 4.5(n_1^2 - n_2^2)]\lambda^{-4} \quad (\text{ec 2.15})$$

La ecuación antes descrita esta expresada en [dB/km], por lo que la longitud de onda (λ) debe expresarse en [μm].

La atenuación depende no solo de la longitud del cable sino también de la longitud de onda de trabajo, la cual se expresa como ventanas de trabajo:

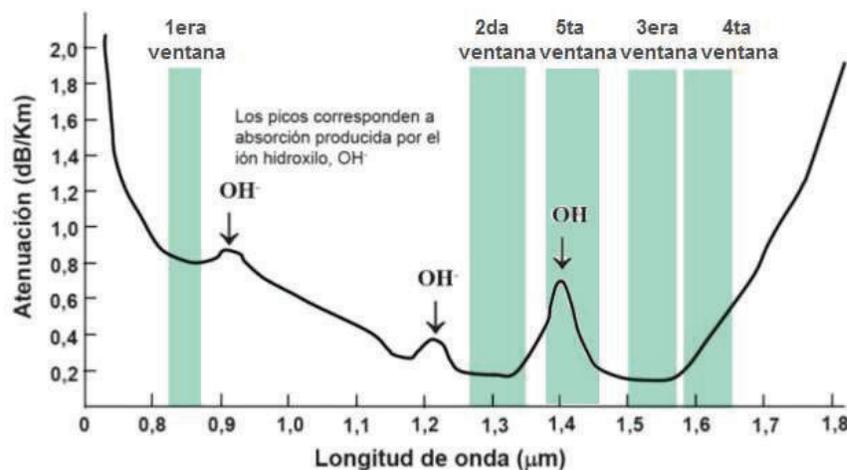


Figura 2.21 Atenuación vs. Longitud de onda [11]

- Primera ventana: $\lambda = 0.85 \mu m$, original
- Segunda ventana: $\lambda = 1.3 \mu m$, banda O
- Tercera ventana: $\lambda = 1.55 \mu m$, Banda C
- Cuarta ventana: $\lambda = 1.625 \mu m$, Banda L
- Quinta ventana: $\lambda = 1.47 \mu m$, Banda S

La *Figura 2.21* presenta las ventanas de operación de la fibra óptica y su relación con la atenuación, determinando que a mayor longitud de onda menor es la atenuación. Sin embargo, esta relación es valedera hasta los 1600 [nm], pasado los 1600 [nm], es decir, en la cuarta ventana, la atenuación comienza a aumentar. También, hay que considerar que debido a la absorción por iones OH^- existen picos en la atenuación presentes a los 900 [nm] a los 1200 [nm] y a los 1400 [nm].

2.4.2.2 Dispersión

La dispersión es el ensanchamiento de los pulsos transmitidos por la fibra óptica hasta llegar a su destino. La dispersión es directamente proporcional a la longitud de la fibra y comúnmente se expresa en [ns]. Se presentan 3 tipos de dispersión:

- **Dispersión modal (T_m):** está presente solo en las fibras multimodo, se produce por la presencia de varios modos de propagación en la fibra óptica, lo que podría causar una interferencia entre los pulsos adyacentes, aumentando el BER y reduciendo la velocidad de transmisión del sistema. Se puede reducir su efecto utilizando fibras multimodo de índice gradual, o se puede eliminar por completo con el uso de fibras monomodo.
- **Dispersión cromática de materiales o espectral (T_c):** está asociada con el índice de refracción de la fibra. Su efecto se produce debido a que las fuentes emiten luz en un rango de longitud de onda conocida como anchura espectral, como muestra la *Figura 2.22*.

Los modos que se propagan por la fibra óptica, viajan a diferente longitud de onda y por consiguiente a diferente velocidad llegando al receptor en tiempos distintos y ensanchando el pulso transmitido. El coeficiente de dispersión de material está expresado en [ps/km.ns] el cual disminuye si la longitud de onda aumenta.

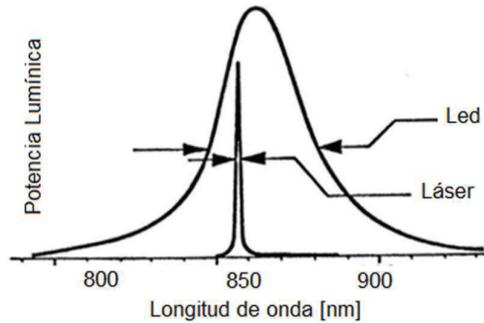


Figura 2.22 Anchura espectral [6]

- **Dispersión cromática de guía de onda (T_g):** afecta solo a las fibras monomodo, se produce debido a que la apertura numérica permite que el 80% de la luz ingrese al núcleo y el 20% se propague por el aire, en la conexión fuente fibra, y por el manto dentro de la fibra mismo. Ya que el índice de refracción del manto es menor que el del núcleo los modos de manto se propagan más rápido que los del núcleo. El coeficiente de dispersión de guía de onda se expresa en [ps/km.nm].

Entre los dos coeficientes, el de dispersión cromática de material y el de dispersión cromática de guía de onda, se pueden compensar y eliminar; para las fibras monomodo esto ocurre a la longitud de onda de 1300 [nm] como muestra la *Figura 2.23*. Sin embargo, a esta longitud de onda se tiene presente una atenuación mayor que a los 1550 [nm].

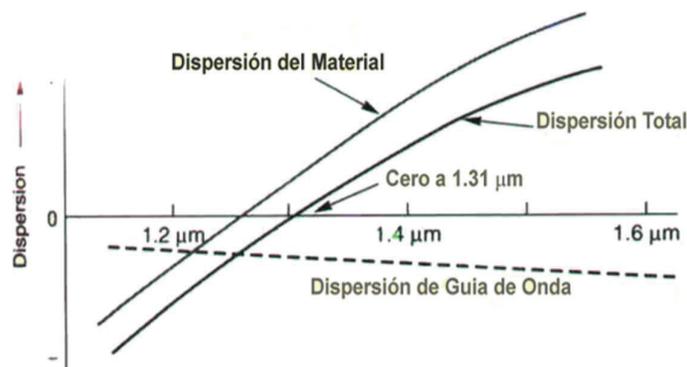


Figura 2.23 Dispersión cromática [11]

La dispersión total está determinada por la siguiente expresión [10], en la cual se debe tomar en cuenta que para las fibras monomodo no existe dispersión modal.

$$\tau^2 = \tau_m^2 + (\tau_c^2 + \tau_g^2) \quad (\text{ec 2.16})$$

La dispersión total limita la capacidad de un sistema de comunicaciones de lo cual se puede tener la expresión aproximada para el ancho de banda de transmisión del canal [10]:

$$AB = \frac{0.5}{\tau} \quad (\text{ec 2.17})$$

Para poder compensar el efecto de la dispersión en fibras monomodo, se debe jugar con los coeficientes de dispersión cromática, la dispersión cromática de material al depender de la composición del vidrio es compleja de modificar ya que aumentaría su atenuación.

Existen fibras que permiten que la dispersión cromática sea nula a los 1550 [nm], estas fibras son conocidas como fibras ópticas de dispersión desplazadas (DSF) y logran su objetivo modificando el perfil de índice de refracción.

Por otro lado, las fibras ópticas de compensación de dispersión (DCF) son diseñadas exclusivamente para reducir los efectos de la dispersión cromática. Esto se logra incluyendo un tramo reducido de fibra óptica de diferente dispersión cromática que contrarreste con el tramo principal. La desventaja de este método es que las fibras compensadoras tienen un coeficiente de atenuación mayor que las fibras monomodo estándar.

2.4.2.3 Efectos no lineales

Los efectos no lineales dependen de la potencia de la señal que ingresa a la fibra óptica. A mayor potencia emitida por la fuente los efectos no lineales aumentan; sin embargo, la potencia de la señal disminuye como consecuencia de la atenuación, esto hace que los efectos no lineales se vuelven menos considerables en relación a los efectos lineales a grandes distancias. Entre los principales efectos no lineales presentes en sistemas de comunicaciones ópticas se tiene:

- **Automodulación de fase (SPM):** conocido como efecto de Kerr Óptico, este efecto se produce debido a que el índice de refracción presenta componentes que son dependientes de la potencia en el medio óptico. Esto genera un desplazamiento en la fase lo que provoca que el pulso sufra

variaciones en el tiempo. El exceso de potencia en el canal óptico causa un ensanchamiento en el pulso de recepción. La automodulación de fase por sí sola no tiene efecto, pero en combinación con la dispersión cromática, puede degradar el pulso transmitido.

- **Modulación de fase cruzada (XPM):** este efecto es considerable en sistemas WDM, y también es producido por un exceso de potencia de la señal transmitida. Este efecto varía el índice de refracción generando un cambio de fase a los haces de luz que viajan a una diferente longitud de onda. La modulación de fase cruzada causa un retardo de la señal y ensanchamiento de pulso que puede interferir con los canales adyacentes en sistemas WDM.
- **Mezcla de cuatro ondas (FWM):** es causado cuando tres frecuencias se mezclan y forman una cuarta, este efecto es considerable en sistemas WDM. Esta nueva frecuencia puede coincidir con un canal legítimo de transmisión provocando interferencia o anulándolo por completo.

2.4.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar seis escenarios utilizando *OptiSystem* que permitan analizar los efectos de los parámetros dinámicos en los enlaces de comunicaciones ópticas.

- El primer escenario debe representar el efecto de la atenuación en fibras multimodo de diferente distancia. Este escenario permite el análisis del espectro óptico y de los valores de potencia en cada tramo del enlace.
- El segundo escenario debe representar el efecto de la atenuación en fibras monomodo de diferente distancia. Este escenario permite el análisis del espectro óptico y de los valores de potencia en cada tramo del enlace.
- El tercer escenario debe permitir el análisis del efecto de la dispersión en un enlace, además de la variación de los resultados al usar fibras compensadoras de dispersión. En este escenario se debe analizar la señal en el dominio del tiempo óptico.
- El cuarto escenario debe permitir el análisis del efecto no lineal de la automodulación de fase en una fibra óptica. En este escenario se propone

variar la potencia de la señal emitida y la distancia de la fibra óptica para analizar los cambios en su espectro óptico.

- El quinto escenario debe permitir el análisis del efecto no lineal de modulación de fase cruzada en un enlace de fibra con WDM. En este escenario se propone variar la potencia de la señal emitida y la distancia de la fibra óptica para analizar los cambios en su espectro óptico.
- El sexto escenario debe permitir el análisis del efecto no lineal de la mezcla de cuatro ondas en un enlace de fibra con WDM. En este escenario se propone variar la potencia de la señal de uno de los canales para analizar los cambios en el espectro óptico.

2.4.3.1 Escenario para el análisis del efecto de atenuación en fibras multimodo

El esquema mostrado en la *Figura 2.24* presenta dos fibras ópticas multimodo, una de 5 [km] de distancia fusionada con una fibra de 10 [km] de distancia, las cuales trabajan a una longitud de onda de 850 [nm]. Basándose en la *Figura 2.21* el coeficiente de atenuación para estas fibras es de 0.8 [dB/km].

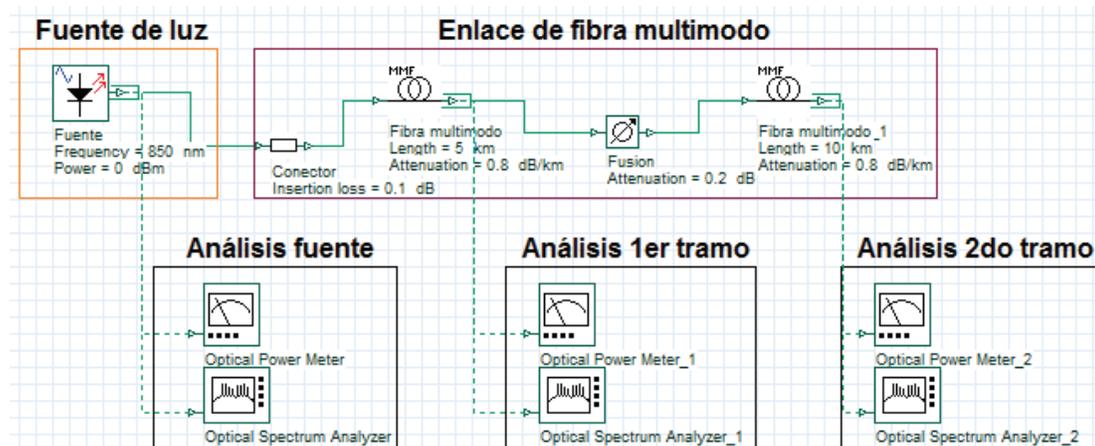


Figura 2.24 Atenuación en fibras multimodo

La fuente de este escenario emite una potencia de 0 [dBm], también se considera un conector de fibra, el cual tiene una pérdida de 0.1 [dB] y el bloque atenuador que representa las pérdidas por fusiones de 0.2 [dB].

La *Tabla 2.3* muestra los resultados obtenidos en el enlace, la potencia se reduce en el transcurso del viaje por la fibra óptica, debido al efecto de la atenuación al trabajar a 850 [nm]. También, las pérdidas por conectores y fusiones generan una

disminución de la potencia óptica. El análisis comparativo de los resultados obtenidos con los resultados teóricos se los presenta en la sección 2.4.3.7.

	Fuente óptica	Fibra óptica de 5 [km]	Fibra de óptica 10 [km]
Potencia	0.000 [dBm]	-4.216 [dBm]	-12.485 [dBm]

Tabla 2.3 Resultados de la atenuación en fibras multimodo

El espectro óptico se reduce al aumentar la distancia de la fibra óptica, aunque la fuente de luz emita potencia en un rango de longitud de onda, como muestra la *Figura 2.25*, mientras la longitud de onda se aleja de la longitud de onda central, la potencia va disminuyendo. Por lo que la atenuación en este tipo de enlaces hace que los espectros de potencias diferentes a la longitud de onda central se hagan imperceptibles al finalizar el enlace, como muestra la *Figura 2.26*.

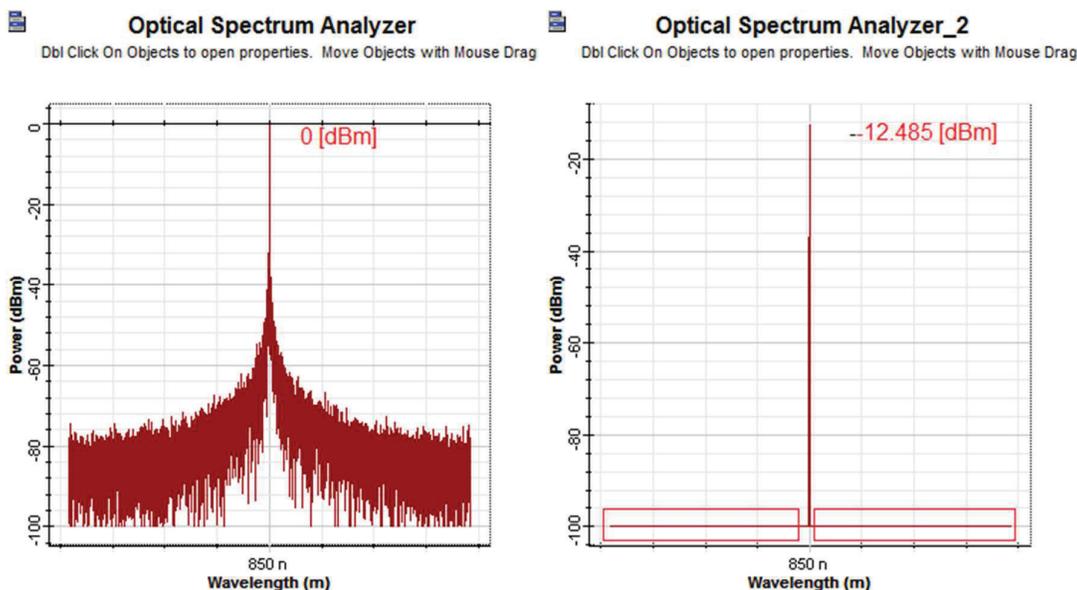


Figura 2.25 Espectro a la salida de la fuente

Figura 2.26 Espectro a la salida del enlace

2.4.3.2 Escenario para el análisis de efecto de atenuación en fibras monomodo

La *Figura 2.27* muestra el escenario que permite el análisis de la atenuación en un enlace con fibras monomodo. El esquema presenta tres fibras monomodo de 5, 10 y 15 [km] de distancia fusionadas trabajando a una longitud de onda de 1550 [nm]. Basándose en la *Figura 2.21*, el coeficiente de atenuación para estas fibras es de 0.2 [dB/km]. Los parámetros para la fuente, los conectores y las fusiones son los mismos que el escenario anterior.

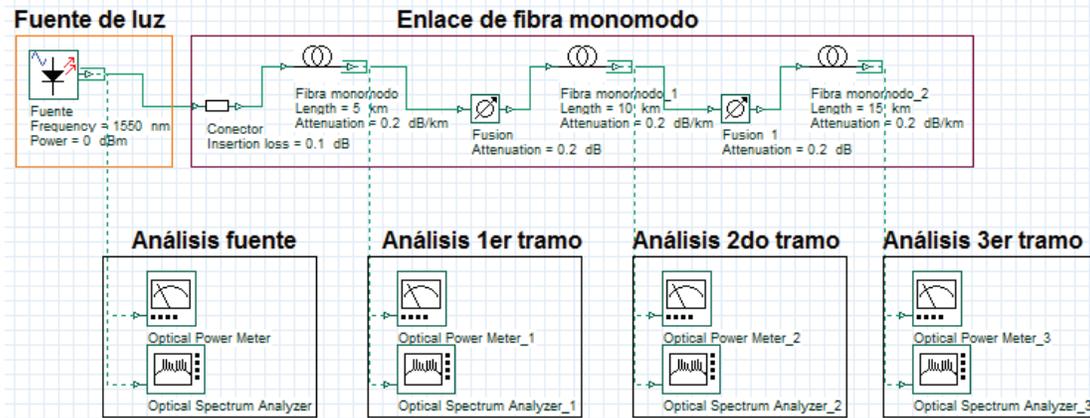


Figura 2.27 Atenuación en fibras monomodo

La *Tabla 2.3* muestra los resultados obtenidos en el enlace, la potencia se reduce en cada tramo de fibra óptica, sin embargo, la atenuación es menor que las fibras multimodo. Además del efecto de la atenuación están las pérdidas por el conector y las pérdidas por las fusiones en el trayecto, lo que generan disminución de la potencia óptica. El análisis comparativo de los resultados obtenidos con los resultados teóricos se los presenta en la sección 2.4.3.7.

	Fuente	Fibra óptica 5 [km]	Fibra óptica 10 [km]	Fibra óptica 15 [km]
Potencia	0.000 [dBm]	-1.100 [dBm]	-3.300 [dBm]	-6.500 [dBm]

Tabla 2.4 Resultados de la atenuación en fibras monomodo

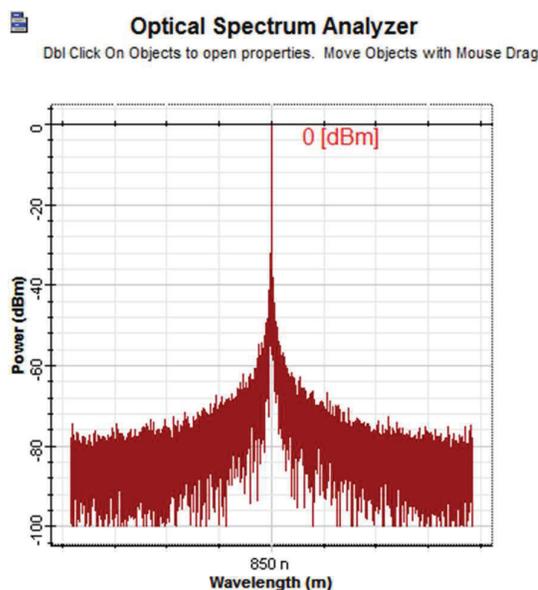


Figura 2.28 Espectro a la salida de la fuente

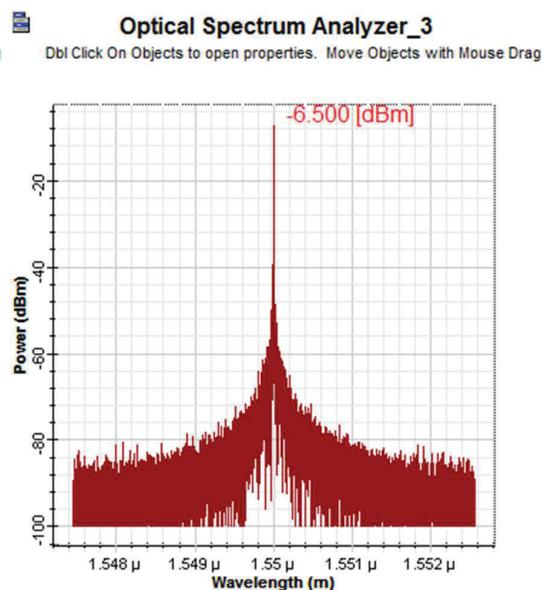


Figura 2.29 Espectro a la salida del enlace

El espectro óptico es diferente que el espectro de las fibras multimodo, ya que éste conserva los espectros de longitudes de onda diferentes de la longitud de onda central. Sin embargo, se puede observar la disminución de la potencia al finalizar el enlace de fibra óptica, como muestra la *Figura 2.29*.

2.4.3.3 Escenario para el análisis de la dispersión cromática en fibras ópticas

La *Figura 2.30* muestra el esquema utilizado para analizar el efecto de la dispersión cromática. El transmisor utiliza una fuente láser que emite una potencia de 0 [dBm] y el receptor está formado por un fotodetector PIN y un filtro pasabajo de Bessel, este filtro es diseñado con ondas cuadradas y presenta una fase lineal en las bandas pasantes, es por esto que presenta una distorsión mínima y la atenuación es constante a la frecuencia de corte (*Ver Anexo 5*).

La señal ingresa a una fibra monomodo de una distancia de 25 [km] que opera a una longitud de onda de 1550 [nm]. El coeficiente de dispersión cromática de esta fibra es de 16.6 [ps/km.nm] (*Ver Anexo 4*).

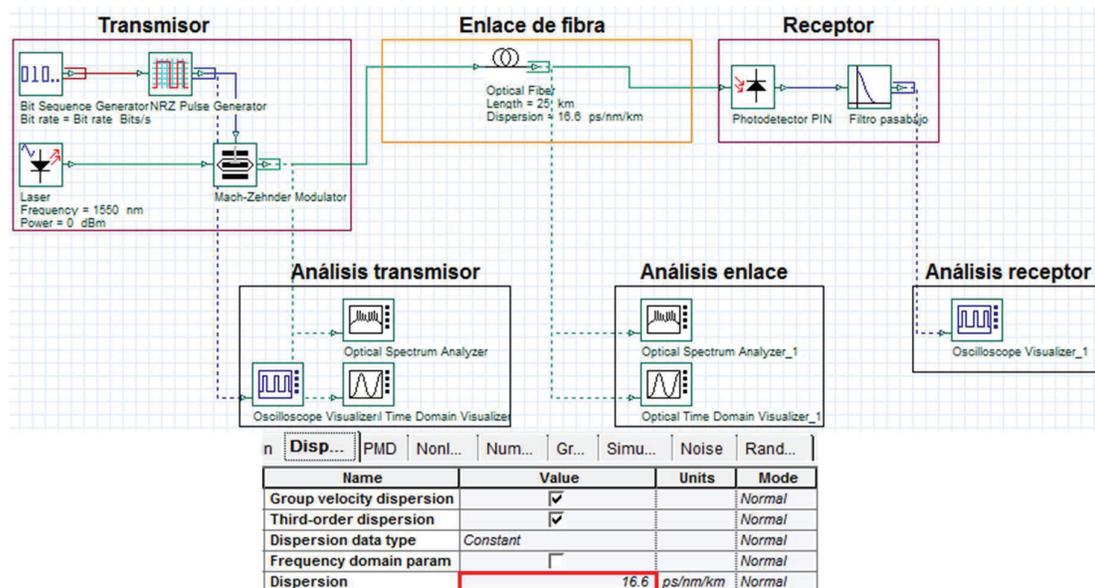


Figura 2.30 Esquema de un enlace óptico con dispersión

El enlace presenta un coeficiente de atenuación de 0.2 [dB], es por esto que la señal llega con una potencia de -5.218 [dBm] al receptor. Cuando la señal viaja por la fibra óptica, la dispersión cromática hace que la parte inferior del pulso se ensanche. La señal se ve degradada por este efecto, como muestra la *Figura 2.32*, el ancho del pulso se ensancha a 0.17 [ns].

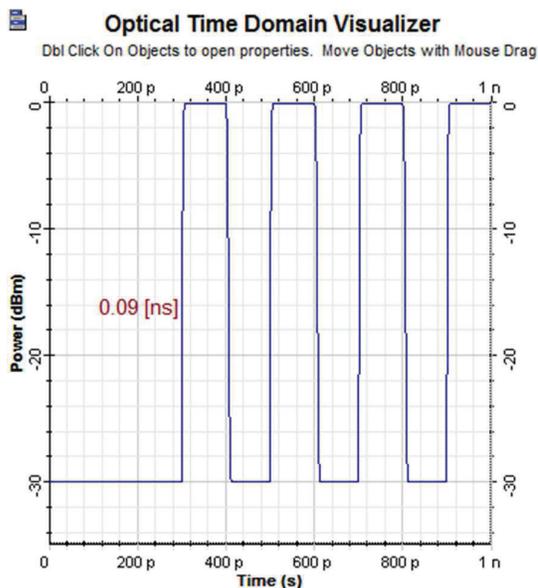


Figura 2.31 Señal óptica a la salida del transmisor

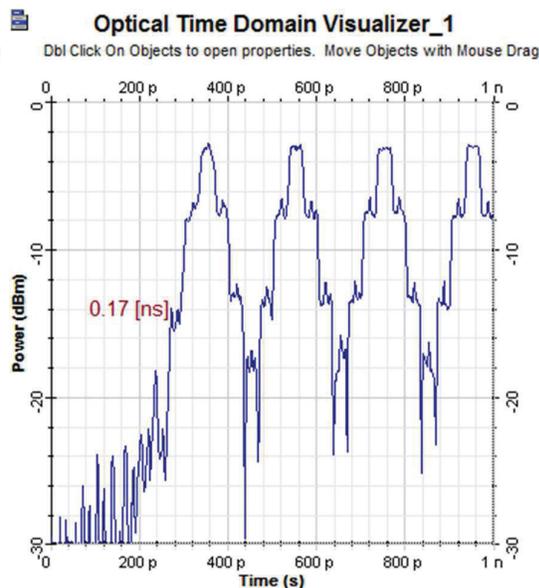


Figura 2.32 Señal a la salida de la fibra

Para contrarrestar los efectos de la dispersión cromática, se utiliza una fibra compensadora de 10% de longitud de la fibra óptica monomodo principal como muestra la *Figura 2.33*, el coeficiente de dispersión de la fibra compensadora es de -92.6 [ps/km.ns] (*Ver Anexo 4*).

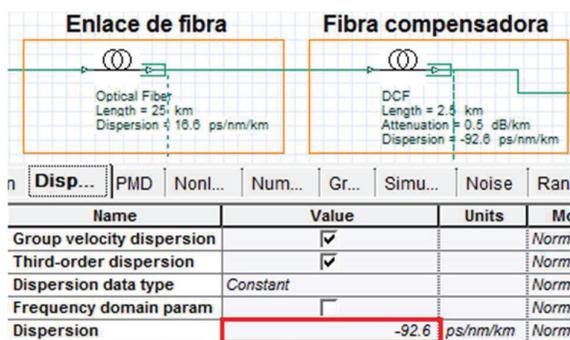


Figura 2.33 Enlace óptico con fibra compensadora de dispersión

La función de la fibra compensadora es reducir el efecto de la dispersión cromática, es decir, disminuir el ancho del pulso que se produjo a lo largo del enlace de fibra. La *Figura 2.34* muestra los efectos de la fibra compensadora en la señal del enlace anterior. Al llegar al receptor, la señal se atenúa más debido a que la atenuación de la fibra compensadora es mayor por lo que la potencia con la que llega es de 6.468 [dBm]. Sin embargo, el ancho de pulso se disminuye a 0.14 [ns], reduciendo el efecto de dispersión cromática.

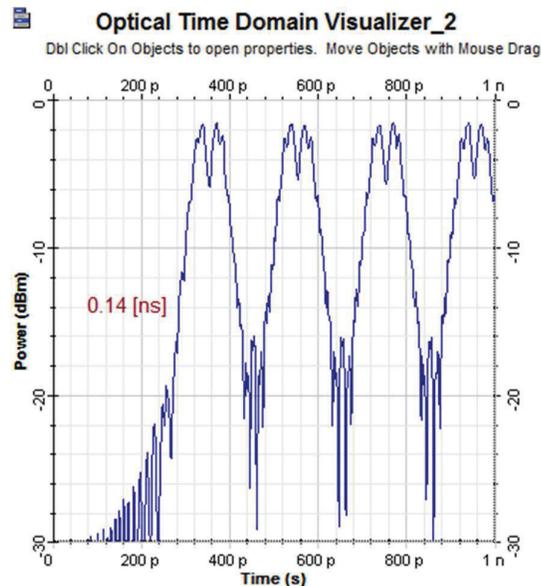


Figura 2.34 Señal a la salida de la fibra compensadora

2.4.3.4 Escenario para el análisis de la automodulación de fase

Este escenario permite analizar el efecto de la automodulación de fase (SPM). El esquema presenta una fibra monomodo de 3 [km] de longitud operando en la tercera ventana. Ya que el efecto de automodulación depende de la potencia en el medio, como ejemplo práctico, se utiliza una fuente que emita un pulso óptico de una potencia exagerada de 30 [dBm], como muestra la *Figura 2.35*.

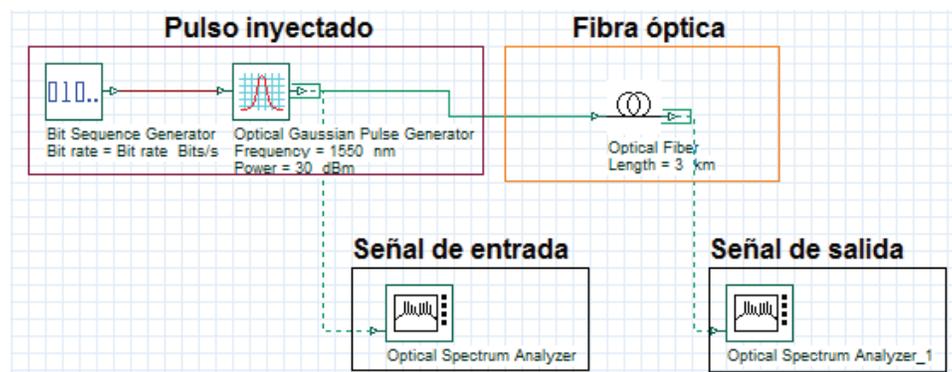


Figura 2.35 Automodulación de fase

Los efectos no lineales son susceptibles a la potencia, cuando el enlace presenta un exceso de potencia óptica la automodulación de fase hace que el pulso se ensanche, como muestra la *Figura 2.36*, este efecto en conjunto con la dispersión cromática pueden determinar la eficiencia en sistemas WDM, ya que generarían interferencia entre canales dificultando la recepción y aumentando el BER.

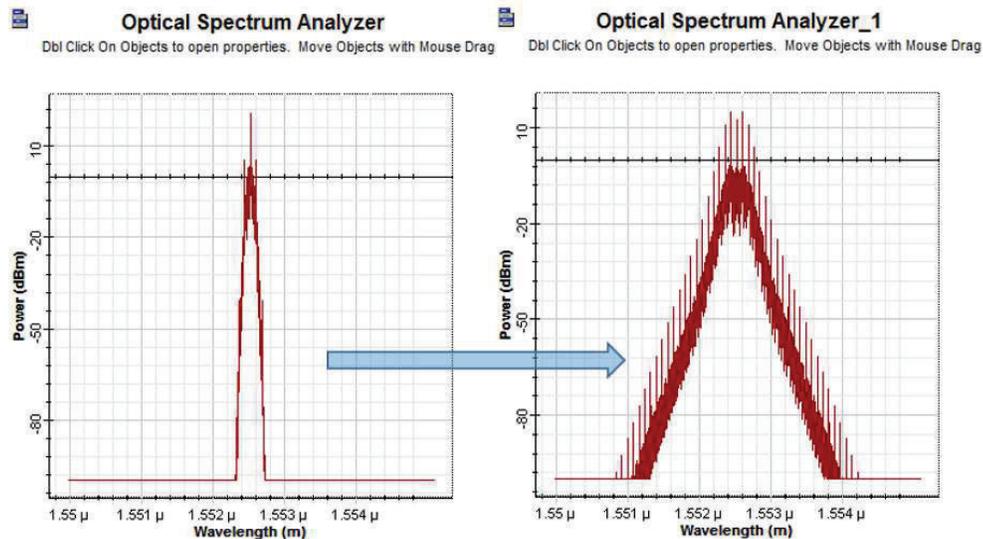


Figura 2.36 Ensanchamiento de pulso por efecto SPM

2.4.3.5 Esquema para el análisis de la modulación de fase cruzada

Este escenario permite analizar el efecto de la modulación de fase cruzada en un sistema WDM. El esquema de la *Figura 2.37* muestra un sistema WDM de dos canales que envían su señal por una fibra óptica monomodo de 25 [km] operando en la tercera ventana. Al igual que la automodulación de fase, la modulación de fase cruzada se hace presente al tener un exceso de potencia en el enlace. Es por esto que como ejemplo práctico el primer canal envía un pulso óptico con una potencia exagerada de 30 [dBm] a una longitud de onda de 1550 [nm], mientras que el segundo canal envía su pulso óptico a una potencia de 0 [dBm] a una longitud de onda de 1552 [nm].

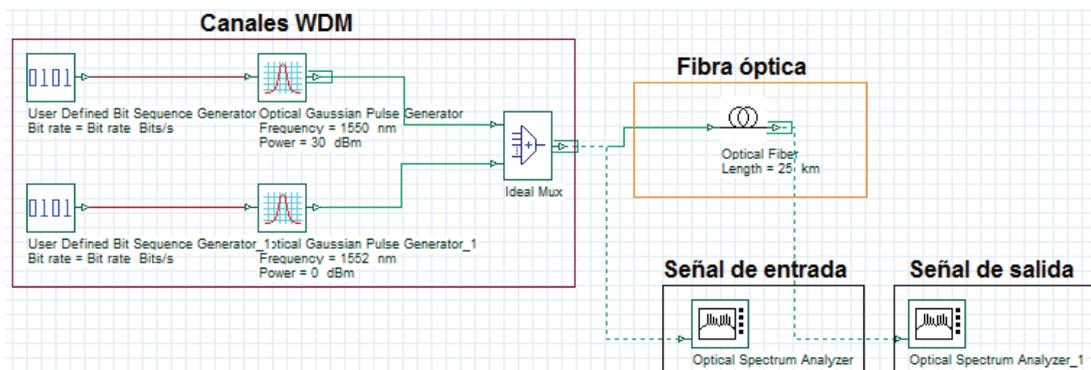


Figura 2.37 Modulación de fase cruzada

El efecto de la modulación de fase cruzada es producido por un exceso de potencia, el primer canal sobrecarga al sistema con una potencia de 30 [dBm], por lo que el ensanchamiento de su pulso es más evidente que el del pulso del segundo canal, esto genera interferencia entre los canales, como muestra la *Figura 2.38*.

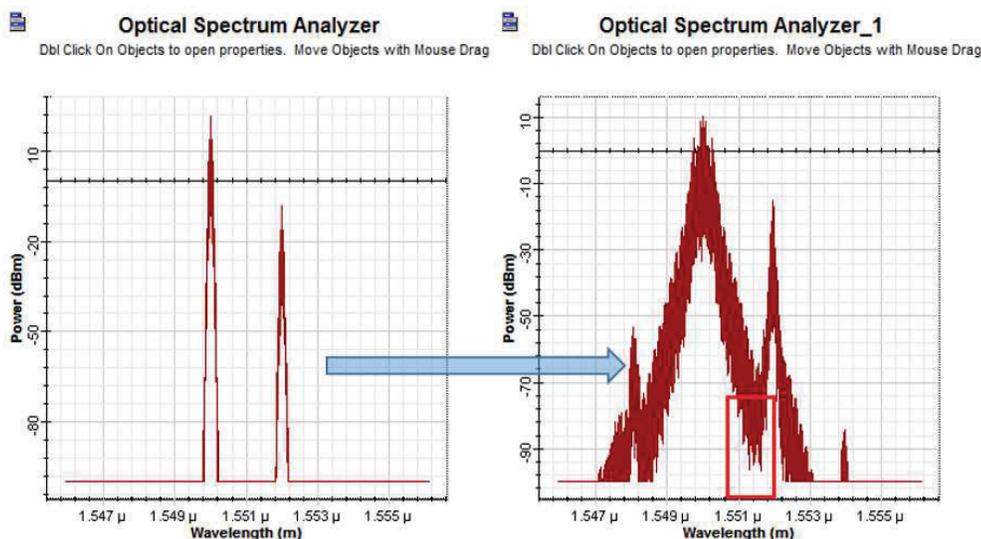


Figura 2.38 Ensanchamiento de pulsos en canal WDM

2.4.3.6 Escenario para el análisis de la mezcla de cuatro ondas

El esquema de la *Figura 2.39* muestra un sistema WDM de tres canales que envían su señal por una fibra óptica monomodo de 50 [km] de longitud operando en la tercera ventana. Al igual que en los casos anteriores, los efectos no lineales afectan al enlace cuando hay presencia de exceso de potencia.

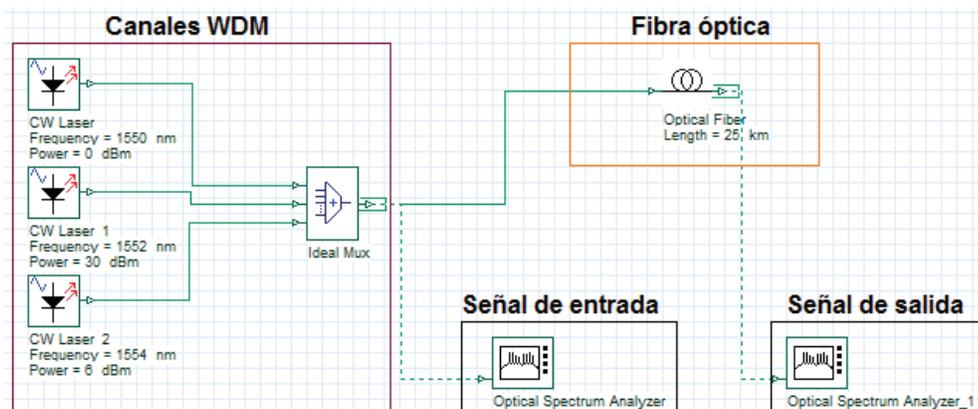


Figura 2.39 Mezcla de cuatro ondas

El primer canal envía una señal con potencia de 0 [dBm] a una longitud de onda de 1550 [nm], el segundo canal envía su señal a una potencia de 30 [dBm] a una longitud de onda de 1552 [nm], por último, el tercer canal envía su señal de información con 6 [dBm] de potencia a una longitud de onda de 1554 [nm].

El exceso de potencia del tercer canal produce que el efecto de FWM sea considerable, haciendo que el ancho del pulso se incremente, el espectro óptico se combina y forma espectros de potencia no deseados a la longitud de onda de 1548 [nm] y 1556 [nm], como muestra la *Figura 2.40*.

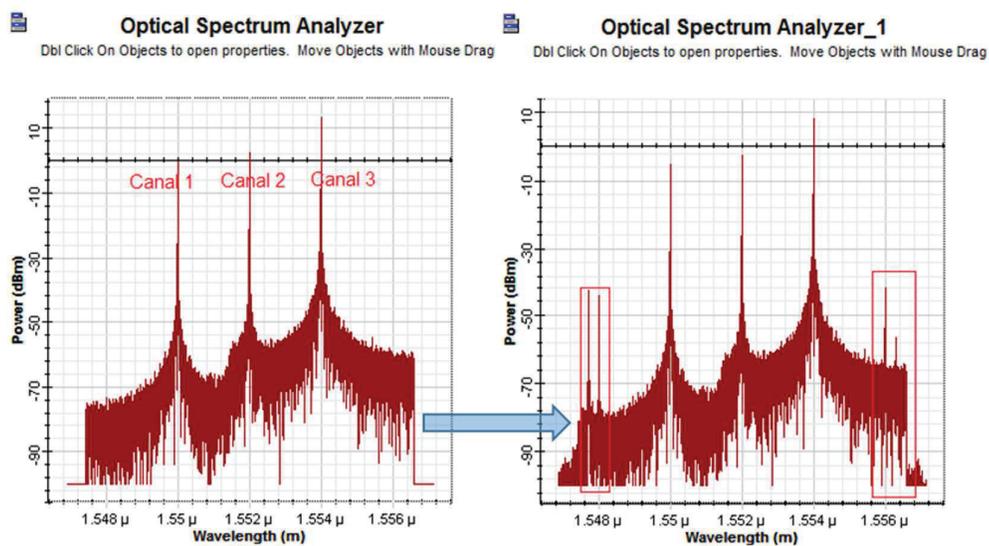


Figura 2.40 Generación de espectros de potencia no deseados

2.4.3.7 Análisis de resultados

Para los dos primeros escenarios se realiza el análisis de la potencia de entrada y a la salida de la fibra óptica, calculando el error relativo y comparando los resultados para ambos casos.

En el primer escenario realizado para fibras multimodo, la potencia emitida por la fuente fue de 0 [dBm], considerando las pérdidas de conectores de 0.1 [dB], un coeficiente de atenuación de 0.8 [dB/km], para el primer tramo de fibra multimodo se obtiene una potencia de salida igual a:

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{conectores} - \alpha_{fibra}$$

$$P_{out} = 0 \text{ [dBm]} - 0.1 \text{ [dB]} - (5 * 0.8 \text{ [dB]})$$

$$P_{out} = 0 \text{ [dBm]} - 4.1 \text{ [dB]} = -4.1 \text{ [dBm]}$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{error\ te\acute{o}rico - error\ pr\acute{a}ctico}{error\ te\acute{o}rico} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{-4.1 \text{ [dBm]} - (-4.216 \text{ [dBm]})}{-4.1 \text{ [dBm]}} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = 2.829\%$$

Para el segundo tramo de fibra multimodo, la potencia teórica que ingresa a la fibra óptica es de -4.1 [dBm] que es la potencia de salida del primer tramos. Considerando las pérdidas por fusión de 0.2 [dB] y un coeficiente de atenuación de 0.8 [dB/km], se obtiene la potencia de salida de:

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{fusión} - \alpha_{fibra}$$

$$P_{out} = -4.1 \text{ [dBm]} - 0.2 \text{ [dB]} - (10 * 0.8 \text{ [dB]})$$

$$P_{out} = -4.1 \text{ [dBm]} - 8.2 \text{ [dB]} = -12.3 \text{ [dBm]}$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{error\ te\acute{o}rico - error\ pr\acute{a}ctico}{error\ te\acute{o}rico} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{-12.3 \text{ [dBm]} - (-12.485 \text{ [dBm]})}{-12.3 \text{ [dBm]}} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = 1.504\%$$

Los errores obtenidos, se presentan debido a que las fibras multimodo tienen varios modos propagándose por su interior, y algunos pueden perderse en el trayecto disminuyendo la potencia de la señal. En los cálculos teóricos este efecto no se lo considera. Sin embargo, estos errores son mínimos y están presentes debido a las condiciones randómicas del simulador.

A pesar de que la distancia que viaja la luz en las fibras multimodo es menor comparada con la distancia para el escenario con fibras monomodo, la potencia al final del canal llega a los -12.485 [dBm], siendo el 5% de la potencia de la fuente, esto se debe al elevado coeficiente de atenuación que se presenta a una longitud de onda de 850 [nm].

El espectro óptico de un enlace con fibras multimodo demostró, que estas fibras no pueden ser usadas a grandes distancias, ya que la atenuación hace que la potencia de la señal disminuya notablemente.

En el segundo escenario dedicado a las fibras monomodo, las condiciones de la fuente, conectores y fusiones son las mismas, sin embargo, el trayecto que viajó la señal por la fibra óptica fue mayor ya que se tenía tres tramos de fibra de diferentes distancias alcanzando un total de 30 [km], el doble del trayecto con fibra multimodo.

En el primer tramo del enlace, a la salida de la fuente la potencia fue de 0 [dBm] considerando las pérdidas de conectores de 0.1 [dB] y el coeficiente de atenuación de 0.2 [dB/km].

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{conector} - \alpha_{fibra}$$

$$P_{out} = 0 [dBm] - 0.1 [dB] - (5 * 0.2 [dB])$$

$$P_{out} = 0 [dBm] - 1.1 [dB] = -1.1 [dBm]$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{error\ te\acute{o}rico - error\ pr\acute{a}ctico}{error\ te\acute{o}rico} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{-1.1 [dBm] - (-1.1 [dBm])}{-1.1 [dBm]} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = 0\%$$

En el segundo tramo, la potencia teórica que ingresa es de -1.1 [dBm], además, se consideran las pérdidas por fusión de 0.2 [dB] entre la primera y la segunda fibra y un coeficiente de atenuación de 0.2 [dB/km] obteniendo así:

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{fusi\acute{o}n} - \alpha_{fibra}$$

$$P_{out} = -1.1 [dBm] - 0.2 [dB] - (10 * 0.2 [dB])$$

$$P_{out} = -1.1 [dBm] - 2.2 [dB] = -3.3 [dBm]$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{error\ te\acute{o}rico - error\ pr\acute{a}ctico}{error\ te\acute{o}rico} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{-3.3 [dBm] - (-3.3 [dBm])}{-3.3 [dBm]} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = 0\%$$

El tercer y último tramo, también presentó pérdidas por fusión de 0.2 [dB] y la potencia teórica que ingresa es de -3.3 [dBm], por lo tanto, se obtiene que la potencia al final del enlace es de:

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{fusión} - \alpha_{fibra}$$

$$P_{out} = -3.3 [dBm] - 0.2 [dB] - (15 * 0.2 [dB])$$

$$P_{out} = -3.3 [dBm] - 3.2 [dB] = -6.5 [dBm]$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{error\ teórico - error\ práctico}{error\ teórico} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = \left| \frac{-6.5 [dBm] - (-6.5 [dBm])}{-6.5 [dBm]} \right| * 100$$

$$Error\ relativo = 0\%$$

Este escenario no presentó errores debido a que la atenuación es el único factor que afecta a la potencia de la señal. Las fibras monomodo emiten un único modo de propagación por lo que no hay pérdida interna de potencia.

Para las fibras monomodo, se puede visualizar en el espectro óptico que la potencia de la fuente en longitudes de onda diferentes de 1550 [nm], se atenúan pero no desaparecen completamente, permitiendo que no se pierda información, alcanzando mayores distancias.

En la segunda parte de la práctica se presentaron escenarios con dispersión cromática. La dispersión cromática al ser directamente proporcional con la distancia, su efecto aumenta en tramos mayores. Como se pudo observar la señal al viajar por el tramo de fibra de 25 [km] con dispersión, sufrió una variación en el ancho de pulso alcanzando un valor de 0.17 [ns], esto quiere decir que la dispersión cromática casi duplicó el ancho del pulso, ya que originalmente se tenía un ancho de pulso de 0.09 [ns]

Para solventar este problema, se presentó un escenario con una fibra compensadora, con una distancia de 2.5 [km]. Esta fibra permitió reducir el ancho de pulso a 0.14 [ns] y así no tener distorsión en la señal. Corregir la dispersión cromática es esencial para aplicaciones de alta velocidad y para disminuir los efectos no lineales de la fibra óptica, ya que el ensanchamiento del pulso puede generar interferencia intersímbolo (ISI), solapamiento, interferencia entre canales y en consecuencia una transmisión errónea.

Sin embargo, la solución mediante el uso de fibras compensadoras afecta la potencia de la señal, ya que estas fibras tienen un índice de atenuación mucho más grande y podrían causar que la señal se atenúe lo suficiente para no ser detectada por el receptor.

En la tercera parte de la práctica se realizó escenarios para el análisis de los efectos no lineales de la fibra óptica. El primer escenario mostró el efecto de automodulación de fase. Al tener una potencia excesiva el pulso en el espectro de potencia se ensanchó notablemente:

$$espectro_{tx} = 1.5501 [nm] - 1.5497 [nm] = 400 [nm]$$

$$espectro_{ensanchado} = 1.5504 [nm] - 1.5494 [nm] = 1000 [nm]$$

$$\% \text{ de ensanchamiento} = \frac{1000 [nm]}{400 [nm]} * 100 = 250\%$$

El pulso en consecuencia se ensanchó 2.5 veces del original, esto se puede corregir usando fibras compensadoras de dispersión. Al aumentar la distancia del enlace a 25 [km], el pulso se ensanchó pero no en las mismas proporciones que a los 3 [km] como muestra la *Figura 2.41*, el efecto de la automodulación de fase fue disminuyendo ya que la potencia de la señal se atenuó por la distancia de la fibra óptica.

$$espectro_{tx} = 1.5501 [nm] - 1.5497 [nm] = 400 [nm]$$

$$espectro_{ensanchado} = 1.5524 [nm] - 1.5484 [nm] = 4000 [nm]$$

$$\% \text{ de ensanchamiento} = \frac{4000 [nm]}{400 [nm]} * 100 = 1000\%$$

El pulso se ensanchó 10 veces más del original, sin embargo, si la dispersión tuviera un efecto lineal directamente proporcional a la distancia, a 25 [km] el pulso se debería ensanchar 20 veces, por lo que se demuestra que la automodulación de fase disminuye su efecto al aumentar la distancia.

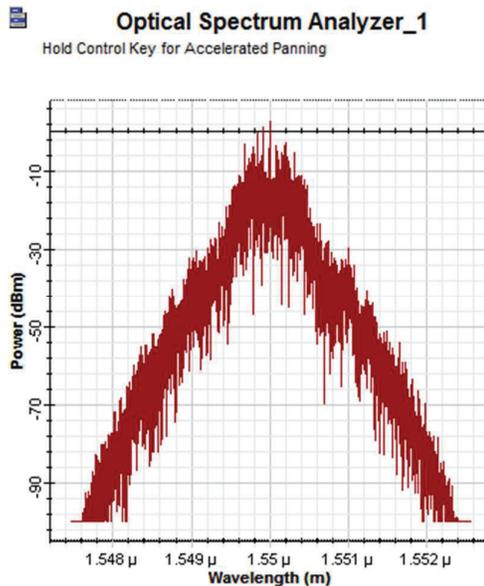


Figura 2.41 SPM al aumentar la distancia

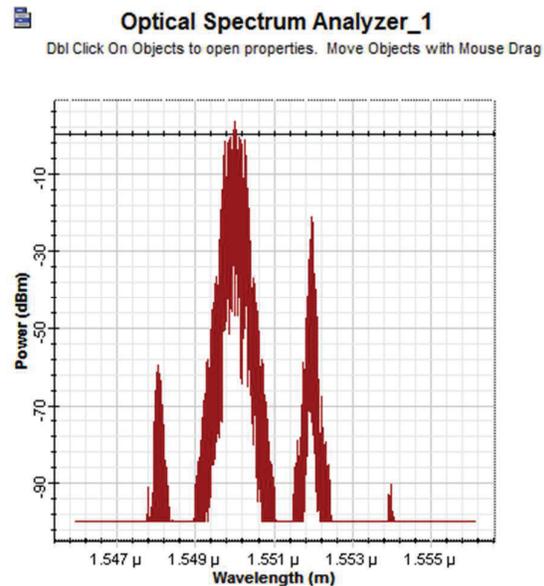


Figura 2.42 XPM al aumentar la distancia

El segundo escenario presentó el efecto de la modulación de fase cruzada, la cual afecta principalmente en sistemas WDM. El exceso de potencia en uno de los canales causó que el pulso del espectro óptico se ensanchara e interfiriera con el pulso del canal adyacente. En la recepción, la demultiplexación se verá afectada porque los canales no están bien identificados.

Al modificar la distancia a 50 [km], el efecto de la modulación de fase cruzada disminuyó debido a que la potencia de la señal se atenuó por la distancia. La *Figura 2.42* muestra que ya no existe interferencia entre los dos canales.

Por último, el tercer escenario mostró el efecto de mezcla de cuatro ondas, este efecto está presente en sistemas WDM, al tener uno de los canales con exceso de potencia, se crearon nuevos espectros de potencia, este efecto tiene relevancia cuando uno de los espectros no deseados coincide con un espectro legítimo, es decir, un canal con información es interferido por un canal no deseado creado por FWM, haciendo que la información se pierda.

2.4.3.8 Aplicaciones de la práctica

Los parámetros dinámicos son propios de las fibras ópticas y dependerán del tipo de fibra que se utilice en el enlace. Así como también de la distancia, los coeficientes de dispersión y el tipo de aplicación sea punto a punto o con varias señales en un solo enlace como WDM.

Esta práctica hace el análisis de los tres parámetros principales en las fibras, tanto monomodo como multimodo, permitiendo determinar las maneras de reducir el efecto que causan en la transmisión para poder tener un enlace óptimo.

Por ejemplo, para contrarrestar el efecto de la atenuación de la señal se utiliza amplificadores ópticos o repetidores cada cierta distancia con el fin de no perder información, teniendo en cuenta que la amplificación no solo afecta a la señal sino también al ruido, por lo que se debe ubicar el amplificador a una distancia donde la señal tenga mayor potencia que el ruido, de otro modo el enlace sería inaceptable ($P_{señal} < P_{ruido}$).

Reducir el efecto de la dispersión, también es primordial para que un enlace se considere óptimo. Al reducir su efecto también se reducen los efectos no lineales de la fibra óptica. En esta práctica se puede analizar cómo la dispersión limita la transmisión en enlaces de alta velocidad y en enlaces multiplexados ya que el ensanchamiento del pulso genera interferencias entre canales transmitidos.

2.4.3.9 Posibles variaciones de la práctica

- Para el análisis de la atenuación se puede modificar la potencia de la fuente y aumentar en el enlace más tramos de fibra multimodo o monomodo operando a diferente longitud de onda.
- En el escenario de análisis de la atenuación en fibras monomodo, se puede cambiar ventana de operación, en este ejercicio se utilizó la tercera ventana, sin embargo, las fibras monomodo también operan en la cuarta y quinta ventana.
- En el escenario con dispersión cromática se puede variar la distancia para analizar el efecto de la dispersión en enlaces cortos y en enlaces de cientos de kilómetros.

- Se puede variar la velocidad del sistema y observar cómo la señal cambia por efecto de la dispersión cromática.
- Se puede realizar el esquema de un sistema de comunicaciones ópticas con WDM que permita el análisis de los parámetros dinámicos incluyendo los efectos no lineales y variar tanto la distancia como la velocidad para determinar los parámetros que causan más alteración de la señal.

2.4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La atenuación es el primer factor determinante del sistema de comunicaciones ópticas, su coeficiente decrece a medida que aumenta la longitud de onda de operación. A excepción de la cuarta ventana de operación donde el coeficiente de atenuación empieza a aumentar.
- La atenuación tiene una relación directamente proporcional a la distancia por lo que se debe tomar medidas para contrarrestar su efecto mediante el uso de amplificadores pero se debe considerar que no solo se amplificaría la señal, sino también el ruido inherente en el sistema.
- La dispersión es otro parámetro fundamental, el cual afecta al ensanchamiento del pulso, lo que puede generar interferencia intersímbolo, solapamiento y a su vez una recepción errónea.
- La dispersión y los efectos no lineales son sensibles a la potencia, sin embargo, disminuyen al aumentar la distancia debido a que la potencia de la señal baja por efecto de la atenuación.
- Para contrarrestar los efectos no lineales es necesario compensar la dispersión cromática, utilizando fibras ópticas compensadoras a pesar de su alto coeficiente de atenuación.
- Para sistemas WDM de alta velocidad se debe considerar los efectos de modulación de fase cruzada, más que los efectos de mezcla de cuatro ondas, ya que el ensanchamiento de pulso limita el desempeño del sistema. Esto depende de la anchura que presente cada canal óptico en el enlace WDM.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO II

- [1] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics" Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback).
- [2] Binh, Le Nguyen "Optical Fiber Communications System, Theory and Practice whit Matlab and Simulink Models", CRC Press ©2010 ISBN 978-1-4398-0620-3.
- [3] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd ed., Copyright © 2002 by John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-21571-6.
- [4] Govind P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems" 4th ed., Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 978-0-470-50511-3 (Hardback).
- [5] Govind. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 3rd Ed, Academic Press, 2001.
- [6] Harris William, Craig Freudenrich, "How Light Works", How Stuff works, Science <http://science.howstuffworks.com/light12.htm>
- [7] Mata H. Gloria, González P. Virgilio, "Sistemas de comunicaciones electrónicas", Pearson Educación, 2003, ISBN 9702603161, 9789702603160.
- [8] López Francisco, "Conceptos fundamentales de comunicaciones ópticas", Laboratorio de Comunicaciones ópticas – Dpto. Tecnología Fotónica y Bioingeniería.
- [9] Montaña Rogelio, "Internet 2", Universidad de Valencia, Mondragon, enero 2000. <http://slideplayer.es/slide/106726/>.
- [10] MSc. Jiménez María Soledad, "Comunicaciones Ópticas", Escuela Politécnica Nacional, folleto y diapositivas.
- [11] Rojas, Russell Arturo, "Estándares de banda ancha Redes PDH" publicación 21 de julio de 2015. <http://es.slideshare.net/arturcrist/redes-pdh>
- [12] Sotelo O. Jaime, "Las Fibra Ópticas de Plástico", Facultas de ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marco, Lima, Electrónica-UNMSM, N.-22, diciembre 2008.

CAPÍTULO III

TRANSMISORES ÓPTICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace referencia a los transmisores ópticos y sus componentes básicos, enfocándose en las fuentes como elemento principal de un transmisor. Los transmisores ópticos son los encargados de la conversión electro-óptica y permiten el envío de la señal por medio de fotones y no por electrones.

Este capítulo presenta cuatro prácticas que permiten el estudio y análisis del comportamiento de los transmisores ópticos en diferentes escenarios, variando los elementos que los conforman y el tipo de enlace de fibra óptica.

En la primera práctica, se analiza comparativamente el comportamiento de las fuentes led y las fuentes láser ante el estímulo de una señal eléctrica. Se analiza el tiempo de respuesta y el espectro óptico de las fuentes. Este análisis permite determinar qué tipo de fuente utilizar para las diferentes aplicaciones que se tiene en comunicaciones ópticas.

La segunda práctica, presenta las características, ventajas y desventajas de la modulación directa y la modulación indirecta. Esta práctica determina el tipo de modulación que se puede utilizar para la transmisión de la señal a través del medio óptico dependiendo de las características del enlace y del sistema, tales como, velocidad de transmisión, distancia, tipo de fibra óptica, entre otros.

La tercera y cuarta práctica, se enfocan en dos de las técnicas de multiplexación utilizadas en sistemas de comunicaciones ópticas. Multiplexación por división de onda (WDM) y multiplexación por división de tiempo óptico (OTDM). En estas prácticas se analizará el comportamiento de los sistemas multiplexados y los parámetros requeridos para tener un enlace óptimo. Además, como ejemplo práctico, se presenta condiciones en las que los enlaces multiplexados presentan problemas en la transmisión con el fin de determinar las posibles soluciones.

3.2 PRÁCTICA 5: FUENTES DE EMISIÓN DE LUZ

3.2.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender el funcionamiento de las fuentes led y las fuentes láser.
- Analizar el comportamiento de una fuente led y una fuente láser ante el estímulo de una señal eléctrica mediante el uso del simulador *Simulink*.
- Comparar el espectro óptico de una fuente led y una fuente láser mediante el uso del simulador *OptiSystem*.

3.2.2 MARCO TEÓRICO [2][4][9][13][17][18]

El principal objetivo de los transmisores ópticos es transformar una señal eléctrica en la correspondiente señal óptica y luego enviarla por el enlace de comunicaciones que, en este caso, es la fibra óptica. Un transmisor está compuesto de varios elementos siendo la fuente óptica el componente principal.

Sistemas de comunicaciones ópticas emplean diodos emisores de luz led y láser semiconductores como fuentes de luz ópticas debido a las ventajas ofrecidas por ellos. La emisión de luz de cada fuente difiere por sus características y su material de construcción, sin embargo tanto fuentes led como láser deben cumplir ciertos parámetros para una óptima emisión de luz en un sistema de comunicaciones.

3.2.2.1 Parámetros de emisión de luz

Las fuentes emisoras de luz deben cumplir con los siguientes requisitos para ser consideradas óptimas para un sistema de comunicaciones ópticas:

- Tamaño y estructura adecuada para un buen acoplamiento.
- Alta fiabilidad ante cambios de temperatura.
- Adecuada longitud de onda de operación.
- Bajo consumo de potencia.
- Reducido tiempo de respuesta ante la presencia de corriente de inyección.
- Adecuada anchura espectral para minimizar el efecto de dispersión cromática.
- Adecuada potencia de salida, no muy alta porque causaría distorsión y efectos no lineales, y tampoco muy baja porque complicaría la recepción de la señal en los detectores de luz y se confundiría con el ruido.

- Adecuado acoplamiento entre fibra y fuente de luz, la cual dependerá de la apertura numérica de la fibra óptica y de la anchura espacial de la fuente de luz.

Basándose en estudios antes realizados, las fuentes de luz presentan una potencia óptica que se puede expresar de la siguiente manera mediante la transformada de Fourier [5][14]:

$$P_e(f) = H_T(f) \cdot I_d(f) \quad (\text{ec 3.1})$$

Donde $H_T(f)$ es la función de transferencia de la fuente e $I_d(f)$ es la transformada de Fourier de la corriente inyectada. La función de transferencia se puede descomponer en dos partes [5][14]:

$$H_T(f) = H_T(o) \cdot H_T^*(f) \quad (\text{ec 3.2})$$

En la (ec 3.2), $H_T(o)$ es la eficiencia cuántica de la fuente de luz y $H_T^*(f)$ es la respuesta de frecuencia normalizada de la fuente de luz. Basándose en los parámetros y a las ecuaciones antes descritas se puede determinar el funcionamiento y características de las fuentes led y las fuentes láser para su posterior análisis y comparación.

3.2.2.2 Fuentes led

El diodo emisor de luz o led es uno de los dispositivos fotónicos más sencillos de fabricar pues no requiere una cavidad óptica especial para su funcionamiento. Sin embargo, presenta algunas desventajas como son una baja potencia óptica, una gran anchura espectral y un tiempo de respuesta elevado.

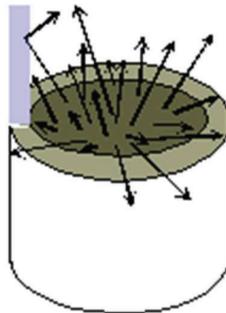


Figura 3.1 Emisión de ondas de luz en un diodo led [7]

La fuente led puede operar hasta frecuencias de modulación de 1 [GHz]. El tipo de emisión de luz de estas fuentes es espontánea, quiere decir que no requiere

de influencia externa y es aleatoria, las ondas emitidas por las fuentes led no se encuentran en fase, como muestra la *Figura 3.1*, es por esto que la potencia de salida es notablemente menor que la potencia de las fuentes láser y la anchura espectral presenta valores del orden de los 20 [nm] alcanzando un máximo de 150 [nm].

Las fuentes led son comúnmente utilizadas para sistemas ópticos de corto alcance en longitudes de onda de 850 [nm] y 1310 [nm], donde la dispersión cromática es menor y no es afectada por la anchura espectral de la fuente. La *Tabla 3.1* muestra las características de funcionamiento de las fuentes led.

Características	Fuentes led
Longitud de onda [nm]	850-1300
Anchura espectral [nm]	20-110
Corriente de inyección [nA]	20-300
Potencia media de salida [mW]	1
Temperatura máxima [°C]	60
Vida media [horas]	10^7

Tabla 3.1 Características de las fuentes led [19]

La estructura de una fuente led se basa en la de un diodo, la cual presenta una unión p-n la cual está directamente polarizada inyectando electrones y huecos en las zonas p y n respectivamente.

La combinación entre un electrón y un hueco generan la emisión de un fotón, a este proceso se lo conoce como proceso radiativo. Sin embargo, no todas las combinaciones generan la emisión de un fotón. En procesos no radiativos, la combinación electrón hueco genera calor o vibraciones de la estructura.

Se define también un tiempo de vida para los portadores que se recombinen de forma radiativa (τ_r) y otro para los que se recombinen de forma no radiativa (τ_{nr}).

Para poder realizar la simulación de una fuente led, se requiere de la eficiencia cuántica de la fuente de luz y la respuesta normalizada de frecuencia, por lo que, basándose en las ecuaciones antes descritas, la función de transferencia del led puede expresarse de la siguiente manera [5][14]:

$$H_T(0) = \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot q}\right) \eta_{int} \cdot \eta_{inj} \cdot \eta_{ext} \quad (ec 3.3)$$

La eficiencia de corriente de inyección (η_{inj}) se define como la fracción de la corriente inyectada que se recombina, radiativamente y no radiativamente, en la región de activa de la fuente led. La eficiencia cuántica interna (η_{int}) es la relación entre el número de fotones emitidos por la fuente y el número de electrones inyectados en la fuente [5][14].

$$\eta_{int} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} \quad (ec 3.4)$$

La eficiencia cuántica externa (η_{ext}) es la relación entre la potencia óptica emitida por la fuente y la potencia eléctrica de entrada a la fuente [5][14].

$$\eta_{ext} = \left[1 - \left(\frac{n_s - n_m}{n_s + n_m}\right)^2\right] \left[1 - \cos \frac{n_m}{n_s}\right] \quad (ec 3.5)$$

Para las fuentes led la función para la respuesta de frecuencia normalizada está determinada por [5][14]:

$$H_T^*(f) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}} \quad (ec 3.6)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_r} \quad (ec 3.7)$$

La *Tabla 3.2* indica el significado de cada uno de los parámetros utilizadas en las ecuaciones anteriormente nombradas

η_{inj}	Eficiencia de corriente de inyección
η_{int}	Eficiencia cuántica interna
η_{ext}	Eficiencia cuántica externa
h	Constante de Planck (6.62×10^{-34} Js)
c	Velocidad de la luz (3×10^8 m/s)
λ	Longitud de onda (m)
q	Carga del electrón (1.60218×10^{-19} C)
τ_r	Tiempo de recombinación radiativa
τ_{nr}	Tiempo de recombinación no radiativa
n_s	Índice de refracción del semiconductor
n_m	Índice de refracción del medio
f_c	Frecuencia de corte óptica (3dB)

Tabla 3.2 Parámetros para ecuaciones del diodo led [5]

3.2.2.3 Fuentes láser

Las fuentes láser a diferencia de las fuentes led presentan una anchura espectral menor, entre 1 [nm] y 5 [nm], y una potencia de emisión por encima de los [mW], a su vez presentan un tiempo de respuesta mínimo ante el efecto de una corriente de inyección.

La emisión de luz en las fuentes láser es estimulada, su efecto se logra cuando existen más electrones en el nivel mayor de energía que en el menor, por lo que requiere de una corriente de inyección que permita una gran concentración de electrones en la unión p-n. La emisión de luz estimulada permite que las ondas de luz se encuentren en fase obteniendo así una emisión mayor de potencia óptica.

La fuente láser puede operar hasta frecuencias de modulación mayores a los [GHz], y es comúnmente utilizada en sistemas de comunicaciones ópticas de largo alcance en longitudes de onda de operación en la segunda, tercera, cuarta y quinta ventana.

Características	Fuentes láser
Longitud de onda [nm]	850-1550
Anchura espectral [nm]	0.1-6
Corriente de inyección [mA]	0.5
Potencia media de salida [mW]	5-20
Temperatura máxima [°C]	0.5-2
Vida media [horas]	10 ⁶

Tabla 3.3 Características de las fuentes láser [19]

La *Figura 3.2* muestra la gráfica de la potencia de salida y la corriente eléctrica de inyección, en la cual se distingue dos zonas separadas por la corriente eléctrica umbral (I_{umb}). La zona donde la corriente es menor a la corriente umbral genera una emisión de luz espontánea con una pequeña pendiente, es ahí donde los led operan, sin embargo si un láser no tiene la suficiente corriente de inyección actuaría como led, disminuyendo la potencia óptica de salida.

Si la corriente de inyección sobrepasa la corriente umbral, la pendiente aumenta drásticamente generando una emisión estimulada, esta zona es donde trabajan comúnmente las fuentes láser.

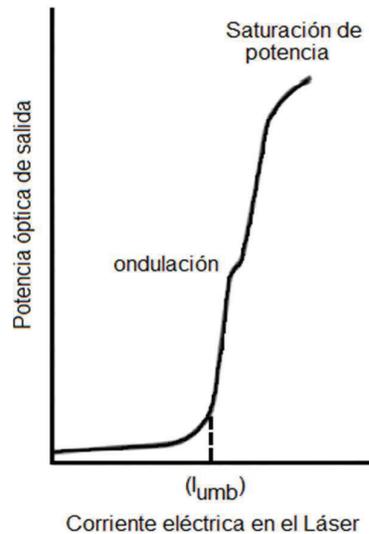


Figura 3.2 Potencia óptica vs corriente eléctrica [16]

Las fuentes láser requieren de un elemento adicional para poder emitir su luz, pues no basta una guía de onda sino que se requiere de un par de espejos que reflejen la luz, haciendo que la guía de onda se convierta en una cavidad resonante llamada Fabry-Perot. La cavidad de Fabry-Perot es una de las estructuras más sencillas utilizadas en fuentes láser.

La longitud típica de esta cavidad va desde los 150 $[\mu\text{m}]$ a 1 $[\text{mm}]$ dependiendo de la aplicación. La luz se refleja a uno de los espejos y regresa a la guía de onda, esta acción estimula más emisión de fotones, por lo que las fuentes láser por si solas amplifican la señal óptica, de esta manera se tiene mayor potencia y mayor eficiencia en la fuente de luz.

Para poder realizar la simulación de una fuente láser, se requiere de la eficiencia cuántica de la fuente de luz y la respuesta normalizada de frecuencia, por lo que, basándose en las ecuaciones antes descritas, la función de transferencia del láser puede expresarse de la siguiente manera [5][14]:

$$H_T(0) = \left(\frac{h.c}{\lambda.q}\right) \eta_{int} \cdot \eta_{ext} \left[\frac{I_d - I_{umb}}{I_d}\right] \quad (\text{ec 3.8})$$

Donde η_{int} esta expresada de la misma manera que en la (ec 3.4) y [5][14]

$$\eta_{ext} = \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1}\right)}{\gamma l + \ln\left(\frac{1}{R_1}\right)} \quad (\text{ec 3.9})$$

Para las fuentes láser la función para la respuesta de frecuencia normalizada está determinada por [5][14]:

$$H_T^*(f) = \frac{f_o^2}{f_o^2 - 4\pi^2 f^2 + j\beta 2\pi f} \quad (\text{ec 3.10})$$

Donde [5][14]:

$$f_o^2 = \frac{(I_o - I_{umb})}{\tau_{sp} \cdot \tau_{ph} \cdot I_{umb}} \quad (\text{ec 3.11})$$

$$\beta = \frac{I_o}{\tau_{sp} \cdot I_{umb}} \quad (\text{ec 3.12})$$

La *Tabla 3.4* indica el significado de cada uno de los parámetros utilizadas en las ecuaciones anteriormente nombradas

I_d	Corriente de inyección (A)
I_{umb}	Corriente umbral (A)
R_1	Reflectancia del espejo (m)
γ	Coefficiente de perdidas
l	Dimensión de la cavidad longitudinal (m)
I_o	Corriente de polarización (A)
τ_{sp}	Tiempo de recombinación (s)
τ_{ph}	Tiempo de vida de fotones (s)
β	Frecuencia amortiguamiento [Hz]
f_o	Frecuencia de resonancia [Hz]

Tabla 3.4 Parámetros para ecuaciones del diodo láser [5]

3.2.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar dos esquemas utilizando bloques de *Simulink* para analizar los tiempos de respuesta de las fuentes aplicando las ecuaciones descritas en el marco teórico. Además, se requiere realizar dos escenarios en *OptiSystem* para el análisis del espectro de las fuentes ópticas.

- El primer esquema debe incluir los bloques de simulación que permitan ingresar las ecuaciones para la eficiencia de corriente de inyección y la frecuencia normalizada de un led y así poder analizar la gráfica que se genera en el osciloscopio.
- Se propone realizar un escenario que incluya una fuente led para analizar el espectro óptico generado ante un estímulo de corriente eléctrica.

- El segundo esquema debe incluir los bloques de simulación que permitan ingresar las ecuaciones para la eficiencia de corriente de inyección y la frecuencia normalizada de un láser y así poder analizar la gráfica que se genera en el osciloscopio.
- Se propone realizar un escenario que incluya una fuente led para analizar el espectro óptico generado ante un estímulo de corriente eléctrica.

3.2.3.1 Esquemas para el análisis de fuentes led

Se realiza dos esquemas en bloques uno de una fuente led y otro de una fuente láser para el análisis de su respuesta ante una corriente eléctrica de inyección. Adicionalmente se presentan dos escenarios para el análisis del espectro de potencia de las fuentes ópticas ante el estímulo de una corriente de inyección constante.

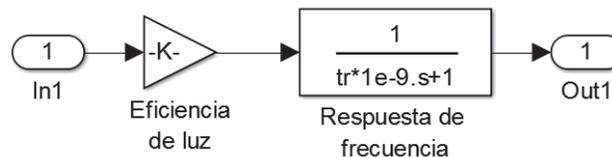


Figura 3.3 Bloques de simulación de una fuente led

El esquema mostrado en la *Figura 3.3* representa los bloques necesarios para la simulación de una fuente led aplicando las ecuaciones desde la (ec 3.3) hasta la (ec 3.7). Estos bloques se agruparán en un solo bloque llamado led para simplificar la visualización en la ventana de simulación. A continuación se detalla la función de cada bloque:

- **Inport:** permite que la corriente de inyección ingrese a la fuente.
- **Gain:** simula la eficiencia cuántica de luz. En sus características se ingresa la (ec 3.3) en función de la longitud de onda, los tiempos de recombinación y los índices de refracción [6], como muestra la *Figura 3.4*.

$$H_T(0) = \left(\frac{1.2387 \times 10^3}{\lambda} \right) \left(\frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} \right) \left[1 - \left(\frac{n_s - n_m}{n_s + n_m} \right)^2 \right] \left[1 - \cos \frac{n_m}{n_s} \right] \quad (\text{ec 3.13})$$

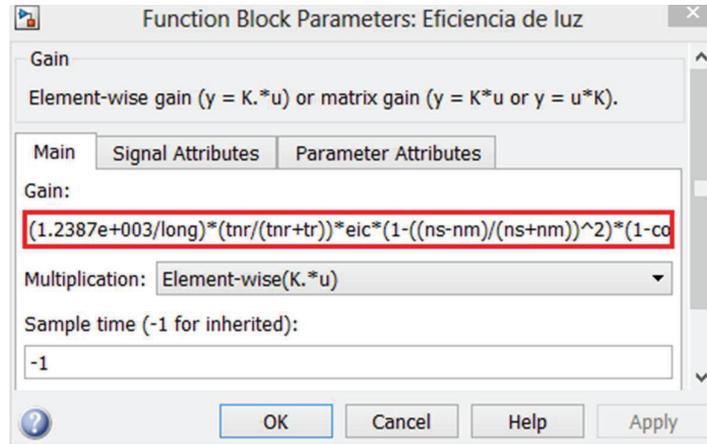


Figura 3.4 Parámetros del bloque Gain

- **TrasferFcn:** representa la respuesta de frecuencia normalizada de la fuente. En sus características se ingresa la (ec 3.6) en función de la longitud de onda, los tiempos de recombinación y los índices de refracción [6], como muestra la *Figura 3.5*.

$$H_T^*(f) = \frac{1}{1+j10^{-9}\tau_r} \quad (\text{ec 3.14})$$

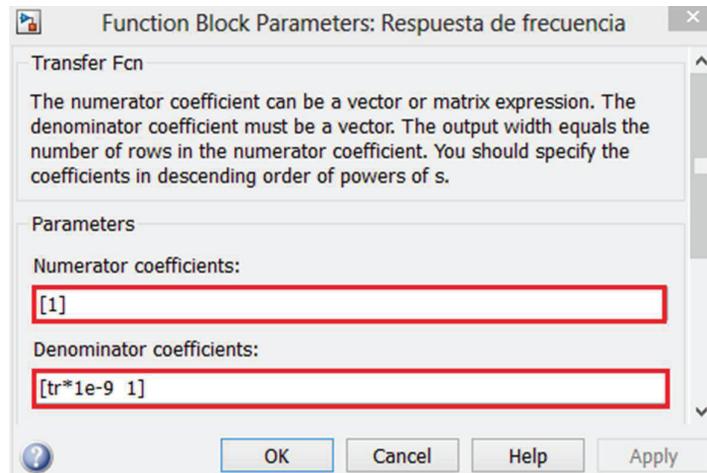


Figura 3.5 Parámetros del bloque TransferFcn

- **Outport:** permite que una señal salga de la fuente.

La *Figura 3.6* representa el esquema de una fuente led recibiendo una corriente eléctrica de forma cuadrada a su entrada. Para poder visualizar la respuesta de la fuente led se utiliza un bloque *Gain* para amplificar la señal y poder compararlo con la señal de entrada. El multiplexor en este esquema es utilizado únicamente

para permitir la visualización tanto de la corriente de entrada como de la potencia óptica a la salida en el bloque Scope.

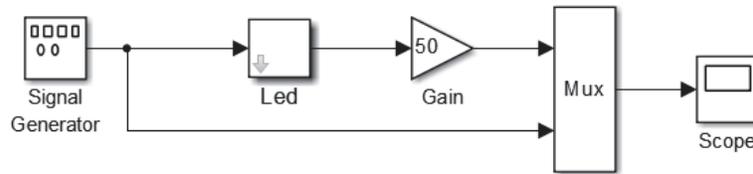


Figura 3.6 Esquema de una señal eléctrica ingresando a una fuente led

El bloque led permite el ingreso de los parámetros de operación de la fuente como son: longitud de onda, tiempo de recombinación radiativa, tiempo de recombinación no radiativa, eficiencia de corriente de inyección, índice de refracción del semiconductor e índice de refracción del medio, en este caso aire.

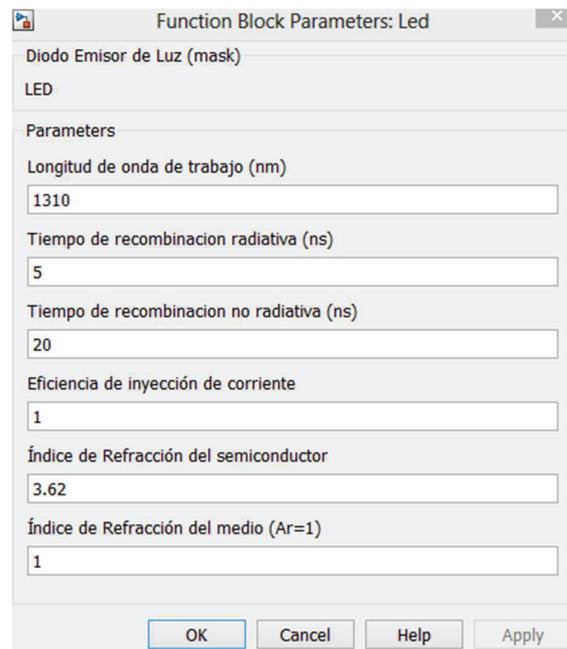


Figura 3.7 Parámetros del bloque led

La *Figura 3.7* muestra los valores utilizados para esta práctica, la fuente led opera en una longitud de onda de 1310 [nm] y el índice de refracción utilizado es el del semiconductor más comúnmente usado para la construcción de las fuentes led, GaAS (Galio-Arsénico) (*Ver Anexo 3*).

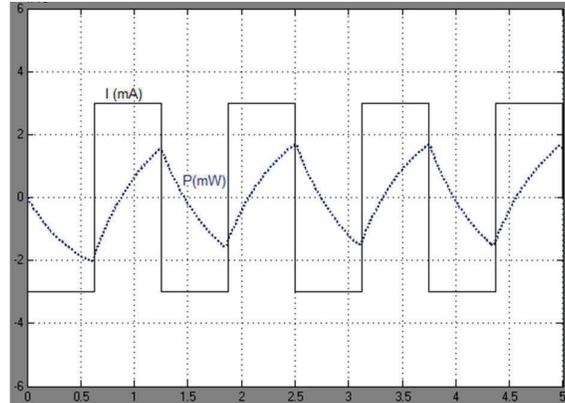


Figura 3.8 Representación gráfica de los resultados de la fuente led

El resultado de la respuesta de la fuente led ante el estímulo de la corriente eléctrica cuadrada está mostrado en la *Figura 3.8*, la fuente requiere de un tiempo para encenderse ante la presencia de corriente, por lo que su respuesta no es inmediata. De igual manera sucede ante la ausencia de corriente de inyección, por lo que la fuente led no se apaga inmediatamente, sino de manera paulatina.

Para realizar el análisis del espectro óptico de las fuentes led, se presenta un escenario donde la fuente opera a una velocidad de 10 [Gbps] y a una longitud de onda de 1330 [nm]. La fuente recibe una señal eléctrica codificada NRZ, como muestra la *Figura 3.9*.

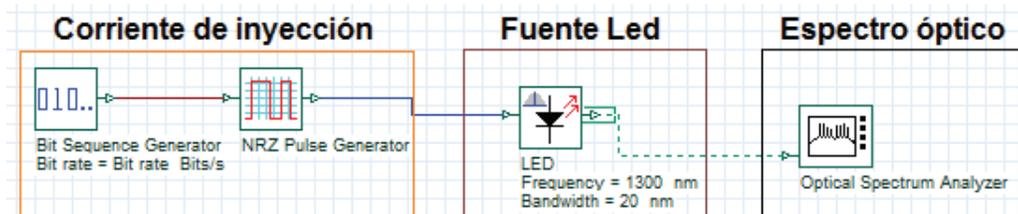


Figura 3.9 Fuente óptica led

El espectro de potencia de la fuente led, que se presenta en la *Figura 3.10* muestra que la anchura espectral es de 26 [nm] aproximadamente y la potencia alcanza -12 [dBm]. Para comunicaciones ópticas la anchura espectral es fundamental para la emisión de luz, por lo que las fuentes led tendrían su aplicación en enlaces de corta distancia a bajas velocidades por su tiempo de respuesta elevado, además, son utilizadas comúnmente en conjunto con fibras ópticas multimodo.

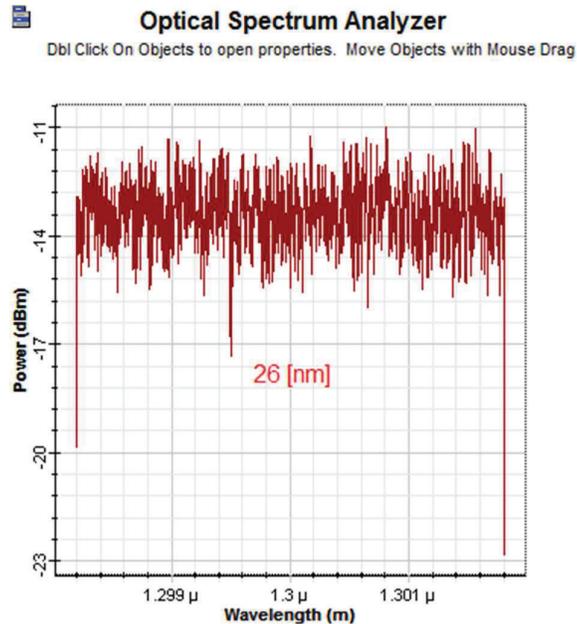


Figura 3.10 Espectro óptico de una fuente led

3.2.3.2 Esquemas para el análisis de fuentes láser

El esquema mostrado en la *Figura 3.11* representa los bloques necesarios para la simulación de una fuente láser aplicando las ecuaciones desde la (ec 3.8) hasta la (ec 3.12). El láser es mucho más complejo que el led, es por eso que sus ecuaciones implican más variables.

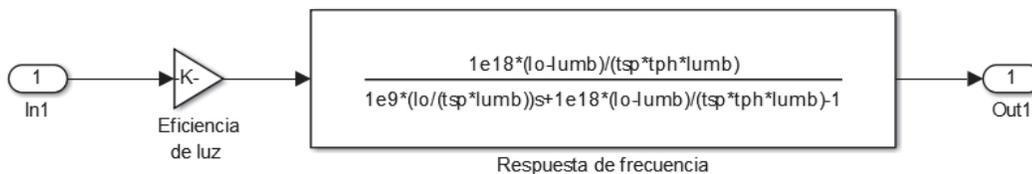


Figura 3.11 Bloques de simulación de una fuente láser

A continuación se detalla la función de cada bloque:

- **Inport:** permite que la corriente de inyección ingrese a la fuente.
- **Gain:** simula la eficiencia cuántica de luz, en sus características se ingresa la (ec 3.8) en función de la longitud de onda, los tiempos de recombinación, la reflectancia del espejo, el coeficiente de pérdidas, la corriente de inyección y la corriente umbral [6], como muestra la *Figura 3.12*.

$$H_T(0) = \left(\frac{1.2387 \times 10^3}{\lambda} \right) \left(\frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} \right) \left(\frac{\ln\left(\frac{1}{R_1}\right)}{\gamma l + \ln\left(\frac{1}{R_1}\right)} \right) \left[\frac{I_d - I_{umb}}{I_d} \right] \quad (\text{ec 3.15})$$

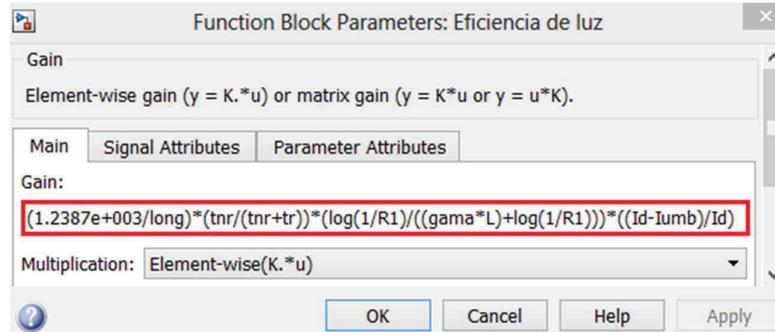


Figura 3.12 Parámetros del bloque Gain

- **TransferFcn:** representa la respuesta de frecuencia normalizada en el cual se ingresa la (ec 3.10) [6], como muestra la Figura 3.13.

$$H_T^*(f) = \frac{10^{18} * \frac{(I_0 - I_{umb})}{\tau_{sp} \cdot \tau_{ph} \cdot I_{umb}}}{10^{18} * \frac{(I_0 - I_{umb})}{\tau_{sp} \cdot \tau_{ph} \cdot I_{umb}} - 1 + j \frac{10^9 * I_0}{\tau_{sp} \cdot I_{umb}}} \quad (\text{ec 3.16})$$

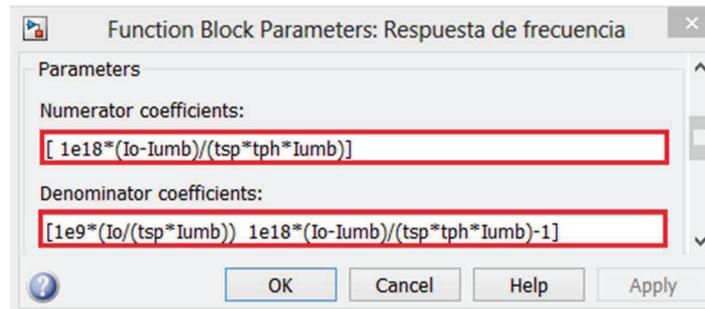


Figura 3.13 Parámetros del bloque TransferFcn

- **Output:** permite que la señal salga de la fuente.

La Figura 3.14 representa el esquema general de una fuente láser recibiendo una corriente de inyección de forma cuadrada. Como la fuente láser emite una potencia mayor a la del led, este esquema no requiere de un bloque adicional que amplifique la señal para poder visualizarla.

El multiplexor al igual que en el esquema anterior, es utilizado para visualizar tanto la señal de corriente de entrada a la fuente láser como la señal de potencia óptica a la salida en el bloque Scope.

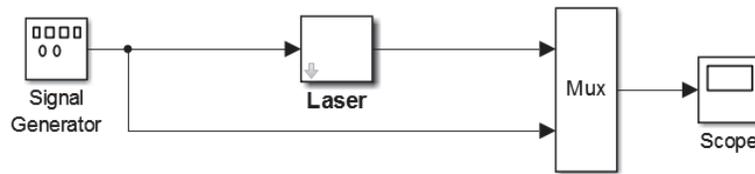


Figura 3.14 Esquema de una señal eléctrica ingresando a una fuente láser

El bloque láser permite el ingreso de los parámetros de operación de la fuente. La *Figura 3.15* muestra los valores utilizados para esta práctica. La fuente láser opera en una longitud de onda de 1550 [nm] con tiempos de recombinación menores a los tiempos de la fuente led. Para que las ecuaciones antes descritas funcionen el láser debe operar en la zona de emisión estimulada es decir cumpliendo que $I_d > I_{umb}$.

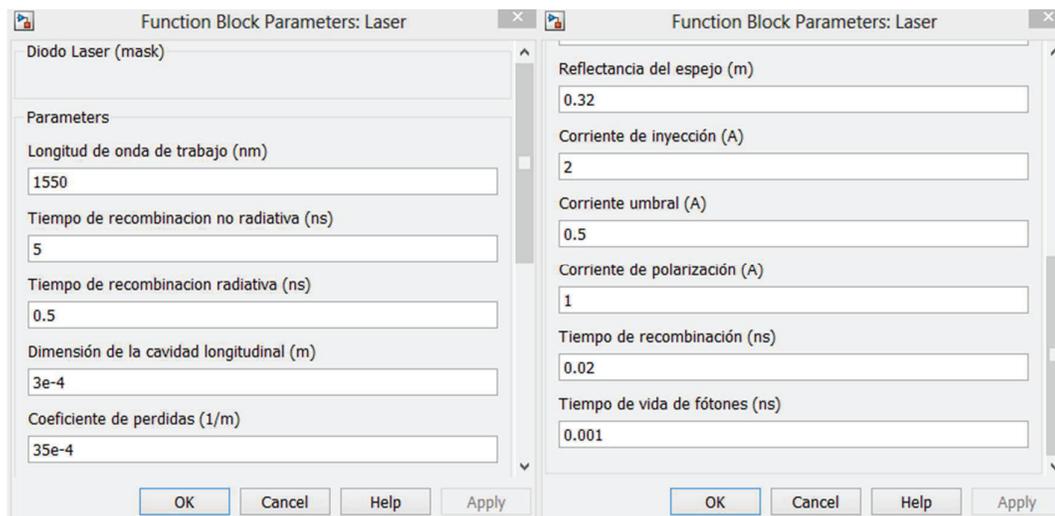


Figura 3.15 Parámetros del bloque láser

El resultado de la respuesta de la fuente láser ante el estímulo de la corriente eléctrica cuadrada está representado en la *Figura 3.16*, la fuente láser requiere de un tiempo, aunque corto, para encenderse y estar estable ante la presencia de corriente, de igual manera sucede en ausencia de corriente de inyección.

La fuente láser requiere de un tiempo para apagarse. En la *Figura 3.16* se puede observar oscilaciones al iniciar y al finalizar cada pulso, hasta que la fuente se estabiliza. Las oscilaciones representan el tiempo de respuesta de la fuente láser ante la corriente de inyección.

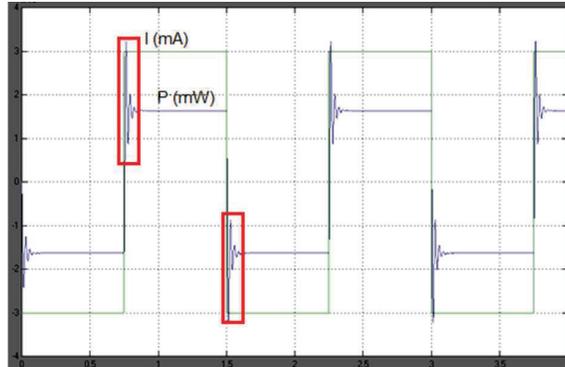


Figura 3.16 Representación gráfica de los resultados de la fuente láser

Para realizar el análisis del espectro óptico de las fuentes láser, se presenta un escenario donde la fuente opera a una velocidad de 10 [Gbps] y recibe una señal eléctrica codificada NRZ.

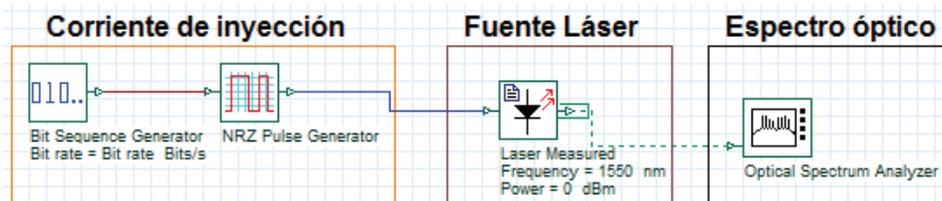


Figura 3.17 Fuente óptica láser

A diferencia de las fuentes led, las fuentes láser pueden operar a longitudes de onda de 1300 [nm] y 1550 [nm]. Para el escenario la longitud de onda de operación es de 1550 [nm], como muestra la *Figura 3.17*.

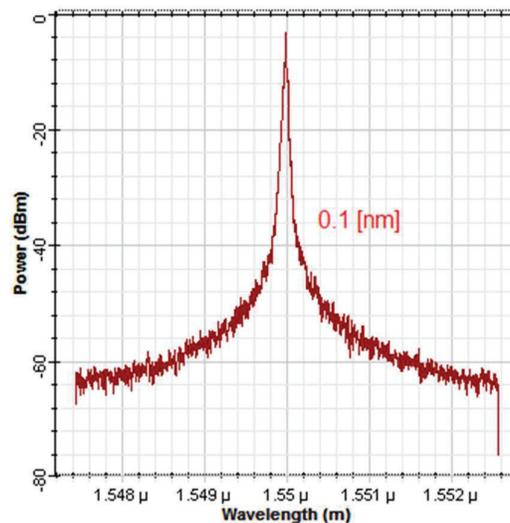


Figura 3.18 Espectro óptico de una fuente láser

El espectro de potencia de la fuente láser presenta una anchura espectral igual a 0.1 [nm] y una potencia de 0 [dBm] como muestra la *Figura 3.18*, lo cual es ideal para enlaces de larga distancia a altas velocidades de transmisión utilizando fibras ópticas monomodo.

3.2.3.3 Análisis de resultados

Las fuentes led tienen un tiempo de recombinación alto, por lo que su respuesta ante el estímulo de la corriente de inyección no es rápida, además su emisión de luz al ser espontánea opera bajo la corriente umbral, en la cual la pendiente de potencia óptica es menor. Por tal motivo, requiere de un componente de amplificación adicional para alcanzar potencias deseables para el análisis.

Por el contrario, las fuentes láser, gracias a la cavidad Fabry-Perot, actúan como amplificadores de señal alcanzando elevadas potencias ópticas. Gracias a esta característica, las fuentes láser pueden ser utilizadas en enlaces ópticos de grandes distancias.

Los tiempos de respuesta de las fuentes led son altos, como se mostró en la práctica, la potencia de la fuente led aumentó progresivamente ante la presencia de la corriente de inyección, de igual manera, la potencia se redujo progresivamente cuando no había presencia de corriente de inyección. Esto quiere decir que la respuesta no es inmediata lo que ocasiona un problema para sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad.

Por otro lado, las fuentes láser presentaron una respuesta casi inmediata al estímulo de la corriente de inyección. Sin embargo, si requiere de un tiempo para detectar la presencia y ausencia del estímulo pero estos tiempos son mínimos comparados con los tiempos de las fuentes led. Esta característica particular permite a las fuentes láser operar en enlaces de alta velocidad.

Para realizar el análisis del comportamiento de las fuentes a distintas velocidades de transmisión, los dos escenarios que operaban a 10 [Gbps] se modificaron para que operen a 100 [Gbps]. El resultado del esquema con fuente led mostrado en la *Figura 3.19* determinó que al aumentar la velocidad de transmisión, la anchura espectral aumenta a 30 [nm] y la potencia se reduce notablemente a -20 [dBm] por lo que las fuentes led para altas velocidades se vuelven ineficientes.

Para el esquema con fuentes láser, la potencia no se redujo al aumentar la velocidad, se mantuvo en 0 [dBm], sin embargo, la anchura espectral si disminuyó a 0.08 [nm], como muestra la *Figura 3.20*, esto quiere decir que el láser requerido para altas velocidades debe ser más directivo.

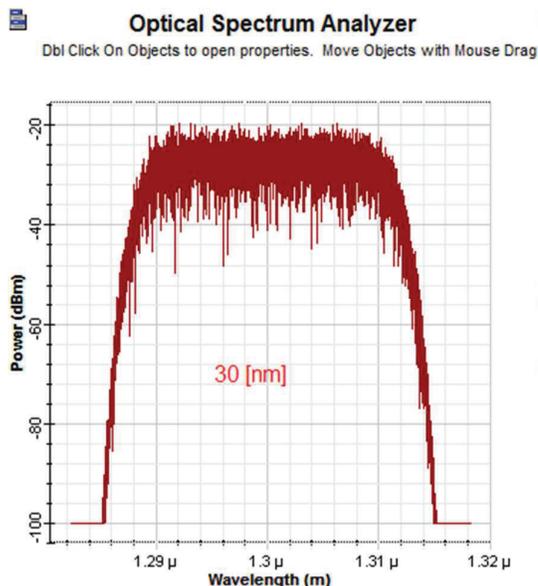


Figura 3.19 Espectro óptico de una fuente led a 100 [Gbps]

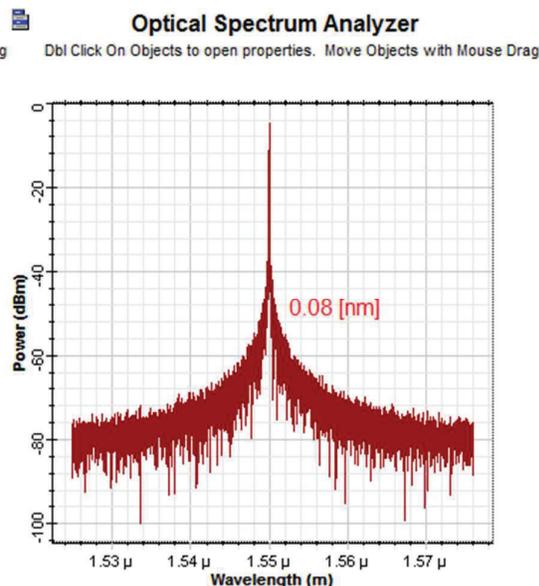


Figura 3.20 Espectro óptico de una fuente láser a 100 [Gbps]

Luego de la práctica realizada y del análisis de resultados, la *Tabla 3.5* muestra un resumen comparativo de los parámetros de las fuentes led y láser.

Parámetro	Fuente led	Fuente láser
Tiempo de respuesta	5-10 [ns]	0.01-0.02 [ns]
Directividad	Baja	Alta
Anchura espectral	26.4 [nm]	0.29 [nm]
Potencia de emisión	-11 [dBm]	0 [dBm]
Velocidad transmisión	1-10 [Gbps]	1-100 [Gbps]

Tabla 3.5 Led vs. Láser [12]

3.2.3.4 Aplicaciones de la práctica

Las fuentes led y láser operan de manera diferente ante el estímulo de una señal eléctrica, esta práctica permite determinar el uso de la fuente respectiva dependiendo del tipo de enlace, de la velocidad de transmisión y de la aplicación.

Las fuentes led son comúnmente usadas con fibras multimodo debido a su anchura espectral, además las aplicaciones que usan fuentes led son de cortas distancias y de potencias bajas.

Por otro lado, las fuentes láser se usan en conjunto con fibra monomodo ya que su anchura espectral es del orden de los 0.1 [nm], permitiendo que se propague un solo modo por la fibra. Las fuentes láser son usadas en enlaces de grandes distancias y altas velocidades de transmisión gracias a su alta potencia de emisión y a su corto tiempo de respuesta.

La simulación en esta práctica, permite analizar el comportamiento de las fuentes led y láser al inyectarles una corriente eléctrica y así se puede determinar las limitantes de cada fuente de luz.

3.2.3.5 Posibles variaciones de la práctica

- Se puede modificar la longitud de onda de trabajo del led a 850 [nm] y comparar con los resultados obtenidos cuando el led opera a 1330 [nm].
- Se puede realizar dos esquemas en *OptiSystem* con una fuente led, en el primer esquema se podría acoplar la fuente a una fibra óptica multimodo, en el segundo esquema se podría acoplar una fibra óptica monomodo y comparar los resultados obtenidos.

3.2.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las fuentes led emiten luz en todas las direcciones, por lo tanto, el ángulo de aceptación de la fibra debe ser considerable. Es por esto, que las fuentes led operan con fibras ópticas multimodo.
- Las fuentes led emiten luz a bajas potencias debido a su emisión espontánea, es por esto que son usados en enlaces de corta distancia, sin embargo si se requiere usarlas en distancias mayores se necesita amplificadores ópticos considerando que estos amplificadores deben ser diseñados de tal manera que amplifiquen la señal más que el ruido.
- Es necesario que las fuentes láser reciban una corriente de inyección superior a la corriente eléctrica umbral, caso contrario trabajarían en la zona de emisión espontánea y actuarían como una fuente led.

- Las fuentes láser son más eficientes que las fuentes led ya que presentan una rápida respuesta al estímulo de corriente de inyección y además trabajan en la zona de emisión estimulada sobre la corriente umbral teniendo una pendiente de potencia mayor, por lo tanto, los niveles de potencia óptica son superiores a las de las fuentes led.
- Para altas velocidades, el enlace de fibra óptica debe estar compuesto por fibras monomodo. En la práctica se pudo observar que las fuentes led aumentan su anchura espectral al aumentar la velocidad del sistema, lo que genera una difícil transmisión ya que la fibra no podrá captar todos los haces de luz que la fuente emite. Sin embargo, al cambiar el enlace de fuente led a fuente láser, se pudo observar que la anchura espectral es mínima. Perfecta para trabajar con fibras monomodo, y alcanzar las velocidades requeridas, considerando que mientras más alta es la velocidad del sistema, más directivo debe ser el láser de la fuente óptica.

3.3 PRÁCTICA 6: MODULACIÓN DIRECTA vs. MODULACIÓN EXTERNA

3.3.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender el funcionamiento de las técnicas de modulación directa y modulación externa.
- Comprender el funcionamiento del interferómetro Mach-Zender.
- Realizar el esquema de un enlace óptico con modulación directa y con modulación externa mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Comparar el espectro óptico para un sistema óptico con modulación directa y con modulación externa.

3.3.2 MARCO TEÓRICO [3][8][11][13][15]

El rendimiento de un transmisor además de depender de la fuente de luz como principal componente, también depende de otros factores como son:

- **Tipo de señal:** sea analógica o digital de lo cual dependerá la construcción electrónica del transmisor.
- **Ancho de banda y la velocidad de transmisión:** los cuales dependen del tiempo de respuesta de la fuente.
- **Longitud de onda de operación:** se elige una fuente que opere a la longitud de onda adecuada que permita tener menos dispersión cromática y atenuación.
- **Potencia del transmisor:** es un factor crítico en el rendimiento del transmisor pues la estabilidad de la potencia depende de la temperatura y de las horas de funcionamiento de la fuente.
- **Eficiencia del transmisor:** es la relación entre la potencia que ingresa a la fibra óptica y la potencia eléctrica a la entrada de la fuente. También se definen la eficiencia interna, eficiencia externa y eficiencia de inyección de corriente, analizadas en la práctica anterior.

La *Figura 3.21* muestra el esquema de un transmisor óptico. Los transmisores dependen de los parámetros antes descritos para su construcción, sin embargo las diferencias fundamentales se basan en las técnicas de modulación análoga o digital que se apliquen y la fuente de luz que utilice.

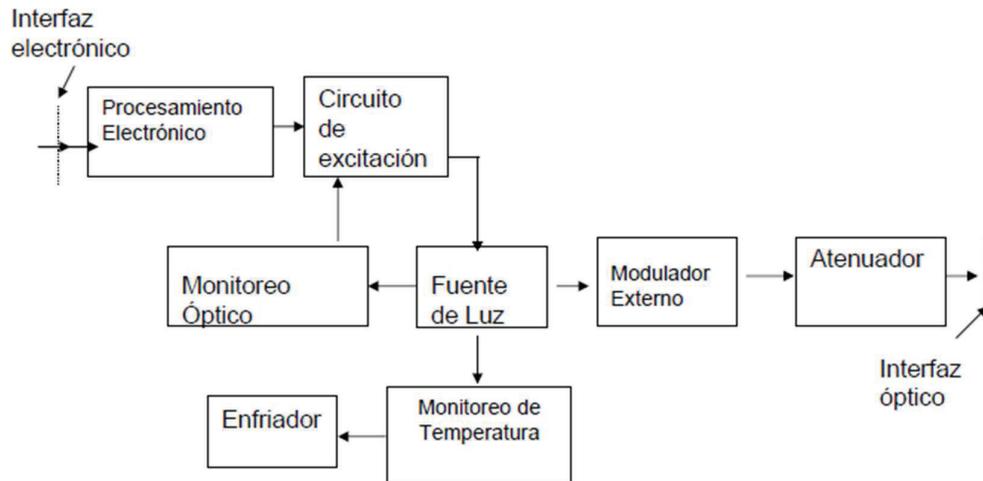


Figura 3.21 Estructura de un transmisor óptico [12][16]

- **Preprocesamiento electrónico:** representa el tratamiento de la señal eléctrica de entrada para una adecuada excitación de la fuente de luz.
- **Circuito de excitación:** depende de la fuente que se utilice, los led pueden ser excitados directamente por una corriente de inyección o excitación, sin embargo los láser requieren superar la corriente umbral para su funcionamiento.
- **Monitoreo óptico:** utilizado para estabilizar la potencia óptica de salida ajustando la corriente de excitación.
- **Monitoreo de temperatura:** la temperatura es un factor primordial en las fuentes en especial en las fuentes láser, por lo que se requiere de un mecanismo de enfriamiento como disipadores de calor.
- **Atenuador:** son necesarios debido al limitante de potencia en los receptores, en ocasiones los niveles de potencia son mayores al estándar y el receptor puede sobrecargarse.
- **Interfaz óptica:** es la unión entre la fuente de luz y el enlace de transmisión.

La transmisión de datos en sistemas de comunicaciones ópticas requieren de técnicas de modulación para las fuentes sean led o láser. La modulación se la puede conseguir de manera directa o con elementos externos. A continuación, se presentan los tipos de modulación usados en comunicaciones ópticas.

3.3.2.1 Modulación directa

La modulación directa es la modulación más sencilla para sistemas de comunicaciones ópticas. Su principio se basa en variar la corriente de alimentación del diodo láser, como muestra la *Figura 3.22*. Esta técnica modula directamente a la señal de información eléctrica convirtiéndola en variaciones de potencia de luz. La modulación directa es factible en escenarios de baja velocidad de transmisión, ya que presenta limitaciones como potencias ópticas bajas, variaciones en la longitud de onda de operación, entre otros.

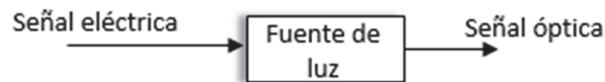


Figura 3.22 Modulación directa [8]

- **Modulación analógica:** utiliza la modulación en intensidad (IM) es decir, la señal se modula de acuerdo a la variación de la corriente de inyección. Entre las técnicas de modulación analógica están:
 - Directa, en la cual la transmisión es en banda base.
 - Modulación de amplitud
 - Modulación de frecuencia o de fase
 - Modulación de amplitud pulso
 - Modulación de ancho de pulso
 - Modulación de posición de pulso
- **Modulación digital:** a diferencia de los sistemas analógicos, los sistemas digitales tienen mayor tolerancia a la distorsión y son más eficientes en la transmisión. Es por esto, que los sistemas de comunicaciones ópticas en su mayoría utilizan modulación digital. Entre las técnicas de modulación digital más conocidas están:
 - Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)
 - Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)
 - Modulación por impulsos codificados (PCM)
 - Modulación por desplazamiento de fase (PSK)
 - Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)

Para mejorar el sincronismo y reducir la componente DC, la modulación digital utiliza códigos de línea, entre códigos de línea usados para comunicaciones ópticas están:

- Código sin retorno a cero (NRZ), la presencia de luz está asociada con el bit 1 y la ausencia de luz con el bit 0. A pesar de ser el más sencillo, no es el más eficiente debido a su problema de sincronismo por falta de suficientes transiciones.
- Código con retorno a cero (RZ), permite un ahorro en la emisión de luz en la fuente, ya que no pasa prendida todo el ciclo. Este código presenta más transiciones por lo que su sincronismo es mejor.

La modulación directa depende netamente del tiempo de respuesta de la fuente al estímulo de la corriente de inyección, es decir, la velocidad con la que se prende y se apaga la fuente para el envío de información. Si los tiempos de respuesta son muy elevados, puede generar que la señal que llegue al receptor sea menos clara y dificulte su detección.

3.3.2.2 Modulación externa

La modulación externa es la solución al problema del tiempo de respuesta de las fuentes para sistemas de alta velocidad. En este caso, la señal eléctrica ingresa a un dispositivo externo o modulador, a este dispositivo también ingresa la potencia de luz de la fuente que actuará como portadora, como muestra la *Figura 3.23*, por lo que la señal eléctrica modulará a la portadora óptica con la ayuda del modulador externo.

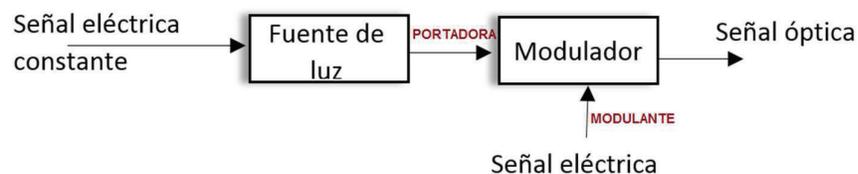


Figura 3.23 Modulación externa [8]

Existen varios tipos de moduladores externos, como son los moduladores electro-ópticos, moduladores de electro-absorción o los moduladores acusto-óptico, sin embargo, para esta práctica se hará referencia a los moduladores electróptico, específicamente modulador basados en el interferómetro Mach-Zenhder.

Modulador en base al interferómetro Mach-Zehnder: es un dispositivo de división de amplitud, compuesto básicamente por dos acopladores direccionales de 3 [dB], un splitter y un combinar con $\alpha = 0.5$, conectados entre sí por caminos de diferente longitud, siendo la diferencia ΔL , como se muestra en la *Figura 3.24*. Se fundamentan en el cambio del índice de refracción de materiales, generado por la presencia de un campo eléctrico en uno de los caminos. Comúnmente son guías de onda de Niobato de Litio (LiNbO3).

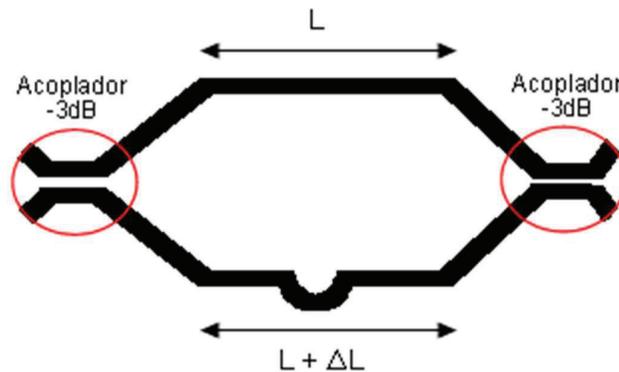


Figura 3.24 Interferómetro Mach Zehnder [8]

La señal que ingresa al interferómetro se divide en dos partes por medio del splitter, cada una con una intensidad óptica del 50%. Al dividirse, una parte viaja por un camino (L) sin alteración, mientras que la otra parte, viaja por un segundo camino con una diferencia de longitud ΔL . El 50% de la señal experimenta una modulación de fase de $\frac{\pi}{2}$ debido a la presencia del campo eléctrico producido por el efecto de la señal eléctrica sobre el Niobato de Litio y a la diferencia de longitud ΔL de la guía de onda. Dependiendo de la longitud de onda de la señal, se tendrá una interferencia constructiva o destructiva a la salida del combinator del interferómetro Mach Zehnder. Si las señales están en fase se tiene interferencia constructiva recuperando la señal de entrada, esto generaría un bit 1. Por otro lado, si las señales se encuentran desfasadas 180° , se tiene una interferencia destructiva, generando un bit 0.

De esta manera la señal eléctrica es la que controla el desfase del 50% de la señal óptica y así la modulación de la misma y no depende de la respuesta de la fuente.

3.3.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar dos escenarios en *OptiSystem*, para poder determinar las diferencias de funcionamiento de la modulación directa en comparación con la modulación externa.

- El primer escenario debe presentar los componentes necesarios para la simulación de un enlace completo de comunicaciones ópticas con modulación directa. En este escenario se debe poder analizar la variación de la señal al ser modulada con modulación directa, además debe presentar el análisis del espectro óptico obtenido.
- Se propone variar la velocidad del sistema para analizar los cambios en la señal en el dominio del tiempo.
- Se propone variar la potencia de la fuente para analizar los cambios en la señal en el dominio del tiempo.
- El segundo escenario debe presentar los componentes necesarios para la simulación de un enlace completo de comunicaciones ópticas con modulación externa. En este escenario se debe poder analizar la variación de la señal al ser modulada con un interferómetro Mach-Zender, además debe presentar el análisis del espectro óptico obtenido.
- Se debe realizar la comparación de los resultados obtenidos en sistemas de comunicación con modulación directa y modulación externa.

3.3.3.1 Escenario para el análisis de un enlace con modulación directa

Se realiza el esquema para un enlace de comunicaciones ópticas a 2.5 [Gbps], el transmisor está compuesto de una fuente láser que opera a 1550 [nm] con una potencia de 3 [dBm], utilizando modulación directa con modulación digital y código de línea NRZ. La señal viaja a través de un enlace de fibra óptica monomodo de 10 [km] de distancia y 0.25 [dB/km] de atenuación.

Para este ejercicio, se considera un receptor con detector PIN. La *Figura 3.25* muestra el esquema de un sistema de comunicaciones ópticas con modulación directa y los correspondientes componentes para el análisis de resultados.

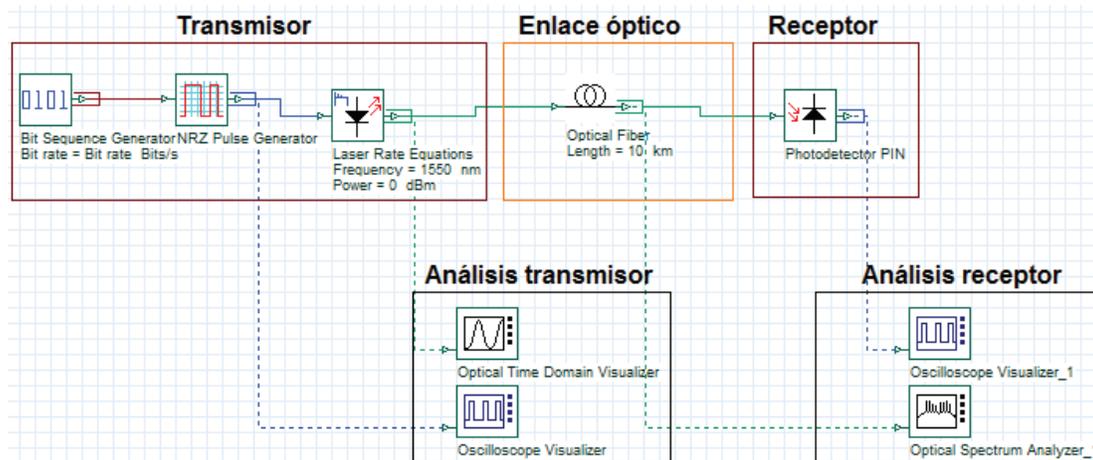


Figura 3.25 Esquema de un transmisor con modulación directa

La modulación directa depende exclusivamente de los tiempos de respuesta de la fuente láser. La *Figura 3.27* muestra la señal con modulación directa que va a ser enviada por el enlace de fibra óptica.

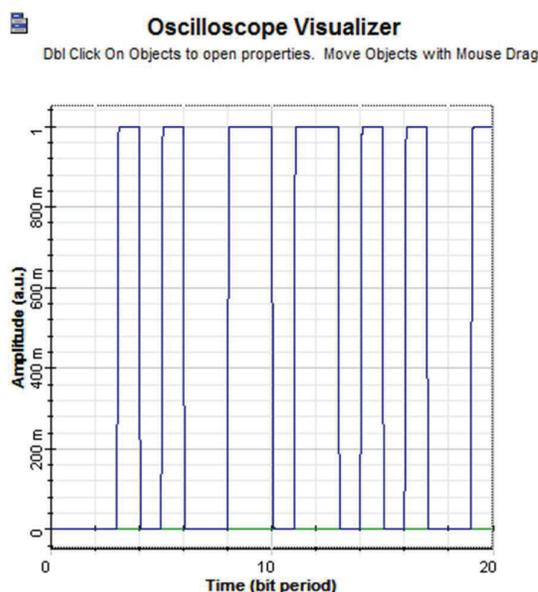


Figura 3.26 Señal eléctrica a la entrada de la fuente

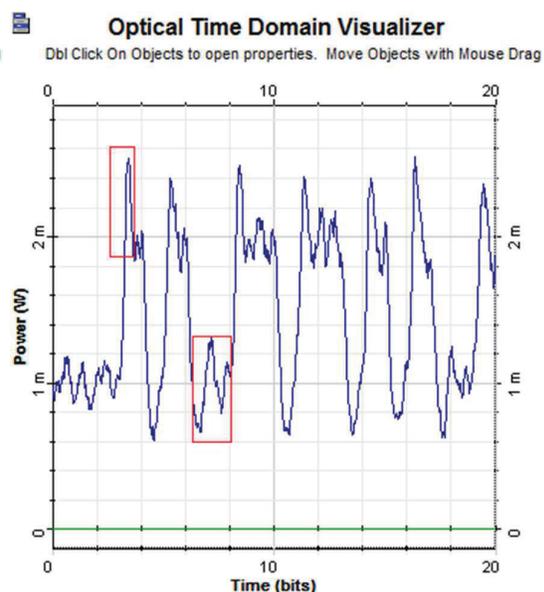


Figura 3.27 Señal con modulación directa

En el momento de la conversión electro-óptica, la señal de salida presenta picos al iniciar cada pulso, que representan el tiempo que requiere el láser para que se

estabilice y reconozca la presencia o ausencia de la corriente de inyección. Al finalizar los pulsos se presentan oscilaciones más pronunciadas este efecto se da en los estados de ausencia de luz (bit 0), estas oscilaciones representan el tiempo que requiere el láser para apagarse.

La fuente láser no llega a apagarse por completo, más bien, trata de entregar una mínima potencia y nuevamente iniciar el proceso de encendido para el siguiente estado. La señal que recibe el detector PIN lo muestra la *Figura 3.28*, esta señal se encuentra atenuada debido a la distancia que tuvo que viajar por la fibra óptica y presenta las mismas distorsiones de la señal al iniciar y finalizar cada pulso.

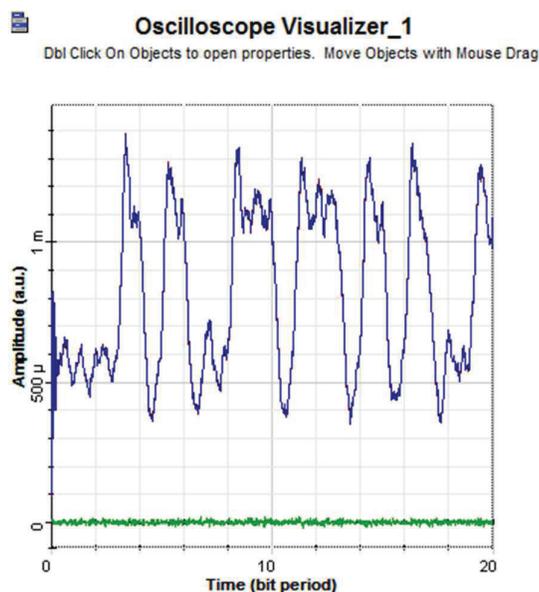


Figura 3.28 Señal recibida por el detector PIN

A pesar de que el detector tiene un tiempo de respuesta mínimo, solo puede recuperar la señal con las imperfecciones de la señal enviada por la modulación.

3.3.3.2 Escenario para el análisis de un enlace con modulación externa

Se realiza el esquema para un enlace de comunicaciones ópticas a 2.5 [Gbps], donde el transmisor está formado por una fuente láser que opera a 1550 [nm] con una potencia de 3 [dBm], utilizando modulación externa con interferómetro Mach-Zender, y modulación digital con código de línea NRZ. El enlace de fibra óptica y el receptor tienen las mismas características que el escenario anterior.

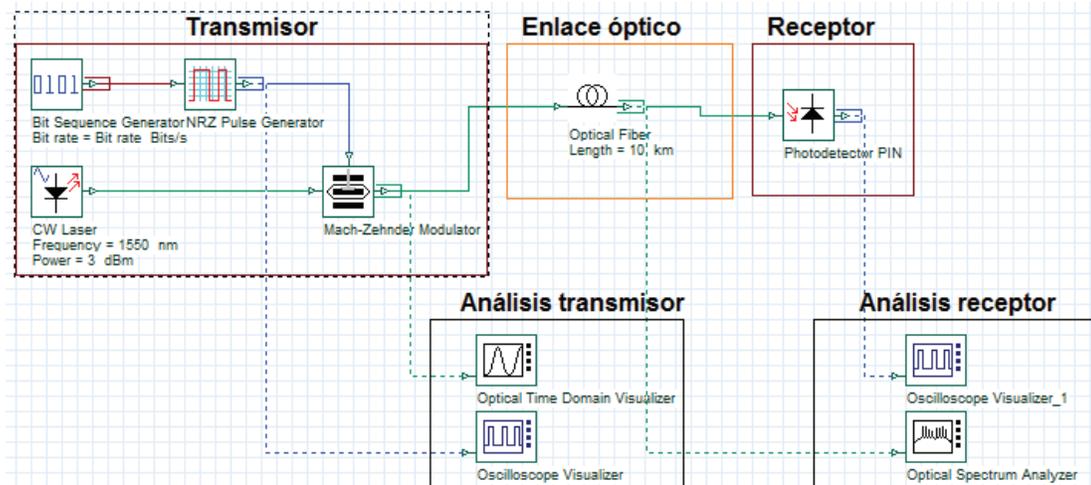


Figura 3.29 Esquema de un transmisor con modulación externa Mach-Zehnder

La Figura 3.29 muestra el esquema de un sistema con modulación externa. La modulación externa no depende de los tiempos de respuesta de la fuente láser, sino del funcionamiento del interferómetro Mach-Zehnder. La señal eléctrica que ingresa al interferómetro con la secuencia de bits de información modula a la portadora óptica de potencia constante enviada por la fuente láser.

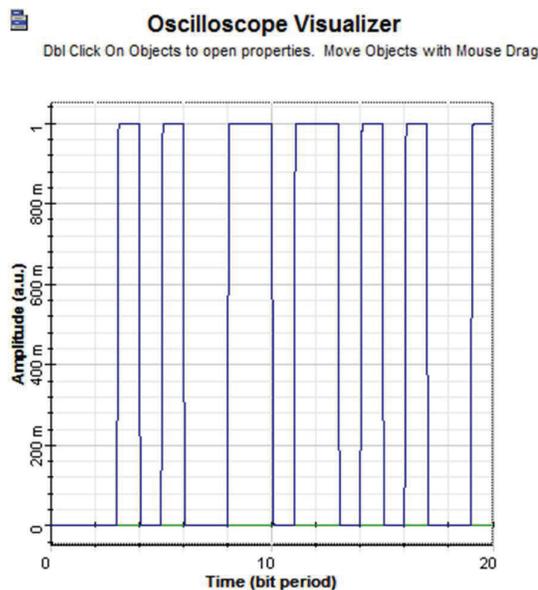


Figura 3.30 Señal a la entrada de la fuente

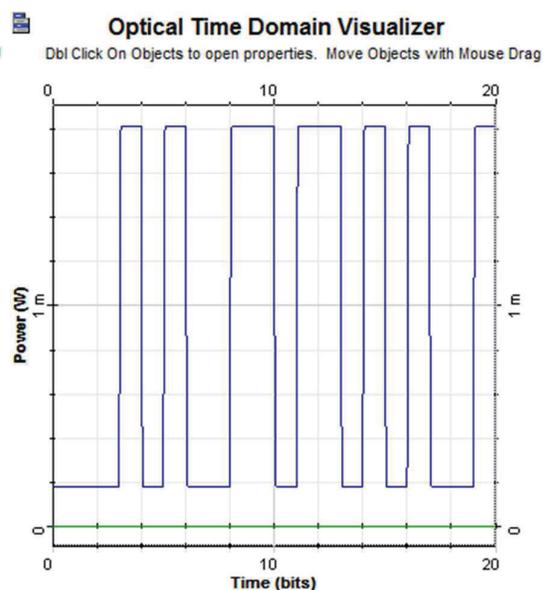


Figura 3.31 Señal con modulación externa

La Figura 3.31 muestra la señal a la salida del interferómetro Mach-Zehnder. Esta señal no presenta picos ni amortiguamientos al iniciar y finalizar el pulso ya que

no depende de los tiempos de respuesta de la fuente láser y el funcionamiento del interferómetro se basa en una comparación de fases para enviar ceros o unos.

En la *Figura 3.32* se muestra la señal recibida por el detector PIN, esta señal está atenuada debido a la distancia del enlace de fibra óptica, sin embargo, la señal que se recibe no presenta tanta distorsión en los mínimos y máximos de la señal como se observó al utilizar modulación directa.

Ya no se presentan las distorsiones pronunciadas del esquema anterior, esto se debe a que la señal recibida por el fotodetector tiene pulsos bien identificados pues no existen oscilaciones adicionales. Los detectores también requieren de un tiempo de respuesta ante la presencia de una señal óptica, es por esto que la señal muestra oscilaciones en la parte superior de los pulsos. Las pequeñas oscilaciones en la parte inferior de los pulsos se debe a la presencia de ruido térmico, sin embargo, el efecto es mínimo.

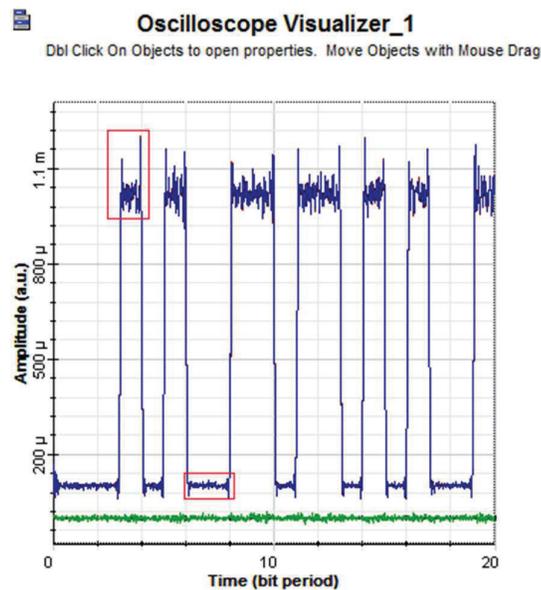


Figura 3.32 Señal recibida por el detector PIN

3.3.3.3 Análisis de resultados

Los esquemas presentados en esta práctica mostraron un enlace de comunicaciones ópticas con modulación directa y modulación externa, obteniendo mejores resultados con la modulación externa.

La fuente láser, al utilizar modulación directa, es estimulada por una corriente de inyección variable, por lo tanto, su anchura espectral aumenta, como se muestra en la *Figura 3.33*. Debido a que en ciertos instantes de tiempo, la corriente de inyección será menor que la corriente umbral, láser tendría una emisión espontánea. Es por esto que, al utilizar modulación directa se debe garantizar que la señal eléctrica de inyección supere los límites de la corriente umbral.

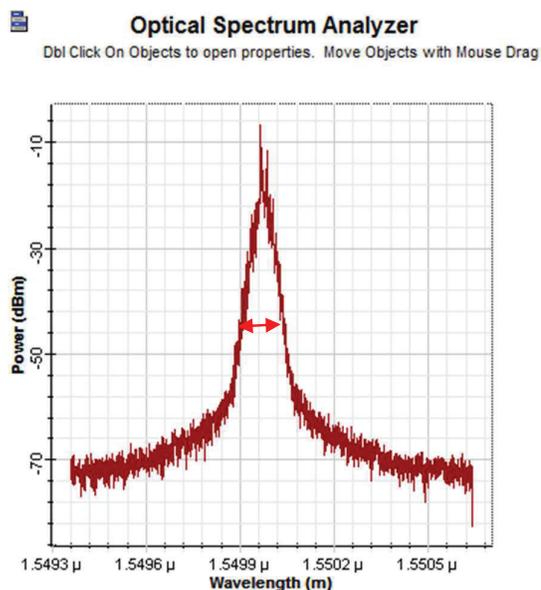


Figura 3.33 Espectro óptico con modulación directa

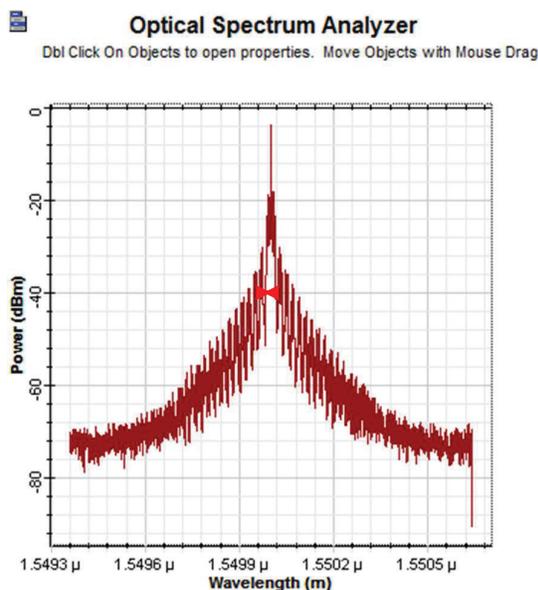


Figura 3.34 Espectro óptico con modulación externa

En modulación externa, este efecto no sucede ya que la fuente láser es estimulada por una corriente de inyección constante, por lo que siempre actuará en la zona de emisión estimulada. En este caso su anchura espectral es mucho menor como muestra la *Figura 3.34*. La señal que se transmitió por el enlace no presentó picos ni oscilaciones en la señal porque no depende del funcionamiento de la fuente láser. Por lo tanto, la modulación externa eliminó la distorsión de la señal que limita al sistema óptico a operar en bajas velocidades.

La modulación directa presenta complicaciones al trabajar en altas velocidades. La *Figura 3.35* muestra el enlace óptico operando a 10 [Gbps]. El tiempo de respuesta de la fuente láser ante la estimulación eléctrica no es lo suficientemente rápido para poder detectar el inicio y fin de cada pulso en altas velocidades, por lo que la señal modulada no es la correcta.

La modulación directa también depende de la potencia de emisión de la fuente, como ejemplo se varió la potencia de la fuente láser de 3 [dBm] a 0 [dBm]. Como las oscilaciones causadas por los tiempos de respuesta alcanzaron el valor de potencia de los pulsos con información, los pulsos y las oscilaciones se confunden y la transmisión es ineficiente. La *Figura 3.36* muestra el resultado de la modulación directa en estas condiciones.

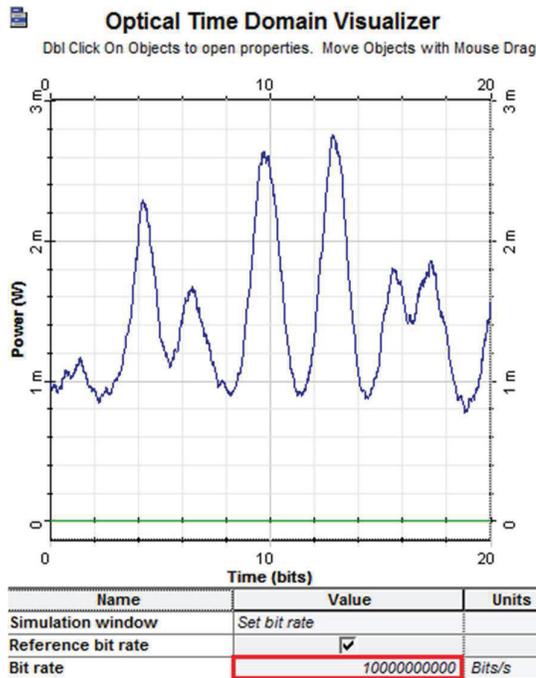


Figura 3.35 Modulación directa a 10 [Gbps]

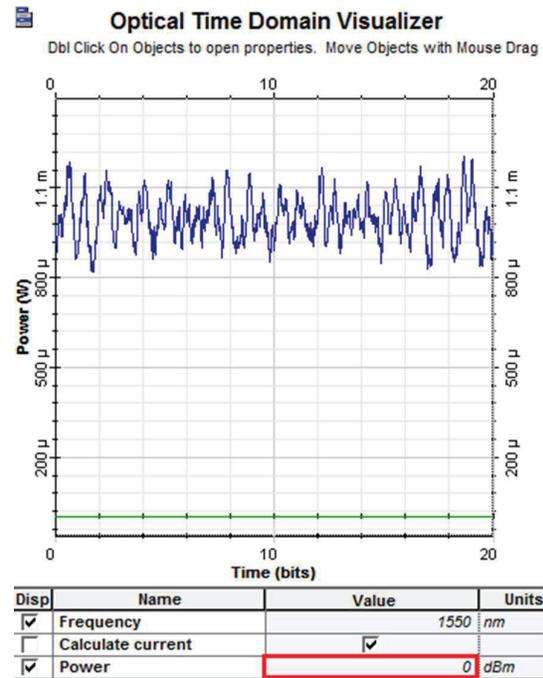


Figura 3.36 Modulación directa con 0 [dBm] de potencia

3.3.3.4 Aplicaciones de la práctica

La decisión de usar modulación directa o modulación externa dependerá de la aplicación y la velocidad de transmisión que se requiera. La modulación directa depende del tiempo de respuesta de la fuente óptica, por lo tanto, la velocidad de transmisión a la que opera el sistema se ve limitada.

Esta práctica permite el análisis de las dos técnicas de modulación en escenarios similares, determinando qué técnica utilizar para un enlace que requiera condiciones específicas. Esta práctica permite realizar variaciones tanto en la velocidad de transmisión, como en la potencia de la fuente láser para determinar qué técnica utilizar para alcanzar mejores resultados.

La modulación externa, en conjunto con el uso de fuentes láser por su estabilidad, es utilizada para sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad, en los cuales las velocidades de transmisión superan los 100 [Gbps] y gracias al uso de la fuente láser, se puede alcanzar cientos de kilómetros.

Una vez realizada la simulación y las pruebas necesarias utilizando los componentes como fuentes, moduladores, receptores y amplificadores se puede proceder a la adquisición de elementos para la implementación del enlace.

3.3.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para modulación directa, las fuentes láser requieren de un tiempo para estabilizarse pero al tener una corriente de inyección no constante la estabilización es más compleja para el láser, lo que se traduce en consumo de potencia y reducción de su vida útil.
- La modulación directa analógica requiere de precisión y los tiempos de respuesta pueden alterar la forma de la señal lo que presentaría una transmisión errónea, es por esto que no tiene muchas aplicaciones en sistemas de comunicaciones ópticas.
- En sistemas digitales de baja velocidad y distancia, la modulación directa digital no presenta un problema, la señal se distorsiona por la respuesta de la fuente pero se puede obtener comunicación satisfactoria.
- La modulación directa depende de la potencia de la fuente, a potencias bajas las oscilaciones, por los tiempos que requiere para estabilizarse, pueden ser comparables con los niveles de potencia de los pulsos de información causando alteración en la señal y confusión en la transmisión.
- La anchura espectral aumenta en la modulación directa porque la fuente láser es estimulada por una corriente de inyección no constante que alcanza niveles bajo el umbral.
- Los moduladores externos permiten que la fuente de luz opere con una corriente de inyección constante lo que prolonga su vida útil. Además, presentan una mayor velocidad de modulación y un espectro óptico con una anchura espectral menor que los moduladores directos ya que no depende del tiempo de respuesta de la fuente.

3.4 PRÁCTICA 7: TÉCNICA DE MULTIPLEXACIÓN-WDM

3.4.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Entender el funcionamiento básico de las técnicas de multiplexación usadas en comunicaciones ópticas.
- Comprender el funcionamiento de la técnica de multiplexación WDM.
- Realizar el esquema de un sistema de comunicaciones ópticas utilizando WDM mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Analizar el espectro óptico de un enlace óptico utilizando WDM.

3.4.2 MARCO TEÓRICO [1][12][15][20]

La demanda de usuarios que requieren una conexión, ha crecido en los últimos 50 años y sigue creciendo de manera exponencial, por lo que se busca soluciones prácticas y efectivas haciendo que los sistemas de comunicación requieran el uso de un mismo medio de transmisión para varios usuarios y servicios. Ésta es la razón por la cual las técnicas de multiplexación se han convertido en un punto fundamental en los sistemas de comunicación.

La multiplexación es la transmisión combinada de dos o más señales de información en un mismo enlace de comunicación mediante el uso de un componente llamado multiplexor. Al proceso inverso, en el cual la información se la recupera, se le denomina demultiplexación. Este proceso se lo realiza en el receptor mediante el uso de un componente llamado demultiplexor.

El objetivo principal es minimizar la cantidad de cableado y maximizar el uso del ancho de banda de los medios. En sistemas de comunicaciones ópticas, varias señales de luz viajan a través de un solo enlace de fibra óptica. Entre las técnicas de multiplexación más utilizadas están:

- **Multiplexación por división de frecuencia (FDM):** esta técnica en conjunto con TDM son usadas para señales eléctricas, por lo que en un sistema óptico deberían aplicarse antes de la entrada al transmisor. A cada señal a transmitirse se le asigna un rango de frecuencia y es modulada con una subportadora de frecuencia adecuada, las cuales deben estar suficientemente separadas para no sobrelaparse.

El proceso de conversión de eléctrico a óptico genera un cuello de botella para los enlaces ópticos ya que las capacidades de los componentes eléctricos son limitadas.

- **Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM):** usada no solo en sistemas de comunicaciones ópticas sino también en sistemas celulares e inalámbricos. Su funcionamiento se basa en enviar información en diferentes frecuencias, adicionalmente, esta técnica se diferencia del convencional FDM porque utiliza el concepto de ortogonalidad de portadoras, lo que permite la transmisión simultánea en un estrecho rango de frecuencias, sin que se produzcan interferencias entre ellas.

El concepto de ortogonalidad determina que la portadora de un canal tenga su máxima potencia donde el canal vecino no tiene efecto, es decir donde su portadora es nula, como muestra la *Figura 3.37*.



Figura 3.37 Ortogonalidad de portadoras [7]

- **Multiplexación por división de tiempo (TDM):** a cada canal se le asigna un *slot* de tiempo para transmitir una secuencia de bits, esta técnica es más utilizada en sistemas eléctricos que ópticos, además, se convierte difícil de aplicar a velocidades superiores a 40 [Gpbs], debido a las limitaciones impuestas por los componentes de la electrónica de alta velocidad.
- **Multiplexación por división de tiempo óptico (OTDM):** permite el multiplexado en el tiempo óptico, es decir, un número de canales ópticos que transportan diferentes secuencias de bits, se intercalan en el tiempo para ser enviados como una única secuencia de bits por un solo enlace. El intercalado se lo puede realizar ser bit a bit, o si se envía por paquetes, el intercalado será paquete a paquete. Esta técnica permite superar la barrera de la conversión electro-óptica ya que la multiplexación se la realiza en el dominio óptico.
- **Multiplexación por división de código (CDM):** a diferencia de TDM y FDM, CDM envía varias señales de manera simultánea en tiempo y

frecuencia mediante códigos pseudoaleatorios asignados a cada canal. Estos códigos son ortogonales entre sí y deben ser conocidos tanto por el transmisor como por el receptor para poder identificarlos.

- **Multiplexación por división de longitud de onda (WDM):** el espectro de transmisión óptica se divide en un número de bandas de longitud de onda que no se superponen, con cada longitud de onda se transporta un solo canal de comunicación, permitiendo múltiples canales que coexisten en una sola fibra y así el enorme ancho de banda que permiten las comunicaciones ópticas puede ser aprovechado.

3.4.2.1 Multiplexación por división de onda

El concepto de WDM se basa en el funcionamiento teórico de FDM. Cuando la separación entre frecuencias es del orden de los [THz] se habla de un sistema con multiplexación de división de onda. Las señales procedentes de fuentes de luz que operan a diferentes longitudes de onda se combinan mediante un multiplexor y se introducen en un enlace de fibra óptica. El principio fundamental de los transmisores para sistemas con WDM es tener la capacidad de emitir luz a diferentes longitudes de onda que no se interfieran.

En el receptor, las diferentes señales se separan por un demultiplexor que identifica cada longitud de onda enviada, y lo direcciona a su correspondiente detector sea PIN o APD. La *Figura 3.38* muestra el esquema de un sistema de transmisión con multiplexación WDM.



Figura 3.38 Diagrama de un sistema de transmisión con WDM [21]

A diferencia de las demás técnicas de multiplexación, WDM utiliza al máximo la capacidad de su medio de transmisión, además permite la transmisión bidireccional sobre un mismo hilo de fibra óptica utilizando diferentes canales para el envío y la recepción.

Sin embargo, los elementos a utilizarse para un sistema WDM son complejos y costosos por lo que resulta en una alta inversión. La complejidad de los componentes se deriva de la necesidad de transmitir señal con tolerancia a longitudes de onda compactas.

Actualmente, los sistemas de comunicaciones ópticas WDM alcanzan a transportar hasta 320 canales incrementando su capacidad al orden de las unidades de [Tbps]. Para esta técnica de multiplexación, se debe tener en consideración dos aspectos fundamentales:

- **Pérdida de inserción:** es la atenuación de una señal de onda que viaja entre el puerto de entrada y de salida del multiplexor. Se considera un multiplexor uniforme cuando esta pérdida es baja, y casi la misma en todos los canales.
- **Interferencia intercanal:** es la atenuación de una señal de onda medida en el puerto de salida diferente del canal que se esté analizando, este parámetro es propio del receptor.

La multiplexación WDM tiene algunas variantes dependientes de la longitud de onda de operación, la separación entre los canales y la cantidad de canales que se pueden enviar. Entre las clases de sistemas con WDM se pueden mencionar:

- **WDM convencional:** esta clase opera en longitudes de onda desde 850 a 1310 [nm] y desde 1310 a 1550 [nm] teniendo una rango de separación de 0.8-1.6 [nm], lo que permite un máximo de 16 canales a la vez.
- **Coarse WDM:** esta clase opera en la longitud de onda de 1310 [nm], a diferencia de la anterior la separación entre canales es demasiado grande, alrededor de 20 [nm], con el fin de poder llevar la información mucho más rápido, sin embargo está limitado a una distancia de 60 [km] para una velocidad de 2.5 [Gbps], porque la separación entre los canales no permite que los amplificadores ópticos operen de manera óptima en este sistema.
- **Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM):** el objetivo de esta clase de multiplexación es llevar más cantidad de canales, por lo que la separación entre ellos es de 0.4-0.1 [nm]. Opera en las

bandas S, C y L. Su implementación es más compleja y requiere de elementos de precisión.

3.4.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para esta práctica se propone realizar un escenario en *OptiSystem* que permite analizar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones ópticas de ocho canales con WDM.

- El escenario debe estar compuesto por los componentes necesarios para transmitir ocho canales a través de un enlace de fibra monomodo utilizando multiplexación por división de onda.
- En este escenario se debe realizar el análisis de los espectros de potencia y de las señales en el dominio del tiempo antes de ingresar al multiplexor, a la entrada de la fibra óptica monomodo y a la salida del demultiplexor.
- Se propone variar la longitud de onda de uno de los canales y analizar los cambios en el espectro óptico del sistema y en la señal en el dominio óptico a la salida del demultiplexor.

3.4.3.1 Multiplexación por división de onda

El escenario utilizado presenta un sistema de comunicaciones ópticas con WDM para ocho canales de transmisión. El esquema utiliza ocho transmisores cada uno con una fuente que emite luz a una potencia de 3 [dBm] y trabaja a una longitud de onda de la tercera ventana de trabajo, separada 0.8 [nm] del canal adyacente.

Este esquema utiliza modulación externa con un modulador Mach-Zehnder para una señal del tipo NRZ. Cada transmisor desea enviar una secuencia de bits única por un enlace de fibra óptica de 50 [km] de distancia y 0.2 [dB/km] de atenuación que opera a 1550 [nm].

El multiplexor se acopla a la fibra óptica monomodo y ésta a su vez, se conecta al demultiplexor WDM. Cada una de las salidas del demultiplexor ingresa a un receptor óptico con detector PIN para su correspondiente conversión opto-eléctrica.

La *Figura 3.39* presenta el esquema de un sistema con WDM, y para analizar el comportamiento del sistema se toma como ejemplo el primer y el último canal tanto en la transmisión como en la recepción.

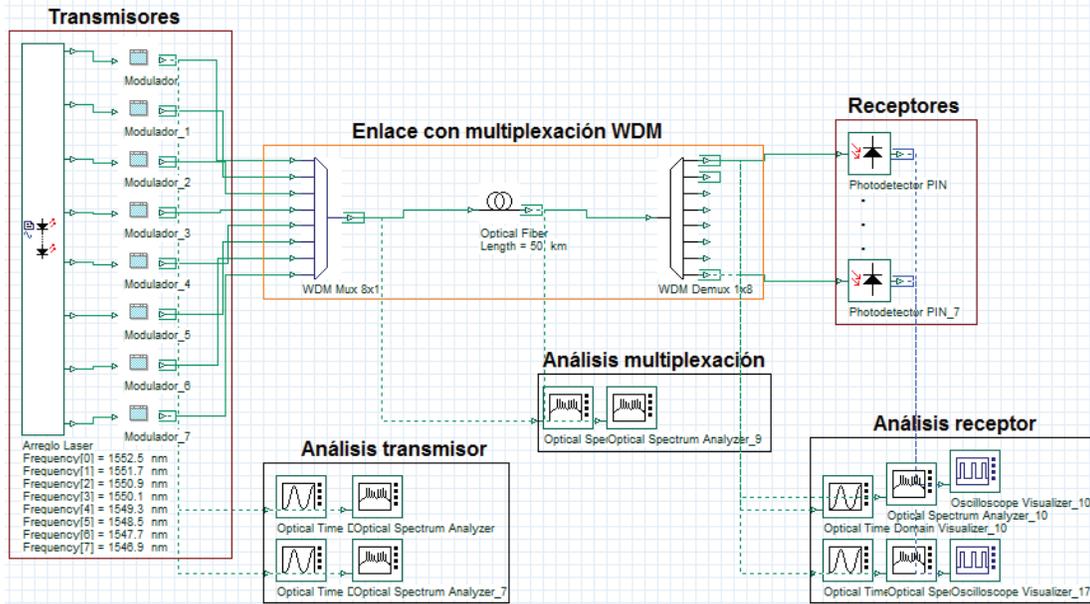


Figura 3.39 Esquema de un sistema óptico con WDM

Es fundamental para los transmisores que sus fuentes sean diseñadas de tal manera que ocupen un sólo canal de transmisión y que su anchura espectral no interfiera con la del canal adyacente. Es por esto que se requiere de fuentes láser por su directividad y su anchura espectral. La *Figura 3.40* y la *Figura 3.41* muestran el espectro óptico del primer y del último canal.

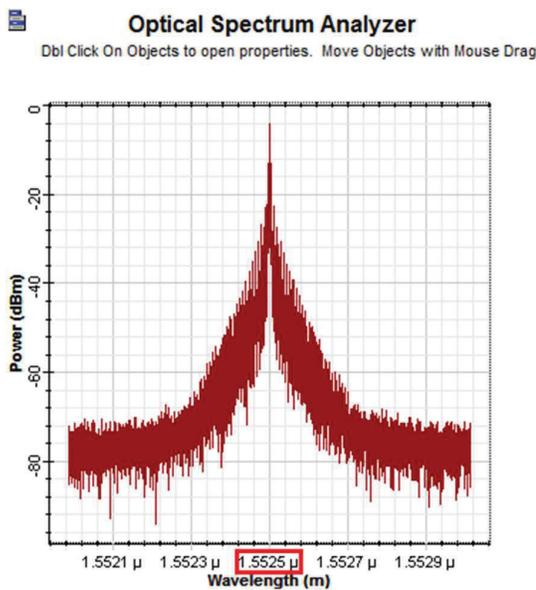


Figura 3.40 Espectro óptico del canal 1

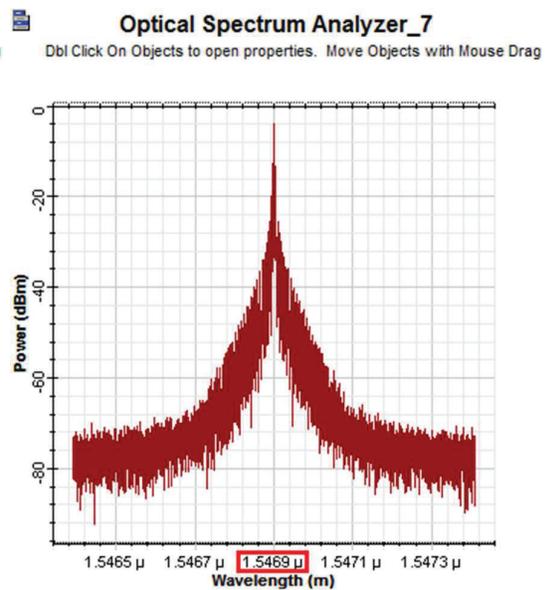


Figura 3.41 Espectro óptico del canal 8

La potencia a la salida del transmisor es la misma para los dos canales, ya que las fuentes emiten 3 [dBm]; sin embargo, la diferencia está en la longitud de onda de trabajo de cada fuente, en este caso el primer canal opera a una longitud de onda central de 1552.5 [nm] y el último canal a una longitud de onda central de 1546.9 [nm], la anchura espectral de cada fuente es de 0.06 [nm] lo cual es óptimo para una transmisión en WDM.

El analizador de espectros óptico es la representación gráfica de la señal de potencia enviada por cada canal en relación con la longitud de onda. Cada uno de los canales con su correspondiente longitud de onda de trabajo ingresa al multiplexor WDM que realiza la combinación espectral de los ocho canales.

La *Figura 3.42* muestra esta combinación, como se puede observar cada canal ocupa un rango de longitud de onda del espectro óptico, correspondiente a la longitud de onda de trabajo de la fuente láser. Al tener una separación apropiada los canales no se sobrelapan y se puede tener un enlace sin errores por interferencia intersímbolo.

 **Optical Spectrum Analyzer_8**
Dbl Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

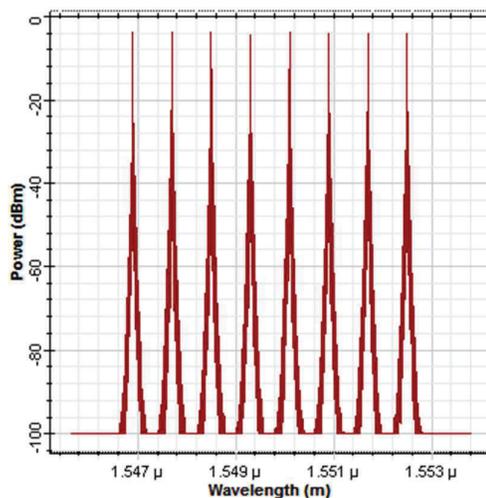


Figura 3.42 Espectro óptico a la salida del multiplexor

 **Optical Spectrum Analyzer_9**
Dbl Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

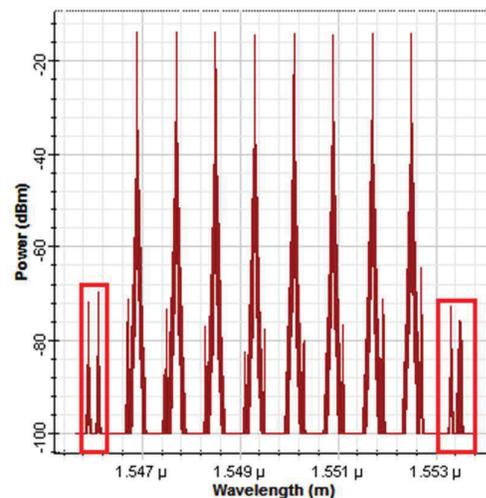


Figura 3.43 Espectro óptico a la entrada del demultiplexor

La *Figura 3.43* muestra la señal que llega al demultiplexor, debido a que ha viajado un tramo largo de fibra óptica sin amplificación, la señal se ve atenuada en 10 [dB].

Los ocho canales se mantienen sin interferencia, sin embargo, existe la presencia de dos espectros en los extremos a longitudes de onda que ninguno de los láser opera, esto se debe a los efectos no lineales de la fibra, en especial a FWM.

Estos dos espectros alcanzan una potencia de -70 [dBm] mientras que los espectros con información alcanzan una potencia de -13 [dBm] por lo que se considera despreciable los valores de los espectros adicionales.

La función del demultiplexor WDM es separar las diferentes longitudes de onda y enviar la señal a su correspondiente receptor óptico, para poder lograr este objetivo, el demultiplexor actúa como un filtro y atenúa los canales que no corresponden, la *Figura 3.44* muestra cómo el espectro de potencia de los siete canales se atenúa sucesivamente para que el detector solo pueda identificar la señal del primer canal. Lo mismo ocurre para cada canal, en el caso del último canal, el demultiplexor atenúa los canales del primero al penúltimo, así, el detector sólo recibirá la señal del último canal, como muestra la *Figura 3.45*.

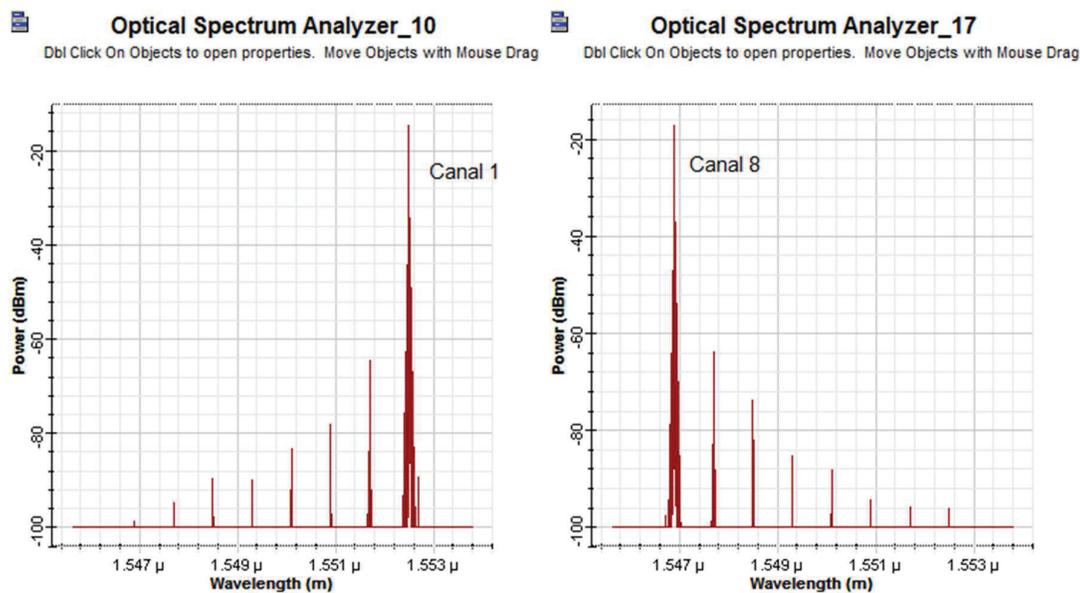


Figura 3.44 Espectro óptico del canal 1 a la salida del demultiplexor

Figura 3.45 Espectro óptico del canal 8 a la salida del demultiplexor

3.4.3.2 Análisis de resultados

El esquema presentado en esta práctica mostró un enlace de comunicaciones ópticas con la técnica de multiplexación WDM operando de manera óptima.

A pesar de la presencia de potencia a longitudes de onda no deseadas en el enlace por el efecto de FWM, la recepción para cada canal fue efectiva.

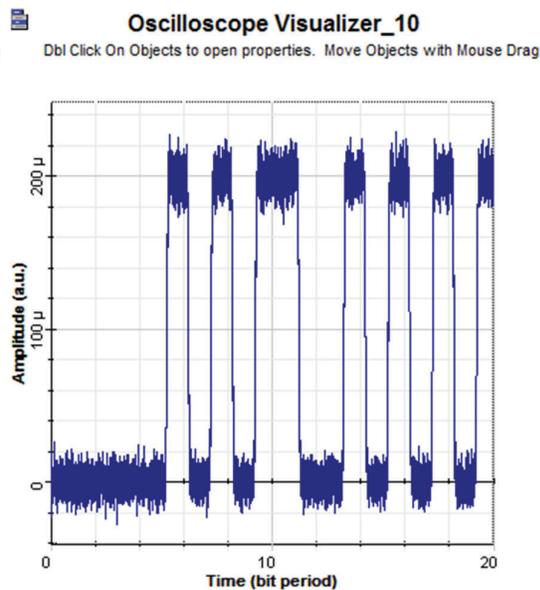
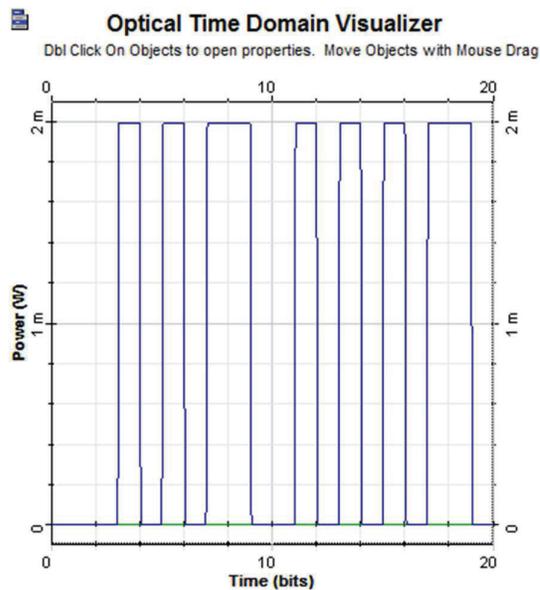


Figura 3.46 Secuencia de bits enviada por el canal 1

Figura 3.47 Secuencia de bits recibida para el canal 1

La *Figura 3.47* muestra la señal recibida para el primer canal. La señal se atenuó por el trayecto de fibra óptica que tuvo que recorrer y se retrasa un tiempo de bit, debido a los efectos de dispersión del enlace. Sin embargo, al ser un enlace digital, la recepción es óptima. En los niveles superiores e inferiores de la señal presenta variaciones debido a la presencia de ruido, pero este no genera errores en la recepción.

Es esencial para WDM que las fuentes operen a longitudes de onda deseadas, como ejemplo demostrativo se modificó la longitud de onda de la fuente del último canal de tal manera que interfiera con el primer canal. El primer canal opera a una longitud de onda de 1552.5 [nm], para este caso el último canal opera a la misma longitud de onda de primer canal. En estas condiciones el multiplexor identificó sólo siete canales, como muestra la *Figura 3.48*, debido a que el octavo canal tendría la misma longitud de onda de trabajo del primer canal.

La *Figura 3.49* muestra el espectro óptico de los canales al pasar por el enlace de fibra óptica, la señal se atenuó los mismos 10 [dB], como en el esquema anterior,

sin embargo, por la interferencia entre los canales, se obtuvo nuevos espectros a longitudes de onda no deseadas.

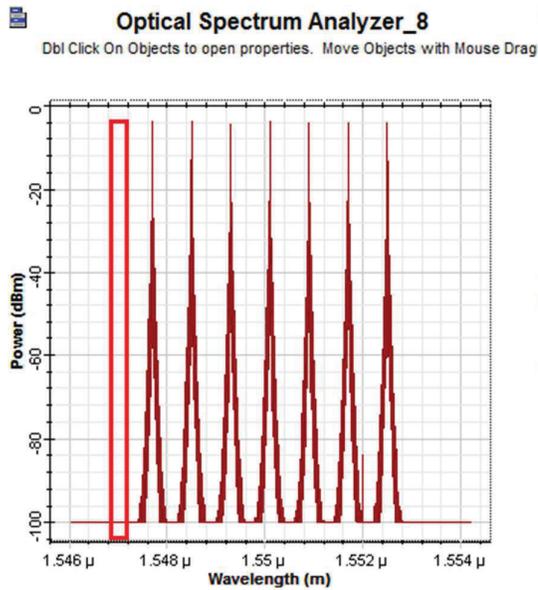


Figura 3.48 Ausencia del canal 8

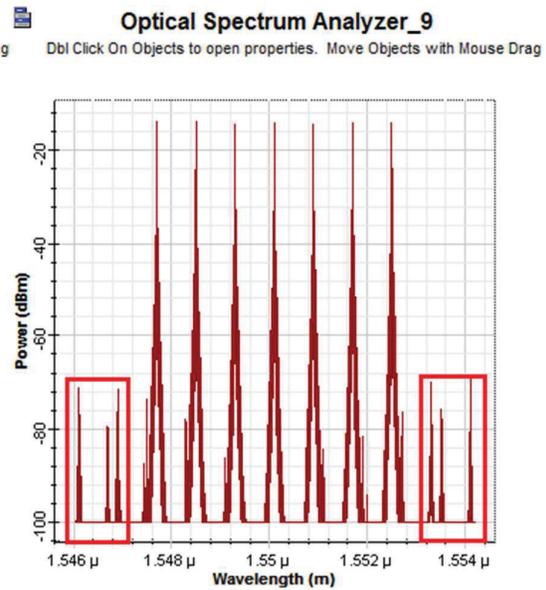


Figura 3.49 Nuevos espectros no deseados

En el demultiplexor, el primer y el último canal presentaron la misma potencia, como muestra la *Figura 3.50*, por lo que se generó una confusión y el demultiplexor envió la misma señal a los dos canales.

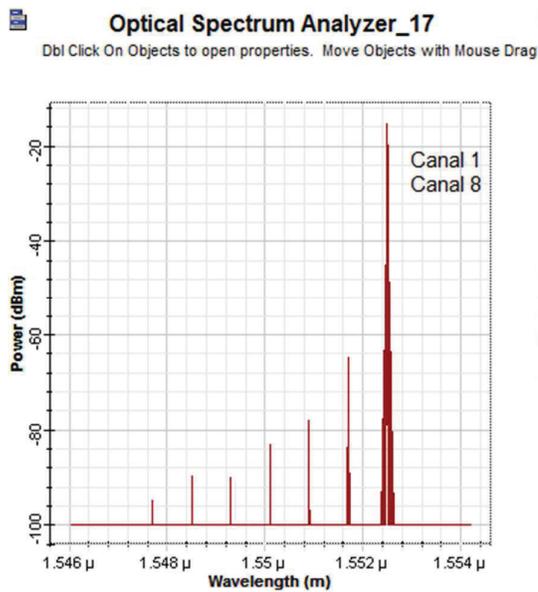


Figura 3.50 Confusión del demultiplexor

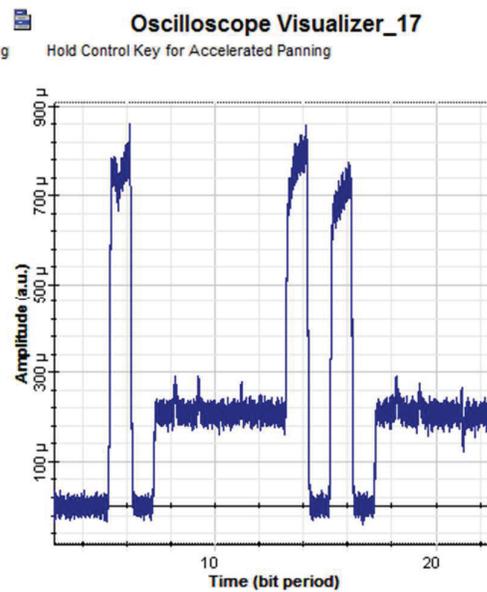


Figura 3.51 Señal recibida en el canal 1 y 8

La *Figura 3.51* muestra la señal recibida por el detector PIN en los dos canales, como el demultiplexor no pudo identificar la señal correspondiente de cada canal, envió una combinación de los dos canales. Por lo que en este caso el enlace es deficiente y la recepción presenta 100% de errores.

3.4.3.3 Aplicaciones de la práctica

La técnica de multiplexación WDM, actualmente, es una de las más utilizadas a nivel comercial, ya que permite incrementar la capacidad del enlace casi de manera inmediata, sin necesidad de cambiar la infraestructura o el cableado. Esto lo logra gracias al transporte de varias señales ópticas por un sólo hilo de fibra.

El realizar un esquema de simulación con esta técnica, permite analizar el comportamiento de los componentes dentro del sistema. Así lo que se pretende es identificar los parámetros y características necesarias para que el enlace funcione óptimamente con esta técnica de multiplexación.

Es importante determinar la cantidad de canales que va a manejar el enlace, para así dimensionar el tipo de fuente, la longitud de onda de trabajo de cada transmisor, la potencia del transmisor que no genere distorsión y poder realizar la implementación. Esta técnica es usada comúnmente en las redes de backbone de los ISP (*Internet Service Provider*) para enlaces punto a punto y enlaces punto multipunto.

3.4.3.4 Posibles variaciones de la práctica

- Se puede disminuir o aumentar la separación entre las longitudes de onda cada canal y observar la variación que sufre el espectro óptico y las dificultades que se presenta en la recepción de la señal.
- Se puede presentar el análisis para un sistema de comunicaciones con multiplexación por división de onda con un mayor número de canales, determinando los parámetros que afectan al enlace óptico al aumentar la cantidad de canales que se envían por la fibra.

3.4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En los sistemas con WDM se debe considerar la dispersión cromática de material del enlace, ya que esto hace que el pulso se ensanche y pueda interferir con otro canal.

- La técnica de multiplexación WDM se basa en enviar información de cada canal en diferentes longitudes de onda. La separación entre una longitud de onda y otra puede llegar a 0.1 [nm], por lo que se requiere de fuentes láser y fibras monomodo para su operación.
- Las fuentes láser deben ser diseñadas con una anchura espectral tan reducida del orden de milésimas de [nm], de tal manera que no interfieran con los demás canales del sistema pues pueden producir que uno de los canales se elimine y el receptor sólo detecte ruido.
- Los efectos no lineales de la fibra óptica como FWM, pueden producir espectros adicionales a longitudes de onda no deseadas, esto se vuelve crítico cuando una de estas longitudes coincide con la longitud de onda de un canal y le causa total interferencia.
- WDM requiere de fuentes de precisión para mantener el canal en la longitud de onda adecuada, además, en el receptor también se necesita filtros de alta precisión para poder recibir la señal adecuada. Tanto las fuentes láser como los filtros de alta precisión son costosos y requieren de sistemas de refrigeración para mantener la temperatura estable, esto se debe considerar para sistemas con un número de canales mayor a 16.

3.5 PRÁCTICA 8: TÉCNICA DE MULTIPLEXACIÓN-OTDM

3.5.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender el funcionamiento de la técnica de multiplexación OTDM.
- Realizar el esquema de un sistema de comunicaciones ópticas utilizando OTDM mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Variar los parámetros del sistema y realizar una comparación de los resultados obtenidos.

3.5.2 MARCO TEÓRICO [3][9][10][20][22]

Las primeras transmisiones de datos por fibra óptica requerían un proceso de multiplexación eléctrica para aumentar la capacidad y llevar varias señales, la transformación electro-óptica se la realizaba únicamente para la transmisión por el enlace óptico.

Con el paso del tiempo, se ha podido desarrollar técnicas que permiten la multiplexación en el dominio del tiempo óptico. A pesar de que WDM se ha convertido en una de las técnicas de multiplexación más utilizada en sistemas de comunicaciones ópticas, sus desventajas debido a los efectos no lineales de la fibra como son FWM y XPM, y a requerir una conversión electro-óptica limitan su capacidad. La técnica de multiplexación por división de tiempo óptico (OTDM) permite superar las no linealidades de la fibra óptica y aumentar la capacidad del enlace.

OTDM en el dominio óptico, permite el multiplexado en tiempo como lo hace TDM en el dominio eléctrico, es decir, un número de canales ópticos que transportan diferentes flujos de datos, se intercalan en el tiempo para ser enviados como un único flujo de datos. El intercalado se lo puede realizar bit a bit, o si se envía por paquetes, el intercalado puede hacerse paquete a paquete.

A diferencia de TDM que es utilizado en sistemas electrónicos, OTDM permite alcanzar velocidades por encima de los 100 [Gbps] incluso llega a los [Tbps], es por esto que el único formato en el cual la información puede ser transmitida es del tipo RZ, ya que los pulsos transmitidos son muy pequeños y no tiene problemas de sincronismo como el código NRZ.

El sincronismo es esencial en los sistemas con OTDM por lo que los circuitos empleados para este fin deben ser de alta precisión. En un enlace óptico con OTDM varias señales ópticas viajan con una velocidad de B [bps] a la misma frecuencia portadora y se multiplexan en el dominio óptico para formar un flujo de bits compuesto a la velocidad binaria NB , donde N es el número de canales.

La capacidad del sistema aumenta al aumentar la cantidad de canales, sin embargo, el diseño se dificulta porque se requieren elementos de mayor precisión para detectar los mínimos pulsos transmitidos. La *Figura 3.52* muestra el esquema de un sistema de comunicaciones óptica utilizando multiplexación OTDM.

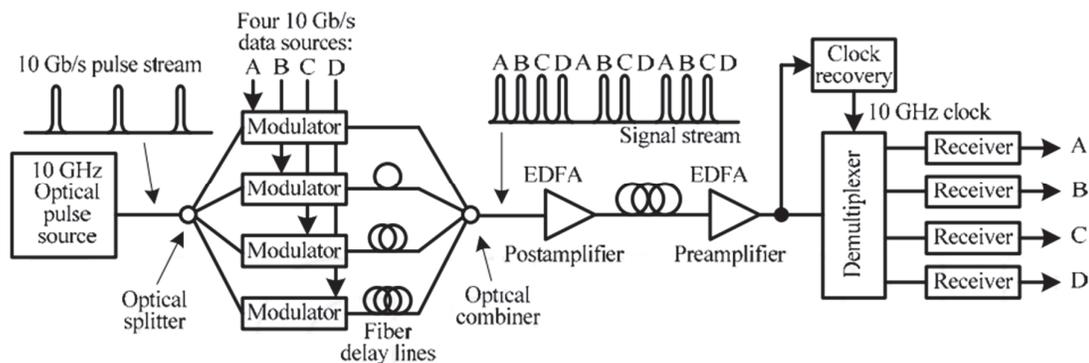


Figura 3.52 Diagrama de un sistema de 4 canales con OTDM [10][22]

El concepto básico del funcionamiento de OTDM se basa en retrasar cierto tiempo de bit (ζ) a la señal de cada canal. Cada secuencia de bits es modulada antes de ingresar al multiplexor, el multiplexor usa un combinador de potencia óptica para generar un tren de pulsos periódico resultado de la combinación binaria de los bits de todos los canales, la cual tiene una velocidad de transmisión igual a NB [bps]. OTDM utiliza pulsos delimitadores que poseen un mayor nivel de potencia para facilitar la demultiplexación. Es importante considerar que la fuente láser debe producir pulsos que puedan ser ubicados en cada *slot* de tiempo sin interferirse.

En el receptor, el demultiplexor tiene como función dirigir cada bit al demodulador correspondiente, el éxito está en el tiempo de recuperación para conducir y sincronizar el demultiplexor, por lo que para esta técnica se requiere un mecanismo de reloj operando a la misma velocidad del sistema.

3.5.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar un escenario en *OptiSystem* que permita el análisis del funcionamiento de la técnica de multiplexación OTDM en un sistema de comunicación con cuatro canales.

- El escenario debe estar compuesto por los componentes necesarios para transmitir cuatro canales a través de un enlace de fibra monomodo utilizando multiplexación OTDM.
- Se propone variar el ancho de pulso del circuito de recuperación para analizar los resultados de la señal obtenida en la recepción.
- Se propone cambiar el codificador en el transmisor para analizar los resultados de la señal obtenida en la recepción.

3.5.3.1 Multiplexación por división de tiempo óptico

El escenario para un sistema de comunicación óptica con multiplexación OTDM de cuatro canales utiliza modulación en amplitud con el fin de no alterar la frecuencia de la señal y obtener niveles de potencia adecuados para la transmisión en el enlace óptico.

Cada canal está formado por un transmisor con fuente láser que emite una potencia de 0 [dBm] y opera a 1550 [nm], un generador de secuencia de bits y un codificador RZ con ancho de pulso de 0.2 [tiempo de bit] ya que OTDM requiere de pulsos pequeños para mejorar el sincronismo y que la señal de cada canal no interfiera con el canal vecino.

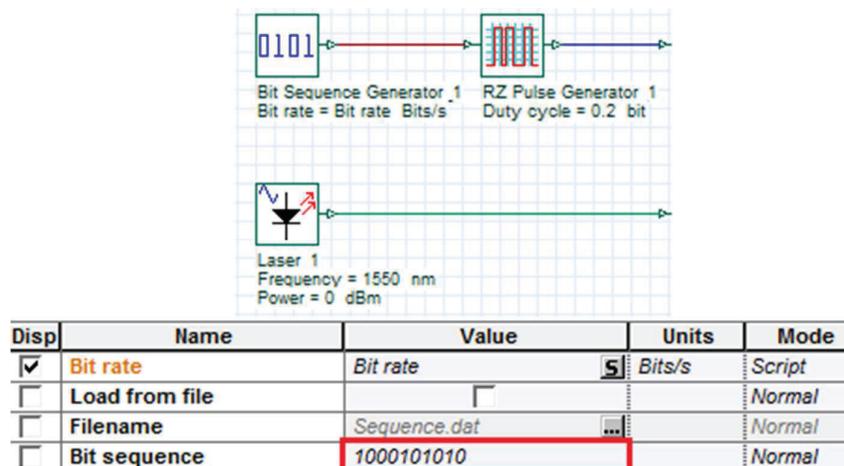


Figura 3.53 Esquema del transmisor y secuencia de bits para el canal 2

Como ejemplo, se enfocará en el funcionamiento del segundo canal. La *Figura 3.53* muestra el esquema del transmisor y la secuencia que va a ser transmitida.

El multiplexor óptico está compuesto por un modulador AM, un circuito de retardo (*delay*) y un combinador de potencia óptica. Cada canal tiene un retardo de $\frac{1}{4}$ del tiempo de bit. Así, cada canal ocupará 25% del tiempo óptico para su transmisión, para el caso del segundo canal, la señal modulada en amplitud se retarda $\frac{1}{4}$ del tiempo de bit. Mediante el uso de un combinador de potencia, las señales de los 4 canales se combinan y se transmiten a través de 50 [km] de fibra óptica monomodo hasta el demultiplexor.

El demultiplexor requiere de un circuito de reloj que opere a la misma velocidad del sistema, y un codificador RZ que permitirá recuperar la señal de cada canal antes de ingresar al receptor. La *Figura 3.54* muestra el esquema del demultiplexor y el parámetro requerido en el codificador RZ para recuperar la señal del segundo canal.

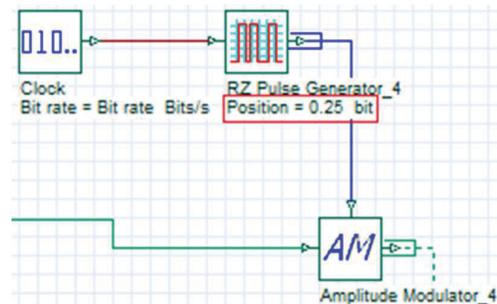


Figura 3.54 Esquema del demultiplexor OTDM

A pesar de que los elementos del transmisor y multiplexor en comparación con los del demultiplexor son los mismos, cumplen diferentes funciones, el generador de secuencia de bit en el demultiplexor ya no representa a los bits de información, sino, representa a la secuencia del reloj para el sincronismo del circuito de tiempo de recuperación, el generador de pulsos RZ será el discriminante para poder recuperar la señal y dependerá de su posición y su ciclo de bit la recuperación de cada canal. La *Figura 3.55* muestra el esquema completo de un sistema de comunicaciones ópticas usando multiplexación OTDM.

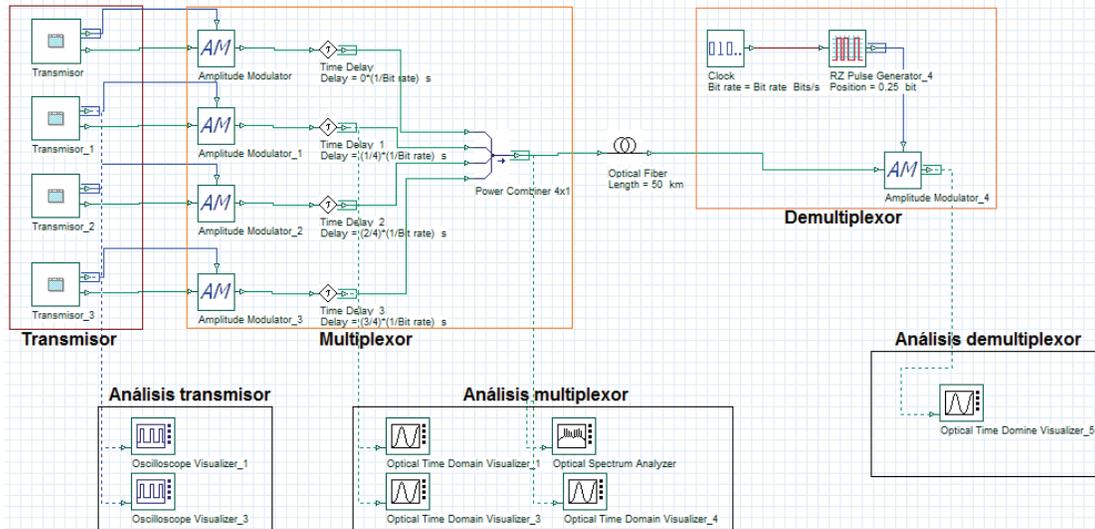


Figura 3.55 Esquema de un sistema de 4 canales usando OTDM

OTDM intercala cada canal en el dominio del tiempo óptico y es transportado en un sólo canal del espectro de potencia óptica. La *Figura 3.57* muestra el espectro óptico a la salida del combinator de potencia.

A pesar de que el ancho del espectro es mayor que el espectro cada transmisor, la señal se envía por un único canal de 0.5 [nm] del espectro óptico.

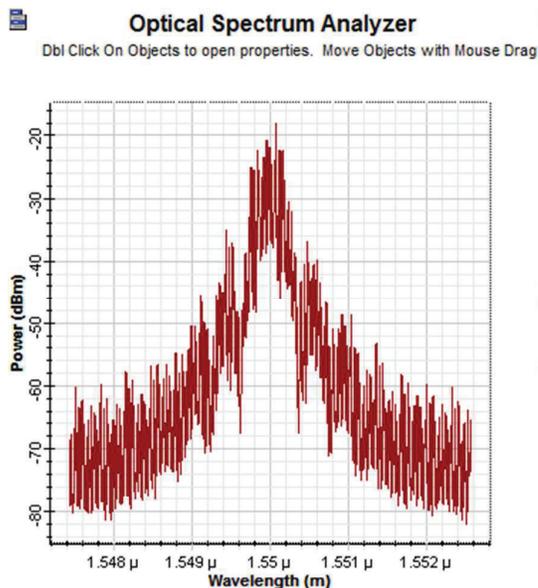


Figura 3.56 Espectro óptico de un sistema con OTDM

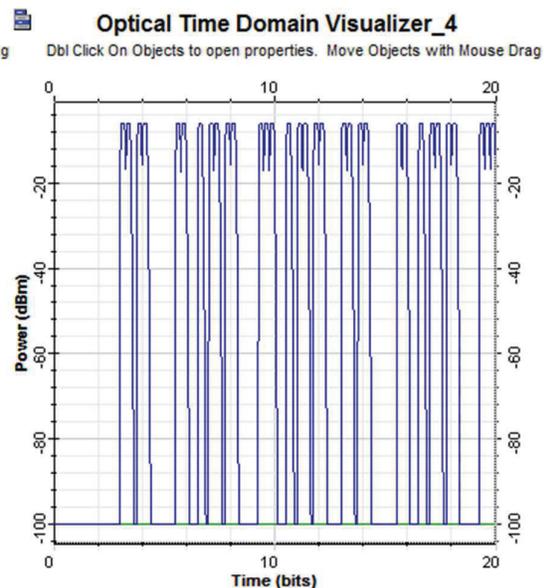


Figura 3.57 Combinación de los 4 canales en el tiempo óptico

La combinación de las secuencias de bits en un solo canal se realiza con una operación AND entre todos los canales, teniendo como resultado una única

secuencia de bits con una velocidad de transmisión N veces mayor que la velocidad de cada canal, siendo N el número de canales del sistema.

La *Figura 3.57* muestra la secuencia resultante de la combinación de los cuatro canales, esta señal es la que se envía por el canal de fibra óptica.

Para poder recuperar la señal del segundo canal, el codificador RZ del demultiplexor debe retrasar el sincronismo del reloj el mismo tiempo de bit que se encuentra retrasado el canal. Al ser el segundo canal se le debe retrasar $\frac{1}{4}$ del tiempo de bit. La *Figura 3.59* muestra el resultado del demultiplexor para obtener la señal del segundo canal antes de ingresar al receptor.

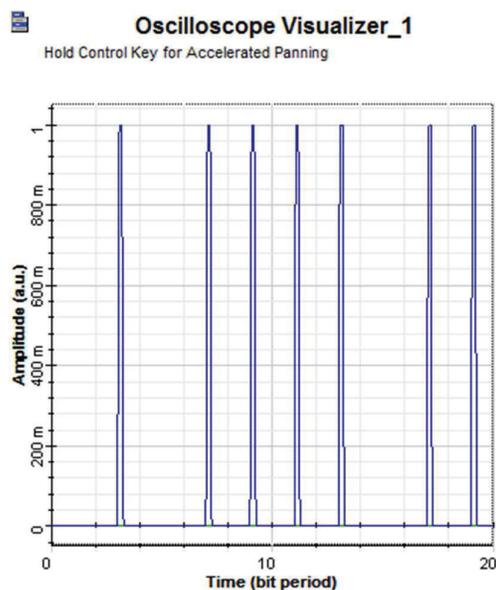


Figura 3.58 Secuencia a transmitirse del canal 2

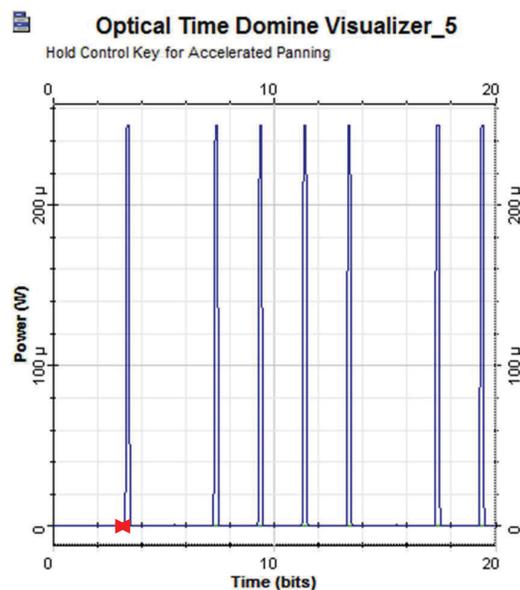


Figura 3.59 Secuencia demultiplexada del canal 2

La señal a la salida del demultiplexor se encuentra atenuada por el viaje por la fibra óptica y se ha desplazado 0.2 del tiempo de bit, por el retraso que sufre el canal antes de ingresar al multiplexor OTDM.

3.5.3.2 Análisis de resultados

El esquema mostrado en la práctica presenta cuatro canales que desean transmitir una secuencia de bits única, al combinar las señales se obtiene una señal con mayores transiciones, mostrada en la *Figura 3.57*, lo que representa que la velocidad del sistema ha aumentado. Al tener cuatro canales en el sistema la velocidad de transmisión se incrementa en cuatro, por lo tanto como cada

sistema trabaja a 10 [Gbps], la velocidad de transmisión de la señal combinada y la capacidad del sistema sería de 40 [Gbps].

El escenario mostrado como tal, permite la recuperación de la señal del segundo canal debido a que tanto los pulsos en la transmisión como en la demultiplexación son los adecuados, es decir, el transmisor utiliza un codificador RZ con un ancho de pulso de 0.2 [tiempo de bit], y en la demultiplexación el codificador RZ también usa un ancho de 0.2 [tiempo de bit] para la recuperación y la posición adecuada para el canal dos.

La recuperación de la señal se ve afectada si los componentes del demultiplexor no son bien diseñados, como ejemplo práctico se modificó el ancho del pulso del codificador RZ a 0.75 [tiempo de bit], debido a que el ancho del pulso es demasiado grande, el demultiplexor recupera señales que no pertenecen al canal, como lo muestra la *Figura 3.60*, lo que hace que la recepción sea errónea y se tenga bits de otros canales.

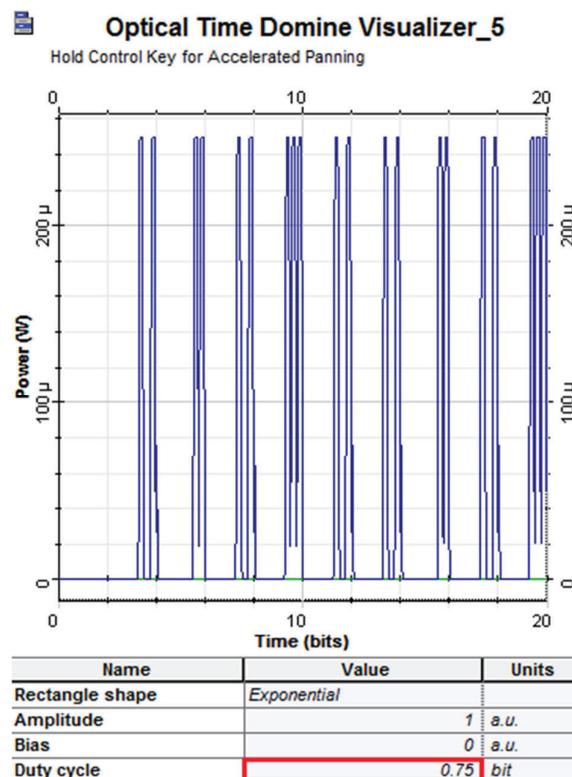


Figura 3.60 Recuperación errónea del canal 2

Es importante que los componentes del transmisor sean los adecuados, para que el enlace con OTDM funcione óptimamente, y no genere pérdidas ni errores de recepción. Un elemento fundamental es el codificador y el ancho del pulso que genere para transmitirse, por lo que a manera de ejemplo demostrativo, se modificó el esquema cambiando los codificadores RZ por codificadores NZR, los cuales tienen un ancho de pulso de 1 [tiempo de bit].

La *Figura 3.61* muestra la señal a la salida del multiplexor, la cual se convierte en una señal de difícil recuperación, ya que todos los pulsos se interfieren en el tiempo óptico. Por más de que el diseño del demultiplexor sea correcto, es decir con el uso del correspondiente ancho de pulso y la posición del bit para la recuperación del canal dos, como los pulsos están muy sobrelapados entre sí, el demultiplexor no puede identificar las señales como tal y obtiene una señal con errores, como lo muestra la *Figura 3.62*.

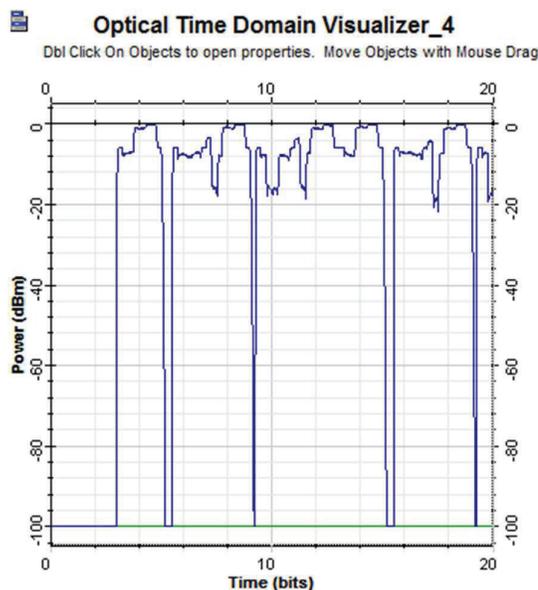


Figura 3.61 Combinación de 4 canales con codificador NRZ

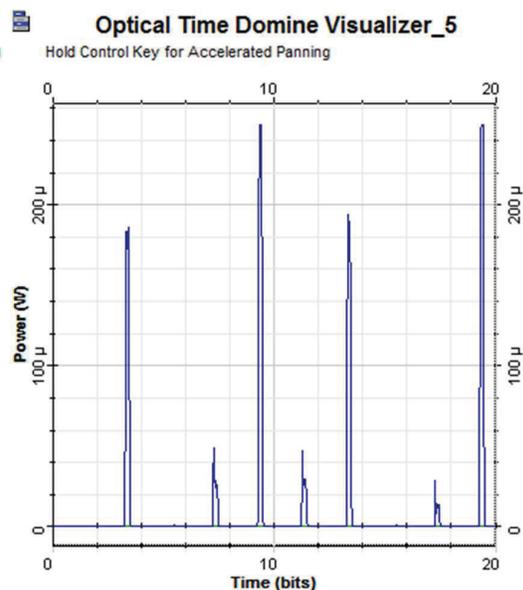


Figura 3.62 Secuencia recuperada por el demultiplexor para el canal 2

3.5.3.3 Aplicaciones de la práctica

La aplicación principal de esta práctica es para sistemas de alta velocidad que alcancen los 100 [Gbps], el comportamiento de cada uno de los componentes se lo puede analizar con el uso del simulador y la variación de sus parámetros.

La variación de los parámetros en el transmisor, como por ejemplo cambiar la técnica de codificación de RZ a NRZ hace que el sistema se vuelva inestable esto se debe a que el código NRZ presenta problemas de sincronismo a altas velocidades. Gracias a esta práctica se puede determinar que el código requerido para OTDM es el código RZ y que mientras más pequeños sean los pulsos el sincronismo será mejor y se facilita la demultiplexación.

La idea principal del uso del simulador para un sistema óptico con multiplexación OTDM es realizar las pruebas necesarias ya sea variando el nivel de potencia del transmisor, la técnica de codificación, la técnica de modulación o la distancia de fibra óptica para alcanzar una operación óptima del multiplexor y así realizar la implementación del sistema con los parámetros ya probados.

3.5.3.4 Posibles variaciones de la práctica

- Se puede presentar el análisis para un sistema de comunicaciones con multiplexación por división de tiempo óptico con un mayor número de canales, por ejemplo, un sistema de 16 canales. Este escenario permitiría determinar las condiciones necesarias de las señales codificadas, como el ancho del pulso, el tipo de codificación, con el fin de no generar interferencia entre los canales. Además, se analizaría las dificultades para el circuito de recuperación al tener mayor cantidad de canales.

3.5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El código de línea RZ es el ideal para la técnica de multiplexación OTDM ya que su ancho de pulso puede reducirse para no generar interferencias entre los canales y facilitar la demultiplexación.
- El codificador RZ permite alcanzar velocidades de 100 [Gbps], sin embargo el sistema de demultiplexación depende del tiempo de recuperación y mientras más pequeño es el pulso más complejo es el circuito del reloj para la recuperación de la señal.
- Los transmisores ópticos deben emitir señales que permita el intercalado de las mismas considerando que al aumentar el número de canales se reduce el *s/ot* de tiempo óptico para la transmisión.
- El multiplexor es responsable de combinar las secuencias de bits de los canales y enviarlos por un único canal del espectro óptico.

- El proceso de demultiplexación depende del sincronismo del circuito de recuperación, si el ancho del pulso no es igual que el ancho del pulso de la señal transmitida, la señal recuperada por el demultiplexor tendrá errores.
- La multiplexación por división de tiempo óptico tiene la ventaja de operar en una única longitud de onda lo que hace posible ejecutar OTDM en un número de canales WDM existentes, mejorando la capacidad global del sistema.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO III

- [1] Ajoy Ghatak, "Introduction to fiber optics", Cambridge University Press, New Delhi march 1997
- [2] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics" Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback);
- [3] Bateman, A, "Comunicaciones digitales: diseño para el mundo real", Editor Marcombo, ISBN 8426713378, 9788426713377, pp.56-58, 2003.
- [4] Bravo, L. Sánchez, "Simulador de enlace de fibra óptica punto a punto usando interfaz gráfica de Matlab", M.S Tesis, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2012.
- [5] Cardona F. Josep, Fernández C. Lorena "Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos", Universidad Politécnica Superior de Castelldefeis febrero 2010.
- [6] Cláudio de Melo JR, "Simulink blocks for simulation of light sources" Departamento de Engenharia Elétrica Centro Tecnológico Universidade Federal do Pará
- [7] Delyser, R. R., "Using Mathcad in Eletromagnetic Education", IEEE Transnsactions on Education., Vol 39, nº 2, pp. 198-209, May 1996.
- [8] Dengpeng Yuan, Ying Dong, Yujin Liu and Tianjian Li, "Mach-Zehnder Interferometer Biochemical Sensor Based on Silicon-on-Insulator Rib Waveguide with Large Cross Section", ISSN 1424-8220, August 2015
- [9] Escobar, Diego "Técnicas de Modulación para enlaces ópticos" Universidad Mayor.
- [10] G. Lim, Y. Park, C. A. Zmudzinski, P. S. Zory, L. M. Miller, T. L. Cockerill, J. J. Coleman, C. S. Hong, and L. Figueroa, "Temperature Analysis and Characteristics of Highly Strained InGaAs–GaAsP–GaAs Quantum-Well Lasers" Vol 39, june 2008.
- [11] Ghafour Amouzad M, Ahmad Fauzi, "Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems" UCSI University & Universiti Putra Malaysia
- [12] Govind P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems" 4th ed., Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 978-0-470-50511-3 (Hardback).

- [13] Iskander, M.F., "Computer based Eletromagnetic education", IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., vol 41, no 6/7, pp. 920-93, June/July 1993.
- [14] Lobão, P.MS, "A Optical Fiber Communication Systems Simulator Software" – MsC. Thesis – FEE/UNICAMP, 1992 (in portuguese).
- [15] Mathworks, inc. "Simulink: A Program for Simulating Dynamic Systems User's Guide." Natick, Massachusetts, 1992.
- [16] Msc Jiménez María Soledad, "Comunicaciones Ópticas", Escuela Politécnica Nacional, folleto y diapositivas.
- [17] Mena, Pablo V., "Rate Equation Based Models with a Single Solution Regime", J. Lighthwave technol. Vol 15, no 4, p.p. 717 – 729, April 1997.
- [18] Monika Srivastava, "Design and Performance Analysis of Optical Time division Multiplexing for Very High Bit –Rate Transmission" Vol.4, No.3, June 2014
- [19] Prof. Esteban Sanchis, Prof. Juan B. Ejea "El diodo de emisión de Luz (LED)", Univerditat d Valencia, Escola Tecnica Superior d Enginyeria, nov 2008.
- [20] Quinorivera Adhemir S., Rojas Ruddy A. "Sistemas De Transmisión Por Fibra Óptica Fuentes Ópticas" Universidad De Aquino Bolivia La Paz, 2012.
- [21] R. G. Winch, "Telecommunication transmission systems", 2nd edition, New York: McGraw-Hill, pp.21-88, 1998.
- [22] Z. Ghassemlooy, "All Optical Time Division Multiplexing An alternative to WDM", Optical Communications Research Group, School of Engineering Sheffield Hallam University, UK.

CAPÍTULO IV

RECEPTORES ÓPTICOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se enfoca en el tercer componente principal de un enlace; el receptor. En este capítulo se hace referencia a los componentes básicos de un receptor óptico, enfocándose principalmente, en los detectores. Los receptores ópticos son los encargados de la conversión opto-eléctrica y permiten el envío de la señal a dispositivos finales mediante un flujo de corriente.

Este capítulo presenta tres prácticas que permiten el estudio y análisis del comportamiento de los receptores ópticos en diferentes escenarios, variando los elementos que los conforman y el tipo de enlace de fibra óptica. Además, se presenta en diseño de un enlace de fibra punto a punto considerando el presupuesto de potencia y la velocidad de transmisión.

En la primera práctica se realiza una introducción a dos herramientas que permiten el análisis de los enlaces: el diagrama del ojo y la tasa de bit errado. Estas dos herramientas permiten el análisis comparativo del comportamiento de los detectores PIN y APD. Esta práctica permite determinar qué tipo de detector utilizar para las diferentes aplicaciones que se tiene en comunicaciones ópticas.

La segunda práctica presenta las características principales que determinan el rendimiento de un receptor óptico. En esta práctica se determinan los límites de operación de los receptores con fuentes PIN y se presentan las alternativas de solución para solventar estas limitantes.

La tercera práctica, permite aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de este proyecto, realizando el diseño de un enlace punto a punto. En esta práctica, se presenta el cálculo del presupuesto de potencia y análisis del enlace cuando opera en óptimas condiciones. Como ejemplo práctico, se varía los parámetros de tal manera que el diseño sea subdimensionado o sobredimensionado.

4.2 PRÁCTICA 9: DETECTORES PIN Y APD

4.2.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Comprender el funcionamiento de los detectores PIN y APD mediante la simulación de un enlace óptico en *OptiSystem*.
- Entender los parámetros del diagrama del ojo y del BER para su análisis.
- Comparar el diagrama del ojo para el detector PIN y para el detector APD.
- Analizar los resultados del BER para un enlace óptico con detector PIN y con detector APD.

4.2.2 MARCO TEÓRICO [1][7][8][17][18]

Antes de empezar el estudio y análisis de los detectores ópticos, se realiza una introducción referente al diagrama del ojo y a la tasa de bit errado (BER) ya que estos parámetros permiten el análisis gráfico del funcionamiento y el rendimiento de los receptores ópticos.

4.2.2.1 Diagrama del ojo

El diagrama de ojo es una herramienta utilizada para el análisis y evaluación del rendimiento de un sistema de transmisión. El diagrama del ojo permite la visualización de desfases, jitter, niveles de ruido, potencias de señal y así poder determinar si el sistema presenta distorsión, interferencias intersímbolo o errores de sincronismo en sistemas de comunicaciones.

El diagrama de ojo es una representación gráfica que muestra la superposición de las combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Esta combinación permite determinar las características de los pulsos propagados por el canal de comunicación, en este caso la fibra óptica. El gráfico se forma superponiendo las señales a la salida del filtro del receptor.

Para poder realizar los análisis correspondientes de la señal, se debe determinar los parámetros del pulso transmitido, a pesar de que se trata de una señal digital, los pulsos siempre presentan alguna alteración debido a los factores como son el ruido, la interferencia, la distorsión, entre otros. La *Figura 4.1* muestra la descripción de los parámetros del pulso. A continuación se detallan los parámetros del pulso:

- **Sobretensión superior/inferior:** es el porcentaje de amplitud que excede el nivel 1 o nivel 0.
- **Vamp:** amplitud del pulso.
- **Vmax:** amplitud máxima.
- **Tiempo de subida/bajada:** se ubican los niveles de ceros y unos lógicos, se obtiene el tiempo relacionado entre el 10% y 90% del valor máximo de amplitud del pulso. El tiempo entre ambos rangos es el que se conoce como tiempo de subida. El tiempo de bajada se considera el tiempo relacionado entre 90% y el 10% del valor máximo del nivel de pulso.
- **Intervalo unitario:** es el tiempo entre dos transiciones adyacentes.

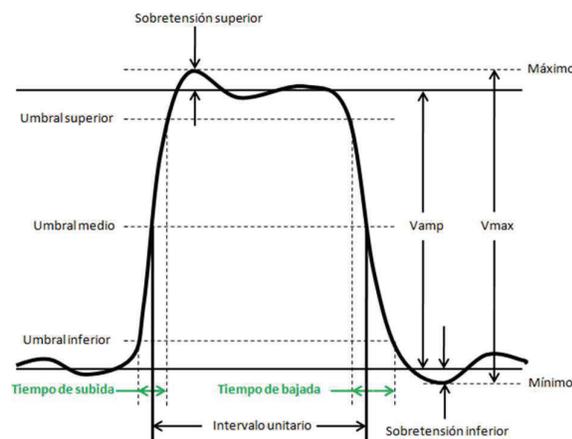


Figura 4.1 Parámetros del pulso [6]

Una vez determinado los parámetros del pulso, se procede a analizar los parámetros del diagrama del ojo, ya que es la superposición de las combinaciones posibles de pulsos de unos y ceros lógicos. La *Figura 4.2* muestra un ejemplo de representación de diagrama del ojo con sus parámetros correspondientes.

- **Nivel de 1 lógico:** corresponde a la medición del valor promedio del nivel de uno lógico.
- **Nivel de 0 lógico:** corresponde a la medición del valor promedio del nivel de cero lógico.
- **Cruce de amplitud:** se refiere al nivel de voltaje en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.

- **Cruce de tiempo:** se refiere al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.
- **Periodo de bit:** período entre la apertura y cierre del ojo. Se obtiene a partir del cruce de amplitud y el cruce de tiempo.
- **Jitter:** es la variación temporal durante el envío de la señal digital, debido a una desviación de la señal de reloj. El jitter es considerado como una señal de ruido no deseada, un cambio indeseado y abrupto de la propiedad de una señal.

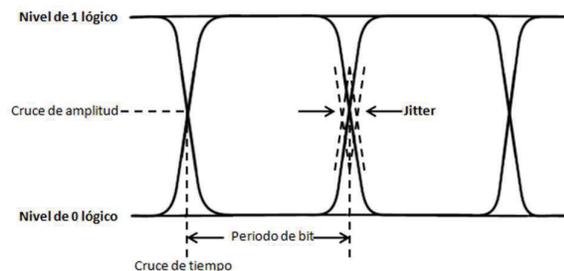


Figura 4.2 Diagrama del ojo [6]

El diagrama del ojo ideal es completamente abierto, en presencia de interferencia intersímbolo el diagrama tenderá a cerrarse verticalmente. Además, cuanto mayor sea la apertura vertical del diagrama, el sistema tiene mayor inmunidad frente al ruido. A pesar del que el diagrama del ojo ideal es completamente abierto, esto dificulta a los circuitos de sincronismo en la parte práctica.

Es por eso que, la apertura horizontal del ojo es también importante desde el punto de vista práctico, si la pendiente es muy pronunciada, el sistema necesitará ser más sensible para evitar errores cometidos en la recuperación del sincronismo.

4.2.2.2 Tasa de bit errado (BER)

El BER se define como la relación del número de bits errados respecto al total de bits enviados durante un intervalo especificado de tiempo. El BER se utiliza para cuantificar la eficiencia de un canal de comunicación digital.

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número de bits transmitidos}} \quad (\text{ec 4.1})$$

Si el canal de comunicación entre el transmisor y el receptor tiene un buen diseño y la relación señal a ruido es alta, entonces la tasa de bit errado será muy

pequeña y no tendrá un efecto notable. Por el contrario, si el ruido puede ser detectado, entonces el BER aumentará.

Mediante la manipulación de las variables que pueden ser controlados, es posible optimizar un sistema para proporcionar los niveles de rendimiento que se requieren. A continuación se detallan los factores que afectan al BER.

- **Interferencia:** generalmente son factores externos que no pueden ser cambiados por el diseño del sistema. Sin embargo, es posible ajustar el ancho de banda reduciendo la interferencia. Esta reducción del ancho de banda limita el rendimiento de la transmisión de datos pero asegura el BER deseado.
- **Potencia en el receptor:** el nivel de potencia mínimo para que el receptor pueda operar óptimamente asegura el valor del BER requerido, sin embargo si el nivel de potencia sobrepasa el límite para el receptor, este se sobrecarga y el BER empieza a aumentar exponencialmente.

4.2.2.3 Detectores ópticos

El detector, al igual que la fuente de luz, es el componente más importante del receptor óptico, es el responsable de la conversión opto-eléctrica, y del cual dependerá el rendimiento del receptor. Sin embargo, la eficiencia de funcionamiento de un detector óptico está relacionado con los circuitos que lo acompañen en el receptor.

Los detectores más utilizados en comunicaciones ópticos son los fotodetectores o fotodiodos semiconductores, los cuales requieren que se polaricen inversamente para detectar la luz, de esta manera si un fotón incide en la unión p-n con la energía necesaria, creará un par electrón hueco, y cada uno de los portadores circulará en sentido contrario creando una fotocorriente. Por lo tanto el proceso en el fotodetector es el inverso al proceso de la fuente de luz.

Lo que necesita un detector para su funcionamiento es que ingrese la suficiente potencia óptica capaz de hacer saltar a un electrón de su banda de valencia a la banda de conducción, y crear el flujo eléctrico, para esto el fotón requiere de una energía mínima E_g , y dado que la energía está relacionada con la frecuencia, se determina una frecuencia de corte f_c [4]. Un fotodetector no responde a

frecuencias menores a la frecuencia de corte. La frecuencia de corte se expresa de la siguiente manera donde, h es la constante de Planck igual a 6.62×10^{-34} [Js].

$$f_c = \frac{E_g}{h} \quad (\text{ec 4.2})$$

Por lo tanto, en sistemas de comunicaciones se determina una longitud de onda de corte, como la máxima longitud a la que opera el fotodetector [4].

$$\lambda_c = \frac{c \cdot h E_g}{f_c} \quad (\text{ec 4.3})$$

La energía mínima que se requiere y la longitud de operación de los fotodetectores dependen del material por el que estén compuestos, la *Tabla 4.1* presenta la energía y la longitud de onda para diodos fotodetectores de Silicio (Si) y de Germanio (Ge).

Material	Energía mínima [eV]	Longitud de onda [nm]
Si	1.12	400-1100
Ge	0.81	800-1600

Tabla 4.1 Características de un fotodetector Si y Ge [15]

Un fotodetector debe cumplir con ciertos requerimientos para un buen funcionamiento del receptor óptico:

- Debe ser altamente sensitivo.
- Debe tener tiempos de respuesta cortos.
- Debe presentar un mínimo ruido interno.

Entre los detectores más utilizados para receptores ópticos se encuentran los fotodetectores PIN y los fotodetectores APD

4.2.2.4 Detectores PIN

A pesar de que los diodos están constituidos por una unión p-n, para comunicaciones ópticas, no es factible su utilización debido a su alto tiempo de difusión de portadores fuera de la zona de unión, por lo que utiliza una zona de unión mucho más grande.

El detector PIN está compuesto por las dos capas semiconductores (p-n) y entre los dos capas una región intrínseca no dopada que permite que la zona de unión

se ensanche, como muestra la *Figura 4.3*; esto hace que más fotones sean absorbidos y produzcan mayor fotocorriente.

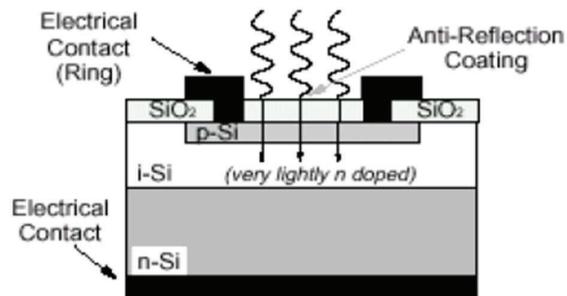


Figura 4.3 Estructura de un detector PIN [10][18]

La polarización inversa de este detector permite que la región intrínseca no tenga portadores, así los fotones absorbidos entregan energía a los electrones los cuales pasan a la banda de conducción y se transforman en portadores de carga para generar la corriente eléctrica.

Esta región intrínseca incrementa la responsividad del receptor, la cual mide la relación entre la corriente que entrega el detector y la potencia óptica que recibe y también disminuye el tiempo de respuesta a las variaciones de intensidad de luz de entrada.

La responsividad aumenta a su vez con la longitud de onda de operación, debido a que más fotones están presentes para la misma potencia óptica. Los detectores PIN pueden operar en dos modos como fotoconductor, o como fotovoltaico, comúnmente se los encuentra en modo fotoconductor:

- **Fotoconductor:** para niveles bajos de potencia, este modo presenta problemas ya que la corriente térmica generada es una fuente importante de ruido; sin embargo, para niveles de potencia normales, este inconveniente se elimina y la respuesta es aún más rápida que operando en modo fotovoltaico.
- **Fotovoltaico:** a bajos niveles de potencia, se tiene una corriente de oscuridad pequeña, la corriente de oscuridad determina el ruido generado por los fotodetectores en ausencia de luz. Además, presenta una buena

sensibilidad, sin embargo la fotocorriente generada es menor y se requiere de amplificadores.

4.2.2.5 Detectores APD

El fotodetector de avalancha o APD basa su funcionamiento en el aumento de polarización inversa lo que produce una repuesta más rápida y una multiplicación en avalancha, amplificando la señal durante el proceso de detección.

La estructura física de un detector APD es similar a la de un detector PIN, la diferencia está en la región intrínseca denominada π , la cual es agrandada y dopada ligeramente de portadores p, su diseño debe asegurar un campo eléctrico uniforme. La *Figura 4.4* muestra la estructura de un detector APD.

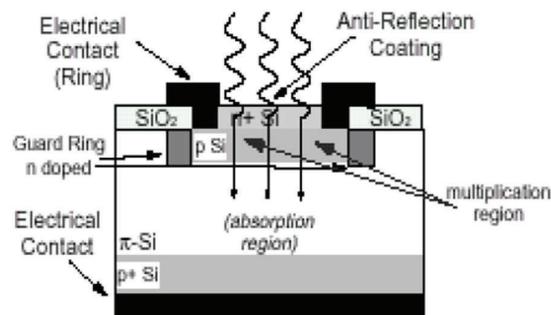


Figura 4.4 Estructura de un detector APD [10][18]

Al igual que el detector PIN, los fotones atraviesan la unión p-n y son absorbidos y generan el par electrón hueco, la potencia eléctrica es suficiente para arrastrar los portadores hacia los contactos eléctricos, sin embargo, en las proximidades el campo eléctrico es más intenso haciendo que los electrones se muevan más rápido y así aumente la energía, ya que colisionan entre si produciendo más pares electrón hueco, este efecto es conocido como avalancha.

Este proceso podría ser infinito, pero a su vez incontrolable, por lo que se diseña dispositivos de forma que solo uno de los portadores pueda ionizar, al transcurrir un intervalo de tiempo todos esos portadores alcanzan la parte n de la zona de transición, deteniendo así el efecto avalancha. La señal es amplificada en el mismo detector gracias al efecto avalancha, por lo que no se requiere de circuitos adicionales de amplificación como en el detector PIN.

La desventaja de este tipo de detector es el elevado voltaje que requiere para su polarización, el voltaje debe estar en el rango de 40 a 400 [V], por lo que se necesita circuitos de alta precisión, y resultan más caros que los detectores PIN.

Tanto los detectores PIN como los detectores APD, deben funcionar a potencias de luz bajas. La relación señal a ruido debe ser alta para no tener inconveniente en el enlace de comunicación. Por lo tanto, la sensibilidad del receptor se define como la mínima potencia óptica para conseguir una relación señal a ruido óptima.

4.2.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar dos escenarios en *OptiSystem* que permiten el análisis de comportamiento de un fotodetector PIN y un fotodetector APD.

- El primer escenario debe presentar los componentes necesarios para un sistema con fotodetector PIN en la recepción. Este escenario debe permitir el análisis del diagrama del ojo y del BER así como del espectro óptico.
- Se propone variar la distancia de la fibra para analizar los cambios en la señal recibida por el detector PIN.
- El segundo escenario debe presentar los componentes necesarios para un sistema con fotodetector APD en la recepción. Este escenario debe permitir el análisis del diagrama del ojo y del BER así como el espectro óptico.
- Se propone variar la longitud del enlace con el fin de analizar los cambios en la señal recibida por el detector APD.
- Se debe realizar la comparación entre los resultados obtenidos en los enlaces con detector PIN y detector APD.

4.2.3.1 Escenario para el análisis de un fotodetector PIN

El esquema para un enlace con fotodetector PIN se muestra en la *Figura 4.5*, *OptiSystem* presenta un bloque exclusivo llamado *photodetector PIN*, al cual se le conecta un filtro pasabajo de Bessel para la recepción de la señal (*Ver Anexo 5*).

Este escenario está compuesto de un transmisor con fuente láser que opera a 1550 [nm] y emite una potencia de 10 [dBm] además de un modulador Mach-Zender. La señal óptica viaja a través de una fibra monomodo de 0.5 [dB/km] de atenuación y 60 [km] de distancia.

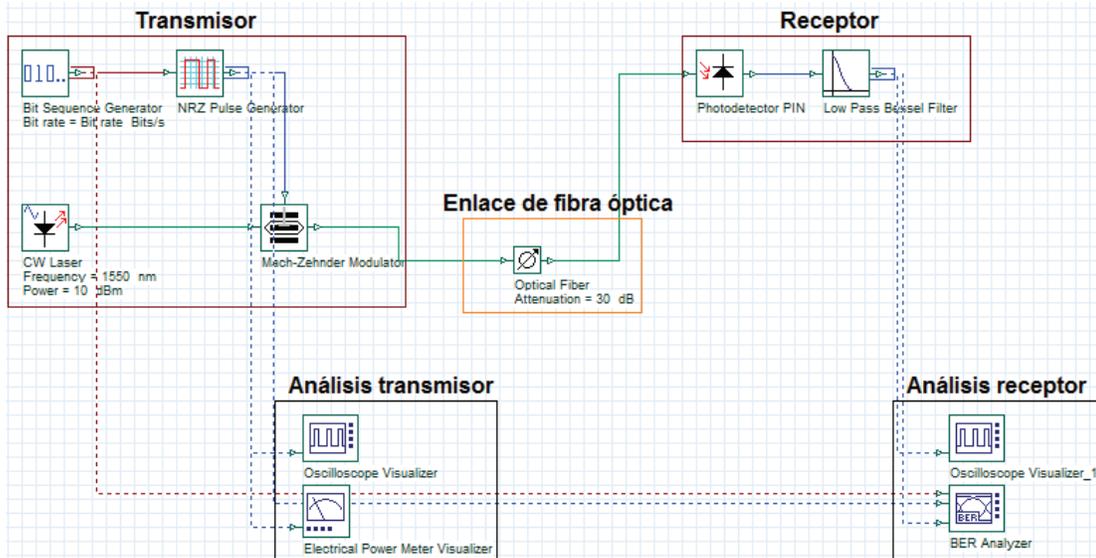


Figura 4.5 Esquema de un sistema óptico con detector PIN

El diagrama del ojo para este escenario, mostrado en la *Figura 4.6*, presenta una buena apertura de ojo, la parte superior representa la presencia de ruido en el sistema, el cual es de 2 [μ .u], esto quiere decir que existe ruido y distorsión en el enlace, sin embargo al ser un sistema de comunicaciones digital, la recepción solo requiere que se detecten los pulsos de unos y ceros lógicos, sin la necesidad de una recuperación exacta a la señal enviada, adicionalmente, el BER es de 1.86×10^{-28} , el cual determina que el enlace opera en buenas condiciones.

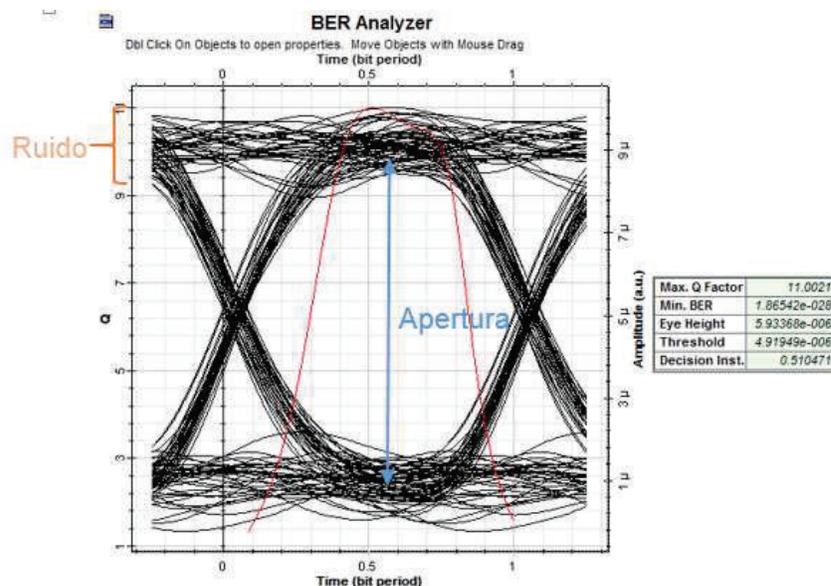


Figura 4.6 Diagrama del ojo del detector PIN

4.2.3.2 Escenario para el análisis de un fotodetector APD

Bajo las mismas condiciones del escenario anterior, se presenta el esquema para un sistema de comunicaciones ópticas con fotodetector APD. Al igual que el detector PIN, *OptiSystem* presenta un bloque exclusivo llamado *photodetector APD*, el cual permite modificar los parámetros de ganancia por el efecto de avalancha, responsividad y corriente de oscuridad.

Para esta práctica se utiliza una ganancia de 10 [dB] y los valores predeterminados de responsividad y corriente de oscuridad. La *Figura 4.7* muestra el esquema de un sistema de transmisión óptica con detector APD.

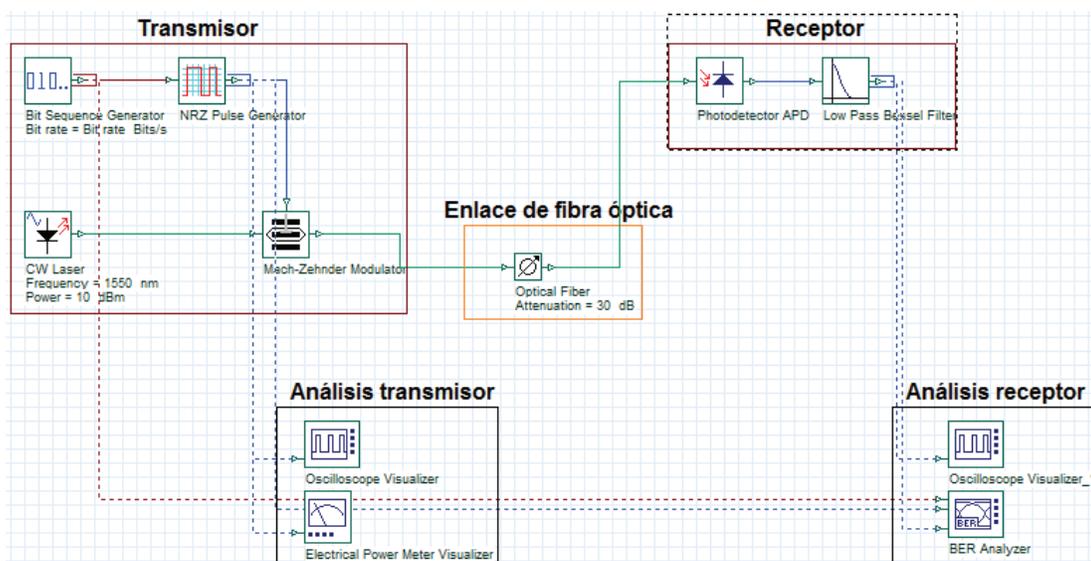


Figura 4.7 Esquema de un sistema óptico con detecto APD

El diagrama del ojo para el segundo escenario se muestra en la *Figura 4.8*, éste presenta una buena apertura de ojo mayor al diagrama del detector PIN, y la parte superior que representa el ruido es menor y no ingresa al centro del ojo por lo que no afecta a la recepción de información. Adicionalmente, el BER es de 1.88×10^{-288} el cual determina que el enlace opera en excelentes condiciones.

A diferencia del esquema con detector PIN, el detector APD amplifica la señal por su efecto avalancha, es por esto que los niveles de amplitud en el diagrama del ojo del segundo escenario alcanzan los 100 [$\mu\text{a.u}$] que es 10 veces más de los valores alcanzados con el detector PIN.

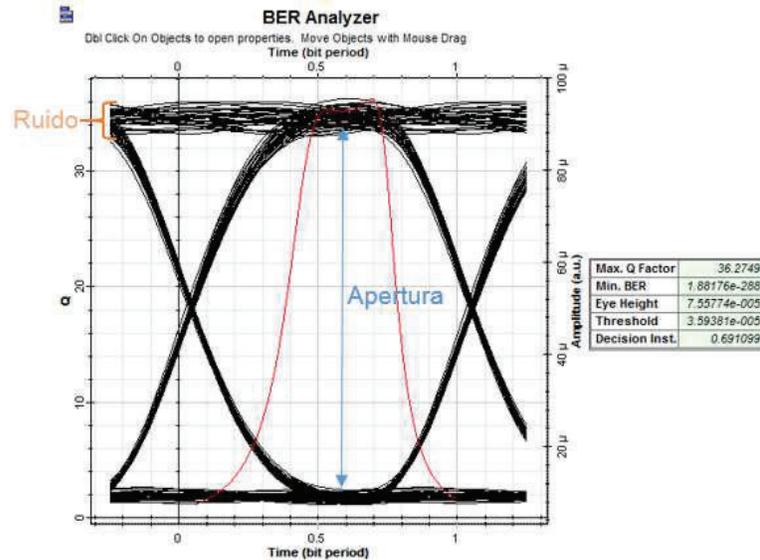


Figura 4.8 Diagrama del ojo del detector APD

4.2.3.3 Análisis de resultados

La *Tabla 4.2* presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada escenario, lo que demuestra que el detector APD presenta mejores resultados. En ambos escenarios, los receptores recibieron la misma potencia óptica; sin embargo, los resultados a la salida del receptor fueron diferentes, obteniendo una potencia eléctrica mayor con el detector APD; esto se debe a su efecto avalancha, ya que amplifica la señal en el proceso de detección.

Además, el BER en los detectores APD es casi despreciable, por lo que el enlace del segundo escenario presentó una recepción sin errores. Cabe recalcar que, el enlace con detector PIN también presentó un BER menor al recomendado, por lo que la recepción tampoco tuvo errores.

Parámetro	Detector PIN	Detector APD
Potencia óptica (Pin)	-23.12 [dBm]	-23.12 [dBm]
Potencia eléctrica (Pout)	-74.27 [dBm]	-54.27 [dBm]
BER	1.86×10^{-28}	1.88×10^{-288}

Tabla 4.2 Detector PIN vs Detector APD

Para poder distinguir el comportamiento de los fotodetectores, se realiza una modificación en ambos escenarios aumentando la longitud del enlace de fibra óptica de 60 [km] a 80 [km]. Este aumento en el trayecto de la señal hace que se atenúe por lo que la señal llega con -33.12 [dBm].

La *Figura 4.9* muestra la señal que va a viajar por el enlace. La *Figura 4.10* muestra la señal recibida por el detector PIN, como se puede observar que el detector no pudo distinguir entre la señal y el ruido, además el enlace presentó un BER igual a 1 lo que significa que todos los bits están errados.

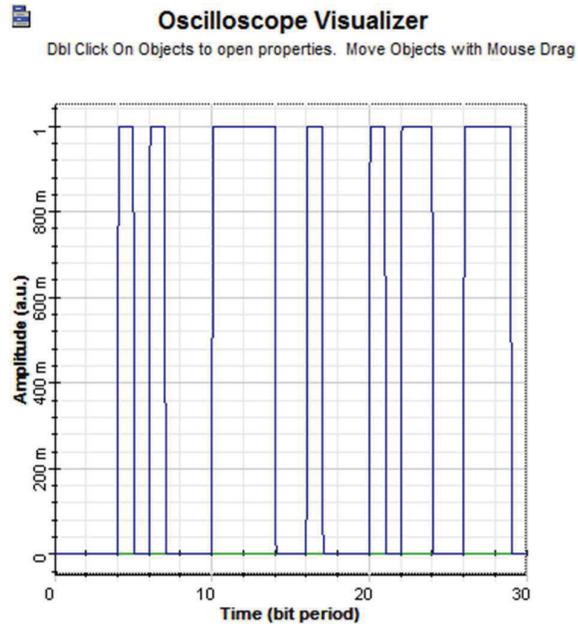


Figura 4.9 Señal eléctrica a transmitirse

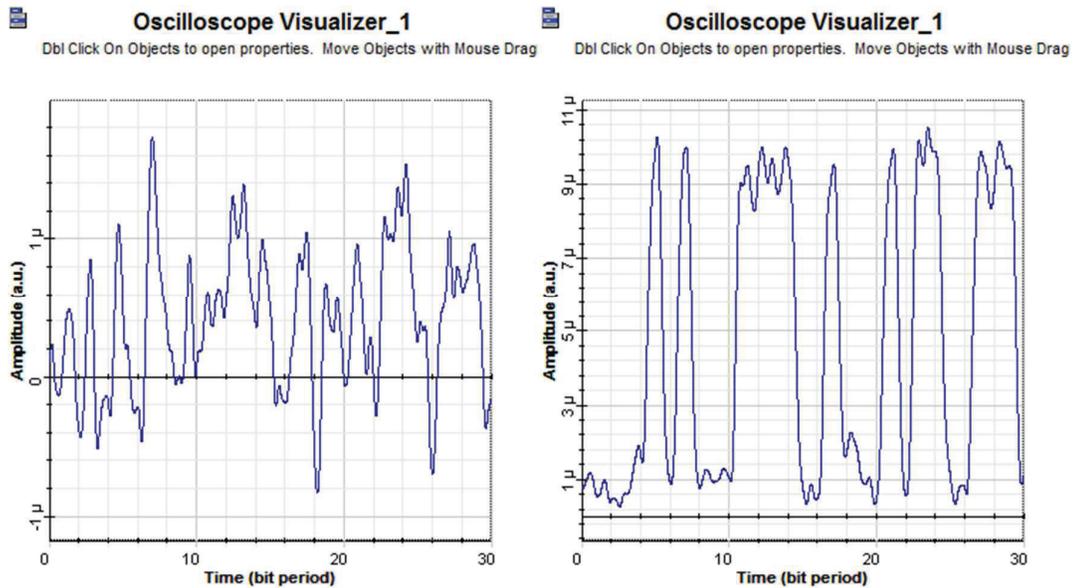


Figura 4.10 Señal a la salida del detector PIN

Figura 4.11 Señal a la salida del detector APD

La *Figura 4.11* muestra la señal recibida por el detector APD, la señal se encuentra atenuada sin embargo, el detector pudo distinguir entre la potencia de la señal y del ruido, además el enlace presentó un BER igual a 9.93×10^{-16} , este valor del BER es menor al recomendado por lo que el enlace funciona óptimamente.

4.2.3.4 Aplicaciones de la práctica

Esta práctica permite determinar el comportamiento de los detectores PIN y APD a una velocidad de transmisión específica, de esta manera se puede determinar en qué escenarios utilizar detectores PIN o detectores APD.

Los detectores APD son más utilizados en aplicaciones de alta velocidad como enlaces ópticos de *carries* principales y cables submarinos por su efecto en avalancha y por su alta responsividad, mientras que los detectores PIN son comúnmente usados en enlaces punto a punto o en enlaces FTTH (*Fiber To The Home*).

Es de mucha utilidad realizar la simulación de un detector óptico para analizar su comportamiento ante efectos ajenos a él, como es la atenuación del enlace y la distorsión de la señal, presentes en cualquier enlace óptico el cual afecta más a los detectores PIN que a los APD. Además, es importante realizar la simulación de los enlaces para conocer los límites del detector y no causar daños físicos en el momento de la implementación.

4.2.3.5 Posibles variaciones de la práctica

- Los escenarios se pueden modificar reemplazando las fuentes láser por fuentes led, y las fibras monomodo por fibras multimodo. Esto permitiría analizar el comportamiento de los fotodetectores ante una menor potencia de señal y una anchura espectral mayor.
- Se puede modificar la velocidad del enlace para determinar el comportamiento de los fotodetectores en aplicaciones de alta y baja velocidad, y realizar una comparación costo-beneficio para la implementación.

4.2.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Un fotodetector es un dispositivo capaz de convertir un flujo de luz en corriente eléctrica al entregar su energía a electrones en su estructura.
- La composición de un fotodetector se basa en la de un diodo, es decir, están formados por capas p y capas n, adicionalmente, presenta un material intrínseco puesto entre las dos capas de portadores para la detección de luz.
- Los detectores PIN presentan un tiempo de respuesta mayor que los detectores APD, debido al tránsito de los portadores en la zona de unión, mientras que en los detectores APD, este viaje es más rápido por el dopaje del material intrínseco.
- Cuando los detectores PIN no pueden distinguir la señal del ruido es porque la señal se atenuó demasiado, por lo que se requieren de un circuito de amplificación de señal.
- Los detectores APD actúan como amplificadores debido al efecto avalancha, por lo que pueden recibir señal en trayectos más largos sin necesidad de un circuito amplificador.
- Los detectores APD son más eficientes que los detectores PIN, pueden ser usados en sistemas de alta velocidad por su corto tiempo de respuesta y su alta responsividad.
- Sin embargo, los detectores PIN son los más utilizados en los sistemas de comunicaciones, debido a que su diseño no es tan complejo como los detectores APD y además son menos costosos.

4.3 PRÁCTICA 10: PERFORMANCE DE UN RECEPTOR

4.3.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Realizar el esquema básico de un receptor óptico mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Comprender los parámetros que determinan el rendimiento óptimo de un receptor óptico.
- Determinar los límites de operación de un receptor óptico para lograr una recepción óptima.
- Variar los parámetros del receptor óptico y comparar los resultados del diagrama del ojo.

4.3.2 MARCO TEÓRICO [4][9][15][18]

La composición de los receptores ópticos puede ser tan simple que incluya únicamente el detector óptico, o tan complejo que requiera de componentes adicionales como amplificadores, demultiplexores, demoduladores, filtros pasa bajos, ecualizadores, entre otros.

La función principal del receptor es convertir la señal óptica recibida por la fibra en una señal eléctrica para los siguientes componentes del sistema. En comunicaciones, los sistemas pueden ser analógicos o digitales, dependiendo del tipo de sistema el factor que determina la calidad del mismo es la relación señal a ruido ($\frac{S}{N}$) en sistemas analógicos y el BER en sistemas digitales.

En sistemas analógicos, un enlace se considera óptimo si su relación señal a ruido es igual o mayor a 30 [dB]. Por otro lado, en sistemas digitales un enlace es considerado óptimo si el BER es igual o menor a 10^{-9} . El BER depende de la potencia recibida en el receptor y de la sensibilidad del mismo.

Los receptores ópticos dependen de ciertos parámetros para determinar su performance, en su mayoría estos parámetros hacen referencia al detector óptico por lo que se considera el componente importante del receptor.

A continuación se detalla los factores que determinan el rendimiento de un receptor óptico:

- **Sensibilidad radiante o responsividad:** Es la relación entre la corriente eléctrica de salida y la potencia óptica de entrada al receptor. La sensibilidad mide la respuesta de un receptor ante una señal de luz. Esta depende de la potencia y del ruido presente en el sistema; en sistemas analógicos se debe considerar la relación señal a ruido mientras que en sistemas digitales, el factor determinante es el BER.

Este parámetro depende de la longitud de onda de operación y del componente de construcción del detector, la *Figura 4.12* muestra las curvas características de los 3 materiales más utilizados para la construcción de detectores y su variación con respecto a la longitud de onda

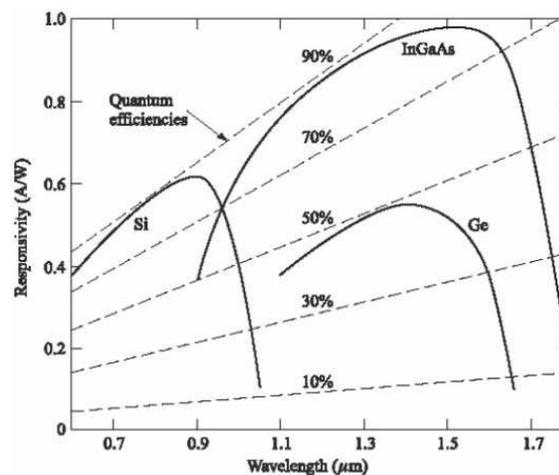


Figura 4.12 Responsividad vs. Longitud de onda [9]

- **Corriente de oscuridad:** es producida internamente en el detector por los electrones en ausencia de luz por efectos térmicos, esta corriente determina el mínimo nivel de señal detectable, es decir, para que una señal sea detectada debe producir una corriente mayor a la corriente de oscuridad.
- **Potencia de ruido equivalente (NEP):** determina de manera más directa el nivel mínimo de señal detectable. La potencia de ruido equivalente es un parámetro dado por el fabricante y depende de la longitud de onda, del ancho de banda y de la temperatura. Este parámetro determina la potencia requerida para generar una corriente igual a la corriente de oscuridad. La *Tabla 4.3* muestra los valores teóricos para los diferentes fotodetectores.

Detector	Responsividad	NEP (W/Hz ^{1/2})	Tiempo de respuesta	Corriente de Oscuridad
Fototransistor	18 A/W	N.A	5-15 us	25-100 nA
Fotodiodo P-N	04-07 A/W	10 ⁻¹³ -10 ⁻¹⁴	5-10 us	1-5 nA
Fotodiodo PIN (Si)	06-08 A/W	10 ⁻¹³ -10 ⁻¹⁴	1-5 ns	3-300 nA
Fotodiodo PIN (InGaAs)	08 A/W	10 ⁻¹³ -10 ⁻¹⁴	1-3 ns	10-30 nA
Fotodiodo Avalancha (Si)	74-100 A/W	10 ⁻¹⁴	0.5-2 us	1 nA

Tabla 4.3 Parámetros de los diferentes tipos de detectores [12]

- **Velocidad y ancho de banda:** al igual que en las fuentes ópticas la velocidad y el ancho de banda del sistema están relacionados con los tiempos de respuesta de los detectores al estímulo de una señal óptica. Los detectores APD tienen tiempos de respuesta menores que los detectores PIN, por lo que pueden alcanzar velocidades de transmisión mayores.
- **Rango dinámico:** determina el rango de potencia de entrada para que un detector pueda producir una señal de corriente a la salida. Al cumplir con el mínimo de este parámetro se garantiza el BER mientras que al cumplir un máximo se garantiza que no se produzca distorsión. Si la potencia de entrada supera el rango dinámico, el receptor se sobrecarga y el BER comienza a aumentar produciendo errores considerables en la recepción.
- **Sensibilidad:** es la mínima potencia requerida para la operación del receptor óptico, es decir, es el límite inferior del rango dinámico. La sensibilidad es dependiente de la longitud de onda y del material utilizado para la construcción del detector.

Receptor	Sensibilidad [dBm]	Velocidad Transmisión [Mbps]	Longitud de onda
PIN	-34	34	1-2 ventana
PIN-FET	-47	34	2-3 ventana
APD	-50	34	2-3 ventana

Tabla 4.4 Sensibilidad de los diferentes tipos de detectores [2]

- **Tipos de codificación y modulación:** dependiendo del código o de la técnica de modulación, la estructura del receptor puede ser más compleja, como por ejemplo, para una señal RZ se requiere de un circuito de sincronismo para pulsos menores.

Para que un detector opere óptimamente, la mayor parte de la señal de luz debe entrar en el área sensitiva del detector, para lo cual se requiere que esta área sea mayor al diámetro núcleo de la fibra óptica.

La estructura de un receptor óptico dependerá de la aplicación para la cual se utiliza. Sus funciones básicas incluyen la detección, amplificación y demodulación. La *Figura 4.13* muestra la estructura para un receptor con detección directa.

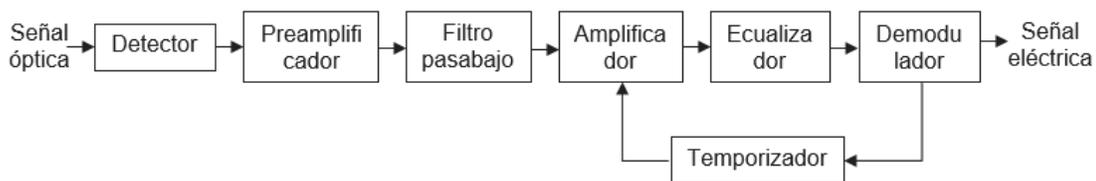


Figura 4.13 Estructura de un receptor óptico para una señal digital [17][18]

- **Detector:** es el encargado de la conversión de la señal óptica que llega al receptor en señal eléctrica.
- **Preamplificador:** comúnmente de bajo ruido, trabaja con señales débiles. Es el responsable de amplificar la señal eléctrica que entrega por el detector, con el fin de tener un nivel adecuado en el dispositivo terminal.
- **Filtro:** su función es ayudar a incrementar la relación S/N atenuando el ruido de manera selectiva, además, puede eliminar frecuencias no deseadas cercanas a un canal.
- **Amplificador:** es la segunda etapa de amplificación, en la cual, el amplificador presenta una alta ganancia y puede incluir control automático.
- **Ecuador:** en muchos casos se utiliza una etapa de ecualización, debido a que la detección y amplificación distorsionan la señal recibida.
- **Demodulador:** permite reproducir la señal eléctrica original. Dependiendo del tipo de sistema, sea analógico o digital, la etapa de demodulación requerirá elementos de precisión (analógica) o un circuito de toma de decisión que determine la presencia o ausencia de pulso (digital).

- **Temporizador:** su función es recrear la señal de reloj, extrayéndola de la señal recibida, definiendo con precisión los instantes de tiempo en que empieza y termina un pulso.

Para esta estructura, el parámetro que limita la sensibilidad del detector es el ruido térmico, y la potencia de señal que ingresa al receptor. Se presentan dos posibles soluciones para reducir el efecto del ruido térmico y garantizar el nivel de potencia óptica recibida.

La primera solución es cambiar el detector PIN por un detector APD, que tiene mejores tiempos de respuesta, sin embargo, es más ruidoso que el detector PIN debido a su efecto avalancha. También, se debe tener en consideración los costos de inversión ya que los detectores APD son más costoso. La segunda opción es el uso de un preamplificador antes del receptor para amplificar la señal a niveles adecuados para su recepción.

4.3.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar tres escenarios en *OptiSystem* para analizar el comportamiento de los receptores ante las diferentes condiciones del enlace.

- El primer escenario debe permitir el análisis de un receptor óptico con fotodetector PIN, para determinar los límites de operación. En este escenario se debe realizar el análisis del diagrama del ojo y del BER para determinar si el enlace es óptimo.
- Se propone variar la distancia del enlace de fibra con el fin de analizar los cambios en el diagrama del ojo y en la señal recibida por el detector mediante el uso de un osciloscopio.
- El segundo escenario se presenta como una solución a la limitante que presenta el primer escenario por la distancia. En este escenario se hace uso de un preamplificador y se debe realizar el análisis del diagrama del ojo y de la señal recibida por el detector.
- El tercer escenario presenta una segunda solución a la limitante del primero mediante el uso de fotodetectores APD. En este escenario se debe analizar el diagrama del ojo y la señal recibida por el detector.

4.3.3.1 Escenario con fotodetector PIN

La *Figura 4.14* presenta el esquema para un receptor que utiliza fotodetector PIN, con los siguientes parámetros basados en la *Tabla 4.3* y *Tabla 4.4*:

Parámetro	Valor
Responsividad	0.8 [A/W]
Corriente de oscuridad	300 [nA]
Sensibilidad	-30 [dBm]

Tabla 4.5 Parámetros del detector PIN

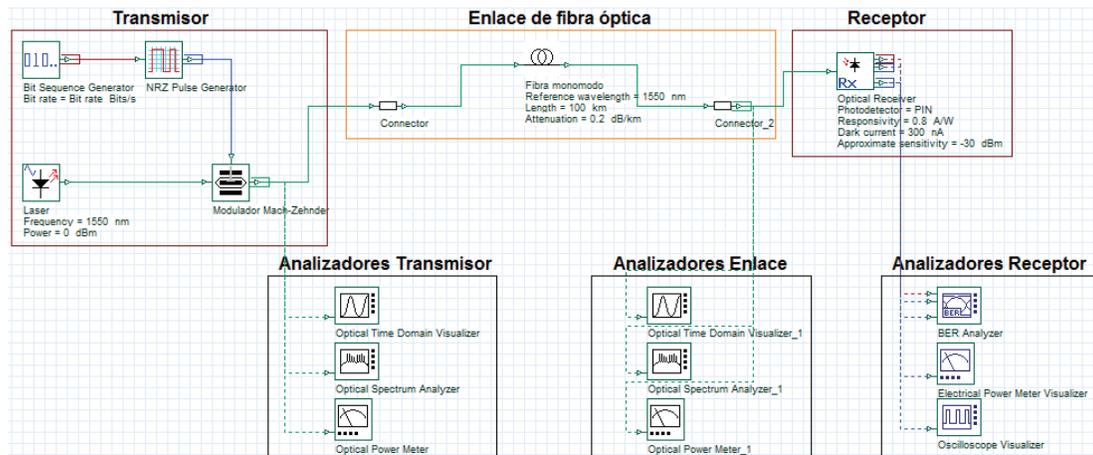


Figura 4.14 Esquema de un enlace óptico con receptor PIN

El sistema consta de un transmisor con fuente láser operando a una longitud de onda de 1550 [nm] y una potencia de 0 [dBm], además utiliza un modulador externo para minimizar los efectos de distorsión producidos por la propia fuente. La señal viaja a través de una fibra óptica monomodo de 0.2 [dB/km] de atenuación y 100 [km] de longitud.



Figura 4.15 Medidores de potencia óptica

La *Figura 4.15* muestra que la señal al viajar a través de la fibra óptica se atenúa alrededor de 20 [dB], sin embargo, al llegar con una potencia de -24.722 [dBm] el receptor puede recibir sin problema la información ya que está dentro de su rango dinámico y sobrepasa la sensibilidad.

El diagrama del ojo para estas condiciones, mostrado en la *Figura 4.16*, presenta una buena apertura de ojo, la parte superior indica la presencia de ruido, pero es mínima y no ingresa al centro del ojo, lo que demuestra que el enlace no tiene interferencia intersímbolo, no tiene distorsión y el ruido no afecta a la recepción.

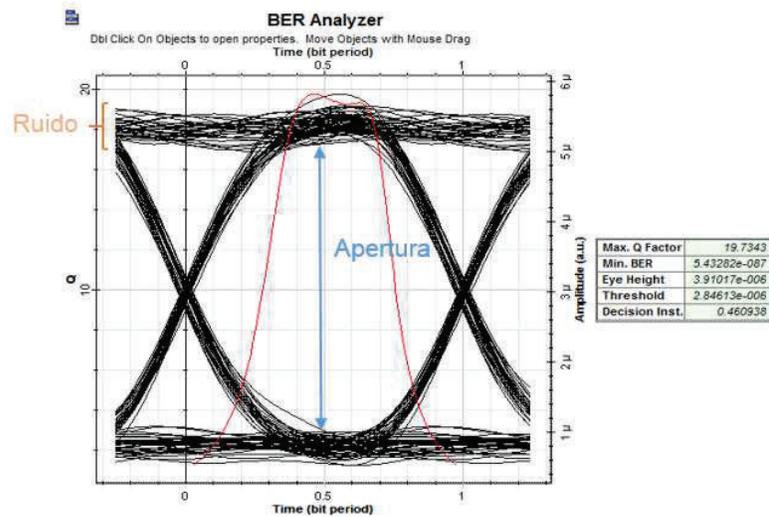


Figura 4.16 Diagrama del ojo y BER de un enlace óptico con receptor PIN

Este esquema tiene una limitante, ya que al aumentar la distancia del enlace de fibra óptica de 100 [km] a 150 [km], los resultados cambian totalmente, la potencia con la que la señal llega al receptor es de -34 [dBm] y no supera la sensibilidad del mismo, por lo que el detector únicamente recibe ruido.

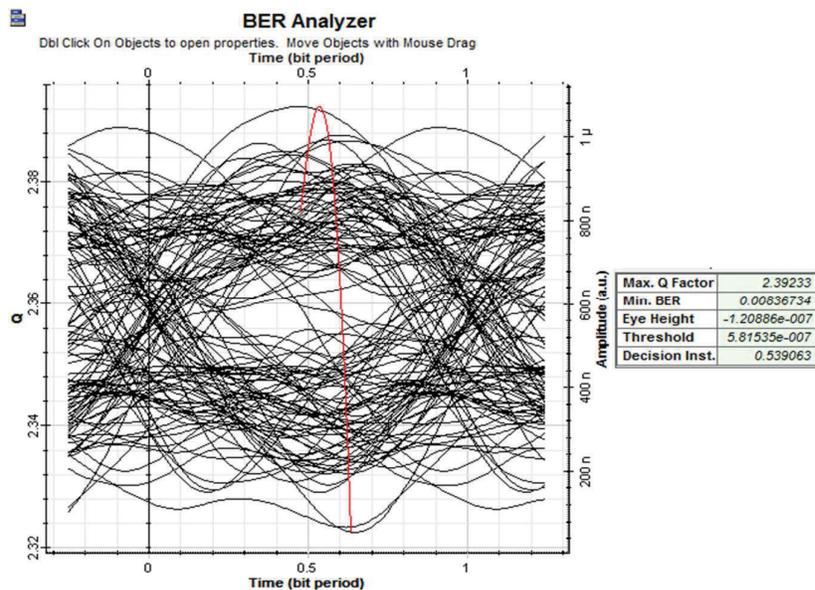


Figura 4.17 Diagrama del ojo y BER de un enlace óptico con ruido

El diagrama del ojo se cierra totalmente demostrando que no se está recibiendo señal con información y que el ruido está limitando el enlace. En estas condiciones el BER mostrado es de 8×10^{-3} , superior al BER recomendado, lo cual determina que el sistema tiene demasiados errores en la transmisión y recepción de información. La *Figura 4.17* muestra el diagrama del ojo para las condiciones antes descritas.

4.3.3.2 Escenario con preamplificador

Debido a que los detectores PIN se ven afectados por el ruido térmico, se plantea un segundo escenario para dar solución a este problema. En este escenario se utiliza un preamplificador para que la señal llegue con la potencia necesaria y el receptor pueda detectarlo.

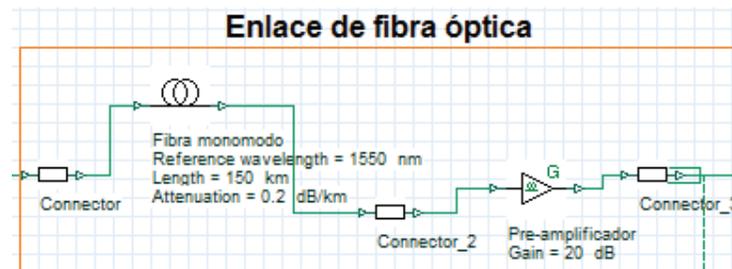


Figura 4.18 Preamplificador en el enlace óptico

El amplificador mostrado en la *Figura 4.18* tiene una ganancia de 20 [dB], lo que permite que la potencia se eleve hasta -15.52 [dBm], suficiente para sobrepasar la sensibilidad del receptor. En estas condiciones, el enlace mejora permitiendo tener un BER de 3.46×10^{-42} .

La *Figura 4.19* muestra el diagrama del ojo para este escenario, la apertura del ojo es lo suficientemente amplia para poder tener una recepción óptima; sin embargo, hay que tomar en cuenta que el ruido del sistema presentado en la parte superior del diagrama ocupa más espacio e ingresa en el centro del ojo aunque es en mínimas cantidades. Esta solución corrige la deficiencia de los detectores PIN ante la presencia de ruido térmico y permite un enlace óptimo, sin embargo, existen un tercer escenario que permite que el enlace opere en mejores condiciones sin uso de preamplificador.

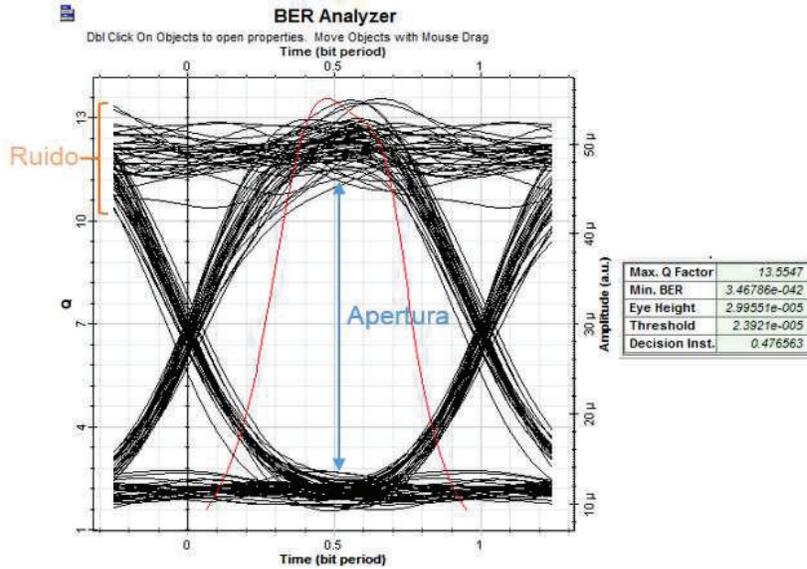


Figura 4.19 Diagrama del ojo para enlace con preamplificador

4.3.3.3 Escenario con fotodetector APD

Este escenario, mostrado en la *Figura 4.20*, utiliza un detector APD con una ganancia de 10 [dB] y con los parámetros de acuerdo a la *Tabla 4.3* y *Tabla 4.4*:

Parámetro	Valor
Responsividad	100 [A/W]
Corriente de oscuridad	1 [nA]
Sensibilidad	-50 [dBm]

Tabla 4.6 Parámetros del detector APD

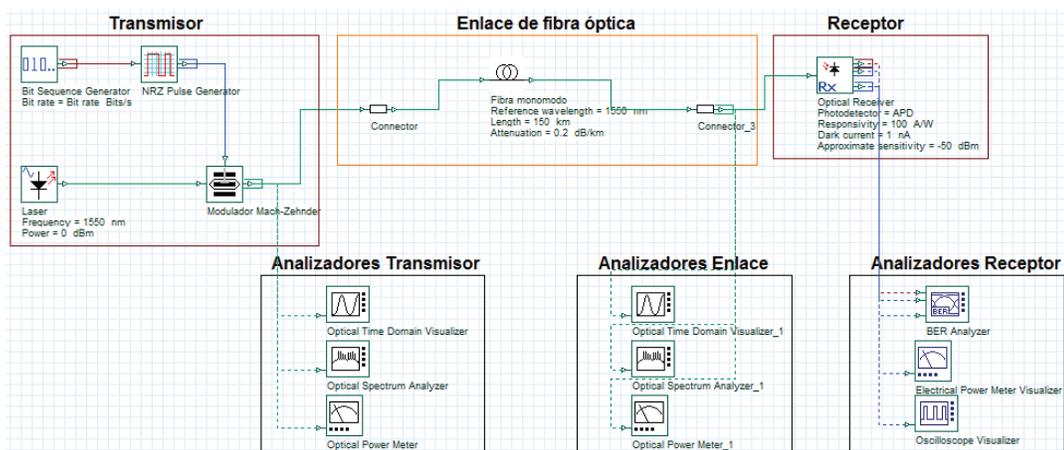


Figura 4.20 Esquema de un enlace óptico con receptor APD

Al utilizar un detector APD, la sensibilidad del receptor disminuye a -50 [dBm], y debido a que la potencia a la entrada del receptor es de -34.72 [dBm], el receptor

puede detectar la señal de información sin inconvenientes. Cabe recalcar que el ruido sigue presente al igual que en el enlace con detector PIN, pero el efecto avalancha del detector APD permite que la señal internamente se amplifique y pueda ser detectada para la recepción.

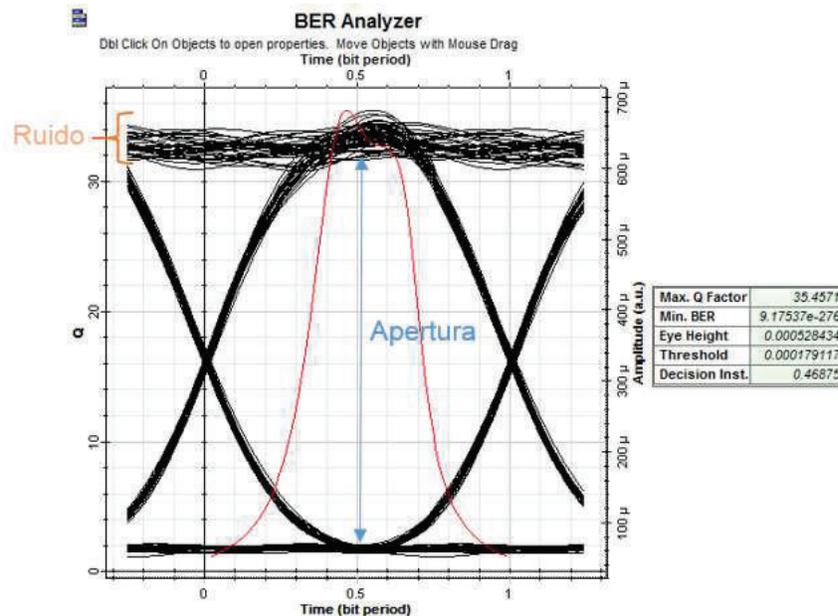


Figura 4.21 Diagrama del ojo para enlace con receptor APD

El enlace opera de manera más eficiente alcanzando un BER de 9.17×10^{-276} , la Figura 4.21 muestra el diagrama del ojo para este escenario, como se puede observar el ojo está completamente abierto y la presencia de ruido en la parte superior es mínima, por lo que no afecta en el rendimiento del enlace.

4.3.3.4 Análisis de resultados

El primer escenario demostró que el receptor compuesto por un detector PIN, requiere de mayor potencia de señal a su entrada para ser detectado, además el ruido térmico es un factor limitante en el diseño de enlaces con detectores PIN.

Este escenario funcionó hasta los 100 [km] de distancia, pero al aumentar el trayecto del enlace de datos, el sistema empezó a degradarse, por lo que a los 150 [km], el receptor ya sólo recibió ruido, esto se debe a que la señal se atenuó demasiado alcanzando niveles menores que la sensibilidad del receptor.

Por tal razón se propuso la primera solución a base de un preamplificador, el cual mejoró las condiciones del enlace permitiendo a la señal alcanzar un nivel

superior de potencia que el de la sensibilidad del receptor, sin embargo, hay que considerar que los amplificadores no discriminan entre señal de información y señal de ruido por lo que ambas señales se amplifican, es por esto que en el diagrama del ojo de la *Figura 4.19* se muestra una presencia mayor de ruido que en el diagrama anterior del receptor con detector PIN a los 100 [km].

Para dar solución al problema del ruido sin preamplificador, se propuso un enlace con detector APD. En estas condiciones se obtuvo mejores resultados sin elementos adicionales ya que el detector APD actúa como amplificador.

	Detector PIN	Preamplificador	Detector APD
BER	0.008	3.46×10^{-42}	9.17×10^{-276}
Anchura del ojo	-1.200×10^{-07}	2.995×10^{-05}	5.284×10^{-04}
Potencia Señal	- 34.72 [dBm]	-15.52 [dBm]	- 34.72 [dBm]

Tabla 4.7 Comparación de resultados para un enlace de 150 [km]

La *Tabla 4.7* presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada escenario, lo que demuestra que el de mejor resultado es el tercer escenario con detector APD. Al receptor del tercer escenario le ingresó el mismo nivel de potencia que el receptor con detector PIN, la diferencia radica en su sensibilidad, ya que el detector APD tiene una sensibilidad menor que la del detector PIN.

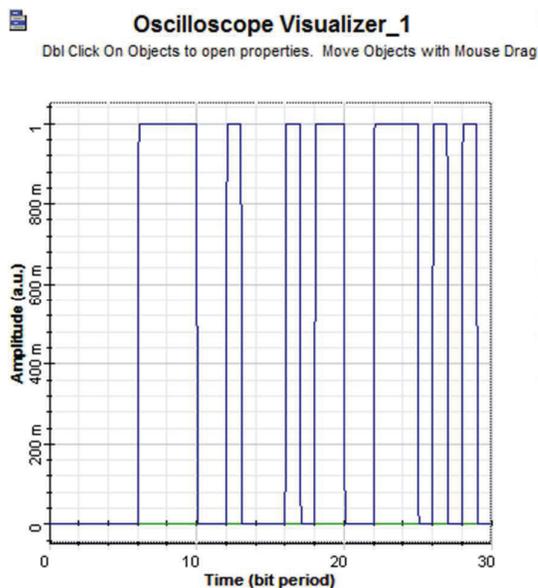


Figura 4.22 Señal eléctrica a transmitirse

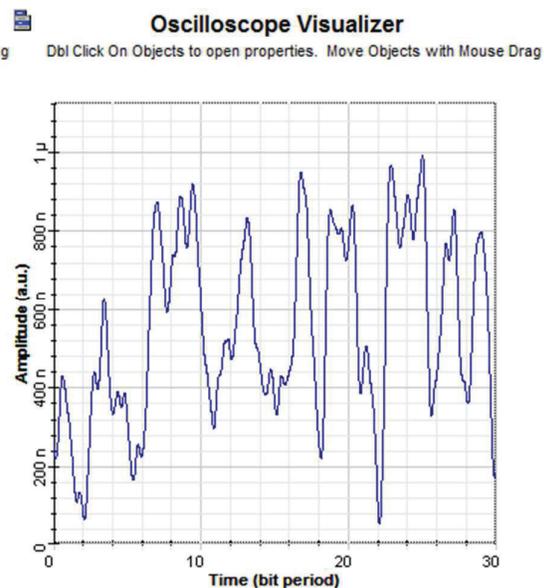


Figura 4.23 Recepción con detector PIN

Las figuras mostradas anteriormente, presentan la señal que se envía por el enlace de 150 [km] (*Figura 4.22*) y la señal recibida en cada uno de los escenarios, con el fin de observar las diferencias en la calidad de recepción. El primer escenario, en el cual sólo se utiliza el detector PIN (*Figura 4.23*) se puede observar que el receptor únicamente recibe ruido, mientras que en el segundo escenario con preamplificación (*Figura 4.24*) la recepción mejora.

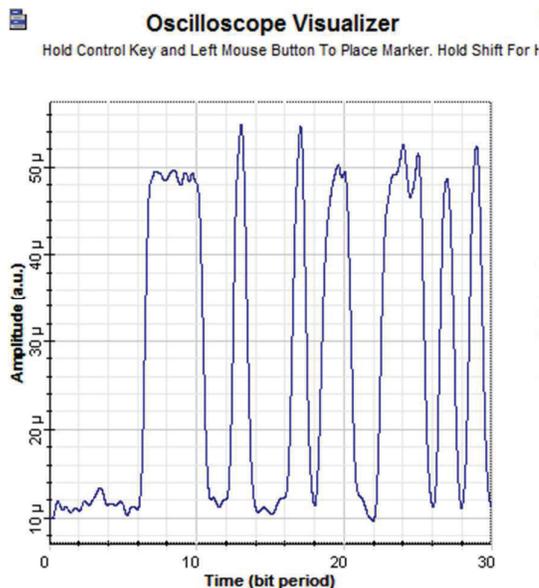


Figura 4.24 Recepción con preamplificador

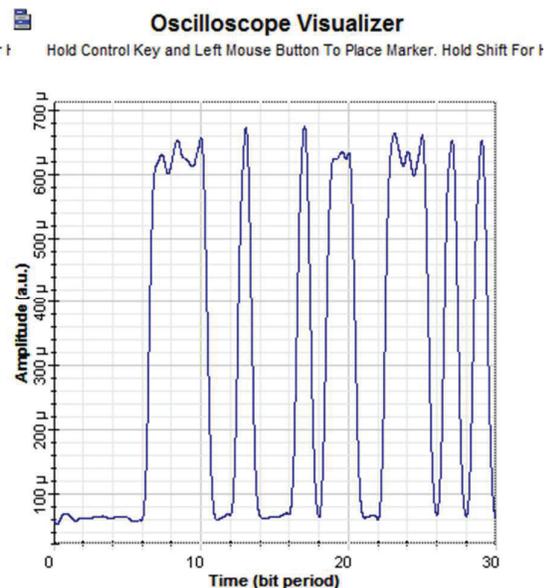


Figura 4.25 Recepción con APD

Sin embargo el nivel de amplitud es menor que el último escenario con detector APD (*Figura 4.25*), en donde el receptor detecta claramente los bits transmitidos y por el efecto avalancha la señal tiene un nivel de amplitud mayor.

4.3.3.5 Aplicaciones de la práctica

Esta práctica permite determinar los parámetros que afectan el rendimiento del receptor como es la potencia de entrada, la atenuación, la distorsión y la distancia del enlace. De esta manera se puede dimensionar las características que se requieren para la adquisición de los componentes del receptor óptico.

Además, es muy útil realizar la simulación de un receptor óptico para analizar su comportamiento en situaciones críticas y así saber cómo manejarlas para optimizar el enlace, por ejemplo, si a la salida del receptor se obtiene un diagrama del ojo muy cerrado y un BER alto, quiere decir que no se tiene una recepción

adecuada y que se está recibiendo solo ruido, por lo que se debería considerar un rediseño del enlace cambiando el detector o utilizando preamplificadores.

4.3.3.6 Posibles variaciones de la práctica

- Los escenarios se pueden modificar reemplazando las fuentes láser por fuentes led, y las fibras monomodo por fibras multimodo. De esta manera se analizaría la variación en el rendimiento de los receptores debido al uso de una fuente menos directiva y de una fibra con dispersión modal.
- Se puede modificar el escenario de preamplificadores reubicando al amplificador en la mitad del enlace y analizando los resultados obtenidos en el receptor. Para este escenario, requerirá de un análisis de presupuesto de potencia y de la relación señal a ruido óptica (OSRN) para determinar los parámetros del preamplificador.

4.3.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El desempeño del receptor depende en un alto porcentaje del detector, puesto que los parámetros como la corriente de oscuridad, el ruido y la responsividad están en relación directa con el funcionamiento del mismo.
- Los receptores requieren de una potencia óptica adecuada para poder realizar la conversión opto-eléctrica, esta potencia debe superar la sensibilidad del receptor para que pueda operar.
- Los receptores con detector PIN por si solos tienen una limitante debido al ruido térmico, si la señal viaja por un tramo de fibra óptica demasiado largo, ésta se atenúa y no podrá ser detectada por el receptor.
- El uso de preamplificadores es una solución para los detectores PIN, sin embargo se debe tomar en cuenta que no solo se amplifica la señal sino también el ruido.
- A pesar de que los resultados del receptor con detector APD son mejores, se debe realizar el análisis de costo-beneficio, ya que los detectores APD son mucho más costosos que los detectores PIN y dependerá de la aplicación y de la inversión que se pueda hacer para el enlace.
- El diagrama del ojo determina si el sistema presenta interferencia intersímbolo, efectos del ruido, jitter o distorsión de señal. Lo que permite modificar los parámetros necesarios para optimizar el sistema.

4.4 PRÁCTICA 11: DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

4.4.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Diseñar un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Realizar el análisis del presupuesto de potencia del sistema y balances de tiempos para cumplir con las condiciones de diseño.
- Determinar los parámetros técnicos necesarios para obtener un sistema de comunicaciones ópticas operando en óptimas condiciones.
- Variar los parámetros del sistema y analizar los resultados obtenidos.

4.4.2 MARCO TEÓRICO [5][10][16][20][21][23]

Una vez estudiado y comprendido los parámetros y funcionamiento de cada uno de los componentes principales de un sistema de comunicaciones ópticas; el diseño es la integración con el fin de obtener enlaces óptimos.

El diseño de un sistema de comunicaciones ópticas está basado en el presupuesto de potencia y el balance de tiempos, los cuales deben cumplirse para obtener un sistema de comunicaciones ópticas operando en óptimas condiciones, cumpliendo los parámetros de calidad. La muestra el diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto.

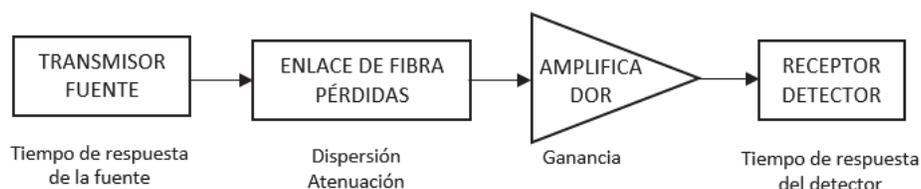


Figura 4.26 Diagrama de bloques de un enlace óptico punto a punto

4.4.2.1 Capacidad de transmisión

La capacidad de transmisión hace referencia al ancho de banda (analógico) o velocidad de transmisión (digital), la cual depende de los siguientes factores:

- Número de longitudes de onda transmitidas.
- Tiempos de subida del transmisor y receptor.
- Dispersión de la fibra óptica.

Para que un sistema funcione correctamente a la capacidad que se requiera, el tiempo de respuesta total Δt debe ser menor al tiempo de bit, siendo el tiempo de respuesta total la sumatoria de los cuadrados de los tiempos de respuesta [18].

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{tx}^2 + \Delta t_{rx}^2 + \Delta t_{fo}^2} \quad (\text{ec 4.4})$$

Los tiempos de respuesta de los transmisores y los receptores ópticos vienen especificados en el *datasheet* de cada componente. Sin embargo, para la fibra óptica el tiempo de respuesta Δt_{fo} depende de la dispersión total. La (ec 4.5) determina el tiempo de respuesta total de la fibra óptica [18]:

$$\Delta t_{fo} = \tau = \sqrt{\tau_{modal}^2 + \tau_{cromática}^2 + \tau_{polarización}^2} \quad (\text{ec 4.5})$$

Es importante recordar que la capacidad del sistema está limitado por la dispersión total en la fibra óptica y afecta inversamente al ancho de banda.

4.4.2.2 Presupuesto de potencia

Es importante conocer los rangos de operación del receptor óptico para determinar la cantidad de potencia mínima requerida para operar y la cantidad máxima de potencia que requiere para no sobrecargarse causando distorsión e incluso daños físicos al receptor.

El presupuesto de potencia o balance de potencia, garantiza que el nivel de potencia óptica que ingresa al receptor, sea mayor al nivel de sensibilidad del mismo. Es recomendable considerar un margen de seguridad adicional a los requerimientos mínimos para compensar cualquier variación sea por el enlace mismo o por agentes externos como son: ruido, temperatura, cambios en el enlace, envejecimiento de los componentes, entre otros. El margen de seguridad en sus valores típicos se encuentra entre 3-12 [dB]. La (ec 4.6) presenta la expresión simplificada del presupuesto de potencia [18]:

$$P_{tx} - \alpha_{total} + G = \text{Sensibilidad}_{rx} + \text{Margen de seguridad} \quad (\text{ec 4.6})$$

- **Potencia del transmisor (P_{tx}):** dependerá del tipo de fuente que se utilice, como se ha explicado en prácticas anteriores, las fuentes láser emiten mayor potencia de luz que las fuentes led, debido a su directividad, a su emisión estimulada y a su efecto de amplificación.

- **Pérdidas totales (α_{total}):** es todo lo que genera disminución en la potencia emitida por el transmisor. Entre los factores más relevantes están [18]:

$$\alpha_{total} = \alpha_{tx-fo} + \alpha_{fo} + \alpha_{fo-rx} + \alpha_{conectores} \quad (\text{ec 4.7})$$

- α_{tx-fo} : pérdidas de acoplamiento de luz entre la fuente y la fibra, las cuales dependerán del tipo de fuente, el tipo de fibra óptica y sus características como apertura numérica y ángulo de aceptación.
 - α_{fo} : pérdidas propias de la fibra óptica presentes por la atenuación.
 - α_{fo-rx} : pérdidas del acople entre la fibra y el receptor, las cuales son mínimas debido a que la mayoría de detectores presentan una área sensitiva mayor que la mayoría de núcleos de fibra óptica.
 - $\alpha_{conectores}$: pérdidas por conectores, empalmes, fusiones, las cuales dependen de la cantidad de ellos presentes en el enlace.
- **Ganancia (G):** hace referencia al uso de amplificadores ópticos en el sistema. Los amplificadores pueden superar las pérdidas de potencia, sin embargo se debe considerar que no solo amplifican la potencia de la señal sino también la del ruido.
 - **Sensibilidad del receptor:** corresponde a un nivel de potencia inferior al definido por el rango dinámico, es decir, es la mínima cantidad de potencia de luz que el receptor requiere para detectar la señal. Es dependiente de la longitud de onda y del material utilizado para la construcción del detector.
 - **Margen de seguridad:** es el factor que se requiere para cubrir inexactitudes de cálculo, degradación de los componentes o alteraciones del medio. En sistemas ópticos, el margen de seguridad dependiendo de la aplicación está entre 3 a 10 [dB].

4.4.2.3 Calidad del sistema de comunicaciones ópticas

Tanto el presupuesto de potencia como el balance de tiempos tienen como función garantizar que la correcta operación del sistema bajo las circunstancias necesarias. Un factor importante para que los sistemas de comunicaciones operen de manera óptima es el nivel del BER en sistemas digitales y el nivel del S/N en sistemas analógicos. Para sistemas de comunicaciones ópticas, existe un

parámetro adicional que determina la calidad del sistema, este parámetro es la relación señal a ruido óptico (OSNR).

La OSNR es la relación entre la potencia óptica recibida y la potencia de ruido óptico. Es un parámetro que debe tenerse en consideración principalmente si el enlace requiere de amplificadores ópticos. La OSNR permite determinar la ubicación de los amplificadores y el valor de su ganancia. Al tener una potencia mayor a la entrada de cada amplificador, esto aumentará la OSNR, sin embargo, implicaría tener una mayor cantidad de amplificadores en el enlace óptico aumentando el costo de inversión. La (ec 4.8) determina la expresión para el cálculo de la OSNR [14].

$$OSNR = \frac{P_{in}}{NF \cdot h \cdot f \cdot \Delta f} \quad (ec\ 4.8)$$

Donde P_{in} es la potencia óptica de entrada al amplificador, NF la figura de ruido del amplificador, h es la constante de Planck igual a 6.62×10^{-34} , f es la frecuencia de operación del sistema y Δf es el ancho de banda para determinado NF . Para una longitud de onda de 1550 [nm], f es igual a 193 [THz] y Δf es igual a 0.1 [nm].

Al tener varios amplificadores en el enlace, la OSNR total viene determinada por la sumatoria inversa de la OSNR en cada segmento [14]:

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \dots + \frac{1}{OSNR_n} \quad (ec\ 4.9)$$

Para varios amplificadores en el enlace, los cuales compensen las pérdidas del segmento anterior (αL), la OSNR expresada en [dB] es igual a [14]:

$$OSNR_{dB} = 58_{dB} + P_{in_{dB}} - NF_{dB} - \alpha L_{dB} - 10 \log(N)_{dB} \quad (ec\ 4.10)$$

Los valores recomendados para OSNR se encuentran entre 11 [dB] y 18 [dB]. Sin embargo, el valor mínimo dependerá de la capacidad del sistema. La *Tabla 4.8* muestra los valores típicos de OSNR según la capacidad del sistema.

Capacidad del sistema	OSNR Típico
1 [Gbps]	12 [dB]
10 [Gbps]	15 [dB]
40 [Gbps]	17 [dB]
100 [Gbps]	21 [dB]

Tabla 4.8 Valores típicos de OSNR según la capacidad del sistema [24]

4.4.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone el diseño un enlace punto a punto que cumpla con las siguientes condiciones, los valores utilizados en esta práctica se encuentran en los *datasheet* de cada componente (Ver Anexo 4, 6 y 7):

- Capacidad del sistema: 1 [Gbps].
- Calidad del sistema: BER=10⁻⁹, OSNR: 12 [dB].
- Alcance del sistema: 200 [km].

La práctica presenta dos escenarios realizados en *OptiSystem* para determinar los parámetros requeridos para un diseño eficiente de un enlace de comunicaciones ópticas.

- Los escenarios presentan el cálculo del presupuesto de potencia y de balance de tiempo para poder cumplir con las condiciones del enlace.
- El primer escenario analiza los resultados considerando únicamente el presupuesto de potencia y los componentes requeridos para la simulación utilizando un único amplificador al final del enlace de fibra óptica.
- Se debe realizar el análisis del diagrama del ojo, del BER y de la OSNR para determinar si el enlace es óptimo.
- El segundo escenario propone un rediseño del enlace considerando amplificadores equidistantes en el enlace para obtener una recepción óptima. Al igual que en el escenario anterior, se debe realizar el análisis del diagrama del ojo, del BER y de la OSNR.
- Se propone variar drásticamente la ganancia de los amplificadores utilizados con el fin de analizar el comportamiento del enlace mediante el diagrama del ojo y del BER.

4.4.3.1 Selección de los componentes del sistema

Considerando las condiciones del sistema, se debe seleccionar los componentes del y sus parámetros de operación.

- **Longitud de onda:** para este enlace punto a punto, se utiliza la tercera ventana de operación, donde $\lambda = 1550$ [nm].
- **Fibra óptica:** debido al alcance que requiere el sistema se utiliza fibras monomodo. Estas fibras en la tercera ventana, presentan una mínima

atenuación de 0.2 [dB/km] (Ver Figura 2.21). Además, utilizando fibras de dispersión desplazada, se alcanza un mínimo valor de dispersión cromática en la tercera ventana, con un coeficiente de 3 [ps/Km.nm] (Ver Anexo 4). Para el enlace de fibra óptica, se considera empalmes cada 10 [km] con una atenuación de 0.2 [dB] por empalme; además, los conectores de unión presentan una atenuación de 0.5 [dB].

- **Fuente del transmisor:** se utiliza una fuente láser por su directividad, con un tiempo de respuesta de 0.3 [ns], una potencia de emisión de 6 [dBm] y anchura espectral de 1.5 [nm] (Ver Anexo 6). Se considera que las pérdidas de acople de del transmisor a la fibra óptica son de 0.1 [dB].
- **Detector del receptor:** se utiliza un detector PIN con un tiempo de respuesta de 0.2 [ns] y una sensibilidad de -25 [dBm] (Ver Anexo 7). Se considera que las pérdidas de transferencia de luz de la fibra óptica al receptor de 0.01 [dB].

4.4.3.2 Cálculo del balance de tiempos del sistema

El balance de tiempos está determinado por los tiempos de respuesta de cada componente. Para esta práctica, el tiempo de respuesta de la fuente láser es de 0.3 [ns] y el tiempo de respuesta de respuesta del detector PIN es de 0.2 [ns].

Para la fibra óptica, al utilizar fibras monomodo la dispersión modal se elimina. Además, con fibras de dispersión desplazada, el coeficiente de dispersión cromática es mínimo, siendo el mismo de 3 [ps/Km.nm] para la tercera ventana. Por último, debido a que la capacidad requerida no supera los 10 [Gbps], el coeficiente de dispersión de modo de polarización no tiene efecto. Para determinar el tiempo de respuesta de la fibra óptica, aplicando la (ec 4.5) se tiene lo siguiente:

$$\Delta t_{fo} = \tau = \sqrt{\tau_{modal}^2 + \tau_{cromática}^2 + \tau_{polarización}^2}$$

$$\tau_{cromática} = coef.*L * \Delta\lambda$$

$$\tau_{cromática} = 3 \left[\frac{ps}{km.nm} \right] * 200 [km] * 1.5 [nm] = 0.9[ns]$$

$$\Delta t_{fo} = \tau = \sqrt{0^2 + 0.9^2 + 0^2} = 0.9[ns]$$

Para determinar el tiempo de respuesta total del sistema se aplica la (ec 4.4).

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{tx}^2 + \Delta t_{rx}^2 + \Delta t_{fo}^2}$$

$$\Delta t = \sqrt{(0.3 [ns])^2 + (0.2 [ns])^2 + (0.9 [ns])^2}$$

$$\Delta t = 0.97 [ns]$$

Al tener un tiempo de respuesta de 0.97 [ns], el cual es menor al tiempo de bit, la velocidad de transmisión máxima que puede alcanzar el sistema es de:

$$V_{tx} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.97 [ns]} = 1.03 [Gbps]$$

Por lo tanto los componentes que se utilizan para el diseño cumplen el balance de tiempos y pueden alcanzar la capacidad de transmisión requerida.

4.4.3.3 Cálculo del presupuesto de potencia, diseño inicial

Una vez, verificado el balance de tiempos para alcanzar la capacidad del sistema requerida, se procede a realizar el análisis de presupuesto de potencia, iniciando por el análisis de pérdidas. Aplicando la (ec 4.7), se obtiene el total de pérdidas del enlace considerando las condiciones del diseño.

$$\alpha_{total} = \alpha_{tx-fo} + \alpha_{fo} + \alpha_{fo-rx} + \alpha_{conectores}$$

$$\alpha_{total} = 0.1 [dB] + [200 \times 0.2 [dB]] + 0.01 [dB] + [(19 \times 0.2 [dB]) + (4 \times 0.5 [dB])]$$

$$\alpha_{total} = 45.91 [dB]$$

Aplicando la (ec 4.6) se realiza el presupuesto de potencia para obtener la ganancia requerida para las condiciones del amplificador, en este ejercicio práctico se utiliza un margen de seguridad de 3 [dB].

$$P_{tx} - \alpha_{total} + G = Sensibilidad_{rx} + Margen de seguridad$$

$$6 [dBm] - 45.91 [dB] + G = -25 [dBm] + 3 [dB]$$

$$-39.91 [dB] + G = -22 [dB]$$

$$G = 17.91 [dB]$$

La *Figura 4.27* muestra el esquema del enlace de comunicaciones ópticas que se está diseñando, adicional se añade un amplificador óptico que representa la ganancia requerida por el sistema.

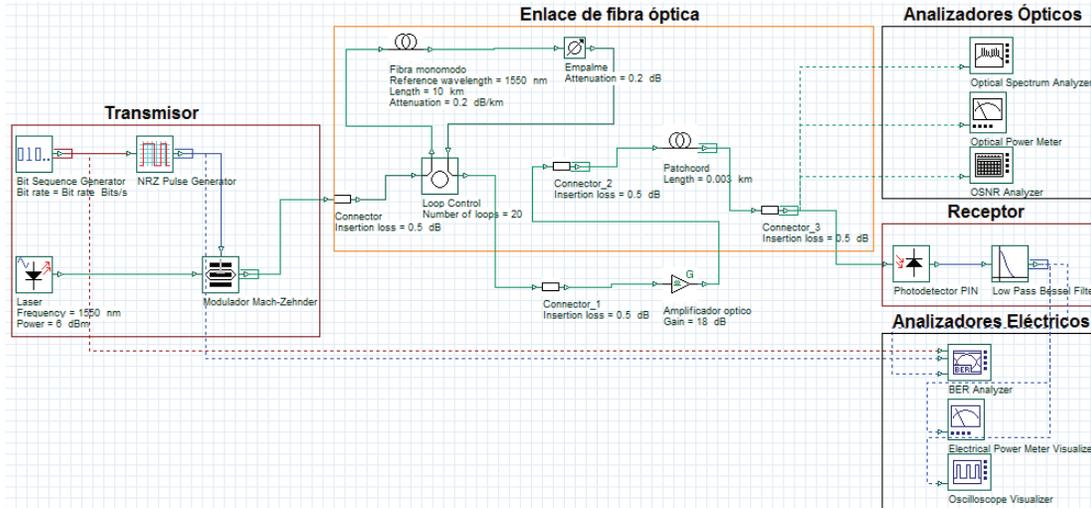


Figura 4.27 Esquema de un enlace óptico punto a punto

Para poder analizar los resultados del diseño, se añade un analizador del diagrama del ojo, un medidor de potencia eléctrica, un analizador de espectro óptico y un analizador de potencia óptica.

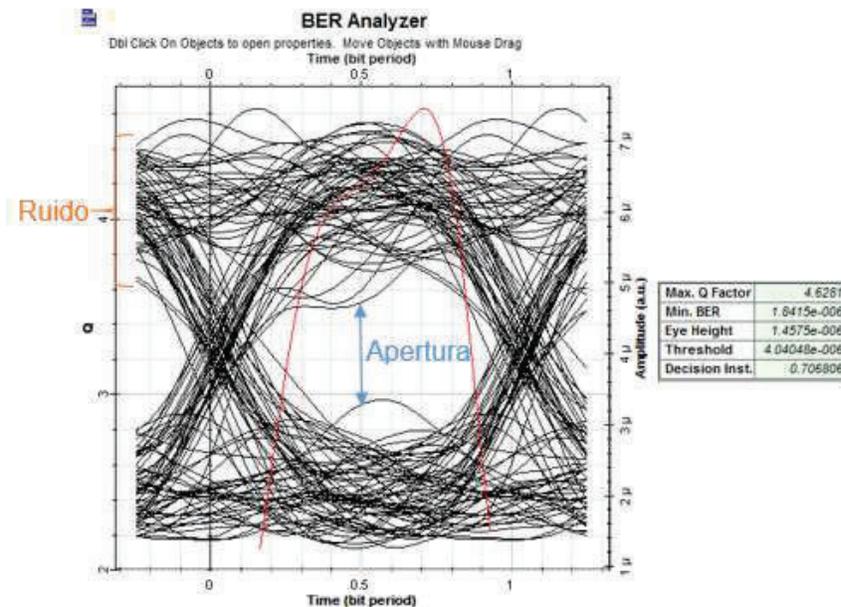


Figura 4.28 Resultados del diagrama del ojo y del BER

A pesar de seguir con el diseño planteado, los resultados no son los esperados. El diagrama del ojo mostrado en la *Figura 4.28* determina la presencia excesiva de ruido en el sistema, por lo que se tiene un BER de 1.8×10^{-6} , el cual es mayor al requerido en las condiciones del sistema.

El analizador de potencia, mostrado en la *Figura 4.29*, determina que la OSNR es de 11.85 [dB], el cual es menor al que se requiere en las condiciones del sistema

	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
Min value	-25.129087	-36.980457	11.85137
Max Value	-25.129087	-36.980457	11.85137
Total	-25.129087	-36.980457	
Ratio max/min	0	0	0
	(nm)	(nm)	(nm)
Wavelength at min	1550	1550	1550
Wavelength at max	1550	1550	1550

Figura 4.29 Analizador de potencia óptica

4.4.3.4 Cálculo del presupuesto de potencia, rediseño del sistema

En vista de que los resultados no son como se esperaba, se procede a realizar una modificación en el diseño. El segmento que debe viajar la señal de información es demasiado largo y presenta pérdidas significativas de 45.91 [dB], por tal razón se requiere la presencia de amplificadores intermedios equidistantes.

Cada amplificador debe cubrir las pérdidas del segmento anterior. Para este ejemplo puntual, se utiliza cuatro amplificadores distribuidos uniformemente cada 50 [km], por lo tanto, cada segmento debe superar pérdidas de dos conectores, cuatro empalmes y 50 [km] de fibra óptica.

$$\alpha L = \alpha_{tx-f_0} + \alpha_{f_0} + \alpha_{f_0-rx} + \alpha_{conectores}$$

$$\alpha L = 0.1 [dB] + [50 \times 0.2 [dB]] + 0.01 [dB] + [(4 \times 0.2 [dB]) + (2 \times 0.5 [dB])]$$

$$\alpha L = 11.91 [dB]$$

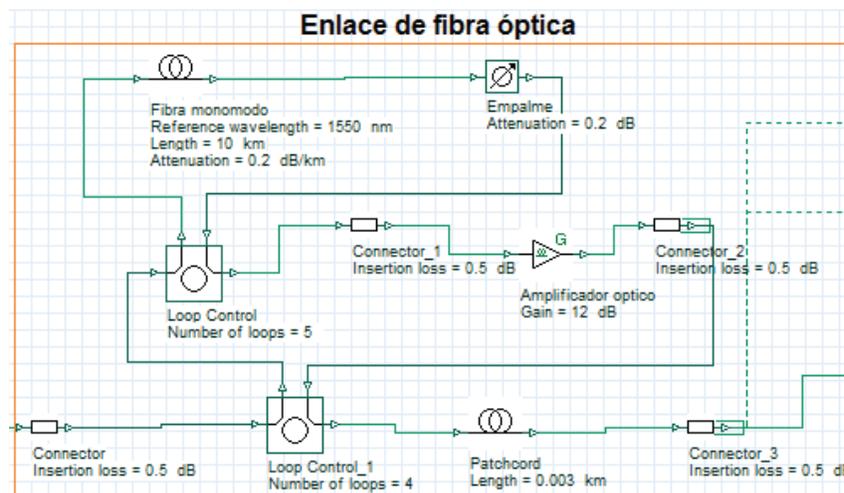


Figura 4.30 Enlace con amplificadores intermedios

Cada amplificador se diseña con una ganancia de 12 [dB] que compensan las pérdidas de cada segmento. La *Figura 4.30* muestra el enlace óptico modificado con los amplificadores intermedios equidistantes.

Al realizar esta modificación los resultados son satisfactorios. Como muestra la *Figura 4.31*, el diagrama del ojo se encuentra abierto, es decir, no presenta interferencias intersímbolo, la parte superior que es el ruido no ingresa a la parte central del ojo, esto quiere decir que el ruido no afecta a la transmisión. Además se obtiene un BER de 8.80×10^{-70} el cual es excelente para una transmisión digital.

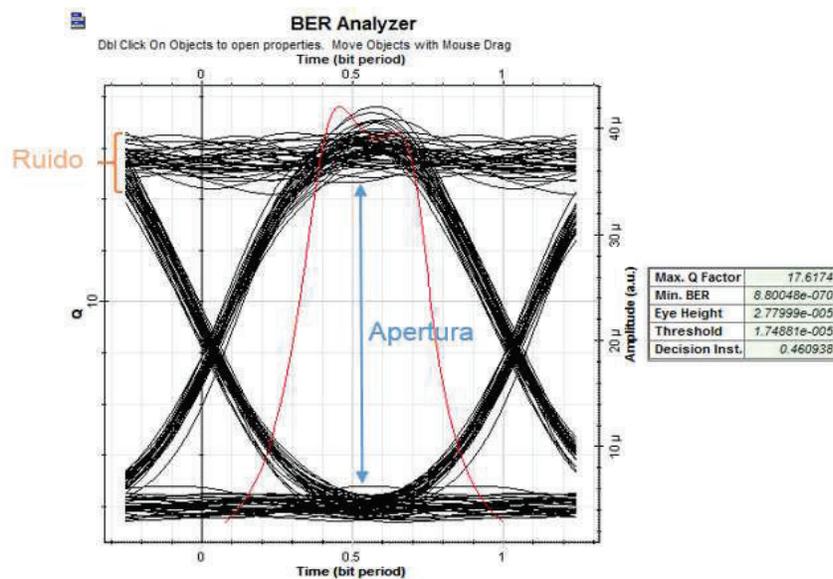


Figura 4.31 Diagrama del ojo y del BER corregidos

El analizador de potencia mostrado en la *Figura 4.32* presenta un valor de OSNR de 38.91 [dB], superior al requerido por el sistema.

	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
Min value	1.8686662	-37.044652	38.913318
Max Value	1.8686662	-37.044652	38.913318
Total	1.8686662	-37.044652	
Ratio max/min	0	0	0
	(nm)	(nm)	(nm)
Wavelength at min	1550	1550	1550
Wavelength at max	1550	1550	1550

Figura 4.32 Analizador de potencia óptica

Estos resultados se lograron debido a la ubicación correcta de los amplificadores y a su correspondiente valor de ganancia; sin embargo, cuando no existe un diseño adecuado de la ganancia de los amplificadores se puede cometer el error

de sobrecargar el sistema al aumentar demasiado la ganancia con la idea de mejorar la potencia de señal, la *Figura 4.33* muestra el resultado del diagrama del ojo de un sistema con sobrecarga al utilizar amplificadores con 22 [dB] de ganancia. Como se puede observar, el BER aumenta considerablemente y el diagrama del ojo comienza a distorsionarse.

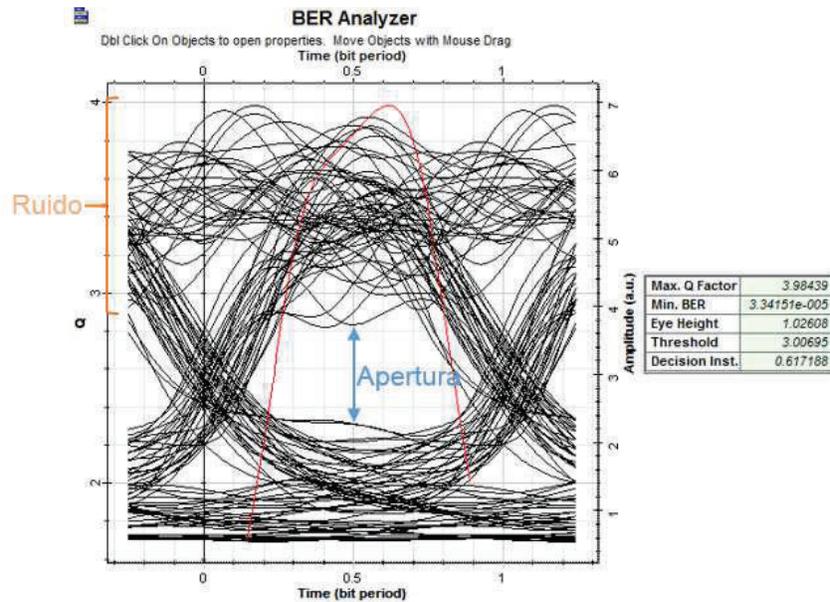


Figura 4.33 Diagrama del ojo y del BER con sobrecarga

4.4.3.5 Análisis de resultados

El primer esquema utilizó un solo amplificador al final del trayecto de fibra óptica, el amplificador no solo aumentó la señal que en si era mínima sino también amplificó el ruido. Al tener una potencia de señal y una potencia de ruido muy similares, el receptor no puede distinguir cual señal es información válida, teniendo como resultado un BER no deseado de 1.8×10^{-6} .

En estas condiciones el enlace no tuvo éxito. El transmisor, después de modulada la señal óptica, emite una potencia de 2.89 [dBm] Aplicando la (ec 4.10), el cálculo teórico para obtener el valor de OSNR, considerando amplificadores con figura de ruido igual a 4 [dB] es el siguiente:

$$OSNR_{dB} = 58_{dB} + P_{in_{dBm}} - NF_{dB} - \alpha L_{dB} - 10 \log(N)_{dB}$$

$$OSNR_{dB} = 58_{dB} + 3_{dBm} - 4_{dB} - 45.91_{dB} - 10 \log(1)_{dB}$$

$$OSNR_{dB} = 10.89_{dB}$$

El OSNR teórico con el practico difiere en 1 [dB], sin embargo, sigue siendo menor que el requerido en las condiciones del sistema. Es por esto que se realiza un rediseño considerando el OSNR.

El segundo escenario se presentó la solución utilizando amplificadores intermedios en cada intervalo de 50 [km] de fibra óptica, con el fin de no permitir que la señal se atenúe demasiado como para que su potencia óptica sea comparable con la potencia óptica del ruido. En este escenario ya no se requirió un solo amplificador, sino cuatro amplificadores de 12 [dB] que compensaría las pérdidas de cada segmento. Al igual que el caso anterior el cálculo del valor de OSNR se lo obtiene aplicando la (ec 4.10).

$$OSNR_{dB} = 58_{dB} + P_{in_{dBm}} - NF_{dB} - \alpha L_{dB} - 10 \log(N)_{dB}$$

$$OSNR_{dB} = 58_{dB} + 3_{dBm} - 4_{dB} - 11.91_{dB} - 10 \log(4)_{dB}$$

$$OSNR_{dB} = 38.89_{dB}$$

En este caso, el OSNR teórico difiere en un 0.1 [dB] con el OSNR práctico, además, es lo suficientemente mayor que el OSNR requerido por el sistema. Lo que permite tener resultados satisfactorios.

El tercer escenario presentó un enlace sobrecargado por un mal diseño de los amplificadores, a pesar de ubicarlos a cierto intervalo de distancia, la ganancia de cada amplificador era excesiva y generó que el BER aumente drásticamente.

Las figuras mostradas a continuación presentan la señal que se envía por el enlace de fibra óptica mostrada en la *Figura 4.34* y la señal recibida en cada uno de los casos anteriormente descritos. Esto permite observar la diferencia en la señal recibida. En el primer caso, mostrado en la *Figura 4.35*, el receptor detecta un alto nivel de ruido y distorsiona por completo la señal de información.

Mientras que en el tercer caso, mostrado en la *Figura 4.37*, el diseño sobredimensionado del enlace óptico produce distorsión en la señal y el receptor no puede realizar una detección óptima.

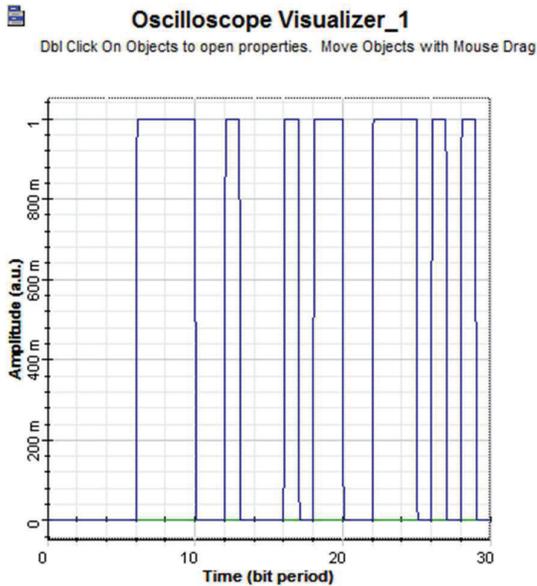
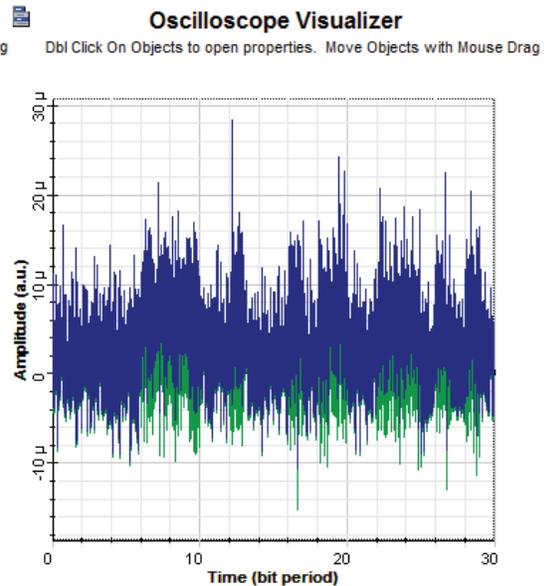
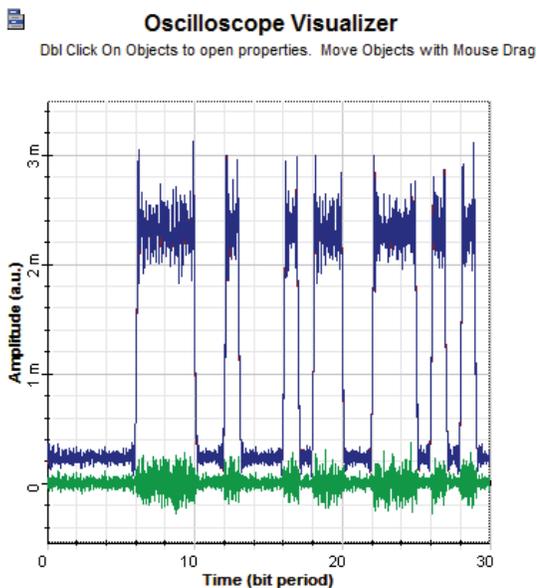
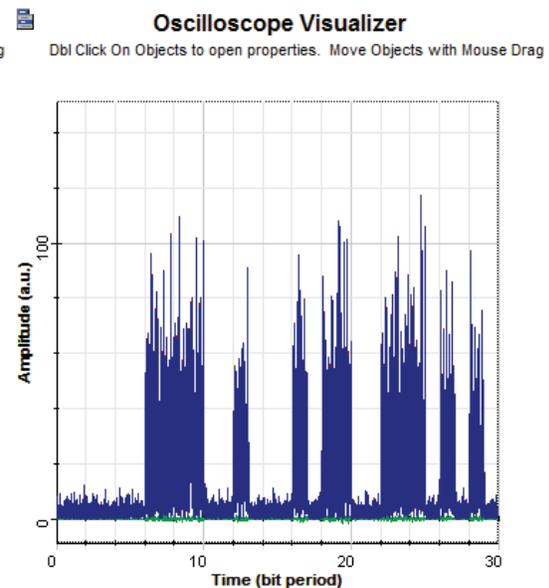


Figura 4.34 Señal eléctrica a transmitirse

Figura 4.35 Recepción con $BER=1.80 \times 10^{-6}$

La *Figura 4.36* muestra los resultados de una enlace en buenas condiciones, al ser una señal digital lo que se está transmitiendo, el receptor puede distinguir los valores de 1 y 0 para recuperar la señal, no obstante, con el uso de amplificadores de mayor ganancia se puede mejorar la recepción tomando en cuenta el no excederse de los límites de sobrecarga.

Figura 4.36 Recepción con $BER=8.80 \times 10^{-70}$ Figura 4.37 Recepción con $BER=3.34 \times 10^{-5}$

4.4.3.6 Aplicaciones de la práctica

Esta práctica permite determinar las características de los componentes que se utilizan en un enlace óptico, además de los parámetros que afectan el rendimiento del mismo mediante el balance de tiempos y el presupuesto de potencia.

Gracias al presupuesto de potencia, se puede determinar los parámetros de amplificación que requiere el enlace punto a punto y al experimentar con la distancia de fibra óptica también se puede determinar la cantidad de amplificadores que necesita el enlace y a qué distancia se los ubicaría con el fin de tener una recepción óptima.

Es importante utilizar los simuladores para elegir los componentes del enlace, así como por ejemplo el tipo de fuente que genera menos pérdida, la potencia requerida de la fuente para no perder información ni sobrecargar al detector, los kilómetros de fibra óptica que no requieren de amplificación, el tipo de detector necesario y las características del detector para un enlace específico.

También, permite realizar las pruebas necesarias antes de la implementación del enlace, con el fin de evitar daños físicos en los equipos adquiridos ya que los mismos son de alto costo. Así se puede tener una visión más clara de los elementos de hardware que se deben adquirir para el sistema de comunicaciones ópticas que se esté diseñando.

4.4.3.7 Posibles variaciones de la práctica

- Se puede modificar los componentes del diseño como las fuentes y los receptores para analizar los resultados considerando las condiciones requeridas del enlace.
- Las condiciones del diseño pueden modificarse para diferentes aplicaciones, se puede considerar el diseño de una fibra óptica de backbone en un edificio reduciendo las distancias del enlace, o una se puede realizar el diseño de una fibra óptica para un enlace metropolitano.

4.4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El balance de tiempos determina la capacidad máxima del sistema y está en dependencia de los tiempos de respuesta de los componentes principales del enlace como son la fuente, la fibra óptica y el detector.

- El tiempo de respuesta de la fibra depende de la dispersión. Si la fibra óptica es monomodo, la dispersión modal queda suprimida y dependería de la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización.
- El presupuesto de potencia permite determinar los valores requeridos para los componentes del sistema como son la potencia de la fuente, la ganancia de los amplificadores, la sensibilidad del receptor, la atenuación de la fibra óptica, con el fin de alcanzar los requerimientos de diseño basados principalmente en la capacidad y eficiencia de transmisión.
- Las pérdidas dependen de varios factores, los cuales se han ido estudiando detenidamente a lo largo de cada práctica de laboratorio, con el fin de saber contrarrestar su efecto en el diseño de un enlace.
- La potencia del ruido es determinante en tramos largos de fibra óptica, y el uso de un solo amplificador no es una solución ya que amplifica no solo la señal sino también el ruido. Además, al tener una ganancia de amplificación excesiva se presentan no linealidades en el sistema que afectan al rendimiento del enlace óptico.
- Cuando la señal viaja por tramos muy largos de fibra sin amplificación, la potencia de la señal alcanza los niveles de la potencia de ruido óptico, por lo que el receptor no puede distinguir la información.
- La relación señal a ruido óptico es un factor determinante en el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas, el cual permite determinar la necesidad de amplificadores y su ubicación para garantizar que el receptor detecte una potencia de señal con información superior a su sensibilidad.
- La ganancia de los amplificadores es fundamental en el diseño de un enlace óptico, pero se debe tener en cuenta los límites del enlace mismo para no sobrecargar el receptor y generar distorsión en la señal ya que un exceso de potencia aumenta drásticamente el BER.
- El diagrama del ojo en conjunto con el BER son herramientas muy útiles para determinar la calidad de un sistema y poder determinar los parámetros técnicos necesarios para obtener una comunicación óptima.

4.5 PRÁCTICA 12: SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS CON MODULACIÓN QAM DIGITAL

4.5.1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Realizar el esquema de un transmisor y un receptor ópticos con modulación QAM mediante el uso del simulador *OptiSystem*.
- Comprender el funcionamiento de los componentes de un sistema de comunicaciones ópticas con modulación QAM.
- Analizar los resultados de sistema de comunicaciones ópticas cuando se obtiene una OSNR deseado y cuando la OSNR es menor al recomendado.

4.5.2 MARCO TEÓRICO [3][9][11][12][21]

La modulación de amplitud en cuadratura o QAM es la técnica en la cual se transporta dos señales de información independientes, mediante la modulación de una señal portadora, tanto en amplitud como en fase, modulando la misma portadora con un desfase de 90°. Gracias a esto se forman dos canales ortogonales entre sí con un mismo ancho de banda, lo que permite ahorrar el ancho de banda y mejorar la eficiencia. En esta técnica la información está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la señal portadora.

En el trasmisor, la señal modulada en QAM es la resultante de la suma lineal de dos señales previamente moduladas en doble banda lateral con portadora suprimida (SSB). Por lo tanto, si dos señales $I(t)$ y $Q(t)$, modulan dos portadoras de la misma frecuencia, una desfasada en 90° respecto a la otra, la señal transmitida $s(t)$ cumple con la siguiente expresión [3]:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi ft) + Q(t) \sin(2\pi ft) \quad (\text{ec 4.11})$$

En el receptor, las señales de información son demoduladas usando demoduladores de producto que multiplican la señal recibida $r(t)$, proporcionalmente igual a $s(t)$ en dos vías separadas, con la señal de un oscilador local recuperada a partir de la señal recibida y con ésta desfasada en 90° para reproducir las señales originales $I(t)$ y $Q(t)$, respectivamente. Debido a la propiedad de ortogonalidad de las señales portadoras, es posible detectar independientemente las señales transmitidas.

Por lo tanto, para recuperar la señal $I(t)$ se multiplica la señal recibida $r(t)$ por la señal de un oscilador local $\cos(2\pi ft)$, obteniendo lo siguiente [3]:

$$I_{recibida}(t) = \frac{1}{2}I(t) + \frac{1}{2}[I(t)\cos(4\pi ft) + Q(t)\sin(4\pi ft)] \quad (\text{ec 4.12})$$

Mediante la aplicación de filtros pasabajos se eliminan las componentes de alta frecuencia y por consiguiente la componente de $Q(t)$, demostrando que la demodulación es independiente para cada señal transmitida.

En sistemas de comunicaciones digitales, la modulación QAM tiene como señal de entrada un flujo de datos binarios, el cual es dividido en grupos de tantos bits como se requieran para generar N estados de modulación, es por esto que se habla de N -QAM. Las técnicas de modulación QAM más utilizadas en comunicaciones ópticas con 16-QAM, 64-QAM, y últimamente se está incursionando en la técnica de 256-QAM.

Para representar los estados de modulación posibles se utiliza el llamado diagrama de constelación como el mostrado en la *Figura 4.38*. Los puntos de la constelación están uniformemente dispuestos en una rejilla cuadrada con igual separación vertical y horizontal.

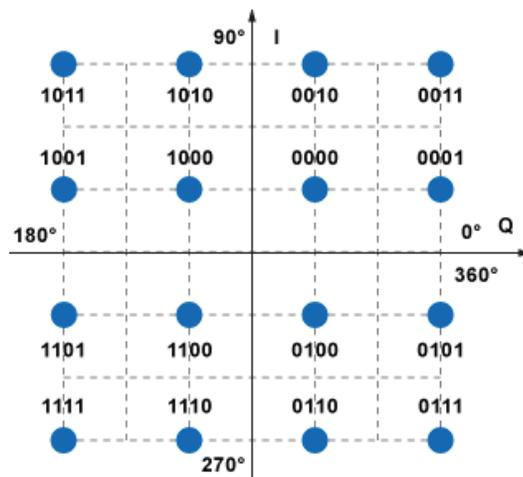


Figura 4.38 Diagrama de constelación de un sistema 16-QAM

Puesto que en los sistemas de comunicación digital los datos son binarios, el número de puntos del diagrama es normalmente una potencia de dos. Al cambiar a una constelación de orden superior, es posible transmitir más bits por símbolo.

Sin embargo, si la energía promedio de la constelación sigue siendo la misma, los puntos deben estar más cercanos y son por lo tanto más susceptibles al ruido y la distorsión, lo que resulta en BER más alto, es por esto que la modulación QAM de orden superior puede presentar más errores si no se utilizan elementos de precisión.

En sistemas de comunicaciones ópticas la modulación QAM es utilizada para solventar las deficiencias de los sistemas con PSK, ya que el rendimiento de la modulación QAM es mejor, debido a la mayor distancia que presentan los puntos adyacentes en el plano I-Q, además presenta mayor tolerancia al ruido blanco.

4.5.3 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se propone realizar un escenario en la herramienta computacional, *OptiSystem* para analizar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones ópticas utilizando modulación 16-QAM.

- El escenario permite el análisis del espectro de potencia óptica a la salida del transmisor QAM y el análisis del diagrama de constelación eléctrica a la salida de un receptor óptico con fotodetector PIN.

4.5.3.1 Escenario de un sistema con modulación QAM

Para realizar la simulación de un sistema de comunicaciones ópticas con modulación 16-QAM, se utilizan dos bloques específicos que *OptiSystem*, en su versión 13.0, presenta. El primer bloque conocido como 16-QAM *transmitter*, permite la simulación del transmisor óptico con modulación en cuadratura y en fase. En este bloque se puede modificar la longitud de onda de operación, la potencia de la fuente láser, el ancho de banda de operación e inclusive se puede determinar si se utiliza un generador de bit interno o externo.

El segundo bloque llamado *Optical Coherent QAM Receiver*, representa una parte del receptor óptico del enlace con modulación QAM. Este bloque permite determinar la longitud de onda de operación y también, seleccionar el tipo de detector, sea PIN o APD, así como la responsividad y la corriente de oscuridad.

El transmisor óptico además del bloque antes descrito, está compuesto por un bloque de control de potencia. Este bloque limita la potencia de entrada al enlace

de fibra óptica, con el fin de no generar distorsiones en la señal por exceso de potencia, lo que reduce a los efectos no lineales.

El receptor óptico, también consta de otros bloques que ayudan a su funcionamiento. Está compuesto por tres bloques adicionales al bloque *Optical Coherent QAM Receiver*. El siguiente bloque es el encargado del procesamiento digital de señales, el cual es la modificación de la señal con el fin de mejorar, filtrar, producir o comprimir señales; en este bloque se puede modificar el tipo de modulación, la clase de filtro pasabajo, además, permite determinar los parámetros de compensación para el enlace. Ya sea compensando la dispersión, o el efecto de los parámetros no lineales de la fibra.

El bloque *Decisión* determina el formato de la modulación, además, este bloque permite especificar la velocidad de los símbolos del sistema. Finalmente el bloque *QAM Sequence Decoder* permite decodificar la señal enviada a lo largo del enlace de fibra óptica y recuperarlo en su estado original.

La *Figura 4.39* representa el esquema para un sistema de comunicaciones ópticas con modulación 16-QAM. Para que el enlace de este sistema opere correctamente la OSNR debe ser mayor a 15 [dB].

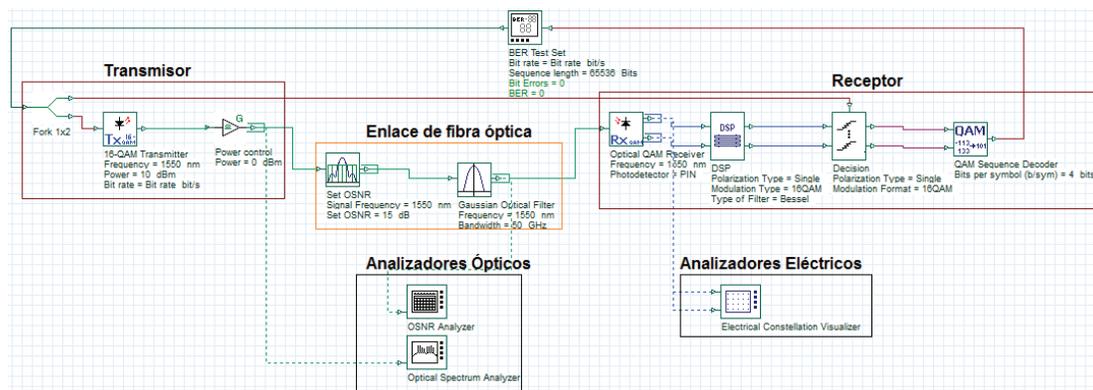


Figura 4.39 Esquema de un sistema óptico con modulación 16-QAM

A la salida del transmisor óptico, se conecta el analizador de espectro de potencia y a la salida del enlace óptico se conecta el analizador de la OSNR. Estos dos componentes permitirán el análisis del sistema a nivel óptico. Para poder analizar los resultados en el aspecto eléctrico, a la salida del receptor, se conecta el visualizador del diagrama de constelaciones.

La *Figura 4.40* muestra el espectro óptico de la señal que va a ser enviada por el enlace. La potencia se centraliza a 1550 [nm] y el ruido óptico está por debajo de los -90 [dBm], lo cual no genera interferencia.

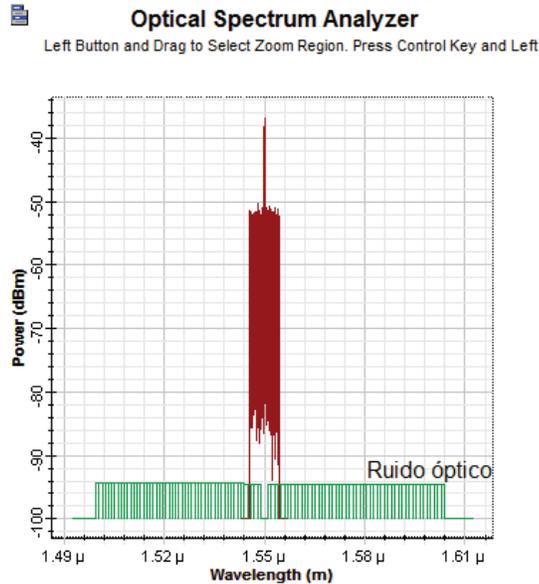


Figura 4.40 Espectro óptico de potencia a la salida del transmisor

A la salida del enlace de fibra óptica, se puede observar que la potencia de la señal es de -3.45 [dBm], mientras que la potencia del ruido es de -14 [dBm], como muestra la *Figura 4.41*, para estas condiciones la OSNR es de 15.03 [dB], lo que supera el límite para tener una buena recepción.

	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
Min value	-3.4493797	-14.980706	11.531326	-18.483186	15.033807
Max Value	-3.4493797	-14.980706	11.531326	-18.483186	15.033807
Total	-3.4493797	-14.980706	23.062653	-18.483186	30.067613
Ratio max/min	0	0	0	0	0
	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
Wavelength at min	1550	1550	1550	1550	1550
Wavelength at max	1550	1550	1550	1550	1550

Figura 4.41 Analizador de potencia óptica

La *Figura 4.42* muestra el diagrama de constelación en el cual se puede observar los 16 estados definidos en cada cuadrante, a pesar de que existe una mínima presencia de ruido, los estados no se interfieren entre sí, lo que permite una buena recepción y decodificación de la señal recibida.

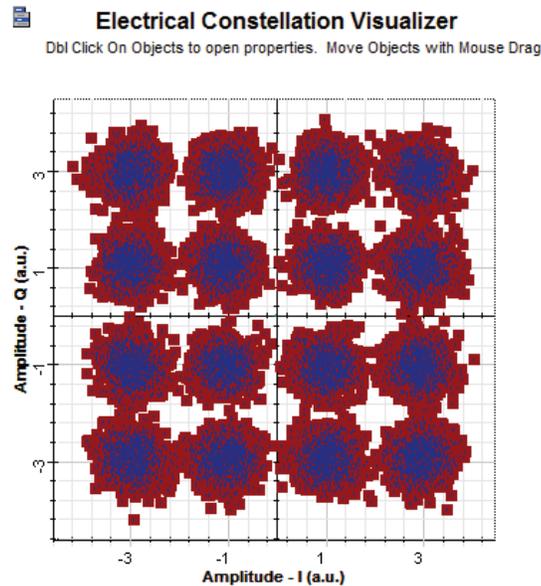


Figura 4.42 Diagrama de constelación para un sistema 16-QAM

4.5.3.2 Análisis de resultados

El enlace antes descrito opera en óptimas condiciones. El analizador de potencia permitió determinar que la OSNR supero los 15 [dB] requeridos por el sistema, lo que permite que el diagrama de constelación tenga definidos los 16 estados y la decodificación no se vea afectada. Como ejemplo de análisis para este tipo de sistema, se simuló un sistema de comunicaciones ópticas con mayor ruido.

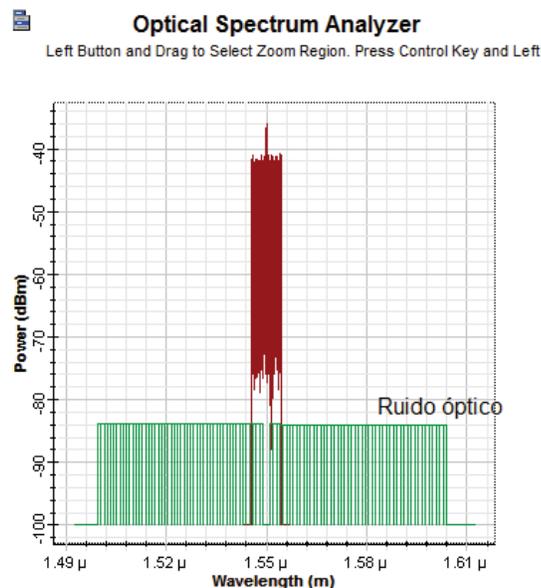


Figura 4.43 Espectro óptico de potencia para un sistema con ruido

En la *Figura 4.43* se puede observar que el nivel de ruido en el espectro óptico supera los -90 [dBm]. Sin embargo, la potencia de la señal no ha variado.

En estas condiciones el ruido ha alcanzado un valor de -8.47 [dBm], lo que generó que la OSNR se redujera a 4.99 [dB], como muestra la *Figura 4.44*, el cual es menor que el que se requiere para una operación óptima del sistema.

Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
-3.474985	-4.9689527	1.4939677	-8.4714329	4.9964479
-3.474985	-4.9689527	1.4939677	-8.4714329	4.9964479
-3.474985	-4.9689527	2.9879353	-8.4714329	9.9928957
0	0	0	0	0
(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
1550	1550	1550	1550	1550
1550	1550	1550	1550	1550

Figura 4.44 Analizador de potencias para un sistema con incremento de ruido óptico

El resultado final de este escenario se muestra en la *Figura 4.45*, donde el diagrama de constelación se ve completamente difuso. Los estados no se pueden distinguir entre sí, debido a la presencia de ruido óptico en el sistema. Para poder solventar esta situación, es recomendable mantener una OSNR mayor a 15 [dB], esto se puede lograr con el uso de amplificadores, y con filtros que permitan el paso únicamente de frecuencias con señal de información.

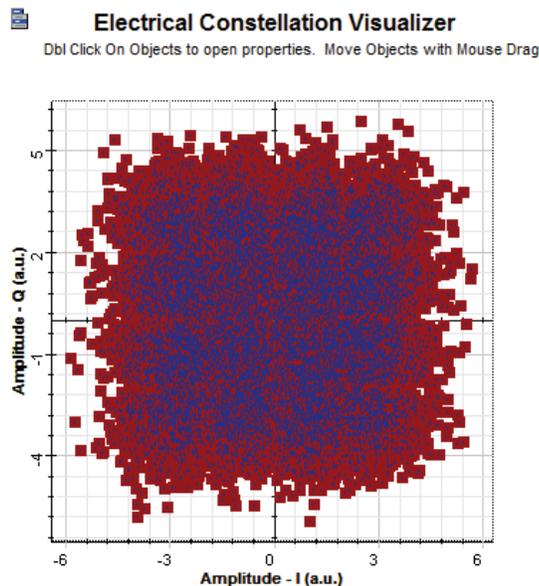


Figura 4.45 Diagrama de constelación para un sistema con ruido

4.5.3.3 Aplicaciones de la práctica

La modulación QAM tiene su aplicación principalmente en sistemas de transmisión de señal de televisión CATV, también es utilizada en el diseño de módems telefónicos para velocidades superiores a los 2.4 [Kbps] y módems ADSL que trabajan a frecuencias comprendidas entre 24 [KHz] y 1104 [KHz], alcanzando velocidades de hasta 9 [Mbps].

Esta técnica de modulación puede conseguir velocidades de transmisión muy elevadas combinándola con la codificación de canal.

4.5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los sistemas de comunicaciones ópticas aplican la técnica de modulación QAM para incrementar la capacidad del enlace al permitir enviar dos señales a la misma frecuencia, moduladas en fase y en cuadratura. Sin embargo, se debe tener en consideración que las variaciones, como por ejemplo, la disminución de la potencia óptica a la llegada del receptor, en sistemas de este tipo pueden ser perjudiciales.
- El diagrama de constelación debe determinar claramente cada estado para que el receptor pueda decodificar la señal recibida, si la señal OSNR es menor que la requerida, esto genera que los estados se crucen dificultando la decodificación.
- En la vida profesional, cuando los tramos de fibra óptica son demasiado largos y no se utiliza amplificadores de señal ni filtros para poder mantener el valor de la relación señal a ruido óptico, la señal se atenúa demasiado, alcanzando valores semejantes al ruido lo que produce errores en la transmisión. Para los sistemas con modulación QAM, esto se traduce en un diagrama de constelación confuso en el cual, los estados se interfieren unos con otros lo que no permite una buena decodificación y demodulación.

REFERENCIA DEL CAPITULO IV

- [1] Ajoy Ghatak, "Introduction to fiber optics", Cambridge University Press, New Delhi march 1997.
- [2] Altamirano C. Gladys, Goitia C. Cecilia, Gonzales Z. Andrés "Receptores Ópticos" Publicada por Jovita Ángeles, 2015.
- [3] Av. Tran, C. Zhu, "Single Carrier QPSK and 16 QAM System Demonstratrtion Using Frequency Domain Equalization and Training Sequences", University of Melbourne, Australia.
- [4] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics" Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback).
- [5] Capmany, José, Ortega, Beatriz, "Fundamentos de Comunicaciones Ópticas", 2ª Edición, Universitat Politecnica de Valencia, septiembre 2014.
- [6] Castillo Milybert, Romero Gabriel "Diagrama de ojo, Comunicaciones II" <http://es.slideshare.net/bujatto02n/diagrama-del-ojo>
- [7] Dinamarca, José "Análisis de diagrama de ojo", Rol: 9721036-5, noviembre 2002.
- [8] Gary Breed, "Bit Error Rate: Fundamental Concepts and Measurement Issues", Summit TechnicalMedia, LLC, january 2003.
- [9] Govind P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems" 3th ed., Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: ISBN 0-471-22114-7 (Hardback).
- [10] Govind P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems" 4th ed., Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 978-0-470-50511-3 (Hardback).
- [11] Hernaez, Inmaculada, "Procesamiento digital de señales, Tema 3: Modulación QAM", septiembre 2010.
- [12] Hernández, Enrique, "Sistemas de Telecomunicación, Modulación digital", Ingeniería en Informática, julio 2010.
- [13] Hinojosa G. Luis, "Tópicos Selectos de fibra óptica", Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México 2007.
- [14] "Introduction to fiber optic communications, Optical Fiber Amplifiers EDFA" hft.tu-berlin, Alemania.
- [15] Jia-Ming Liu, "Photonic Devices", Chapter 14, Published on Jul 8, 2013
- [16] López, Francisco J., Conceptos fundamentales de comunicaciones ópticas, Manual LCO, Laboratorios de comunicaciones ópticas, Dpto. Tecnología Fotónica, septiembre 2012
- [17] M. C. España "Comunicaciones ópticas: Conceptos esenciales y resolución de ejercicios" Ediciones Díaz de Santos, S. A. ISBN: 84-7978-685-X, 2005.

- [18] MSc Jiménez María Soledad, "Comunicaciones Ópticas", Escuela Politécnica Nacional, folleto y diapositivas.
- [19] P.J. Winzer, R.J. Essiambre: "Advanced Optical Modulation Formats", Proceedings, IEEE, vol. 94, May 2006.
- [20] Pascal, Francisco, "Monitorización de OSNR en redes ópticas", Universidad Politécnica de Valencia, agosto 2009
- [21] R. G. Winch, "Telecommunication transmission systems", 2nd edition, New York: McGraw-Hill, pp.21-88, 1998.
- [22] Soumya, M Sajjan, Vikerm Seshasai "DWDM Link Desing and Power Budget Calculation" Vol, 4. ISSN: 2278-8875, RV College of Engineering, Bangalore, Karnataka, India, april 2015.
- [23] Strategic technology infrastructure for regional competitiveness in the network economy, Volume 4: Fiber optic infrastructure design guide, Virginia Polytechnic Institue and State University, 2003.
- [24] Tasse Jean-Sebastien, "What should the OSNR values be in DWDN networks", December 2012

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de éste proyecto fue demostrar cuán importante son los laboratorios en la formación de ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones, aplicando la teoría en escenarios prácticos mediante el uso de herramientas computacionales, como *Matlab* y *OptiSystem*.

Este proyecto permitió ampliar y complementar los conocimientos de sistemas comunicaciones ópticas mediante prácticas realizadas en las herramientas computacionales. De esta manera se adquirió experiencia, teniendo como resultados sólidos conceptos de comunicaciones ópticas, tanto teóricos como prácticos con el fin de aplicarlos en la vida profesional, ya sea para diseño, implementación o solución de problemas.

Los sistemas de comunicaciones ópticas están compuestos principalmente por tres elementos: el transmisor, el canal de comunicaciones y el receptor. Se le dedicó un capítulo a cada uno de ellos para poder entender, mediante la variación de los parámetros en las herramientas computacionales, su comportamiento, su funcionamiento y las técnicas que se pueden aplicar para minimizar los efectos que causarían que el enlace no sea óptimo.

Además, las prácticas realizadas en este proyecto permiten elaborar varios escenarios que permiten la variación en los parámetros como índices de refracción, distancias, longitud de onda de trabajo, velocidad de transmisión, potencia de la fuente e inclusive permiten modificar los componentes del enlace como el tipo de fibra óptica, la clase de fuente, el tipo de detector entre otros.

La ventaja de usar herramientas computacionales, es que se puede variar los parámetros de manera exagerada para obtener resultados en los límites de operación, lo cual no se podría realizar en laboratorios de hardware debido a la tolerancia de los equipos y la posibilidad de dañarlos en presencia de parámetros erróneos, incurriendo en costos por reparación o adquisición de nuevos equipos.

A continuación, se presentan conclusiones y recomendaciones puntuales de cada tema tratado en este proyecto de titulación.

5.1 CONCLUSIONES

- El material con el que se fabrica la fibra óptica determina los parámetros de transmisión de la luz en el canal. Dependiendo de estos parámetros se determina con qué tipo de transmisor puede interactuar dicha fibra óptica.
- Se demostró que el índice de refracción del material del núcleo siempre debe ser mayor que el del manto para poder asegurar que la luz viaje dentro de la fibra óptica, específicamente dentro del núcleo, y no se pierda información ni en el manto ni fuera de la fibra óptica.
- El ángulo de aceptación determina la clase de fuente de luz que se requiere para el sistema. Si el ángulo es pequeño, la fuente debe ser más directiva para que la mayor cantidad de haces de luz ingresen a la fibra óptica y no se pierdan en el espacio de aire.
- Las fibras multimodo operan en la primera y la segunda ventana. Para el diseño de un canal con éstas fibras, se deben considerar la dispersión modal, debido a la propagación de varios modos en el núcleo, lo que causa ensanchamiento en el pulso de recepción, reducción de ancho de banda y menor velocidad de transmisión. Por esta razón las fibras multimodo son utilizadas en distancias máximas de 2 [km].
- Las fibras monomodo pueden operar en la segunda, tercera, cuarta y quinta ventana. Los parámetros de diseño para enlaces con éstas fibras son más exigentes pues presentan un ángulo de aceptación pequeño y un núcleo alrededor de 8 [μm] de diámetro. Esto es considerable para la selección de la fuente de luz.
- La atenuación y la distorsión son parámetros fundamentales en el diseño de un canal de comunicación. El coeficiente de atenuación disminuye a mayores longitudes de onda, pero al ser acumulativo, aumenta a mayores distancias. Por otro lado la dispersión afecta al ancho de pulso produciendo interferencia intersímbolo y solapamiento lo que resulta en una recepción errónea.

- La dispersión cromática afecta más a las fibras monomodo y es el parámetro principal en su diseño, por lo que se debe minimizar el máximo su efecto. Una de las técnicas estudiadas para solventar este efecto es mediante el uso de fibras de compensación de dispersión.
- Las fuentes son los elementos principales de transmisor óptico, son las encargadas de la emisión de luz y en conjunto con los moduladores, sirven de portadora para enviar la señal eléctrica por el enlace óptico.
- Las fuentes led emiten luz a bajas potencias, debido a su emisión espontánea, es decir, las ondas no se encuentran en fase. Esta es la razón por la que son usados en enlaces de corta distancia y a longitudes de onda de 850 [nm] y 1310 [nm].
- Las fuentes láser son más eficientes que las fuentes led ya que presentan una rápida respuesta al estímulo de corriente de inyección, su anchura espectral es menor lo que permite acoplarlas a las fibras monomodo y además trabajan en la zona de emisión estimulada sobre la corriente umbral, por lo tanto, los niveles de potencia óptica son superiores a las de las fuentes led y alcanzan distancias de centenas de kilómetros.
- Uno de los elementos de los transmisores son los moduladores, las dos técnicas de modulación estudiadas presentan diferentes aplicaciones. En sistemas digitales de baja velocidad de transmisión y corta distancia, la modulación directa es ideal, pues aunque la señal se distorsione por la respuesta de la fuente ante el estímulo de la corriente de inyección variable, los receptores y las técnicas de regeneración de señal permiten identificar sin mayor problema la señal transmitida.
- En sistemas digitales de alta velocidad de transmisión y considerables distancias, la modulación directa presenta errores de distorsión, es por esto que se utiliza moduladores externos como el modulador Mach-Zehnder. Su principio de funcionamiento está en la no dependencia de los tiempos de respuesta de las fuentes ópticas.
- Debido a la cantidad de usuarios que requieren una conexión, existen técnicas que permiten el uso de un mismo canal para enviar varias señales, a esto se lo conoce como multiplexación. En este proyecto se hizo énfasis en dos técnicas: WDM y OTDM.

- Para sistemas WDM se requiere de fuentes de precisión para mantener el canal en la longitud de onda adecuada y ancho de banda apropiada, pues la separación entre señales es pequeña y una fuente con anchura espectral considerable provocaría interferencia entre los canales.
- En OTDM, el concepto fundamental es transmitir cada señal en un *slot* de tiempo, por lo que se requiere que los pulsos enviados sean de un pequeño ciclo de bit, el código de línea RZ permite este tipo de señal. Los sistemas OTDM trabajan a velocidades de 100 [Gbps] porque combinan las señales de cada canal aumentando así su capacidad.
- Un detector óptico es el componente más importante del receptor, su función principal es la conversión opto-eléctrica a la salida del canal de comunicaciones. El rendimiento del receptor depende en su mayoría de la eficiencia de trabajo del detector.
- Los detectores PIN tienen un tiempo de respuesta menor que los detectores APD, y requieren de circuitos de amplificación de señal a la entrada (preamplificador) o a la salida del detector.
- Los detectores PIN son los más utilizados en los sistemas de comunicaciones, debido a que su diseño no es tan complejo como los detectores APD, además son menos costosos.
- El diagrama del ojo y el BER en sistemas digitales, permiten el análisis de la señal transmitida, los resultados presentados por el diagrama del ojo determinan la presencia de interferencia intersímbolo, efectos del ruido, distorsión de señal. Mientras que el BER determina si el sistema es presenta tolerancia de error de transmisión

5.2 RECOMENDACIONES

- El uso de herramientas computacionales para la formación de ingenieros no es una recomendación exclusiva para comunicaciones ópticas, sino también para las materias teóricas que permitan el diseño de sistemas de comunicación de cualquier clase (eléctrica, microonda, u óptica).
- A pesar de que los simuladores son bastante intuitivos, es necesario su constante uso y práctica para adquirir la experiencia necesaria y poder manipular los parámetros requeridos para obtener los resultados deseados.

- Dependiendo de la cantidad de componentes que se ubique en el área de trabajo de *OptiSystem*, el tiempo de simulación variará. Por lo que se recomienda utilizar los componentes necesarios, o modificar la velocidad de simulación en los parámetros del área de trabajo.
- Es recomendable el uso de herramientas computacionales para determinar las características de los elementos del enlace óptico antes de la adquisición en hardware. Además, estas herramientas permiten visualizar los efectos que pueden afectar al rendimiento del enlace con el fin de poder minimizarlos y garantizar que el sistema opere en óptimas condiciones.
- Los bloques de visualización tanto de *Matlab* como de *OptiSystem*, permiten el análisis gráfico de la señal transmitida. Por lo que se recomienda antes de utilizarlos, conocer los parámetros y sus efectos están presentes en la simulación para poder interpretar de manera correcta los gráficos presentados por cada bloque, como por ejemplo, el analizador de diagrama del ojo, el analizador de espectro óptico, osciloscopios, diagramas en tiempo óptico, entre otros.
- Considerando el diseño de un enlace de comunicación óptica, es recomendable realizar el presupuesto de potencia para determinar las características de los componentes del enlace y la cantidad de los mismos.

ANEXOS

A. Anexo 1: Guía práctica de Optiwave utilizando OptiSystem:

A continuación se incluye la tabla de contenido de los dos volúmenes de una guía práctica de simulaciones y posibilidades de diseño producida por Optiwave, estas guías son de acceso gratuito.

OptiSystem

Tutorials - Volume 1

Version 13

Table of contents

Introduction

..... 1

Introductory

Tutorials..... 3

Lesson 1: Transmitter — External modulated laser5

Lesson 2: Subsystems — Hierarchical simulation37

Lesson 3: Optical Systems — WDM Design57

Lesson 4: Parameter Sweeps — BER x Input power79

Lesson 5: Bidirectional Simulation — Working with multiple iterations87

Lesson 6: Time-Driven Simulation — Working with individual samples.....97

Lesson 7: Optical Amplifiers — Designing optical fiber amplifiers and fiber lasers 105

Lesson 8: Optical Systems — Working with multimode components 133

Optical transmitters 165

Optical transmitters 167

LED modulation response 169

Semiconductor laser modulation response 173

Semiconductor laser—Large signal modulation..... 177

Chirp in Mach-Zehnder Lithium Niobate modulators.....	183
LED spectral distribution	189
Semiconductor laser L-I curve	193
Laser noise and linewidth.....	195
Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser - VCSEL Validation.....	197
Using the Laser Measured Component	219
Optical fibers	227
Effects of group velocity dispersion (GVD) on Gaussian pulse propagation.....	229
Effects of PMD on pulse propagation.....	241
Effects of cross phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM).....	245
Combined effects of GVD and SPM on Gaussian pulse propagation.....	253
Combined effects of GVD and SPM on modulational instability	259
PMD-induced broadening of ultra-short pulses	269
Validation of FWM effect	279
Stimulated Raman scattering	285
Stimulated Raman scattering—Separated channels	291
SPM-induced spectral broadening	295
XPM-induced asymmetric spectral broadening.....	300
Kerr shutter	309
Bidirectional fiber and Raman design	315
Optical receivers	319
Modulation formats.....	321
Extracting the thermal noise parameter for a specific receiver sensitivity.....	325
Receiver noise—PIN.....	329
Receiver noise—Shot noise enhancement with APD	331
Receiver sensitivity—Bit error rate (BER).....	335
Receiver sensitivity—Minimum input power.....	337

Sensitivity degradation—Extinction ratio	341
Signal degradation—Jitter	343
Electrical PLL	345
Doped optical fiber amplifiers	347
Analysis of Gain and Noise in Erbium doped fiber	351
Optimizing the EDFA gain for WDM lightwave systems	355
Excited state absorption impact on EDFA performance	359
Ion-ion interaction effects	367
Rayleigh backscattering in EDFA.....	373
Inhomogeneous broadening in EDFAs	379
Power transients in EDFAs	387
Temperature dependence in EDFA	395
Ytterbium-doped fiber amplifiers	401
SPO optimization—System margin	405
SPO optimization—EDFA fiber length	411
EDFA — Basic concepts	413
Booster Amplifier	421
Inline Amplifier.....	425
Preamplifier	429
Pumping requirements	431
Transient Control in EDFAs	435
Amplifier Characteristics	439
Automatic Control Simulation.....	445
Erbium-doped Fiber Laser	453
Reflective Amplifier	459
Split-Band Amplifier.....	465
Dynamic Amplifier Using Ytterbium-Doped Fiber.....	469

Gain Flattening Filter Optimization	473
Amplification of multiple modes in Er-doped multimode fibers	479
S-band amplification using Tm-DFA	485

OptiSystem

Tutorials - Volume 2

Version 13

Table of contents

Introduction

.....	1
-------	----------

Raman amplifiers

100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifier—Average power model	5
Flattening the gain of broadband Raman amplifier with multipump configuration....	13
Optimizing the pump power and frequencies of Raman amplifiers for gain flatness	19
Raman Amplifier - Dynamic Model.....	25

SOA amplifiers

SOA gain saturation—Gaussian pulses	33
SOA gain saturation—Comparison with experimental results	43
SOA gain saturation—Chirped and super Gaussian pulses	47
SOA Gaussian pulse—Gain recovery	55
SOA pulse compression.....	65
SOA as a wavelength converter (FWM).....	75
SOA as a wavelength converter (XGM)	81
SOA In-line amplifier	87
Wideband SOA characterization	97
Wavelength conversion in a wideband SOA	101

Waveguide amplifiers	103
Improved gain in high-concentration Er ³⁺ /Yb ³⁺ waveguide amplifiers	105
Dispersion management	111
Dispersion compensation schemes—a system perspective	113
Compensation of dispersion with Ideal dispersion component	121
Compensation of dispersion with Fiber Bragg Grating component	125
Uniform Fiber Bragg Grating as a filter	131
Compensation of dispersion with OptiGrating	143
Dispersion compensation using subsystems	151
Maximum-likelihood sequence estimation (MLSE) equalizer	157
DFE - Decision-Feedback Equalizer	161
Dispersion compensation using electronic equalization	165
Lightwave systems	167
Lightwave system components	169
Optimizing power and dispersion compensation for nonlinear RZ transmission	179
10 Gb/s single channel transmission in standard mode fibers (SMF)	183
40 Gb/s single channel transmission in standard mode fibers (SMF)	189
Engineering the fiber nonlinearities and dispersion	197
System design — Power budget	201
Time Division Multiplexing (TDM)	203
Broadband optical system based on a Passive Optical Network (BPON)	207
Optical code-division multiple-access system (OCDMA)	209
Free Space Optics (FSO)	211
Coherent Optical Transmission	213
Radio over fiber (RoF)	215
Optical Time Domain Multiplexing (OTDM) Design	217
System Performance Analysis Using Script Automation	223

BER Calculation Using the BER Test Set	229
WDM systems.....	233
Comparison of RZ and NRZ modulation formats for 40 Gb/s systems	235
16 channel WDM system design.....	251
WDM components—Tunable filters	277
WDM components—AWG demultiplexer	279
Broadcast star coupler	283
Optical cross-connects	285
Configurable optical add-drop multiplexer.....	287
Advanced modulation formats.....	289
Conventional duobinary transmitter	303
Modified duobinary transmitter	305
Interferometer characterization	307
Solitons and soliton systems	313
Fundamental and higher order solitons.....	315
Interactions of optical solitons	321
Decay of higher order solitons in the presence of third-order dispersion	327
Decay of higher order solitons in the presence of intrapulse Raman scattering	333
Decay of higher order solitons in the presence of self-steepening	341
Stability of solitons in birefringent optical fibers	347
Orthogonal Raman gain	355
Average soliton regime	361
SOA as in-line amplifier in soliton communication systems	369
Metro systems.....	377
Power level management in optical Metro networks	379
Migrating to 10Gbps in Metro networks	399
Negative dispersion fiber for Metro networks	405

Interchannel crosstalk in Metro networks	413
WDM Ring—Wavelength independent subscriber equipment	417
Digital modulation.....	421
Digital modulation—DPSK	423
Digital modulation—OQPSK	441
Digital modulation—QAM	443
Manchester and PAM Coding/Decoding	445
CATV	447
Using OptiSystem to analyze CATV systems	449
Multimode	461
Differential Mode Delay and Modal Bandwidth	463
Encircled Flux.....	471
Matlab Co-simulation.....	475
OptiSPICE Co-simulation	477
OptiSPICE Netlist Component	479

B. Anexo 2: Principales Características del Communication System Toolbox de Matlab

Communications System Toolbox Product Description

Design and simulate the physical layer of communications systems. Communications System Toolbox™ provides algorithms and apps for the analysis, design, end-to-end simulation, and verification of communications systems in MATLAB® and Simulink®.

Toolbox algorithms, including channel coding, modulation, MIMO, and OFDM, enable you to compose a physical layer model of your system. You can simulate your models to measure performance.

The system toolbox provides constellation and eye diagrams, bit-error-rate, and other analysis tools and scopes for validating your designs. These tools enable you to analyze signals, visualize channel characteristics, and obtain performance metrics such as error vector magnitude (EVM). Channel and RF impairment models and compensation algorithms, including carrier and symbol timing synchronizers, enable you to realistically model your link-level specifications and compensate for the effects of channel degradations.

Using Communications System Toolbox hardware support packages, you can connect your transmitter and receiver models to radio devices and verify your designs with over-the-air testing. The system toolbox supports fixed-point arithmetic and C or HDL code generation.

Algorithms are available as MATLAB functions, System objects, and Simulink blocks.

Key Features

- Algorithms for designing the physical layer of communications systems, including channel coding, modulation, OFDM, MIMO, equalization, and synchronization.
- Analysis tools and measurement scopes, including a bit-error-rate app, constellation diagrams, and eye diagrams.

- Channel models, including AWGN, multipath Rayleigh fading, Rician fading, MIMO multipath fading, and LTE MIMO multipath fading.
- Basic RF impairment models, including nonlinearity, phase noise, thermal noise, and phase and frequency offsets.
- Hardware support packages for connecting waveforms to radio devices and verifying designs with over-the-air testing.
- GPU-enabled algorithms for computationally intensive algorithms such as Turbo, LDPC, and Viterbi decoders
- Support for fixed-point modeling and C and HDL code generation

C. Anexo 3: Índices de refracción de núcleo y manto.

Index of Refraction Values													
Acetone	1.36	Calcite	1.491	Dogsde	1.680	Glass, Crown	1.520	Lead	2.01	Purple	1.840	Strontium Titanate	2.410
Actinolite	1.618	Carbon Dioxide (gas)	1.030449	Doornite	1.593	Glass, Crown, Zinc	1.517	Leucite	1.509	Pyrite	1.810	Strychnin	1.595
Agalmanite	1.550	Carbon Disulfide	1.628	Dumortierite	1.685	Glass, Flint, Dense	1.566	Magnesite	1.515	Pyrope	1.740	Sulphur	1.960
Agate	1.544	Carbon Tetrachloride	1.460	Ebonite	1.665	Glass, Flint, Heavy	1.655	Malachite	1.655	Quartz	1.544	Synthetic Spinel	1.720
Agate, Moss	1.540	Caeserite	1.997	Ebanite	1.600	Glass, Flint, Heavy	1.65548	Mercurianum	1.530	Quartz, Fused	1.45843	Taaffeite	1.720
Air	1.002926	Celsite	1.622	Elaolite	1.532	Glass, Flint, Light	1.58038	Mercury (liq)	1.62	Rhodolite	1.695	Tanzanite	2.240
Alcohol	1.329	Cenozoite	1.804	Emerald	1.576	Glass, Flint, Medium	1.62725	Moctavite	1.290	Rhodolite	1.600	Tanzanite	1.691
Alexandrite	1.745	Ceylanite	1.770	Emerald, Synth Hydro	1.568	Glycerine	1.473	Monstone, Aulularia	1.525	Rhodolite	1.725	Teflon	1.35
Aluminum	1.44	Chalcodanym	1.530	Emerald, Synth Hydro	1.568	Glycerine	0.473	Monstone, Aulularia	1.525	Rock Salt	1.544	Thomsonite	1.530
Amber	1.546	Chalk	1.510	Erxatite	1.663	Gold	0.473	Monstone, Aulularia	1.525	Rubber, Natural	1.5191	Tiger eye	1.544
Amethyst	1.611	Chalysite	1.630	Feldite	1.733	Hinnersgrite	1.559	Nephrite	1.480	Ruby	1.760	Topaz	1.620
Amethyst	1.544	Chlorine (gas)	1.002068	Ethanol	1.36	Ilmenite	1.532	Nephrite	1.600	Rutile	2.62	Topaz, Blue	1.610
Amethyst	2.490	Chlorine (liq)	1.385	Ethyl Alcohol	1.36	Ilmenite	1.532	Nephrite	1.600	Rutile	2.62	Topaz, Blue	1.610
Andalusite	1.641	Chromite	2.4	Eucrase	1.652	Ilmenite	1.000036	Nitrogen (gas)	1.000297	Sandite	1.522	Topaz, Pink	1.620
Anhydrite	1.571	Chrome Red	2.42	Fabulite	2.409	Hannamphite	2.940	Nitrogen (liq)	1.2053	Sapphire	1.760	Topaz, White	1.630
Apatite	1.632	Chrome Yellow	2.31	Feldspar, Adirondack	1.532	Hicabutte	1.614	Nylon	1.53	Scapolite	1.540	Topaz, Yellow	1.620
Appophyllite	1.536	Chromum	2.97	Feldspar, Albite	1.525	Howlite	1.655	Obsidian	1.489	Scapolite, Yellow	1.555	Tourmaline	1.624
Aquamarine	1.577	Chrysoberyl	1.745	Feldspar, Amazonite	1.525	Howlite	1.655	Obsidian	1.489	Scheelite	1.920	Tourmaline	1.624
Argonite	1.530	Chrysocolla	1.500	Feldspar, Labradorite	1.565	Hydrogen (gas)	1.000140	Oxyc	1.670	Scheelite	1.920	Tourmaline	1.624
Argonite	1.00281	Chrysoprase	1.534	Feldspar, Microcline	1.525	Hydrogen (liq)	1.0974	Opal	1.450	Serpentine	2.92	Tugupite	1.496
Asphalt	1.635	Citrine	1.530	Feldspar, Orthoclase	1.533	Ice	1.379	Oxygen (gas)	1.000276	Shell	1.560	Turpentine	1.472
Asphalte	1.574	Clinzoisite	1.724	Feldspar, Orthoclase	1.525	Iodaxene	1.713	Painite	1.221	Silicon	1.330	Turquoise	1.610
Azomite	1.675	Cobalt Blue	1.74	Fluorite	1.56	Iodine Crystal	1.713	Painite	1.221	Silicon	4.24	Ulexite	1.490
Azomite	1.730	Cobalt Green	1.97	Fluorite	1.434	Iolite	1.737	Painite	1.221	Silicon	1.658	Uvarovite	1.870
Barite	1.636	Cobalt Violet	1.71	Formica	1.47	Iron	3.34	Pearl	1.530	Silver	0.18	Variscite	1.550
Barite	1.684	Coltanitic	1.586	Garnet, Almandine	1.760	Irocy	1.548	Periclite	1.740	Sinhalite	1.699	Vivianite	1.590
Bastnaesite	1.757	Copper	1.10	Garnet, Almardite	1.790	Jade, Nephrite	1.51	Peridot	1.654	Sinhalite	1.608	Wairite	1.590
Bauxite	1.501	Copper Oxide	2.705	Garnet, Andradite	1.820	Jadeite	1.610	Peridot	1.525	Sinhalite	1.621	Water (gas)	1.000251
Beryl	1.577	Coel	1.486	Garnet, Demantoid	1.880	Jasper	1.665	Phenakite	1.502	Sodalite	1.483	Water 100°C	1.31819
Beryl	1.553	Coelente	1.540	Garnet, Grossular	1.738	Jet	1.540	Phosgenite	2.117	Sphalerite	1.844	Water 20°C	1.33335
Brazilianite	1.603	Corundum	1.766	Garnet, Hessonite	1.745	Komarovite	1.650	Phosgenite	2.117	Sphalerite	2.368	Water 35°C	1.33157
Bromine (l q)	1.661	Coconite	2.310	Garnet, Rhodolite	1.760	Kunzite	1.665	Plastic	1.460	Sphene	1.885	Willemite	1.690
Bronze	1.18	Crystal	2.00	Garnet, Spessartite	1.810	Kyanite	1.655	Plastic	1.30	Spinel	1.712	Willemite	1.532
Brownite	1.567	Curite	2.830	Gaulyssite	1.517	Lapis Gem	1.715	Prase	1.55	Spocumone	1.650	Willemite	2.300
Calcite	1.486	Danburite	1.633	Glass	1.51714	Lapis Lazuli	1.51	Prehnite	1.540	Staurite	1.739	Zincite	2.010
Calcspur	1.486	Diamond	2.417	Glass, Albite	1.489	Lazulite	1.615	Proustite	2.790	Stichtite	2.50	Zincite, Low	1.800
				Glass, Albite	1.489	Lazulite	1.615	Proustite	2.790	Stichtite	1.520	Zincite, Cubic	2.170

Tabla C.1 Valores de Índices de refracción de materiales [1].

[1] Harris William, Craig Freudenrich, "How Light Works", How Stuff works, Science <http://science.howstuffworks.com/light12.htm>

D. Anexo 4: Coeficientes de dispersión cromática

Valores de dispersión para fibras monomodo y fibras de compensación de dispersión

Trans Fiber	Name	Dispersión @1550nm (ps/nm/km)	Dispersión slope @1550nm (ps/nm²/km)	Kappa @1550nm (nm)
L	Low Dispersion NZDSF	3.3	0.0845	39
S	Standar Single Mode Fiber	16.6	0.0575	289
M	Moderate Dispersion NZDSF	8.1	0.0535	152

Tabla D.1 Valores de dispersión cromática para fibras monomodo [1]

Dispersion compensating fiber	Dispersion @1550nm (ps/nm/km)	Dispersion slope @1550nm (ps/nm²/km)	Kappa @1550nm (nm)
I	-155	-0.409	38
II	-92.6	-0.3214	288
III	-106.3	-1.6994	152

Tabla D.2 Valores de dispersión cromática para fibras compensadoras [1]

[1] George E Berkey, "Dispersion correction fiber, transmission system and method of operating same", Número de publicación WO2005083482 A1, septiembre 2005.

E. Anexo 5: Principales filtros pasa bajo

Existen tres tipos principales de filtros paso bajo, siendo la pendiente y la respuesta a las frecuencias inferiores a la de corte las principales características de cada uno de ellos.

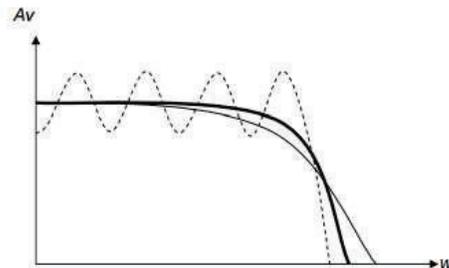


Figura 1.5

Gráfica comparativas de tres tipos de características de respuesta de filtros.

— Butterworth
 -·- Bessel
 Chebyshev

- El filtro Butterworth presenta una respuesta de frecuencia muy plana y es el más utilizado en sistemas PCM. Ofrece una atenuación de 3dB a la frecuencia de corte. Su tiempo de respuesta es bastante bueno, aunque no son adecuados para utilizarlos en altas frecuencias.
- El filtro Chebyshev produce una mayor atenuación por octava, aunque su ancho de banda no es totalmente plano. Por esta razón, la atenuación ofrecida a la frecuencia de corte varía en función del orden del filtro. Por ejemplo, si el orden del filtro es impar, la atenuación a la frecuencia de corte es de 3dB; mientras que si el orden es par, la atenuación será de 0 dB. Para éste tipo de filtros, la frecuencia de corte se define como la frecuencia a la cual la respuesta del filtro desciende por debajo del rizado que se produce en la respuesta del filtro. El tiempo de respuesta de este filtro es bastante bajo y la distorsión es superior a la del resto de los filtros.
- El filtro Bessel ofrece una atenuación a la frecuencia de corte de 3 dB, independientemente del orden del filtro. La distorsión introducida es mínima, aunque la pendiente de atenuación es la más pobre.

[1] Muñoz Mayén Juan Bosco, "Transmisión/Recepción multiplexada por fibra óptica sincronizada por el microcontrolador intel 803 1". Universidad Autonoma Metropolitana, 1995.

F. Anexo 6: Datasheet transmisor óptico



CVC INTERNATIONAL LLC

1310nm Laser Diode

Part No.:LD131T10

Feature

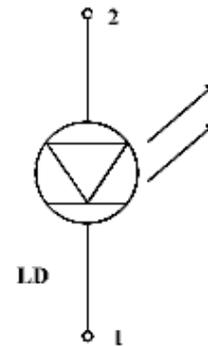
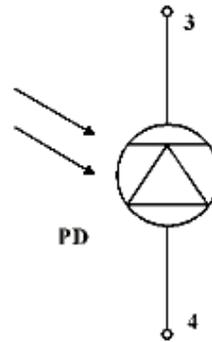
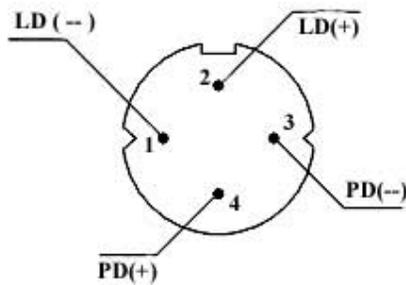
- Emission Wavelength 1310nm • Wide Operating Temperature
- High Power • High Reliable, Long Lifetime • Lens Output
- Low Threshold, Low Operation Current

Applications

- Optical Communication
- Local Area Communication



Bottom view



Absolute Maximum Ratings(Tc=25°C)

Output Power	10mW
LD Reverse Voltage	2V
PD Reverse Voltage	10V
PD Forward Current	1.0mA
Operation Temperature	-40~+85°C
Storage Temperature	-40~+100°C

Main Specifications (Tc=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	MIN.	Typ.	MAX.	UNIT	TESTING CONDITIONS
Output Power	P _o	-	5	-	mW	CW, King free
Central Wavelength	λ _c	1280	1310	1340	nm	CW, P _o =5mW

Threshold Current	I_{th}	-	8	20	mA	
Forward Voltage	V_f	1.0	1.2	1.6	V	CW, $P_o = 5mW$
PD Monitor Current	I_m	100	300		μA	CW, $P_o = 5mW$
PD Dark Current	I_d	-	10	100	nA	$V(PD) = 5V$
Spectral Width	$\Delta \lambda$	-	1.5	4.0	nm	CW, $P_o = 5mW$
Beam Divergence	Θ_{\perp}	-	40	-	deg	CW, $P_o = 5mW$, FWHM
	$\Theta_{//}$	-	20	-		
Rise Time	t_r	-	0.3	0.7	ns	$P_o = 5mW$, 10%~90%
Fall Time	t_f	-	0.3	0.7	ns	$P_o = 5mW$, 90%~10%

[1] http://www.datasheetcatalog.com/info_redirect/datasheets2/25/257242_1.pdf.shtml

G. Anexo 7: Datasheet Receptor óptico



Fiber Optics

Ternary PIN Photodiode

SRD00214x
SRD00215x

Technical Data

All data refer to the full operating temperature range unless otherwise specified.

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Module				
Operating temperature range at case	T_C	-40	85	°C
Storage temperature range	T_{stg}	-40	85	
Soldering temperature ($t_{max} = 10$ s, 2 mm distance from bottom edge of case)	T_S		260	

Receiver Diode

Reverse Voltage	V_R		20	V
Forward Current	I_F		10	mA
Optical power into the optical port	P_{port}		1	mW

Receiver Diode Electro-Optical Characteristics

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Spectral sensitivity $V_R = -2$ V, $P_{opt} = 1$ μ W	S_{1310nm}	0.8	0.9		A/W
	S_{1550nm}				
Change in Spectral Sensitivity in	ΔS			0.2	%/K
Operating Temperature Range					
Dark current $V_R = 2$ V, $P_{opt} = 0$ mW	$I_D 25^\circ C$			5	nA
	$I_D 85^\circ C$			50	

Total Capacitance $V_R = 3\text{ V}, f = 1\text{ MHz}, V_{RF} = 30\text{ mV}$	C		0.8	1	pF
Rise and fall time (10%...90%) $V_R = 5\text{ V},$ $P_{opt} = (0.1...1)\text{ mW}, 50\ \Omega$	t_r, t_f		200	300	ps
Cut Off Frequency $\lambda = 1310\text{ nm}, V_R = 5\text{ V}, 50\ \Omega$	f_{3dB}	1			GHz
Return Loss, $\lambda = 1310\text{ nm}$	RL			-27	dB

End of Life Time Characteristics

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Detector Dark Current, $V_R = 2\text{ V}, T = T_{max}$	I_R		400	nA

[1] "Ternary PIN Photodiode", Edition 2001, D-81541 Munchen, Germani, © Infineon Technologies AG 2002. All Rights Reserved. https://ab-div-bdi-bl-blm.web.cern.ch/ab-div-bdi-bl-blm/Acquisition_system/optical_links/Receivers/SRD00214_215.pdf