

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

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

HÉCTOR FABIÁN COLIMBA ESCOLA
hector.colimba@epn.edu.ec

DIRECTOR: MSc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ
maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, marzo 2018

DECLARACIÓN

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

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

Héctor Fabián Colimba Escola

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Héctor Fabián Colimba Escola, bajo mi supervisión.

MSc. María Soledad Jiménez Jiménez
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios por todo lo que he recibido y por todo lo que aún está por llegar.

A mi madre, por darme la dicha de vivir y a mi padre, por ser el promotor de la mayor proeza de mi vida, educarme en la Escuela Politécnica Nacional.

A mis hermanos Edwin y Sandrita, quienes han sido ejemplo de lucha y constancia.

Y a la Ingeniera María Soledad Jiménez, por su enorme paciencia y porque su profesionalismo me incentivó a concluir este proyecto de titulación.

DEDICATORIA

Quiero ofrecer este proyecto de titulación como testimonio de amor, grandeza e infinita misericordia a Dios, porque me ha guiado y me ha respaldado para afrontar las pruebas que he debido superar, llevándome por el camino correcto y enseñándome a comprender cada uno de sus propósitos.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XXII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XXV
RESUMEN	XXVI
PRESENTACIÓN.....	XXVII
CAPÍTULO 1	
LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	1
1.1 PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA ÓPTICA	1
1.1.1 El espectro electromagnético	1
1.1.2 Fibra óptica.....	2
1.1.3 Leyes de propagación de la luz.....	3
1.2 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA.....	7
1.2.1 Modos de propagación	7
1.2.2 Perfil de índice de refracción	7
1.2.3 Fibra multimodo.....	8
1.2.4 Fibra monomodo	8
1.3 TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA.....	9
1.3.1 Atenuación	9
1.3.2 Pérdidas intrínsecas	11
1.3.3 Pérdidas extrínsecas.....	12
1.3.4 Dispersión en una fibra óptica	13
1.4 ESTÁNDARES UIT PARA FIBRAS ÓPTICAS	17
1.4.1 G.651.1: Características de los cables de fibra óptica multimodo de índice gradual de 50/125 μm para redes de acceso óptico	17
1.4.2 G.652: Características de las fibras y cables ópticos monomodo	17
1.4.3 G.653: Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada.....	18

1.4.4	G.655: Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula	19
1.4.5	G.657: Características de las fibras y cables ópticos monomodo insensibles a la pérdida por flexión	20
1.5	CABLES PARA FIBRA ÓPTICA.....	21
1.5.1	Funciones y propiedades	21
1.5.2	Composición de un cable para fibra óptica	22
1.5.3	Tipos de cables para fibra óptica.....	26
1.5.4	Código de colores de cables de fibra óptica.....	31
1.6	TÉCNICAS DE CONEXIÓN Y EMPALMES ÓPTICOS	32
1.6.1	Conectores.....	33
1.6.2	Empalmes ópticos	39
1.7	DISPOSITIVOS ÓPTICOS	43
1.7.1	Dispositivos ópticos activos.....	44
1.7.2	Dispositivos ópticos pasivos.....	52
1.8	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA	55
1.8.1	Estructura básica de un enlace de fibra óptica.....	56
1.8.2	Diseño de un enlace de fibra óptica	56
1.8.3	Tipos de enlaces de fibra óptica.....	57
1.9	NORMAS DE SEGURIDAD EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	61
1.9.1	Obligaciones.....	61
1.9.2	Precauciones que deben considerarse antes de empezar a trabajar en el laboratorio de comunicaciones ópticas.....	62
1.9.3	Normas para el correcto desempeño de las actividades en el laboratorio de comunicaciones ópticas	63

CAPÍTULO 2

	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y SELECCIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS A UTILIZARSE EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	65
2.1	INVENTARIO DE LOS RECURSOS DISPONIBLES EN LA FIEE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	66
2.1.1	Equipos para el laboratorio de comunicaciones ópticas.....	66

2.1.2	Dispositivos, componentes y herramientas	85
2.1.3	Accesorios varios	97
2.2	ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS QUE SE REQUIEREN EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	99
2.2.1	Términos de referencia (TDR) para la adquisición de equipos, herramientas o accesorios para complementar la infraestructura del laboratorio de comunicaciones ópticas	100

CAPÍTULO 3

	SOFTWARE PARA DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS	108
3.1	SIMULADORES DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS	108
3.1.1	<i>Rsoft OptSim</i> TM	109
3.1.2	<i>VPItransmissionMaker</i> TM	111
3.1.3	<i>Simulink</i> ® de MATLAB®	113
3.1.4	<i>OptiSystem</i>	115
3.2	COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SIMULADOR	117
3.3	ENTORNO DE TRABAJO EN <i>OPTISYSTEM</i>	119
3.3.1	Interfaz gráfica.....	119
3.3.2	Librerías de componentes de <i>Optisystem</i>	119
3.3.3	Componentes que simulan equipos de medición y análisis	132
3.3.4	Componentes para simular redes ópticas	134
3.4	SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS CON <i>OPTISYSTEM</i>	140
3.4.1	Diseño del transmisor.....	142
3.4.2	Diseño del <i>feeder</i>	145
3.4.3	Diseño del receptor WDM	146

CAPÍTULO 4

	PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	149
4.1	PRÁCTICA # 1.....	149
4.1.1	Tema: Inducción al laboratorio de comunicaciones ópticas	149
4.1.2	Objetivos	149
4.1.3	Equipos y materiales	150

4.1.4	Marco teórico.....	150
4.1.5	Procedimiento práctico.....	159
4.1.6	Informe	166
4.2	PRÁCTICA # 2.....	166
4.2.1	Tema: Simulación de sistemas de comunicaciones ópticos.....	166
4.2.2	Objetivos	166
4.2.3	Equipos y materiales.....	166
4.2.4	Marco teórico.....	167
4.2.5	Procedimiento experimental.....	170
4.2.6	Informe	178
4.3	PRÁCTICA # 3.....	178
4.3.1	Tema: El OTDR (<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>).....	178
4.3.2	Objetivos	178
4.3.3	Equipos y materiales.....	178
4.3.4	Marco teórico.....	179
4.3.5	Procedimiento experimental.....	183
4.3.6	Informe	194
4.4	PRÁCTICA # 4.....	195
4.4.1	Tema: Empalmes por fusión y conectorización de fibras ópticas	195
4.4.2	Objetivos	195
4.4.3	Equipos y materiales.....	195
4.4.4	Marco teórico.....	195
4.4.5	Procedimiento práctico.....	198
4.4.6	Informe	208
4.5	PRÁCTICA # 5.....	209
4.5.1	Tema: Medición de potencias ópticas	209
4.5.2	Objetivos	209
4.5.3	Equipos y materiales.....	209
4.5.4	Marco teórico.....	209
4.5.5	Procedimiento práctico.....	214
4.5.6	Informe	220
4.6	PRÁCTICA # 6.....	221

4.6.1	Tema: Analizador de espectros ópticos OSA (<i>Optical Spectrum Analyzer</i>)	221
4.6.2	Objetivos	221
4.6.3	Equipos y materiales	221
4.6.4	Marco teórico.....	221
4.6.5	Procedimiento práctico	224
4.6.6	Informe	233
4.7	PRÁCTICA # 7.....	234
4.7.1	Tema: Caracterización de redes de acceso con tecnología GPON (<i>Gigabit – capable Passive Optical Network</i>).	234
4.7.2	Objetivos	234
4.7.3	Equipos y materiales	234
4.7.4	Marco teórico.....	234
4.7.5	Procedimiento práctico	237
4.7.6	Informe	246
4.8	PRÁCTICA # 8.....	247
4.8.1	Tema: Multiplexación en redes ópticas	247
4.8.2	Objetivos	247
4.8.3	Equipos y materiales	247
4.8.4	Marco teórico.....	247
4.8.5	Procedimiento práctico	250
4.8.6	Informe	256
CAPÍTULO 5		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		257
5.1	CONCLUSIONES	257
5.2	RECOMENDACIONES.....	260
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		262
ANEXOS		271
ANEXO A: MANUAL DE USUARIO DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO OSA YOKOGAWA Q6370D (EN FORMATO DIGITAL).		272
ANEXO B: FICHA TÉCNICA DEL OTDR <i>SUNRISE TELECOM SUNSET</i> MTT, MÓDULO SSM-TT-35 (EN FORMATO DIGITAL).		272

ANEXO C: MANUAL DE USUARIO DEL OTDR YOKOGAWA Q7280 (EN FORMATO DIGITAL).....	272
ANEXO D: MANUAL DE USUARIO DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM <i>NEWPORT</i> 1916-C (EN FORMATO DIGITAL).	272
ANEXO E: MANUAL DE USUARIO DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM YOKOGAWA AQ2180 (EN FORMATO DIGITAL).	272
ANEXO F: FICHA TÉCNICA DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM JDSU OLP-55 (EN FORMATO DIGITAL).....	272
ANEXO G: FICHA TÉCNICA DE LA EMPALMADORA POR FUSIÓN DVP-730 Y MANUAL DE INSTRUCCIONES DE LA CORTADORA DE PRECISIÓN DVP_105 (EN FORMATO DIGITAL).....	272
ANEXO H: FICHA TÉCNICA DE LA EMPALMADORA POR FUSIÓN <i>FUJIKURA</i> 12S Y DE LA CORTADORA DE PRECISIÓN <i>FUJIKURA</i> CT-30E (EN FORMATO DIGITAL).....	272
ANEXO I: MANUAL DE USUARIO DE LA PLATAFORMA MULTIFUNCIÓN OSICS 8-CHANNEL MAINFRAME Y DE LOS MÓDULOS OSICS-DFB, OSICS-TLS-50 Y OSICS-TLS-AG (EN FORMATO DIGITAL).	272
ANEXO J: FICHA TÉCNICA DE LA FUENTE DE LUZ AFL OLS4 (EN FORMATO DIGITAL).	272
ANEXO K: GUÍA DE USUARIO DE LA FUENTE DE LUZ AFL OLS7-3 (EN FORMATO DIGITAL).....	273
ANEXO L: FICHA TÉCNICA DE LA Sonda MICROSCÓPICA DE VIDEO DIGITAL PARA INSPECCIÓN DE CONECTORES <i>LINGHTEL</i> DI-1000 (EN FORMATO DIGITAL).....	273
ANEXO M: FICHA TÉCNICA DEL KIT DE SIMULACIÓN DE REDES PON FTTX-00-2000 (EN FORMATO DIGITAL).....	273
ANEXO N: FICHA TÉCNICA DEL KIT PARA ENTRENAMIENTO ACADÉMICO TELNET - GPON_ ACADEMIC_ KIT, DE LA OLT GPON <i>TELNET SMARTOLT_240</i> Y DE LA ONT GPON <i>TELNET WAVEACCESS_4022</i> (EN FORMATO DIGITAL).....	273
ANEXO O: PROFORMAS DE LAS LICENCIAS PARA EL USO DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN VPI SYSTEM Y OPTISYSTEM (EN FORMATO DIGITAL).....	273

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Espectro electromagnético.....	2
Figura 1.2 Estructura de la fibra óptica (los valores de diámetro son típicos)	3
Figura 1.3 Ley de Snell o de refracción.....	4
Figura 1.4 Ángulo crítico	5
Figura 1.5 Reflexión total interna ($n_1 > n_2$).....	5
Figura 1.6 Ángulo de aceptación y Apertura Numérica ($n_1 > n_2$).....	6
Figura 1.7 Cono de aceptación	6
Figura 1.8 Modos de propagación.....	7
Figura 1.9 Perfil de índice de refracción: a) escalonado en fibra multimodo, b) gradual en fibra multimodo y c) escalonado en fibra monomodo	8
Figura 1.10 Ventanas de transmisión de la fibra óptica.....	10
Figura 1.11 Corrección de atenuación en Banda E.....	10
Figura 1.12 Atenuación por pérdidas de absorción y dispersión de Rayleigh	12
Figura 1.13 a) Macro curvatura y b) Micro curvatura.....	13
Figura 1.14 Dispersión modal.....	14
Figura 1.15 Dispersión del material.....	15
Figura 1.16 Dispersión de guía de onda	15
Figura 1.17 Dispersión cromática y sus componentes	15
Figura 1.18 Dispersión por modo de polarización	16
Figura 1.19 Composición del cable para fibra óptica.....	23
Figura 1.20 Cable: a) monofibra y b) multifibra	23
Figura 1.21 Cable con protección secundaria ajustada en: a) monofibra y b) multifibra.....	24
Figura 1.22 Cable de fibra óptica con protección secundaria holgada.....	24
Figura 1.23 Cable de fibra óptica con elementos de refuerzo: a) varilla central de fibra de vidrio y b) varilla central metálica	25
Figura 1.24 Cable de fibra óptica con chaqueta para interiores	25
Figura 1.25 Cable con chaqueta para exteriores: a) en instalaciones subterráneas y b) en instalaciones aéreas.....	26
Figura 1.26 Cable de fibra óptica con chaqueta para exteriores e interiores	26

Figura 1.27 Cable <i>zipcord</i> a) simplex y b) duplex.....	27
Figura 1.28 Cable de distribución.....	27
Figura 1.29 Cable <i>break out</i>	28
Figura 1.30 Cable tipo cinta.....	28
Figura 1.31 Cable ADSS	28
Figura 1.32 Herrajes a) de sujeción y b) de paso.....	29
Figura 1.33 Cable a) OPGW, b) con un solo tubo portador de fibra (<i>Central loose tube</i>) y c) OPGW con varios tubos portadores de fibras (<i>Multi loose tube</i>).....	29
Figura 1.34 Cable figura 8.....	30
Figura 1.35 Cable blindado	30
Figura 1.36 Estructura de un cable submarino.....	31
Figura 1.37 Partes de un conector óptico.....	33
Figura 1.38 Tipos de pulido de férula	33
Figura 1.39 Pérdidas por: a) desplazamiento axial, b) desplazamiento angular, c) separación de fibras d) cortes incorrectos y e) diferencia de tamaño de núcleos.....	40
Figura 1.40 Estructura del diodo LED	45
Figura 1.41 Estructura y espectro óptico del diodo láser con cavidad <i>Fabry - Perot</i>	46
Figura 1.42 Estructura y espectro óptico del diodo láser con cavidad DFB	47
Figura 1.43 Estructura del diodo láser con cavidad externa.....	47
Figura 1.44 Estructura del diodo láser VCSEL.....	48
Figura 1.45 Estructura de un fotodiodo PIN	49
Figura 1.46 Estructura de un fotodiodo APD.....	49
Figura 1.47 Esquema de un amplificador óptico semiconductor	50
Figura 1.48 Amplificador EDFA.....	51
Figura 1.49 Amplificador RAMAN utilizando bombeo hacia atrás	51
Figura 1.50 Estructura de un <i>Splitter</i> tipo PLC	53
Figura 1.51 Estructura de un <i>Splitter</i> tipo FBT	54
Figura 1.52 Acoplador óptico (<i>combiner</i>) 3x1.....	54
Figura 1.53 MUX/DEMUX óptico.....	55
Figura 1.54 a) atenuador fijo y b) atenuador variable.....	55

Figura 1.55 Esquema básico de un sistema de comunicaciones óptico	56
Figura 1.56 Esquema de un enlace pasivo simple	58
Figura 1.57 Esquema de una red PON tipo árbol con un nivel de splitteo	59
Figura 1.58 Esquema de una red PON tipo árbol con dos niveles de splitteo.....	59
Figura 1.59 Esquema de una red PON tipo bus.....	59
Figura 1.60 Esquema de una red PON tipo anillo	60
Figura 1.61 Esquema de una red WDM.....	60
Figura 1.62 Esquema de una red WDM – PON	61

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D	67
Figura 2.2 MICRO OTDR <i>MODULE</i> SSMTT-35.....	70
Figura 2.3 OTDR YOKOGAWA AQ7283.....	71
Figura 2.4 Íconos utilizados en modo de operación PON	72
Figura 2.5 Medidor de potencia óptica <i>Newport</i> 1916-C	73
Figura 2.6 Medidor de potencia óptica YOKOGAWA – AQ2180	74
Figura 2.7 Medidor de potencia óptica JDSU OLP-55.....	75
Figura 2.8 Fusionadora DVP–730 y cortadora DVP-105.....	76
Figura 2.9 Fusionadora <i>Fujikura</i> 12s y cortadora de precisión CT-30.....	77
Figura 2.10 Portador de fibras <i>Fujikura</i> (250 μm y 900 μm).....	78
Figura 2.11 Plataforma Multifunción OSICS a) vista frontal y b) vista posterior ...	80
Figura 2.12 Módulos OSICS TLS, generador WDM en banda L y banda C.....	80
Figura 2.13 Módulos OSICS DFB de 1610 nm, 1625 nm y 1650 nm.	82
Figura 2.14 Fuente de luz NOYES OLS4	83
Figura 2.15 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH.....	84
Figura 2.16 Sonda microscópica de video Lightel DI-100	86
Figura 2.17 Localizador visual de fallas	86
Figura 2.18 Atenuador variable FIS F1-0031-LBR	88
Figura 2.19 Atenuador variable <i>Kingfisher</i> KI 7013B.....	88
Figura 2.20 Atenuadores fijos JFOPT FC, SC, LC y ST.....	89
Figura 2.21 Splitter óptico	90
Figura 2.22 MUX/DEMUX WDM 1X2	91
Figura 2.23 Kit para simulación de redes PON (FTTx).....	92

Figura 2.24 a) Simulador de redes PON (FTTx) y b) bobinas de 200 m, 300 m, 500 m y 1000 m de fibra óptica	92
Figura 2.25 Kit de herramientas para conectorización <i>INTELLINET</i>	93
Figura 2.26 Kit de herramientas JFOPT JF-100A	94
Figura 2.27 Limpiador de férulas en conectores y adaptadores.....	96
Figura 2.28 Limpiador de conectores AFL	96

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Interfaz gráfica de <i>OptSim</i> TM	109
Figura 3.2 Interfaz gráfica de <i>VPItransmissionMaker</i> TM	112
Figura 3.3 Interfaz gráfica de <i>Simulink</i> [®]	114
Figura 3.4 Simulación con <i>Optical fibre Toolbox</i> de <i>Simulink</i> [®]	114
Figura 3.5 Interfaz gráfica de <i>OptiSystem</i>	116
Figura 3.6 Interfaz principal de <i>OptiSystem</i>	119
Figura 3.7 Ejemplo de sistema construido en el área de trabajo.....	120
Figura 3.8 Librería de visualizadores en <i>OptiSystem</i>	121
Figura 3.9 Librería de transmisores en <i>OptiSystem</i> . Parte 1.....	122
Figura 3.10 Librería de transmisores en <i>OptiSystem</i> . Parte 2.....	123
Figura 3.11 Librería de multiplexores en <i>OptiSystem</i>	123
Figura 3.12 Librería de fibra óptica en <i>OptiSystem</i>	124
Figura 3.13 Librería de componentes que simulan amplificadores en <i>OptiSystem</i>	124
Figura 3.14 Librería de componentes que simulan filtros en <i>OptiSystem</i>	125
Figura 3.15 Librería de componentes que simulan elementos pasivos. Parte 1	126
Figura 3.16 Librería de componentes que simulan elementos pasivos. Parte 2	127
Figura 3.17 Librería de elementos de red en <i>OptiSystem</i>	127
Figura 3.18 Librería de óptica en el espacio libre.....	127
Figura 3.19 Librería de componentes que simulan receptores en <i>OptiSystem</i> ..	128
Figura 3.20 Librería de herramientas en <i>OptiSystem</i>	128
Figura 3.21 Librería de componentes para procesamiento de señales en <i>OptiSystem</i>	129
Figura 3.22 Librería de componentes de MATLAB en <i>OptiSystem</i>	130
Figura 3.23 Herramientas <i>Optiwave</i> en <i>OptiSystem</i>	130

Figura 3.24 Librería de componentes para cosimulación EDA en <i>OptiSystem</i> ..	130
Figura 3.25 Librería de componentes de acceso por cable en <i>OptiSystem</i>	131
Figura 3.26 Medidor de potencia óptica en <i>OptiSystem</i>	132
Figura 3.27 Analizador de espectro óptico en <i>OptiSystem</i>	132
Figura 3.28 Osciloscopio eléctrico <i>OptiSystem</i>	132
Figura 3.29 Analizador de espectro eléctrico en <i>OptiSystem</i>	133
Figura 3.30 Analizador del diagrama del ojo en <i>OptiSystem</i>	133
Figura 3.31 Analizador de BER en <i>OptiSystem</i>	134
Figura 3.32 Analizador WDM en <i>OptiSystem</i>	134
Figura 3.33 Generador de secuencia aleatoria de bits.....	135
Figura 3.34 Generador de pulsos NRZ	135
Figura 3.35 Generador de pulsos RZ	135
Figura 3.36 Generador de láser de onda continua	136
Figura 3.37 Fuente de luz LED.....	136
Figura 3.38 Generador láser directamente modulado	136
Figura 3.39 Modulador de <i>Mach-Zhender</i>	137
Figura 3.40 Componente que simula una fibra óptica monomodo	137
Figura 3.41 Componente que simula una fibra óptica multimodo.....	137
Figura 3.42 Componente que simula un amplificador de fibra dopada de erbio	138
Figura 3.43 Componente que simula un atenuador óptico	138
Figura 3.44 Componente que simula un splitter	138
Figura 3.45 Componente que simula un combinador óptico	139
Figura 3.46 Componente que simula un fotodetector PIN.....	139
Figura 3.47 Componente que simula un fotodetector APD	139
Figura 3.48 Componente que simula un multiplexor WDM	140
Figura 3.49 Componente que simula un demultiplexor WDM	140
Figura 3.50 Sistema de comunicación óptica con tecnología WDM – PON	141
Figura 3.51 Transmisor de una señal óptica	143
Figura 3.52 Valor de potencia de la señal óptica a) de entrada y b) modulada..	143
Figura 3.53 a) secuencia de bits y b) espectro de la señal óptica modulada.	144
Figura 3.54 Potencia de la señal WDM en el puerto de salida del MUX	144
Figura 3.55 Espectro de la señal WDM.....	144
Figura 3.56 Análisis de la señal WDM en el puerto de salida del MUX.	145

Figura 3.57 Cuadro de configuración de parámetros de la fibra óptica	145
Figura 3.58 Potencia óptica medida en el extremo final de la fibra óptica.....	145
Figura 3.59 Espectro de la señal obtenido en el extremo final de la fibra óptica.	146
Figura 3.60 Análisis de la señal WDM en el extremo final de la fibra óptica.	146
Figura 3.61 Espectro de la señal en el puerto de salida “1” del DEMUX.....	146
Figura 3.62 Potencia óptica medida en el puerto de salida “1” del DEMUX.	147
Figura 3.63 Secuencia de bits recuperada en el receptor.	147
Figura 3.64 Potencia de la señal recibida.	147
Figura 3.65 Diagrama del ojo y estimación del BER en el canal 1.....	148

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D	153
Figura 4.2 OTDR YOKOGAWA AQ7283.....	153
Figura 4.3 Medidor de potencia óptica (OPM) YOKOGAWA – AQ2180	154
Figura 4.4 Fusionadora <i>Fujikura</i> 12s y cortadora de precisión CT-30.....	154
Figura 4.5 Plataforma multifunción OSICS a) vista frontal y b) vista posterior ...	155
Figura 4.6 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH.....	156
Figura 4.7 Sonda microscópica de video <i>Lightel</i> DI-100	156
Figura 4.8 Localizador visual de fallas	157
Figura 4.9 Kit para simulación de redes PON (FTTx).....	157
Figura 4.10 a) Simulador de redes PON (FTTx) y b) bobinas de 200 m, 300 m, 500 m y 1000 m de fibra óptica	158
Figura 4.11 Kit de herramientas para trabajos con fibra óptica	158
Figura 4.12 Herramientas utilizadas para preparar un cable de fibra óptica.	160
Figura 4.13 Preparación de cable de fibra óptica para exteriores.	161
Figura 4.14 Retiro de protección secundaria (buffer) y limpieza de gel.....	161
Figura 4.15 Preparación de cable de fibra óptica para interiores a) corte de protección externa y b) corte de elementos de refuerzo.	162
Figura 4.16 Retiro de protección primaria de fibra óptica a) cable de exteriores y b) cable de interiores.	162
Figura 4.17 Limpiador para conectores de fibra óptica a) AFL y b) <i>one click</i>	163
Figura 4.18 Sonda microscópica de video <i>Lightel</i> DI-100	164
Figura 4.19 Examinando el conector SC/UPC con la sonda microscópica	164

Figura 4.20 Imagen de una férula contaminada	165
Figura 4.21 Imagen de la férula luego de la limpieza	165
Figura 4.22 Interfaz gráfica de <i>OptiSystem</i>	168
Figura 4.23 Ventana principal de <i>OptiSystem</i>	169
Figura 4.24 Sistema de comunicación óptica con tecnología WDM – PON	171
Figura 4.25 Creación de un nuevo proyecto en <i>OptiSystem</i>	172
Figura 4.26 Transmisor de una señal óptica en <i>OptiSystem</i>	173
Figura 4.27 Esquema de funcionamiento del OTDR	180
Figura 4.28 Traza reflectométrica.....	181
Figura 4.29 Íconos utilizados en modo PON	182
Figura 4.30 OTDR YOKOGAWA AQ7283.....	183
Figura 4.31 Conexión para evaluar un tramo de fibra óptica de 4000 m.....	183
Figura 4.32 Configuración del OTDR en modo “Simple”	184
Figura 4.33 Conexión de dos tramos de fibra óptica, uno de 4000 m (que se incluye en el simulador PON) y otro de 500 m.	186
Figura 4.34 Configuración del OTDR en modo “Detalle”	187
Figura 4.35 Configuración del OTDR en modo “PON”	188
Figura 4.36 Red formada por dos tramos de FO (300 m y 200 m) unidos con adaptadores SC/APC - SC/APC.....	188
Figura 4.37 Red de FO formada por un tramo de 4000 m (incluido en el simulador PON), un <i>patchcord</i> SC/APC – SC/APC, 1 splitter de 1x2 (incluido en el simulador PON) y un tramo de 300 m de fibra óptica.....	190
Figura 4.38 Inspección de conector SC/UPC	191
Figura 4.39 Pantalla de inicio del OTDR.	192
Figura 4.40 Vista de a) férula contaminada, b) férula luego de limpieza en seco y c) férula después de limpieza húmeda.	192
Figura 4.41 a) Pantalla de inicio del OTDR, b) Interfaz para operar la fuente de luz visible.	193
Figura 4.42 Conexión de pigtail de prueba en el puerto de salida de la fuente de luz visible (diámetro de férula típico de 2.5 mm).....	193
Figura 4.43 Prueba con luz visible de un pigtail que incluye una fusión.....	194
Figura 4.44 Prueba del radio de curvatura con luz visible	194
Figura 4.45 Fusionadora <i>Fujikura</i> 12s y cortadora de precisión CT-30.....	196

Figura 4.46 Portador de fibras Fujikura (250 μm y 900 μm).....	197
Figura 4.47 Partes de un conector óptico.....	197
Figura 4.48 a) Estructura interna del conector prepulido y b) componentes del conector prepulido.....	198
Figura 4.49 Herramientas para preparar un cable de fibra óptica: tijeras para kevlar, pelador de revestimientos y buffer, alicate de corte y navaja multiuso.....	199
Figura 4.50 Paño impregnado con sustancia para remover gel, paño seco anti pelusa y alcohol isopropílico.....	199
Figura 4.51 Fibra número uno (hilo azul del buffer azul) y pigtail.....	199
Figura 4.52 a) corte de chaqueta utilizando hilos de rasgado, b) retiro de kevlar y cinta de polietileno, c) retiro de cintas de sujeción, d) destrenzado, e) corte de elemento de refuerzo, f) y g) retiro de buffer y h) limpieza con sustancia quita gel.....	201
Figura 4.53 a) colocación de manguito termo contraíble y b) retiro de revestimiento primario.....	201
Figura 4.54 a) retiro de la protección primaria gruesa y b) retiro de la protección primaria fina.....	202
Figura 4.55 a) Colocación de la fibra en el dispositivo portador y b) limpieza de la fibra desnuda.....	202
Figura 4.56 a) activación de mecanismo de corte, b) colocación de porta fibra en la cortadora y c) ejecución de corte de fibra.....	203
Figura 4.57 a) colocación de porta fibras en la fusionadora y b) alineación y enfrentamiento de las fibras.....	203
Figura 4.58 Fusión de las fibras ópticas.....	204
Figura 4.59 Evaluación de pérdidas en el empalme.....	204
Figura 4.60 a) Ubicación del manguito en la zona del empalme, b) inicio del calentamiento del manguito y c) colocación del tubito en la ranura de enfriamiento.....	205
Figura 4.61 Conectorización de un pigtail.....	205
Figura 4.62 Colocación de la bota y dispositivo de fijación con rosca.....	206
Figura 4.63 Retiro de recubrimientos de la fibra óptica.....	206
Figura 4.64 a) fibra con tubillo en porta fibra de 900 μm y b) corte de fibra.....	206

Figura 4.65 a) fusión de pigtail con tramo de fibra incrustada en la férula y b) colocación del tubillo de protección.....	207
Figura 4.66 a) fijación de bota y acoplamiento y b) conector instalado	207
Figura 4.67 Red para probar el empalme de fibra óptica	208
Figura 4.68 Red para probar el conector SC/UPC prepulido	208
Figura 4.69 Ventanas de transmisión de la fibra óptica.....	210
Figura 4.70 Corrección de atenuación en Banda E.....	211
Figura 4.71 a) Macrocurvatura y b) Microcurvatura.....	212
Figura 4.72 Medidor de potencia óptica YOKOGAWA – AQ2180	213
Figura 4.73 OTDR YOKOGAWA AQ7283.....	213
Figura 4.74 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH.....	214
Figura 4.75 Medición de la potencia entregada por la fuente de luz incluida en el OTDR YOKOGAWA AQ7280.....	215
Figura 4.76 Medición de la potencia de la fuente de luz NOYES OLS7-FTTH ..	216
Figura 4.77 Interfaces para operar las fuentes de luz incluidas en el OTDR	216
Figura 4.78 Medición de la atenuación del tramo de 4000 m incluido en el simulador PON	217
Figura 4.79 Medición de la atenuación producida en los splitters 1x2, 1x4 y 1x8	218
Figura 4.80 Red para verificar el valor del atenuador FC de 5 dB.....	218
Figura 4.81 Red para medir la pérdida de retorno en los adaptadores de la bobina de 4000 m del simulador PON y para verificar el valor del atenuador SC de 5 dB	219
Figura 4.82 Diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectro Óptico	222
Figura 4.83 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D	223
Figura 4.84 Calibración de la longitud de onda del OSA YOKOGAWA AQ6370D	223
Figura 4.85 Calibración de longitud de onda y alineación óptica en el OSA	224
Figura 4.86 Conexión para caracterizar la fuente óptica del OTDR.....	225
Figura 4.87 Análisis de potencia de la señal generada por el OTDR a 1550 nm	226
Figura 4.88 Análisis del ancho espectral de la señal generada por el OTDR	227
Figura 4.89 Análisis espectral de una fuente de tipo <i>Fabry - Perot</i> (OTDR)	228

Figura 4.90 Conexión para caracterizar la fuente de luz NOYES OLS7-FTTH ..	228
Figura 4.91 Análisis espectral de una fuente de tipo <i>Fabry - Perot</i> (AFL OLS7)	229
Figura 4.92 Conexión para caracterizar la fuente de luz TLS WDM SOURCE AG L-Band W que se incluye en la Plataforma multifunción OSICS, Yenista Optics	230
Figura 4.93 Pantalla inicial de la fuente de luz que se incluye en la Plataforma multifunción OSICS, Yenista Optics	230
Figura 4.94 Pantalla que muestra el menú principal y el menú de los módulos.	231
Figura 4.95 Menú del módulo <i>TLS WDM SOURCE AG L-Band W</i>	231
Figura 4.96 Pantalla que indica las características de la señal emitida por el módulo <i>TLS WDM SOURCE AG L-Band W</i>	232
Figura 4.97 Análisis a) de ancho espectral y b) de la fuente de tipo DFB <i>TLS WDM SOURCE AG L-Band W</i>	233
Figura 4.98 Esquema de una red PON tipo árbol con un nivel de splitteo	236
Figura 4.99 Esquema de una red PON tipo árbol con dos niveles de splitteo....	236
Figura 4.100 Esquema de una red PON tipo bus.....	236
Figura 4.101 Esquema de una red PON tipo anillo	237
Figura 4.102 Esquema para medir la potencia en una red de acceso con topología tipo árbol con un nivel de splitteo	238
Figura 4.103 Esquema para caracterizar una red de acceso con topología tipo árbol con un nivel de splitteo	239
Figura 4.104 Traza característica de la red mostrada en la Figura 4.103	240
Figura 4.105 Lista de eventos encontrados a lo largo de la red de la Figura 4.103	240
Figura 4.106 Mapa de las características de la red mostrada en la Figura 4.103	241
Figura 4.107 Traza generada por el OTDR utilizando un barrido en tiempo real.	242
Figura 4.108 Esquema de red de acceso con topología tipo árbol con dos niveles de splitteo.....	243
Figura 4.109 Mapa de eventos de la red de la Figura 4.108 a) parte 1 y b) parte 2	244
Figura 4.110 Parámetros de medición del OTDR y lista de eventos localizados	245

Figura 4.111 Traza característica de la red mostrada en la Figura 4.108.	245
Figura 4.112 Esquema de red de acceso con topología tipo bus.....	246
Figura 4.113 MUX/DEMUX óptico.....	248
Figura 4.114 Esquema de una Red WDM.....	248
Figura 4.115 Esquema de una red WDM – PON	249
Figura 4.116 Módulos OSICS TLS, generador WDM en banda L y banda C.....	249
Figura 4.117 Esquema de una red WDM	251
Figura 4.118 Pantalla de la plataforma multifunción en la que muestran las características de las señales generadas	252
Figura 4.119 Espectro de dos señales multiplexadas en una sola fibra.....	253
Figura 4.120 Esquema de red para obtener el espectro de una señal DWDM ..	254
Figura 4.121 Espectro de dos señales multiplexadas en una sola fibra.....	255
Figura 4.122 Análisis de una señal WDM en el OSA YOKOGAWA AQ6370D. .	256
Figura 4.123 Esquema de una red WDM-PON.	256

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Colores del espectro según su longitud de onda.....	2
Tabla 1.2 Ventanas de operación de la fibra óptica	9
Tabla 1.3 Código de colores de cubierta y/o buffer	32
Tabla 1.4 Código de colores de chaqueta externa	32
Tabla 1.5 Código de colores de conectores	35
Tabla 1.6 Tipos de conectores	36
Tabla 1.7 Tipos de adaptadores.....	37
Tabla 1.8 Pérdida en splitters (se excluyen conexiones y pérdidas en exceso)...	52
Tabla 1.9 Parámetros característicos de un splitter tipo PLC.....	53
Tabla 1.10 Parámetros característicos de un splitter tipo FBT	54

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Analizador de espectro óptico disponible en la FIEE	66
Tabla 2.2 Sensibilidad del OSA YOKOGAWA AQ6370D	68
Tabla 2.3 Rango dinámico del OSA YOKOGAWA AQ6370D	68
Tabla 2.4 Detalle de OTDRs disponibles	69
Tabla 2.5 Medidores de potencia óptica disponibles para el laboratorio	73
Tabla 2.6 Detalle de fusionadoras disponibles para el laboratorio	76
Tabla 2.7 Fuentes ópticas disponibles para el laboratorio	79
Tabla 2.8 Sonda microscópica de video disponible en el laboratorio	85
Tabla 2.9 Localizador visual de fallas disponible para el laboratorio.....	86
Tabla 2.10 Atenuadores ópticos disponibles para el laboratorio	87
Tabla 2.11 Detalle de splitters disponibles para el laboratorio	89
Tabla 2.12 Detalle de MUX/DEMUX disponibles para el laboratorio.....	90
Tabla 2.13 Kit de simulación de redes PON (FTTX)	91
Tabla 2.14 Kit de herramientas	93
Tabla 2.15 Kit de herramientas para limpieza de conectores.....	96
Tabla 2.16 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 1	97

Tabla 2.17 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 2.....	98
Tabla 2.18 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 3.....	99

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Comparación entre simuladores de sistemas de comunicaciones ópticos	118
----------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Identificación de cables de fibra óptica.....	159
Tabla 4.2 Identificación de conectores de fibra óptica.....	160
Tabla 4.3 Resultado de la simulación en el transmisor. Parte 1.....	173
Tabla 4.4 Resultado de la simulación en el transmisor. Parte 2.....	174
Tabla 4.5 Imágenes de la simulación en el puerto de salida del MUX.	174
Tabla 4.6 Imágenes del análisis de la señal WDM en el puerto de salida del MUX	175
Tabla 4.7 Resultado de la simulación en el extremo de salida de la fibra óptica.	175
Tabla 4.8 Análisis de la señal WDM en el extremo de salida de la fibra óptica..	176
Tabla 4.9 Análisis de la señal óptica recibida.....	177
Tabla 4.10 Diagrama del ojo de la señal recibida.....	177
Tabla 4.11 Traza reflectométrica y análisis de eventos.....	185
Tabla 4.12 Traza reflectométrica y análisis de eventos de la red de la Figura 4.33	186
Tabla 4.13 Traza reflectométrica y análisis de eventos (utilizando un ancho de pulso igual a 50 nm).....	187
Tabla 4.14 Traza reflectométrica y análisis de eventos (utilizando un ancho de pulso igual a 100 nm).....	187
Tabla 4.15 Resultados obtenidos con la aplicación <i>Smart Mapper</i> de la red presentada en la Figura 4.36.....	189
Tabla 4.16 Resultados obtenidos con la aplicación <i>Smart Mapper</i>	191
Tabla 4.17 Resultados obtenidos con el OTDR en modo “Detalle”	191
Tabla 4.18 Ventanas de operación de la fibra óptica	210
Tabla 4.19 Medición de potencia en las fuentes del OTDR y OLS7.....	216

Tabla 4.20 Medición de la atenuación del tramo de FO de 4000 m incluido en el simulador PON	217
Tabla 4.21 Medición de la potencia de los splitters 1x2, 1x4 y 1x8 incluidos en el simulador PON	218
Tabla 4.22 Medición de la potencia en la red de la Figura 4.80	219
Tabla 4.23 Medición de la atenuación en la red de la Figura 4.81	219
Tabla 4.24 Traza reflectométrica y análisis de eventos.....	220
Tabla 4.25 Medición de la pérdida de retorno en los adaptadores de la bobina de 4000 m del simulador PON	220
Tabla 4.26 Parámetros de cálculo del método <i>THRESH</i>	227
Tabla 4.27 Pérdida en splitters (se excluyen conexiones y pérdida en exceso)	235

ÍNDICE DE ECUACIONES

CAPÍTULO 1

Ecuación 1.1.....	1
Ecuación 1.2.....	4
Ecuación 1.3.....	5
Ecuación 1.4.....	6
Ecuación 1.5.....	9
Ecuación 1.6.....	52
Ecuación 1.7.....	54
Ecuación 1.8.....	57

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo analizar la factibilidad para realizar prácticas con los recursos existentes en el laboratorio de comunicaciones ópticas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, las cuales están orientadas al desarrollo de habilidades en diseño, implementación y evaluación de redes de fibra óptica.

En primera instancia, se desarrolla un capítulo en el que se resumen los conceptos teóricos que ayudan a entender el fenómeno de propagación de la luz por medios guiados y se describen las principales características de los componentes básicos de un sistema de comunicaciones óptico. También se presenta un conjunto de normas que ayudan a identificar las fuentes de peligro, minimizar los riesgos y mantener un entorno de trabajo seguro en el laboratorio.

En el segundo capítulo se presenta un inventario de los equipos, instrumentos y accesorios disponibles para la implementación del laboratorio de comunicaciones ópticas y se detallan las principales características técnicas de los recursos que serán utilizados en las prácticas propuestas en este trabajo. Se incluye además, el análisis técnico y económico de los recursos que se recomienda adquirir para complementar el laboratorio.

En el capítulo tres, se analizan y comparan las características de cuatro herramientas computacionales, útiles para diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticos. Se realiza la selección del software que ofrece mayores prestaciones para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

En el cuarto capítulo se redacta una guía para la ejecución de ocho prácticas de laboratorio destinadas a la familiarización con los recursos, operación adecuada de los equipos y herramientas, y evaluación de redes de fibra óptica.

Finalmente, en el quinto capítulo se presenta un conjunto de conclusiones y recomendaciones respecto al trabajo realizado.

PRESENTACIÓN

La fibra óptica es considerada como uno de los medios más eficientes para transmitir información a altas velocidades y largas distancias, y su constante evolución ha hecho que los sistemas de comunicaciones ópticos sean parte fundamental en el acceso y uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).

El desarrollo de una gran variedad de aplicaciones y servicios de telecomunicaciones demandan el uso de redes de alto desempeño en un entorno cambiante y competitivo, esto obliga a mejorar la preparación académica de los estudiantes de ingeniería a través de prácticas de laboratorio que incentiven a desarrollar habilidades para encontrar y proponer soluciones eficaces a problemas que podrían surgir a lo largo del ejercicio profesional en el área de las comunicaciones ópticas.

El presente proyecto permitirá que los estudiantes de comunicaciones ópticas cuenten con un documento que les brinde un conocimiento elemental pero preciso al momento de realizar experimentos, simular eventos y evaluar los parámetros que caracterizan a las redes de fibra óptica en general.

CAPÍTULO 1

LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

En el presente capítulo se describen los fundamentos físicos de la propagación de la luz a través de la fibra óptica y los fenómenos que permiten caracterizar y evaluar un sistema de comunicaciones óptico.

Se revisan además, las características principales de los componentes básicos de una red óptica, las normas y tecnologías más utilizadas en el país; y por último, se detallan ciertas recomendaciones que ayudarán a mitigar los riesgos y mantener un entorno de trabajo seguro en el laboratorio de comunicaciones ópticas.

1.1 PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA ÓPTICA ^{[1] [2] [3] [4]}

1.1.1 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas emitidas o absorbidas por un objeto. La energía transportada viaja en forma sinusoidal con velocidad de la luz¹ (c), frecuencia (f) y longitud de onda (λ) definidas. Estos parámetros se relacionan mediante la Ecuación 1.1.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En la Figura 1.1 se representa gráficamente el espectro electromagnético, mismo que se divide en segmentos o bandas cuyos límites no están exactamente definidos, sin embargo se adoptan ciertos rangos de longitudes de onda con el propósito de analizarlos. Uno de dichos rangos es aquel cuyas radiaciones son visibles para el ojo humano y se lo conoce como espectro de luz visible, el cual está formado a su vez por pequeños intervalos de longitudes de onda que representan un color diferente tal como se detalla en la Tabla 1.1.

¹La velocidad de propagación de la onda en el vacío es igual a la velocidad de la luz cuyo valor es una constante universal igual a 2.99792458×10^8 m/s y puede aproximarse a 3×10^8 m/s.

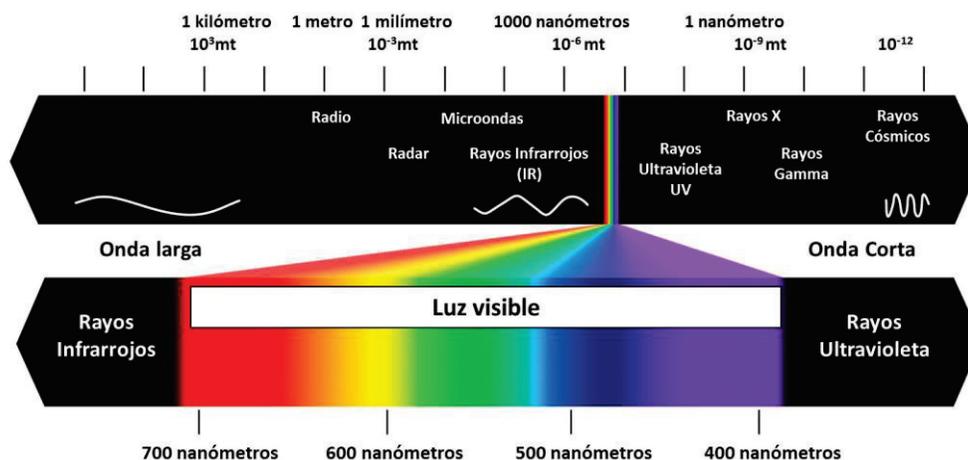


Figura 1.1 Espectro electromagnético [2]

Intervalo de longitudes de onda [nm]	Color
menor a 380	Ultravioleta
380 – 450	Violeta
450 – 475	Azul
475 – 495	Cian
495 – 570	Verde
570 – 590	Amarillo
590 – 620	Naranja
620 – 750	Rojo
mayor a 750	Infrarrojo

Tabla 1.1 Colores del espectro según su longitud de onda [4]

Dentro del rango correspondiente a la luz infrarroja (IR), se encuentran las longitudes de onda utilizadas en telecomunicaciones, mismas que ocupan el segmento comprendido entre los 800 nm y 1700 nm.

1.1.2 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un filamento constituido por dos cilindros coaxiales transparentes y es utilizada como guía de onda para transmitir información en forma de pulsos de luz. En la Figura 1.2 se muestran las partes de una fibra óptica típica.

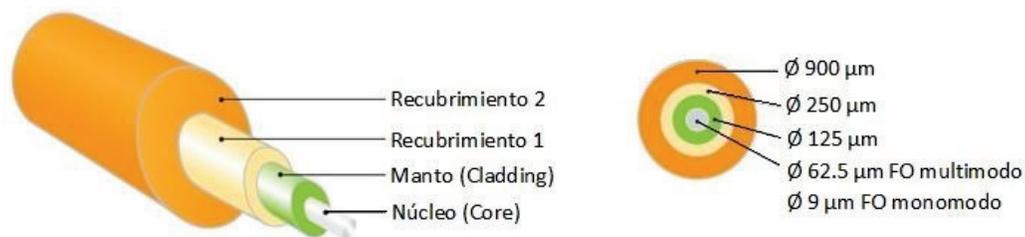


Figura 1.2 Estructura de la fibra óptica (los valores de diámetro son típicos) ^[1]

- **Núcleo (Core):** es el ducto interno de la fibra óptica por el cual transitan los pulsos de luz. Se fabrica generalmente de sílice (SiO_2) dopado con óxidos metálicos para ajustar su índice de refracción. Su diámetro usualmente varía entre $50 \mu\text{m}$ y $62.5 \mu\text{m}$ en fibras multimodo y es de $9 \mu\text{m}$ (valor típico) en fibras monomodo.
- **Manto (Cladding):** es una capa del mismo material que el núcleo pero de menor índice de refracción. Cumple con la función de ayudar a que los rayos de luz queden confinados en el interior del núcleo durante su propagación. Su diámetro es de $125 \mu\text{m}$ (valor típico en fibras monomodo y multimodo).
- **Recubrimiento:** esta capa se aplica sobre el manto para ofrecer protección mecánica al filamento. El recubrimiento puede ser de distintos materiales (acrilato, silicona, poliamida, carbono, etc.), la opción más adecuada dependerá de la aplicación final a la que se destine la fibra óptica.

1.1.3 LEYES DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ ^[3]

La propagación de la luz por la fibra óptica se basa en la aplicación de las leyes de la óptica geométrica, principalmente de la refracción (ley de Snell) y de la reflexión (principio de reflexión interna total). La forma de propagación depende del modo de propagación (monomodo o multimodo) y del perfil de índice de refracción² de la fibra óptica.

² El índice de refracción es un parámetro propio de cada medio y se define como la relación entre la velocidad con la que recorre un haz de luz en el vacío y la velocidad del mismo rayo en el medio. Índices de refracción de algunos materiales: aire= 1.0002924 , cuarzo= 1.544 , vacío= 1 y vidrio= 1.52 .

1.1.3.1 Refracción

La refracción es el cambio de dirección que experimenta un haz de luz al pasar de un medio a otro debido a la diferencia de sus índices de refracción. Cuando un haz de luz que se propaga en un medio de índice de refracción n_1 , incide sobre otro medio de índice de refracción n_2 formando un ángulo θ_1 con la normal a la superficie que forma la unión de ambos medios, parte del haz retorna al primer medio (haz reflejado) formando el mismo ángulo θ_1 con la normal (ley de la reflexión) y otra parte pasa al segundo medio (haz refractado), formando un ángulo de refracción θ_2 con la normal. Este es el enunciado de la ley de Snell o de refracción (Figura 1.3) e indica que se cumple la Ecuación 1.2.

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2 \quad \text{Para: } \theta_1, \theta_2 \in [0, \pi/2] \text{ y } n_1 > n_2 \quad \text{Ecuación 1.2}$$

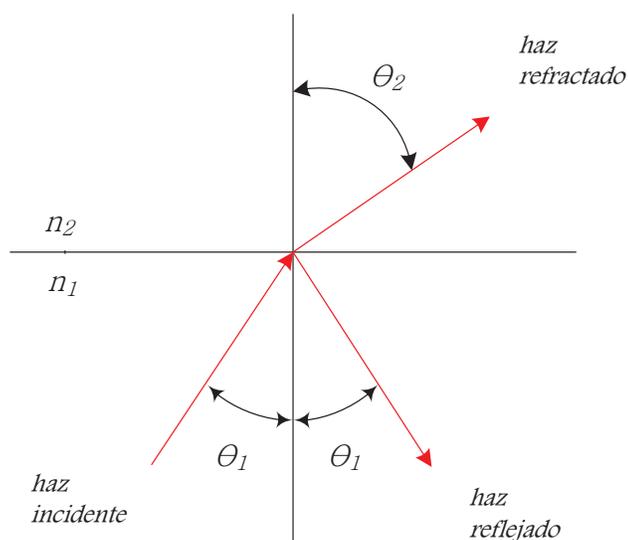


Figura 1.3 Ley de Snell o de refracción ^[3]

1.1.3.2 Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección que experimenta un haz de luz que incide sobre la superficie de separación entre dos medios de diferente índice de refracción, de tal forma que dicho haz regresa al medio inicial formando un ángulo con la normal a la superficie igual al ángulo del rayo incidente; a este fenómeno se lo conoce como Ley de Reflexión (Figura 1.3).

1.1.3.3 Ángulo Crítico

Cuando un rayo de luz que se propaga en un medio de índice de refracción n_1 incide sobre otro medio de índice de refracción n_2 ($n_1 > n_2$), existe un ángulo de incidencia θ_1 para el cual el ángulo refractado (θ_2) es igual a 90° , es decir, que el rayo refractado no pasa al medio de índice de refracción n_2 (Figura 1.4). Al ángulo incidente se lo conoce como ángulo crítico θ_c , y se calcula con la Ecuación 1.3:

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

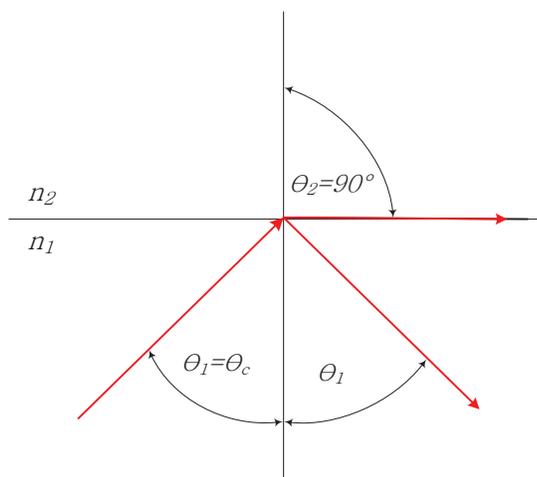


Figura 1.4 Ángulo crítico [3]

1.1.3.4 Principio de reflexión total interna

Para cualquier ángulo de incidencia $\theta_1 > \theta_c$ no se produce rayo refractado, por tanto la luz incidente se refleja por completo en el medio de índice de refracción n_1 .

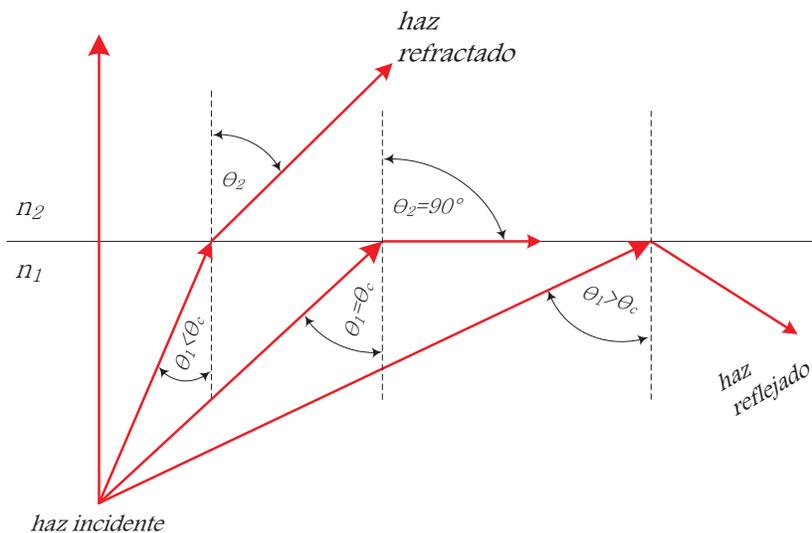


Figura 1.5 Reflexión total interna ($n_1 > n_2$) [3]

1.1.3.4.1 Ángulo de aceptación

Ángulo máximo o de aceptación (θ_0) es aquel para el cual el haz de luz que ingresa al núcleo experimenta reflexión total interna (Figura 1.6).

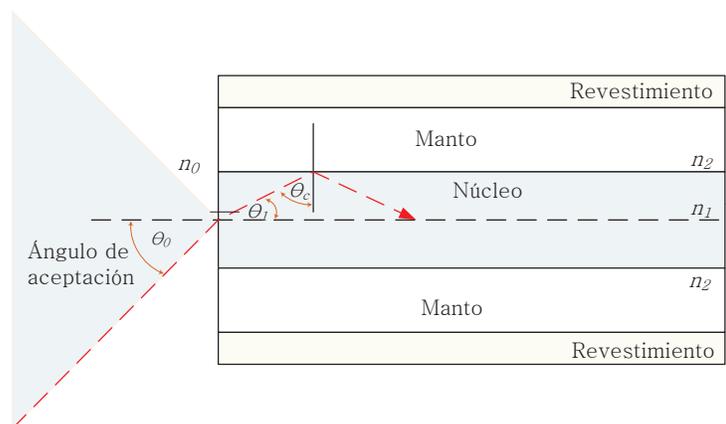


Figura 1.6 Ángulo de aceptación y Apertura Numérica ($n_1 > n_2$) [3]

1.1.3.4.2 Cono de aceptación

Es el sólido generado cuando al ángulo de aceptación máximo $\theta_{0(\text{máx.})}$ se lo hace girar alrededor del eje longitudinal de la fibra óptica (Figura 1.7).

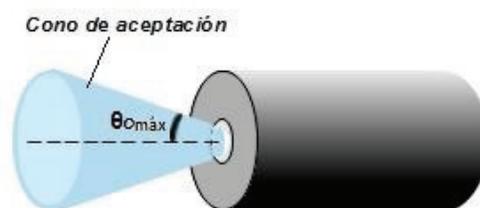


Figura 1.7 Cono de aceptación [6]

1.1.3.4.3 Apertura Numérica

Es un parámetro adimensional que indica el ángulo de aceptación de la fibra óptica. A mayor valor de la Apertura Numérica, mayor será la cantidad de luz que puede introducirse en el núcleo (Figura 1.6). Este parámetro se puede determinar mediante la Ecuación 1.4:

$$AN = \sin(\theta_{0\text{máx}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Donde } n_1 > n_2 \quad \text{Ecuación 1.4}$$

1.2 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA [3] [7]

1.2.1 MODOS DE PROPAGACIÓN

Son las trayectorias que adoptan los rayos de luz cuando ingresan al núcleo y pueden ser de modo único (un solo camino) o de modo múltiple (varios caminos). En la Figura 1.8, se observan diferentes modos de propagación, siendo el modo más corto aquel cuya trayectoria es una línea recta paralela al eje de la fibra óptica.

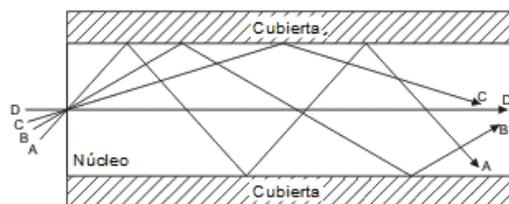
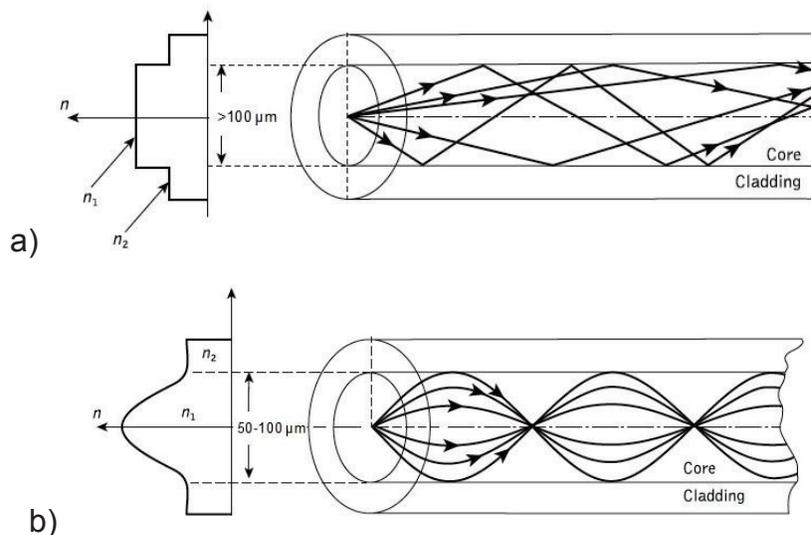


Figura 1.8 Modos de propagación [7]

Los diferentes modos de propagación dependen de las dimensiones geométricas de la fibra óptica y del perfil del índice de refracción que caracteriza al medio.

1.2.2 PERFIL DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Es la representación gráfica de la variación del índice de refracción vista en una sección transversal de la fibra óptica. Los tipos de perfiles de mayor utilización son: de índice escalonado y de índice gradual (Figura 1.9).



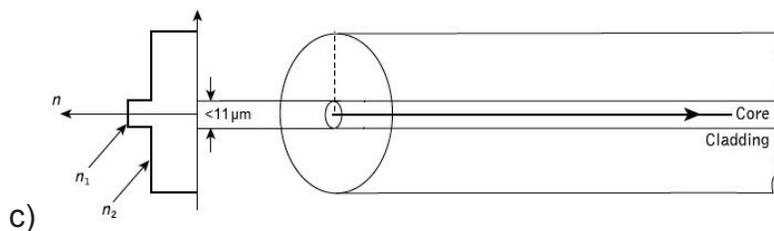


Figura 1.9 Perfil de índice de refracción: a) escalonado en fibra multimodo, b) gradual en fibra multimodo y c) escalonado en fibra monomodo ^[3]

1.2.3 FIBRA MULTIMODO

Una fibra multimodo es aquella en que los rayos de luz pueden adoptar más de una trayectoria. El diámetro de su núcleo es mucho mayor que en la fibra monomodo y se utilizan comúnmente en aplicaciones de distancias cortas.

1.2.3.1 Fibra óptica multimodo de índice escalonado

En este tipo de fibras el núcleo tiene un índice de refracción uniforme pero presenta un cambio abrupto en el límite entre el núcleo y el manto. Son muy poco utilizadas debido a sus altos valores de atenuación y de dispersión modal³ (Figura 1.9a).

1.2.3.2 Fibra óptica multimodo de índice gradual

En este tipo de fibras el índice de refracción va decreciendo gradualmente desde el centro del núcleo hacia la frontera con el manto lo cual provoca una propagación ondulada del rayo de luz. Estas fibras presentan menos modos de propagación que la de índice escalonado por lo cual se reduce la dispersión y aumenta el ancho de banda (Figura 1.9b).

1.2.4 FIBRA MONOMODO

Posee un núcleo de diámetro muy pequeño ($<11 \mu\text{m}$), razón por la que el haz de luz se propaga en un solo modo. La dispersión modal desaparece, lo cual provoca un aumento en el ancho de banda y disminución de pérdidas, por esto son ideales para transmitir grandes cantidades de datos a largas distancias y altas velocidades.

³ Cuando los rayos de luz adoptan diferentes trayectorias, los tiempos de llegada al otro extremo de la fibra también son diferentes, produciéndose así la denominada dispersión modal.

1.3 TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA ^{[3] [9] [10] [11] [12] [28] [57]}

Para evaluar el desempeño de un enlace de fibra óptica es necesario analizar los parámetros característicos de transmisión, siendo el de mayor interés la atenuación de la señal, cuyas causas pueden ser de tipo externo o interno a la fibra.

1.3.1 ATENUACIÓN

La atenuación es un factor que limita el rendimiento de una fibra óptica ya que disminuye la potencia de la señal en proporción inversa con la longitud de dicha fibra. Para una determinada longitud de onda, la atenuación en una fibra óptica se define como el cociente entre la potencia óptica de entrada (P_i) y la potencia óptica de salida (P_o), y se calcula mediante la Ecuación 1.5.

$$\text{Atenuación (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

1.3.1.1 Bandas y ventanas de trabajo de la fibra óptica

Las bandas son regiones del espectro electromagnético utilizadas para transmitir señales a través de una fibra óptica. Una ventana es una zona en la que la atenuación es mínima; es aquí en donde se encuentran las longitudes de onda habituales para trabajar con fibras ópticas y en donde los transmisores y receptores ópticos son más eficientes. Las bandas y ventanas de trabajo se muestran en la Tabla 1.2.

Banda	Rango de Longitud de Onda [nm]	Ventana	Longitud de onda de trabajo [nm]
	820 - 880	Primera	850
O (Original)	1260 - 1360	Segunda	1310
E (Extended)	1360 - 1460		
S (Short)	1460 - 1530	Quinta	1470
C (Conventional)	1530 - 1565	Tercera	1550
L (Long)	1565 - 1625	Cuarta	1625
U (Ultralong)	1625 - 1675		

Tabla 1.2 Ventanas de operación de la fibra óptica ^{[3] [57]}

En la Figura 1.10 se muestra la curva de atenuación de una fibra óptica típica de silicio en la que se pueden destacar las siguientes características:

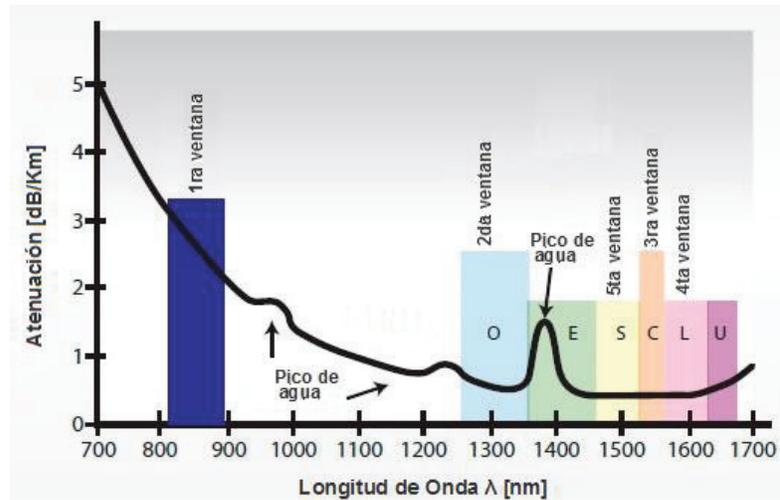


Figura 1.10 Ventanas de transmisión de la fibra óptica ^[1]

- ✓ En ciertas zonas, la atenuación es mínima (850 nm, 1330 nm, 1550 nm y 1625 nm). Estas son óptimas para el trabajo con fibras ópticas;
- ✓ Por arriba de 1625 nm la atenuación tiende a aumentar debido a las pérdidas provocadas por la absorción infrarroja;
- ✓ Existen picos de absorción asociados al ion hidroxilo (OH⁻). Estos aparecen por impurezas e imperfecciones originadas durante el proceso de fabricación de la fibra óptica; a 1390 nm se encuentra el pico más grande.

Los avances tecnológicos han permitido mejorar los procesos de fabricación y desarrollar las fibras ópticas LWP (*Low Water Peak*) y ZWP (*Zero Water Peak*) que presenta una reducción significativa del pico de agua en la banda E (Figura 1.11).

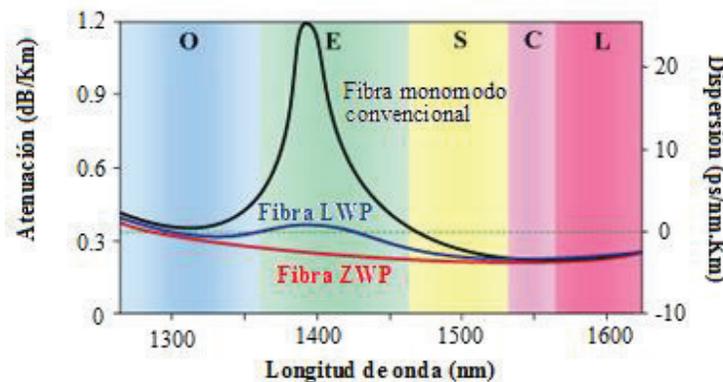


Figura 1.11 Corrección de atenuación en Banda E ^[1]

En general, las pérdidas producidas en una fibra óptica se pueden clasificar como pérdidas intrínsecas y pérdidas extrínsecas.

1.3.2 PÉRDIDAS INTRÍNSECAS

Son aquellas que no se pueden reducir o eliminar de manera simple, ya que se originan durante el proceso de fabricación de la fibra óptica y se clasifican en:

1.3.2.1 Pérdidas por absorción intrínseca

Se producen debido a la composición de la fibra óptica y al método de fabricación de la misma. La potencia perdida se transforma en calor y la atenuación se incrementa a medida que aumenta la longitud de la fibra. Estas pérdidas son importantes por debajo de 800 nm (región ultravioleta) y por encima de 1600 nm (región del infrarrojo).

1.3.2.2 Pérdidas por dispersión intrínseca

Las pérdidas por dispersión se producen cuando el rayo de luz que se propaga por la fibra óptica choca contra las impurezas o irregularidades originadas durante el proceso de fabricación y se dispersa. Las pérdidas por dispersión pueden ser:

1.3.2.2.1 Pérdidas por dispersión de Rayleigh

Se producen por el choque entre un rayo de luz y pequeñas partículas cuyo diámetro es considerado mucho menor que la longitud de onda de la señal óptica. Este tipo de dispersión produce atenuaciones cuyos valores son considerables para longitudes de onda comprendidas entre 400 nm y 1100 nm, tal como se puede observar en la Figura 1.12.

1.3.2.2.2 Pérdidas por dispersión de Mie

Se originan por no homogeneidades (encontradas en la fibra óptica) que tienen tamaño similar a la longitud de onda de la señal transmitida. Este tipo de dispersión puede disminuirse a niveles despreciables si se controla el proceso de la extrusión y recubrimiento de la fibra e incrementando la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el manto.

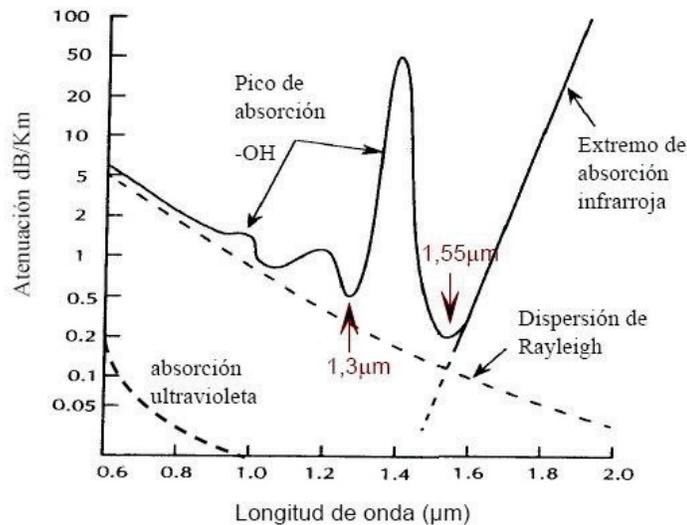


Figura 1.12 Atenuación por pérdidas de absorción y dispersión de *Rayleigh* [8]

1.3.3 PÉRDIDAS EXTRÍNSECAS

Se originan debido a defectos de fabricación y por errores cometidos durante la instalación, conectorización o ejecución de empalmes de la fibra óptica. Este tipo de pérdidas pueden reducirse o eliminarse de forma relativamente simple.

1.3.3.1 Pérdidas debido a impurezas

Se originan usualmente por impurezas metálicas (hierro, cobalto, cromo y níquel) y alcanzan valores aproximados de 1 dB/Km si su concentración es de una parte por millón. Estas pérdidas son independientes de la longitud de onda y pueden minimizarse aplicando los correctivos necesarios durante la fabricación de la fibra óptica.

1.3.3.2 Pérdidas por curvaturas

Siempre que la fibra óptica sea sometida a una curvatura (por bobinado, por tendido o por manipulación en general) existirá una atenuación adicional a la existente. Las curvaturas provocan que los rayos de luz se reflejen con ángulos que impiden el cumplimiento del principio de reflexión total interna, produciéndose pérdidas de potencia de la luz emitida. Este tipo de pérdidas pueden reducirse utilizando procedimientos adecuados en la instalación de la fibra óptica.

1.3.3.2.1 Pérdidas por macro curvaturas

Varían de forma exponencial con el radio de la curvatura y pueden ser despreciables hasta que alcance un valor crítico, el cual se establece considerando el radio de curvatura mínimo que puede soportar el cable de fibra óptica (puede ser 10 a 12 veces el diámetro exterior, dependiendo del fabricante). Ver Figura 1.13a.

1.3.3.2.2 Pérdidas por micro curvaturas

Se producen por irregularidades geométricas entre el núcleo y el manto, por fluctuaciones del diámetro o por curvaturas del eje de la fibra (Figura 1.13b). También se originan por cambios de temperatura, tensiones excesivas y por torsiones provocadas al momento del tendido del cable. Estas pérdidas pueden reducirse adoptando las siguientes medidas: aumentando la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y manto, incrementando la sección de la fibra o utilizando elementos que ayuden a absorber los esfuerzos a los cuales son sometidos los cables de fibra óptica.

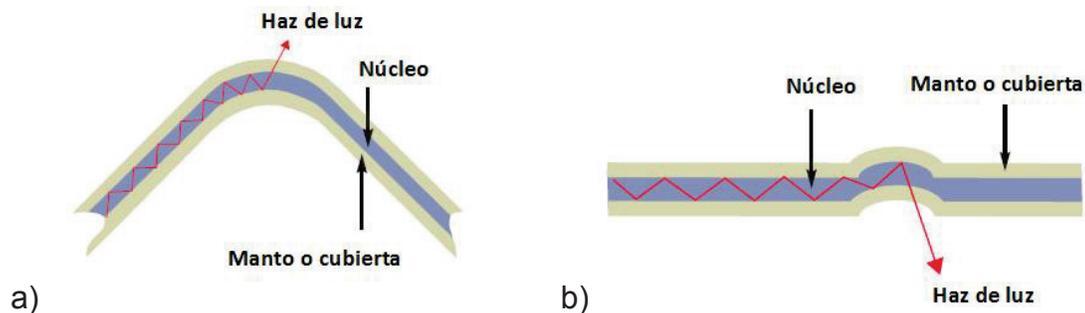


Figura 1.13 a) Macro curvatura y b) Micro curvatura ^[9]

1.3.4 DISPERSIÓN EN UNA FIBRA ÓPTICA

La dispersión es el fenómeno por el cual un pulso se ensancha a medida que se propaga a través de la fibra óptica, esta deformación produce la interferencia inter-símbolo⁴ y define el ancho de banda máximo que un canal es capaz de transmitir. Existen varias formas de dispersión presentes en una fibra, entre ellas se tienen:

⁴ ISI (*Inter Symbol Interference* - Interferencia entre símbolos): la dispersión provoca un alargamiento del período del pulso en un intervalo de tiempo muy corto en relación al tiempo del pulso original. Dicha distorsión compromete el intervalo de tiempo destinado a la "no presencia de pulso", lo cual genera errores al momento de leer la información que llega al receptor.

1.3.4.1 Dispersión modal

Se origina cuando los rayos de luz que se propagan a través de una fibra óptica llegan a su destino en tiempos diferentes. Estos retardos se producen debido a que los rayos viajan por diferentes trayectorias al interior del núcleo. La dispersión modal (presente únicamente en las fibras multimodo) se puede reducir utilizando fibras con índice gradual y se elimina con el uso de fibras monomodo con índice de escalón. En la Figura 1.14, se observa el ensanchamiento y la pérdida de energía que sufren los pulsos al llegar a su destino.

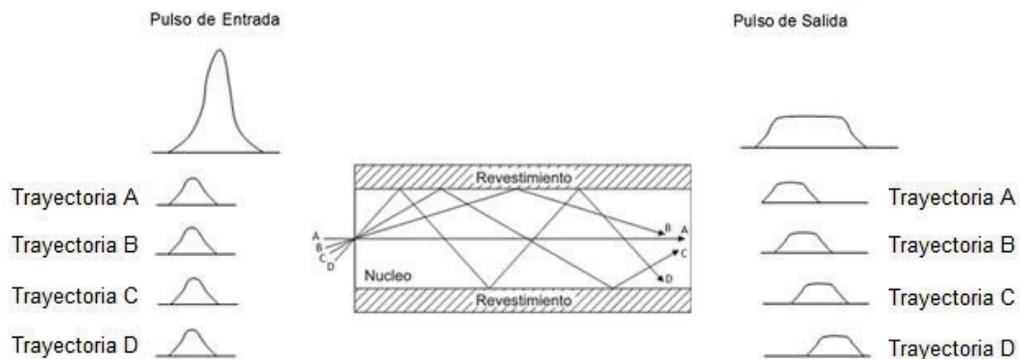


Figura 1.14 Dispersión modal ^{[11][12]}

1.3.4.2 Dispersión cromática

Se produce cuando diferentes componentes espectrales de un pulso viajan a través de la fibra óptica con diferentes velocidades. Su relevancia es mayor en la fibra monomodo ya que en el caso de la fibra multimodo, los efectos de la dispersión modal suelen opacar a los efectos de la dispersión cromática. La dispersión cromática posee dos componentes:

1.3.4.2.1 Dispersión por el material

Es dependiente de la frecuencia ya que el índice de refracción varía en función de la longitud de onda de la luz emitida, por esta razón la velocidad de transmisión también varía, provocando a su vez retardos en la llegada de los pulsos y el ensanchamiento de los mismos. Este tipo de dispersión es difícil de cambiar sin alterar la composición del material, pero es posible desplazarla modificando la dispersión de guía de onda. En la Figura 1.15 se muestra un esquema de las posibles trayectorias que podrían adoptar los componentes de un rayo de luz al interior de la fibra óptica.

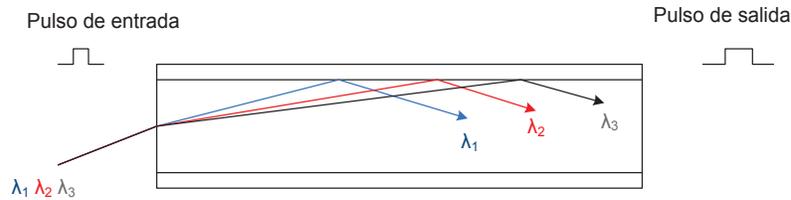


Figura 1.15 Dispersión del material ^[13]

1.3.4.2.2 Dispersión de guía de onda

Los rayos de luz que viajan por el núcleo y que tienen longitudes de onda pequeñas tienden a viajar a velocidades menores que los rayos de luz cuyas longitudes de onda son más grandes y que viajan por el manto, esto provoca que la señal se disperse (Figura 1.16).

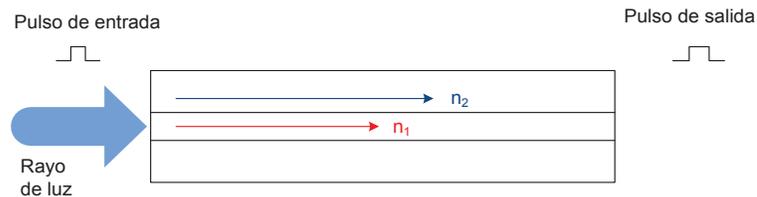


Figura 1.16 Dispersión de guía de onda ^[13]

Rediseñando la interfaz núcleo – manto, la dispersión de guía de onda puede compensarse con la dispersión del material de manera que la dispersión cromática total sea cero a una cierta longitud de onda (Figura 1.17). La unidad para evaluar la dispersión cromática es el ps/(nm - Km), que indica que un pulso con anchura espectral de un nanómetro se ensancha un picosegundo por cada kilómetro de propagación.

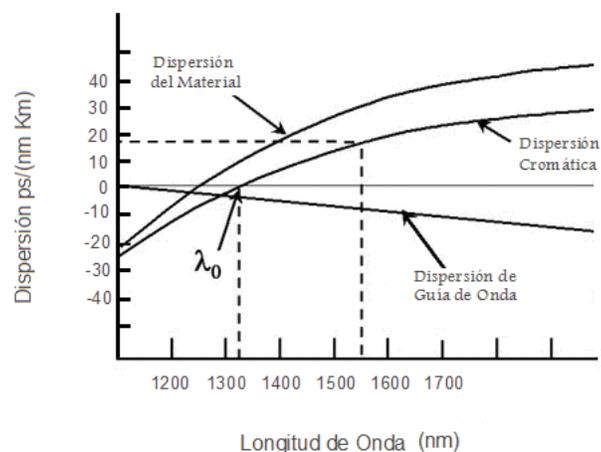


Figura 1.17 Dispersión cromática y sus componentes ^[14]

1.3.4.3 Dispersión de modo de polarización (PMD - *Polarization Mode Dispersion*)

El PMD se produce cuando los modos de polarización (componentes ortogonales de polarización) viajan a distinta velocidad (llegan al final de la fibra óptica en tiempos diferentes, produciéndose un ensanchamiento y distorsión de los pulsos de luz). La diferencia de retardo entre los modos de polarización (Figura 1.18) se conoce como retardo diferencial de grupo (DGD - *Differential Group Delay*).

Si la fibra es ideal (simétricamente circular), la constante de propagación entre las polarizaciones es la misma y por tanto también lo es la velocidad de propagación de cada polarización. Pero si una fibra monomodo no es ideal, la velocidad de propagación de cada modo ortogonalmente polarizado va a ser distinta produciéndose la dispersión. El PMD se mide generalmente en picosegundos (ps) y es directamente proporcional a la raíz cuadrada del largo de la fibra y a una constante conocida como "Coeficiente de PMD", el cual se mide en $\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$ y cuyo valor debe ser especificado por el fabricante de la fibra óptica.

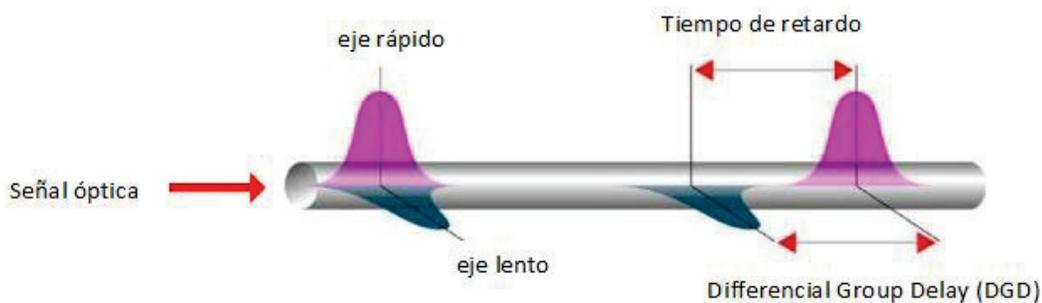


Figura 1.18 Dispersión por modo de polarización ^[15]

Puesto que la dispersión de modo de polarización es un parámetro de alta sensibilidad, y que es difícil de medir y compensar (ya que depende de las condiciones de construcción de la fibra óptica), es necesario acatar las recomendaciones que proporcione el fabricante para que los procesos de manipulación e instalación del cable se ejecuten de manera correcta, esto evitará que se produzcan esfuerzos mecánicos exagerados y curvaturas que pueden dañar o deformar la fibra óptica, provocando el incremento del valor de PMD.

1.4 ESTÁNDARES UIT⁵ PARA FIBRAS ÓPTICAS [16] [17] [18] [19] [20] [21]

La UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones) divide sus recomendaciones en series identificadas con una letra mayúscula, seguidas por un punto y numeradas dentro de cada serie. En este trabajo se revisa la serie G (Sistemas y medios de transmisión y sistemas y redes digitales), en particular las recomendaciones G.65X (donde X puede ser 0, 1, 2... 9), en las que se mencionan las características que deben cumplir las fibras ópticas como medio de transmisión. Se prioriza el estudio de los estándares de fibras que se usarán en el laboratorio.

1.4.1 G.651.1: CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL DE 50/125 μm PARA REDES DE ACCESO ÓPTICO [17]

Esta actualización reemplaza a la norma G.651 y recomienda que la fibra óptica multimodo sea utilizada en redes de cortas distancias (LAN - redes de área local y centros de datos). Además, indica que esta fibra puede soportar velocidades de 1 Gbps para enlaces de hasta 550 m de longitud en la ventana de los 850 nm.

1.4.2 G.652: CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS Y CABLES ÓPTICOS MONOMODO [18]

La recomendación UIT-T G.652 describe los atributos geométricos, mecánicos y de transmisión de una fibra óptica monomodo de dispersión nula a 1310 nm. Se optimizó inicialmente para su uso en la ventana de los 1310 nm, pero también es adecuada para trabajar a 1550 nm. Existen cuatro sub categorías de fibras G.652:

G.652.A: soporta aplicaciones tales como las descritas en las normas G.691⁶ hasta STM-16 y G.693⁷ hasta STM-256. Presenta un valor máximo de coeficiente de PMD igual a $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ y atenuaciones máximas en 1310 nm y 1550 nm.

⁵ La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) se encarga de la asignación del espectro radioeléctrico y de órbitas satelitales, y elabora las normas que rigen el funcionamiento continuo de las redes y los servicios tecnológicos para la comunicación y garantía del acceso a las TIC.

⁶ G.691: Recomendación para interfaces ópticas de sistemas monocanal de largo alcance STM-4, STM-16 y STM-64 que utilizan amplificadores ópticos.

⁷ G.693: Recomendación para interfaces ópticas de sistemas intraoficina monocanal con velocidad binaria combinada nominal de 10 Gbit/s y de 40 Gbit/s para distancias de enlace de hasta 2 Km.

G.652.B: contiene recomendaciones para aplicaciones de altas velocidades de transmisión contenidas en las normas G.691 y G.692⁸ hasta STM-64, G.693 y G.959.1⁹ hasta STM-256. Se define un valor máximo de coeficiente de PMD igual a $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ y presenta coeficientes de atenuación máxima en 1310 nm, 1550 nm y 1625 nm.

G.652.C: son fibras de tipo ZWP (*Zero Water Peak*) con características similares a la G.652.A, pero permite transmisiones en longitudes comprendidas entre 1360 nm y 1530 nm. Presenta un valor máximo de coeficiente de PMD de $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$.

G.652.D: es similar a la categoría G.652.B, pero permite transmisiones en partes en el rango comprendido entre 1360 nm y 1530 nm. Presenta un valor máximo de coeficiente de PMD de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$. Son fibras de tipo ZWP (*Zero Water Peak*).

1.4.3 G.653: CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES Y FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO CON DISPERSIÓN DESPLAZADA ^[19]

Esta recomendación describe las características geométricas, mecánicas y de transmisión de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión cero desplazada en la ventana de los 1550 nm. Aunque esta fibra está optimizada para trabajar en la región de 1550 nm, también puede ser utilizada limitadamente alrededor de los 1310 nm. Existen dos categorías dentro de este estándar:

G.653.A: esta categoría indica recomendaciones para un cable de fibra óptica monomodo de dispersión desplazada, adaptada para su uso en sistemas G.691, G.693, y G.977¹⁰ con una separación no uniforme entre canales. Presenta atenuación máxima de 0.35 dB/Km y un valor máximo de PMD igual a $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ a 1550 nm.

⁸ G.692: Recomendación que describe características de sistemas de línea ópticos de 4, 8, 16, 32 o más canales en señales STM-4, STM-16 y STM-64, además describe parámetros de interfaces ópticas con distancias entre amplificadores de 80 Km, 120 Km y 160 Km y un objetivo de distancia entre regeneradores de hasta 640 km.

⁹ G.959.1 Norma que incluye recomendaciones para interfaces monocanal que pueden transportar a velocidades aproximadas de 43.01 Gb/s (OTU3 o STM-256 o 40 Gb/s Ethernet), e interfaces multicanal con velocidades de hasta 112 Gb/s (OTU4 o 100 Gb/s Ethernet).

¹⁰ G.977: Características de los sistemas de cable submarino de fibra óptica con amplificación óptica.

G.653.B: Es similar a G.653.A, pero con un valor de PMD más bajo ($0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ a 1550 nm). Permite el funcionamiento de los sistemas STM-64 en enlaces cuyas longitudes superen los 400 km y de aplicaciones STM-256 de G.959.1. También soportan aplicaciones CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*).

1.4.4 G.655: CARACTERÍSTICAS DE FIBRAS Y CABLES ÓPTICOS MONOMODO CON DISPERSIÓN DESPLAZADA NO NULA ^[20]

Esta recomendación describe a una fibra monomodo cuyo coeficiente de dispersión cromática es, en valor absoluto, mayor que cero en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 1530 nm y 1565 nm. Con dicho valor de dispersión cromática se reducen los efectos no lineales que afectan principalmente a los sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Actualmente se han emitido cinco categorías de cables G.655, mismas que se revisan a continuación:

G.655.A: esta categoría proporciona características para el soporte de sistemas monocanal (G.691) y multicanal (G.692) como WDM. Se utiliza en banda C con espaciamiento entre canales de hasta 200 GHz y define un valor máximo de PMD igual a $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ en la ventana de 1550 nm.

G.655.B: en esta categoría se especifican características de soporte para sistemas DWDM (G.692) con separación reducida de canales hasta un mínimo de 100 GHz, tomando en cuenta las longitudes de onda y dispersión cromática cuyo valor es mayor que en el caso de G.655.A. Se utilizan para aplicaciones en las bandas C y L. Se define un valor máximo de PMD igual a $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ en 1550 nm.

G.655.C: similar a G.655.B, pero permite aplicaciones con altas velocidades (STM-64 y STM-256) para largas distancias en las bandas O y C. Se define una atenuación máxima a 1550 nm y 1625 nm. Posee un valor de dispersión cromática mayor al G.655.A. El valor máximo de PMD es de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ en 1550 nm.

G.655.D: en esta categoría se define una gráfica que limita una región de trabajo en que la dispersión cromática tiene un valor positivo y una magnitud tal que permite

una supresión significativa de los efectos no lineales entre 1530 nm y 1625 nm. También se define una región entre 1460 nm y 1530 nm. En este caso la dispersión cromática es negativa pero la fibra óptica puede trabajar en aplicaciones CWDM para longitudes de onda de 1471 nm o más.

G.655.E: similar a G.655.D, pero con valores más elevados de dispersión cromática que pueden ser importantes para los sistemas que trabajan con menores separaciones de canal.

1.4.5 G.657: CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS Y CABLES ÓPTICOS MONOMODO INSENSIBLES A LA PÉRDIDA POR FLEXIÓN ^[21]

En esta recomendación se describen dos categorías (A y B) de cable de fibra óptica monomodo para aplicaciones de redes de acceso incluyendo acometidas en interiores de edificios. Cada categoría se divide a su vez en dos subcategorías que difieren en los valores de pérdidas por macro curvaturas.

G.657.A: define un tipo de fibra optimizada para reducir las pérdidas por macro curvaturas y presenta especificaciones técnicas más estrictas que la norma G.652.D, sin embargo ambas (G.652.D y G.657.A) poseen las mismas propiedades de transmisión e interconexión, por lo que son compatibles y adecuadas para trabajar en redes de acceso en las bandas O, E, S, C y L.

G.657.A1: es apropiada para aplicaciones que requieran radios de curvatura mínimos de hasta 10 mm.

G.657.A2: este tipo de fibra óptica se puede utilizar en aplicaciones que requieran radios mínimos de curvatura de hasta 7.5 mm.

G.657.B: están optimizadas para reducir aún más las pérdidas por macro curvaturas y son capaces de trabajar con radios de curvatura muy pequeños. Son adecuadas para aplicaciones con distancias menores a 1000 m en las bandas O, E, S, C y L. En términos del coeficiente de dispersión cromática y de dispersión de

modo de polarización, esta fibra no necesariamente es compatible con la fibra G.652.D, sin embargo, en redes de acceso si es compatible con la fibra G.657.A.

G.657.B2: es apropiada para su uso en aplicaciones que requieran radios mínimos de curvatura de hasta 7.5 mm.

G.657.B3: se puede utilizar en aplicaciones que requieran radios mínimos de curvatura de hasta 5 mm.

En general las pérdidas por macro curvaturas dependen de los valores de diámetro de campo modal¹¹, coeficiente de dispersión cromática y la longitud de onda de corte de la fibra¹² y se reducen buscando un equilibrio entre dichos valores.

1.5 CABLES PARA FIBRA ÓPTICA ^{[22] [23] [24] [27] [29] [79] [81] [86] [87]}

Cuando se habla de "cable para fibra óptica", se refiere al conjunto formado por los elementos de refuerzo y la chaqueta protectora, los cuales brindan la resistencia mecánica que el filamento óptico requiere para soportar las condiciones medio ambientales y esfuerzos físicos ocurridos durante su instalación y operación.

1.5.1 FUNCIONES Y PROPIEDADES

1.5.1.1 Funciones

De forma general se puede indicar que la función principal del cable es proteger a las fibras ópticas, sin embargo existen funciones específicas que los cables deben cumplir, tales como:

- Proveer la robustez mecánica necesaria para que las fibras ópticas puedan soportar tensiones, torsiones y microcurvaturas;
- Ofrecer resistencia, impermeabilización y aislamiento para soportar las adversidades ambientales a las que estarán expuestos durante su vida útil;

¹¹ Diámetro del campo modal: es el diámetro efectivo ocupado por la luz cuando se propaga por la fibra óptica.

¹² Longitud de onda de corte de la fibra: es la longitud de onda más pequeña a la que puede propagarse un modo único en una fibra monomodo.

- Dotar al cable de la facilidad necesaria para su manipulación e instalación, considerando su peso, portabilidad y modo de almacenamiento;
- Permitir una forma de agrupación ordenada y adecuada de filamentos ópticos;
- Acondicionar al cable para resistir deformaciones y ataques de roedores u otros riesgos propios del entorno en que se encuentra instalado.

1.5.1.2 Propiedades

Para desempeñar las funciones descritas en el numeral anterior, los cables para fibra óptica deben cumplir con ciertas propiedades que van a determinar su capacidad para soportar las situaciones a las que pueden someterse en el momento de su instalación o durante su vida operativa:

- **Tensión:** es el valor máximo de la fuerza que puede ejercerse longitudinalmente sobre un cable antes de que la fibra óptica se dañe.
- **Compresión:** representa la carga máxima que puede soportar un cable antes de sufrir deformaciones que atenúen la señal o rompan la fibra óptica.
- **Curvatura:** diámetro mínimo de la curva que puede formar un cable sin que resulten afectadas las fibras ópticas ni la estructura de dicho cable.
- **Torsión:** es la fuerza ejercida sobre el eje transversal de un cable. El máximo valor se determina fijando un extremo del cable y haciéndolo girar por el otro hasta un cierto ángulo, luego del cual se producirán daños en la fibra óptica.

1.5.2 COMPOSICIÓN DE UN CABLE PARA FIBRA ÓPTICA

La estructura de un cable para fibra óptica depende de su aplicación; en unos casos tendrán más elementos de protección que en otros, sin embargo, se puede generalizar indicando que los cables poseen los siguientes elementos (Figura 1.19):

- ✓ Fibra óptica (núcleo y manto);
- ✓ Recubrimiento primario;
- ✓ Recubrimiento secundario o buffer;
- ✓ Elementos de refuerzo; y,
- ✓ Chaqueta del cable.

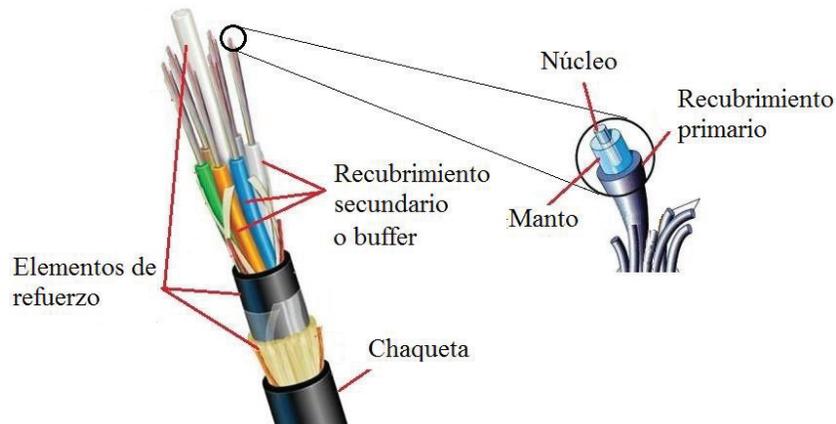


Figura 1.19 Composición del cable para fibra óptica [23] [24]

- **Fibra óptica:** es un cilindro de vidrio (núcleo) recubierto por una capa del mismo material (manto) pero de diferente índice de refracción.
- **Recubrimiento primario:** esta capa (barniz de acrilato de 6 μm de espesor o resinas de silicona de 20 μm) recubre el manto y sus objetivos son: proteger, mejorar la resistencia mecánica y permitir la identificación de las fibras ópticas de forma predeterminada gracias a la coloración que poseen (basada generalmente en el estándar ANSI/TIA-598.D¹³). Esta protección (Figura 1.20) posee un diámetro típico de hasta 500 μm en cables monofibra (de una sola fibra) y de hasta 250 μm en cables multifibra (que contienen más de una fibra).



Figura 1.20 Cable: a) monofibra y b) multifibra [25]

- **Recubrimiento secundario (buffer):** su objetivo es aumentar la resistencia mecánica de la fibra óptica y establecer un orden en el arreglo de las fibras ópticas (gracias a su coloración). Existen dos tipos de recubrimiento secundario: ajustados u holgados.

¹³ ANSI/TIA 598.D [29]: es una norma para codificación de color de fibra óptica en la que menciona la forma de agrupar las fibras y el orden de las mismas según su color.

- **Fibras ópticas con recubrimiento secundario ajustado:** esta capa presenta un espesor que oscila entre 0.5 mm y 1 mm (Figura 1.21). Es muy flexible, por lo que es altamente vulnerable a pérdidas por tensiones y microcurvaturas. Los cables de este tipo se utilizan especialmente en instalaciones de interiores con trayectoria vertical.

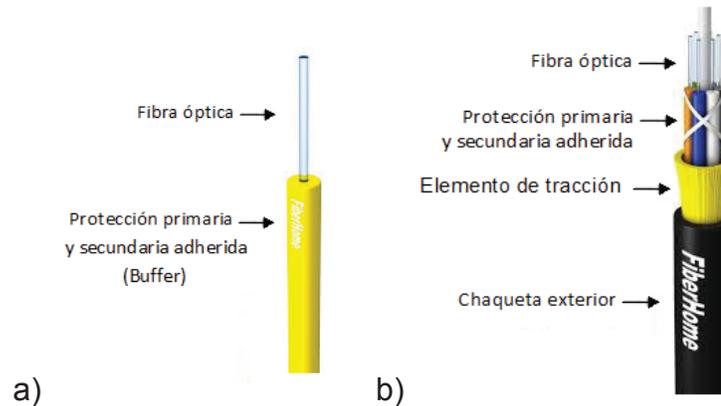


Figura 1.21 Cable con protección secundaria ajustada en: a) monofibra y b) multifibra ^[26].

- **Fibras ópticas con recubrimiento secundario holgado:** son tubos de plástico de entre 1.5 mm y 3 mm de diámetro y 0.25 mm de espesor que contienen hasta 12 hilos de fibra óptica (con protección primaria) que descansan holgadamente en su interior. Los tubos ayudan a mantener a las fibras aisladas de las fuerzas mecánicas y generalmente están rellenos de un gel (grasa de silicona) que evita el ingreso de humedad.

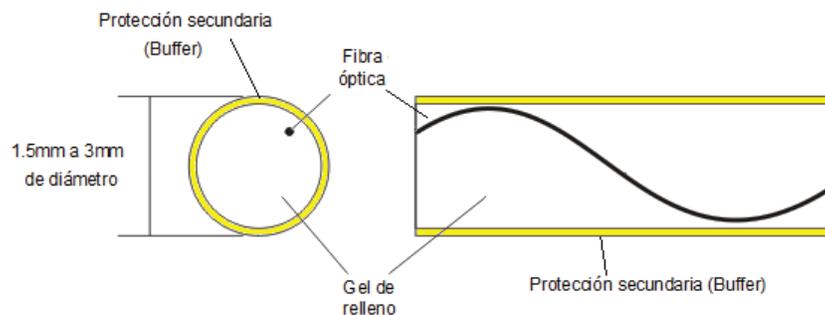


Figura 1.22 Cable de fibra óptica con protección secundaria holgada ^[27].

Este tipo de cable se utiliza en planta externa y no es adecuado para instalaciones con trayectorias verticales porque existe la posibilidad de que el gel interno fluya o que las fibras se desplacen.

- **Elementos de refuerzo:** estos elementos ayudan a soportar la tensión que puede sufrir un cable, evitando que las fibras ópticas sufran elongaciones mayores a las permitidas. Generalmente, los elementos de protección se construyen con materiales flexibles y de bajo costo, tales como: kevlar y fibra de vidrio (Figura 1.23a); también existen refuerzos metálicos (Figura 1.23b), mismos que requieren de conexión a tierra, lo cual encarece la instalación.

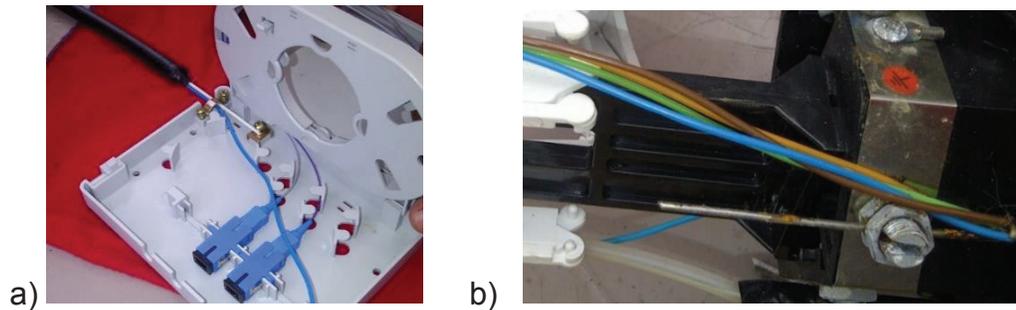


Figura 1.23 Cable de fibra óptica con elementos de refuerzo: a) varilla central de fibra de vidrio y b) varilla central metálica

Otros elementos de refuerzo que suelen encontrarse en los cables de fibra óptica son: tubos de relleno, cintas y láminas de polietileno y de aluminio. Estos elementos ayudan a mantener la flexibilidad del cable y brindan una protección permanente a las fibras ópticas.

- **Chaqueta del cable:** Esta capa se encuentra en contacto directo con el entorno en el que se encuentra instalado el cable, y debe ser capaz de proteger a las fibras ópticas de los efectos del medioambiente (temperatura, humedad, etc.) y de posibles agresiones de agentes externos (fuego, golpes, roedores, etc.). Existen dos tipos de chaquetas en el mercado:

- 1) Chaquetas para interiores:** se fabrican en PVC (policloruro de vinilo) y poseen propiedades ignífugas. Presentan coloraciones que permiten identificar al tipo de fibras que contienen en su interior (Figura 1.24).



Figura 1.24 Cable de fibra óptica con chaqueta para interiores ^[26]

- 2) **Chaquetas para exteriores:** se construyen en base de polietileno negro (PE), ya que presentan mayor resistencia a la humedad y a la luz solar. Existen cables con doble cubierta, una interna metálica (que requiere conexión a tierra) y otra externa plástica, que se utiliza en instalaciones subterráneas (Figura 1.25a); y otros con capa interna de Kevlar y capa externa de plástico, apto para instalaciones aéreas (Figura 1.25b).

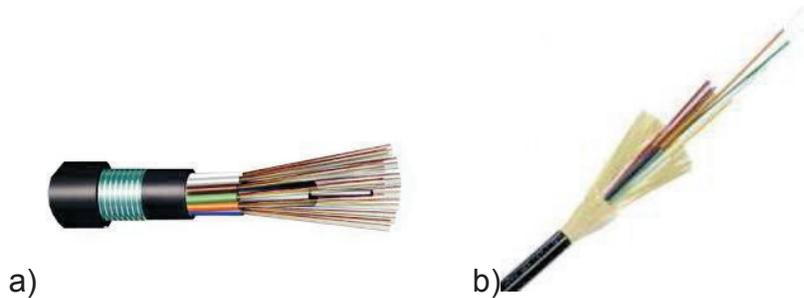


Figura 1.25 Cable con chaqueta para exteriores: a) en instalaciones subterráneas y b) en instalaciones aéreas ^[26]

En el mercado también se encuentran cables adecuados para uso en exteriores e interiores (poseen doble chaqueta, una para exteriores y otra para interiores), tal como se observa en la Figura 1.26.

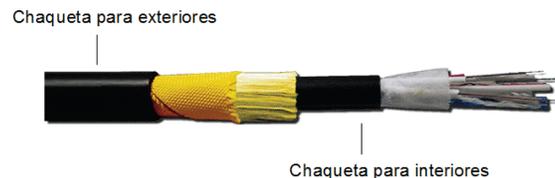


Figura 1.26 Cable de fibra óptica con chaqueta para exteriores e interiores ^[30]

1.5.3 TIPOS DE CABLES PARA FIBRA ÓPTICA

Existen varios tipos de cables y para elegir el adecuado, es necesario considerar el tipo de aplicación y los factores que influirán directamente sobre su vida útil. Entre los cables más utilizados se tienen:

1.5.3.1 Cable Zipcord (*patchcord*)

Se utiliza en interiores para conexiones entre equipos o con *patchpanel*. Son monofibra y poseen un recubrimiento secundario de estructura ajustada de 900 μm

sobre el recubrimiento primario, además, está reforzado mecánicamente con hilos de Kevlar y se recubre externamente con una chaqueta de 3 mm de diámetro típico (Figura 1.27).

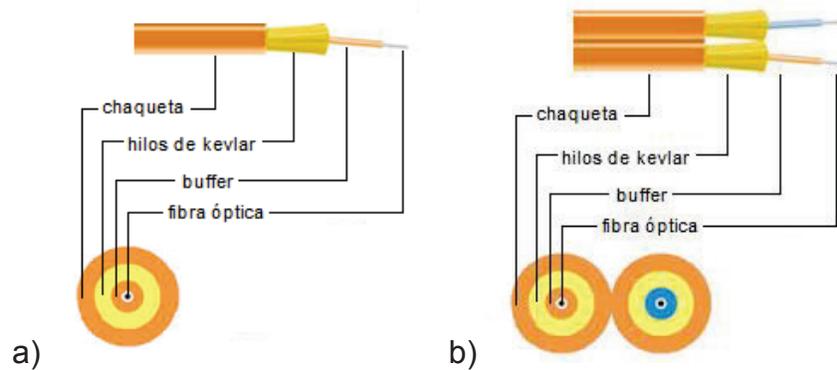


Figura 1.27 Cable zipcord a) simplex y b) duplex ^[79]

1.5.3.2 Cable de distribución

Este cable es ligero y posee un diámetro pequeño (Figura 1.28), esto lo hace ideal para interiores. Es muy utilizado en aplicaciones de cortas distancias, y puede ser instalado a través de ductos, de forma aérea (sin exposición a líquidos ni humedad excesiva) y en instalaciones de tipo vertical. Contiene varias fibras con recubrimiento secundario ajustado que están envueltas en una misma chaqueta y reforzadas con hilos de Kevlar; en algunos cables se incluye una varilla de fibra de vidrio en la parte central.

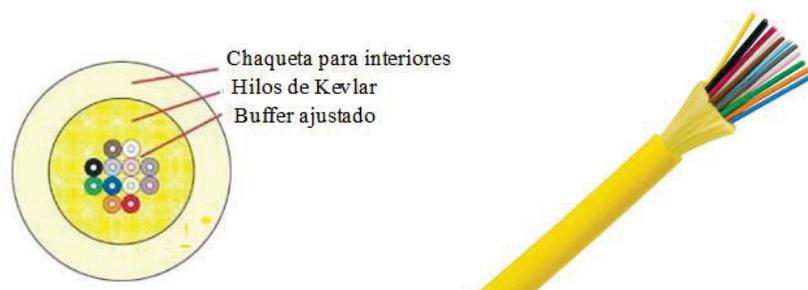


Figura 1.28 Cable de distribución ^[80]

1.5.3.3 Cable *break out*

Este cable agrupa a varios cables simplex al interior de una misma chaqueta y puede ser utilizado tanto en interiores como en exteriores. Cada fibra está reforzada individualmente, por lo que se puede realizar la conectorización respectiva sin necesidad de utilizar cajas o paneles de conexiones (Figura 1.29).



Figura 1.29 Cable *break out* ^[82] ^[83]

1.5.3.4 Cable tipo cinta

Se basan en la estructura *Ribbon*, la cual permite empaquetar un alto número de fibras ópticas en el menor espacio posible y dentro de un mismo cable, esto a su vez, ayuda a reducir costos y facilita la manipulación de las fibras empaquetadas. Los paquetes constan de hasta 12 fibras ópticas dispuestas en paralelo, y dependiendo del diseño del cable y del arreglo de las cintas, un solo cable puede contener hasta 864 fibras ópticas (Figura 1.30).

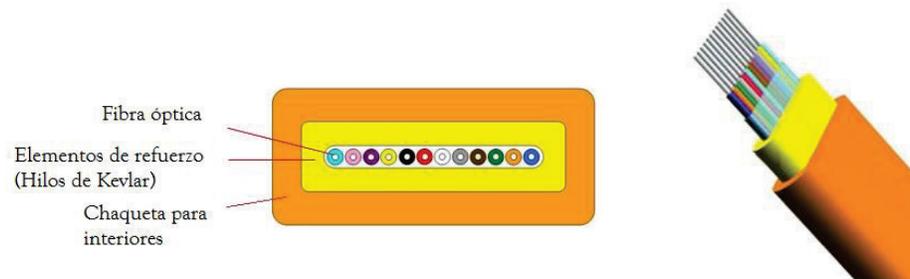


Figura 1.30 Cable tipo cinta ^[84]

1.5.3.5 Cable Autosoportado (ADSS - *All Dielectric Self Supported*)

Está diseñado para ser instalado de forma aérea en exteriores y se caracteriza por ser completamente dieléctrico ya que no posee elementos metálicos (Figura 1.31).



Figura 1.31 Cable ADSS ^[85]

Se dice que es auto-soportado porque el montaje se lo realiza con la ayuda de estructuras independientes (Figura 1.32) instaladas sobre torres o postes cuya separación depende del vano (*span*) que soporte el cable (hasta 500 m típico).

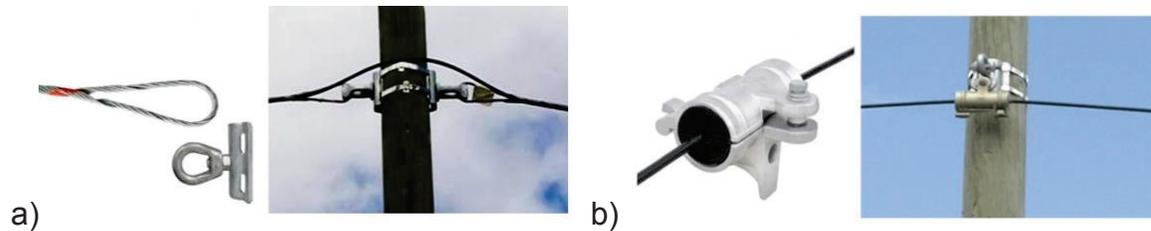


Figura 1.32 Herrajes a) de sujeción y b) de paso ^[86]

1.5.3.6 Cable OPGW (*OPTical Ground Wire*)

Es un conductor de acero recubierto de aluminio que generalmente se usa como cable de guarda en las líneas de transmisión eléctrica. Las fibras ópticas se encuentran alojadas en tubos de acero inoxidable que se ubican al interior del conductor de acero. Generalmente permite alcanzar distancias sin empalmes de hasta 10 Km y su diseño ayuda a evitar calentamientos y efectos generados por los campos eléctricos. Este cable se utiliza para la gestión y comunicación de las estaciones eléctricas y para proveer servicios de portador (Figura 1.33).

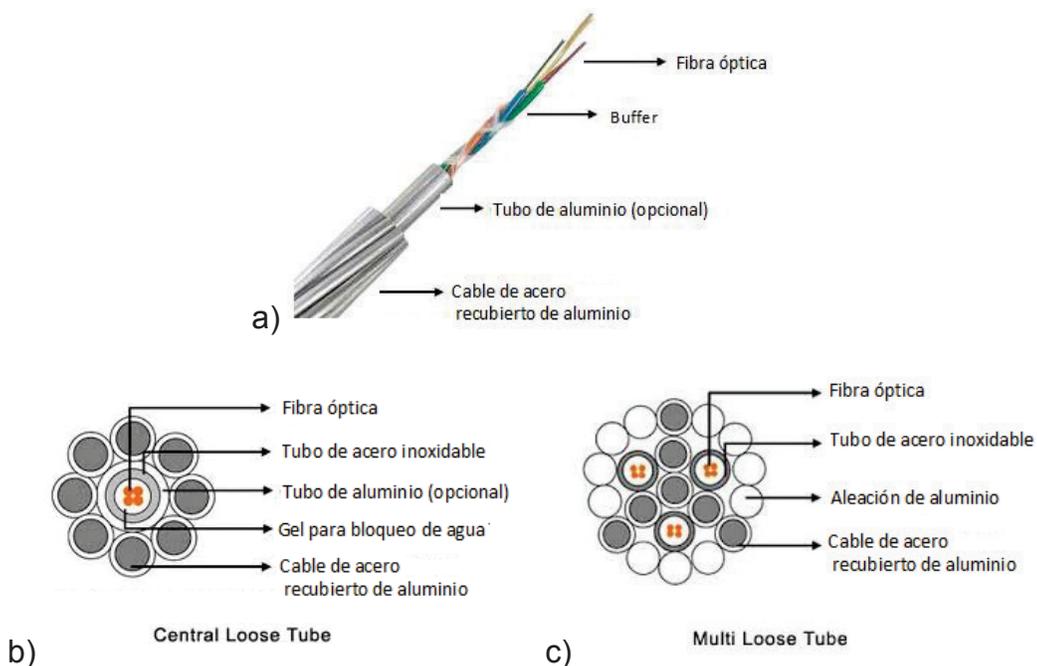


Figura 1.33 Cable a) OPGW, b) con un solo tubo portador de fibra (*Central loose tube*) y c) OPGW con varios tubos portadores de fibras (*Multi loose tube*) ^[86]

1.5.3.7 Cable Figura 8

Es utilizado para tendido aéreo en exteriores. Posee un cable de acero denominado “mensajero” que va adherido al cable de fibra óptica y con el cual se sujeta a los herrajes instalados en los postes. El mensajero permite realizar instalaciones con vanos de hasta 200 m, pero por tratarse de un cable metálico, es necesario realizar una adecuada conexión a tierra (Figura 1.34).

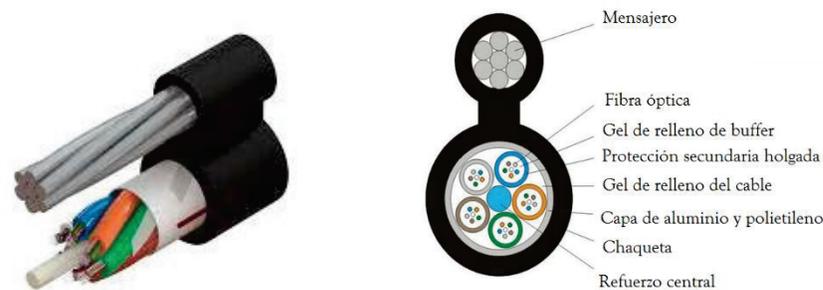


Figura 1.34 Cable figura 8 [87]

1.5.3.8 Cable blindado

Se utiliza particularmente para instalaciones subterráneas ya sea en ductos o directamente soterrado. Posee una armadura metálica (debajo de la chaqueta exterior) que le ofrece alta resistencia a la presión y excelente protección frente al ataque de roedores. Debido a la existencia de componentes metálicos, este cable debe tener una conexión adecuada a tierra (Figura 1.35).

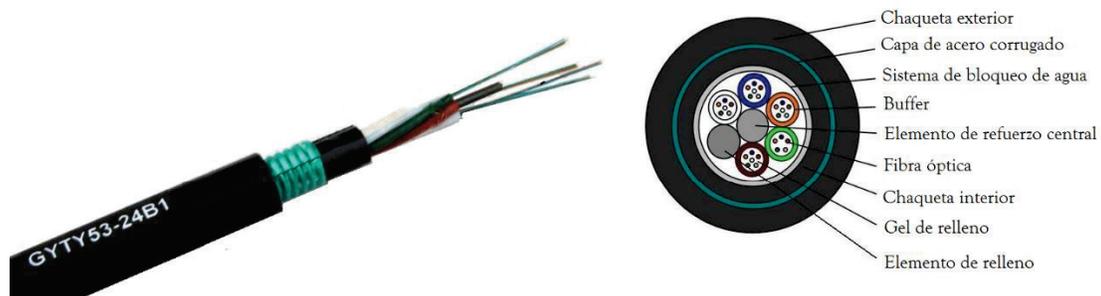


Figura 1.35 Cable blindado [88]

1.5.3.9 Cable submarino [31]

Un cable submarino permite construir enlaces intercontinentales y está diseñado para ser instalado en el fondo del mar, permanecer sumergido y soportar las inclemencias del ambiente marino y las presiones ejercidas por el agua. En general, un cable submarino (Figura 1.36) está compuesto por una chaqueta externa de polietileno de alta densidad, una envoltura de Mylar (material sintético de alta

resistencia), alambres de acero trenzado, lámina de aluminio (sirve de barrera contra el agua), capa de Policarbonato (ofrece mayor resistencia a la presión y golpes), tubo de aluminio o cobre y buffer relleno con Gel (donde se alojan las fibras ópticas). Además, se incluyen cables de cobre que sirven para transportar la energía eléctrica que requieren los dispositivos ópticos activos que se encuentran a lo largo del enlace.

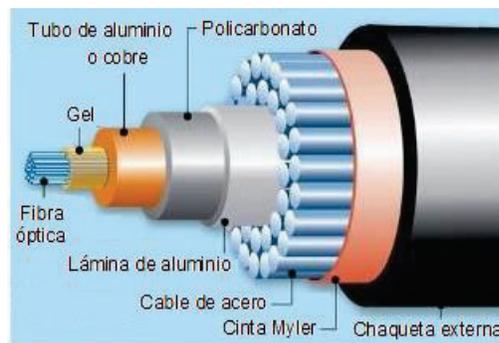


Figura 1.36 Estructura de un cable submarino ^[31]

1.5.3.10 Cables híbrido y mixto

- **Cables híbridos:** contienen dos tipos de fibras ópticas (multimodo y monomodo) y se utilizan en aquellas aplicaciones en las que inicialmente se trabajan con fibras multimodo pero que a futuro podría requerir el uso de fibras monomodo.
- **Cables mixtos:** contienen fibras ópticas y conductores de cobre (par trenzado, coaxial y/o conductores de energía eléctrica). Se utilizan para transmisiones de voz y datos, para antenas, cámaras de CCTV remotas, etc. Puesto que poseen conductores eléctricos, requieren de una adecuada conexión a tierra.

1.5.4 CÓDIGO DE COLORES DE CABLES DE FIBRA ÓPTICA ^[29]

Las capas de recubrimiento primario y secundario poseen una coloración que permite identificar a las fibras ópticas y establecer un orden predeterminado. Cada fabricante utiliza su propio código de colores, sin embargo, la mayoría utiliza la norma EIA/TIA-598.D (última actualización) como referencia (Tabla 1.3).

Color de cubierta	Posición	Color de cubierta	Posición
Azul	1	Rojo	7
Naranja	2	Negro	8
Verde	3	Amarillo	9
Café	4	Lila	10
Gris	5	Rosado	11
Blanco	6	Celeste	12

Tabla 1.3 Código de colores de cubierta y/o buffer ^[29]

Los códigos de colores se utilizan también en las chaquetas externas de algunos tipos de cables con el propósito de indicar ciertas propiedades de la fibra óptica contenida en su interior, esto se muestra en la Tabla 1.4.

Color de buffer o chaqueta exterior	Detalle de uso o aplicación
Amarillo	Fibra óptica monomodo
Naranja	Fibra óptica multimodo
Celeste	Fibra óptica multimodo 50/125 μm , optimizada para láser de 10 Gbps
Gris	Fibra óptica multimodo (en desuso)
Azul	Utilizado usualmente para identificar a las fibras ópticas PM (<i>Polarization - Maintaining</i>)

Tabla 1.4 Código de colores de chaqueta externa ^[29]

1.6 TÉCNICAS DE CONEXIÓN Y EMPALMES ÓPTICOS ^{[32] [33] [37]}

Considerando que la fibra óptica es eficaz para transmisiones a largas distancias y que por facilidad logística los cables se distribuyen en carretes que contienen hasta 10 Km de longitud (dependiendo de la aplicación), es imprescindible que los procesos de conectorización y empalmes sean óptimos, para lo cual es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- ✓ Pérdidas de potencia óptica mínimas (atenuación y reflexión);
- ✓ Alta confiabilidad de la conexión; y,
- ✓ Facilidad en la implementación.

En general, las pérdidas en una conexión se producen por las siguientes razones:

- Desplazamientos de los ejes de la fibra;
- Deslizamientos angulares;
- Separación entre fibras;
- Diferencias entre las características de las fibras (tamaño del núcleo, tipo de fibra, índices de refracción, etc.)

Gracias a los avances tecnológicos, actualmente se disponen de herramientas y máquinas que facilitan los procesos de conectorización y empalmes, lo cual ayuda a ejecutar procesos confiables de conexión y a conseguir bajos niveles de pérdidas.

1.6.1 CONECTORES ^[34] ^[35] ^[36]

Son elementos pasivos que permiten alinear y unir temporalmente los extremos de dos fibras ópticas con el propósito de transferir la mayor cantidad de luz posible.

1.6.1.1 Estructura de un conector

Existe una gran variedad de tipos de conectores, sin embargo, la mayoría poseen los siguientes elementos (Figura 1.37):



Figura 1.37 Partes de un conector óptico ^[36] ^[38]

- a) **Férula:** es un cilindro cerámico cuya función es alinear y proteger mecánicamente a la fibra óptica. Su extremo presenta diferentes acabados (Figura 1.38), lo cual permite clasificarlas de la siguiente manera:

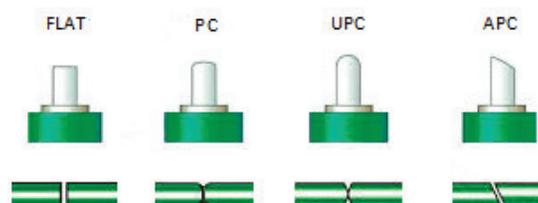


Figura 1.38 Tipos de pulido de férula ^[39]

- **FLAT (Plano):** está diseñado para dejar un espacio libre en la unión (*Air Gap* - cámara de aire), esto ayuda a prevenir rayones y deformaciones debidas a fricciones entre las superficies de las férulas. La reflexión producida con este tipo de pulido es de alrededor de -14 dB.
 - **PC (*Physical Contact*):** este tipo de pulido posee una superficie plana sólo en el punto donde las férulas hacen contacto físico. La reflexión ocurrida con este tipo de pulido es de alrededor de -40 dB.
 - **UPC (*Ultra Physical Contact*):** es una férula ultra pulida, la cual mejora el contacto físico y reduce la reflexión a valores típicos de -55 dB.
 - **APC (*Angled Physical Contact*):** presenta un pulimento que posee un ángulo de 8° de inclinación, el cual ayuda a que la luz reflejada sea dispersada hacia el manto. Esta forma de pulido mantiene una conexión firme y reduce la reflexión a un valor típico de -65 dB.
- b) Cuerpo del Conector:** contiene a la férula y asegura el acoplamiento entre el conector y su respectivo adaptador. Puede ser de metal o plástico, y su coloración ayuda a identificar el tipo de fibra óptica o el pulido de la férula.
- c) Tubo de crimpado:** es un cilindro metálico que permite asegurar el cable de fibra óptica al cuerpo del conector.
- d) Manguito (*Boot – bota de protección*):** ayuda a reforzar mecánicamente al cable que ingresa al conector, evitando pérdidas o daños por curvaturas. El manguito generalmente adopta el mismo color que el cuerpo del conector.
- e) Tapón de férula:** está construido en plástico y protege el extremo de la férula de rayones e impurezas mientras no está siendo utilizada.

1.6.1.2 Código de colores de los conectores ^[32]

El color que se expone en los conectores (en el cuerpo del conector plástico o en el manguito del conector metálico) permite identificar el tipo de fibra óptica y del pulido de la férula, esto permite generar la codificación mostrada en la Tabla 1.5:

Color de Cuerpo y/o la bota		Terminado de Férula	Observación
Azul		PC	Se usa en conectores para fibra monomodo y en fibra PM (<i>Polarization - Maintaining</i>).
Verde		APC	Utilizado en conectores para fibras monomodo.
Negro		PC	Se utilizan en conectores para fibra multimodo con núcleos de 50 μm .
Gris	Beige	PC	Se utilizan en conectores para fibra multimodo con núcleos de 62.5 μm .
Blanco		PC	Utilizado en conectores para fibras monomodo.
Rojo			Se utiliza en conectores para transmitir señales con alta potencia óptica.

Tabla 1.5 Código de colores de conectores ^{[32] [40]}

1.6.1.3 Tipos de conectores

Existen diferentes modelos y variantes dentro de cada tipo de conectores. En la Tabla 1.6 se muestran los tipos de conectores más utilizados en el mercado ecuatoriano, algunas de sus principales características técnicas y sus aplicaciones.

1.6.1.4 Adaptadores

Son dispositivos que permiten unir, fijar y asegurar mecánicamente dos conectores que pueden ser del mismo o de diferentes tipos. Se encuentran generalmente en placas de sujeción o en paneles frontales de ciertos equipos. Su utilización ofrece flexibilidad y adaptabilidad bajo cualquier circunstancia, además, permite reducir el tamaño y complejidad de un sistema de comunicaciones óptico.

1.6.1.5 Tipos de Adaptadores

Existen diferentes tipos de adaptadores, mismos que pueden ser machos, hembras o híbridos (macho de un tipo a hembra de otro tipo). En la Tabla 1.7 se muestran los adaptadores más utilizados en el ámbito local.

Conector	Sistema de anclaje	Diámetro de la férula [mm]	Material del cuerpo	Aplicaciones	Imagen
SC (Subscriber Connector)	push-pull	2.5	Plástico	Transmisión de datos, Transceivers (GBIC) y redes de telecomunicaciones en general con fibras monomodo.	
FC (Ferule Connector)	rosca con guía	2.5	Metálico	Es utilizado con fibras monomodo en Equipos de medición, transmisiones de datos y redes de telecomunicaciones en general.	
LC (Little Connector)	push-pull	1.25	Plástico	Se usa en Transceivers y equipos de comunicación de alta densidad de datos.	
ST (Straight Tip)	Bayoneta	2.5	Metálico	Utilizado en Redes LAN con fibras multimodo y monomodo. CCTV, Control industrial. No es posible su uso con férulas de terminados APC.	
FDDI (Fiber Distribution Data Interface)	push-pull	2.5	Plástico	Es un conector duplex utilizado con fibras monomodo para redes FDDI de alta velocidad.	
MTRJ (Mechanical Transfer Registered Jack)	push-pull tipo RJ45	2.45 x 4.4	Plástico	Utilizado en conexiones duplex con fibra multimodo.	
SMA (Subminiature A)	rosca	3.14 (típico)	Plástico y metálico	Se usa con fibras multimodo en redes LAN, sistemas cerrados de TV/CCTV, control industrial y aplicaciones militares.	
E2000	push-pull	2.5	Plástico	Usado en redes LAN, WAN, redes de telecomunicaciones y CATV.	
DIN	rosca	2.5	Metálico	Se utiliza con fibras monomodo y multimodo en CATV, redes LAN, MAN, WAN, equipos de medición y pruebas, y sensores para aplicaciones industriales y medicinales.	

Tabla 1.6 Tipos de conectores [32] [38] [40] [41]

Adaptador	Descripción	Imagen	Adaptador	Descripción	Imagen
SC - SC	Adaptador simplex para conector SC con terminado APC.		SMA - SMA	Adaptador simplex para conector SMA.	
FC - FC	Adaptador simplex para conector FC.		E2000 - E2000	Adaptador para conector E2000.	
LC - LC	Adaptador simplex para conector LC con terminado PC.		DIN - DIN	Adaptador simplex para conector DIN.	
ST - ST	Adaptador simplex para conector ST.		SC - FC	Adaptador simplex de conector SC a FC.	
MTRJ - MTRJ	Adaptador MTRJ-MTRJ		FC - ST	Adaptador simplex de conector FC a ST.	
ST - SC	Adaptador macho a hembra ST a SC		FC - ST	Adaptador macho a hembra FC a ST	

Tabla 1.7 Tipos de adaptadores ^[42]

1.6.1.6 Conectorización de fibra óptica ^{[34] [43] [44]}

Existen dos maneras de conectorizar una fibra óptica: la primera es empalmado un pigtail (tramo corto de fibra óptica que contiene un conector instalado en fábrica y que presenta pérdidas menores a 0.3 dB); y la segunda, es la conectorización manual (pérdidas que oscilan entre 0.5 dB y 0.75 dB). En ambos casos, las pérdidas deben cumplir con los márgenes que recomienda la norma ANSI/TIA 568-B.3¹⁴.

¹⁴ ANSI/TIA 568-B.3. Norma que especifica las características de los componentes (cables, conectores, etc.) y los parámetros de transmisión para un sistema de cableado óptico, utilizando fibras multimodo (50/125 μm y 62.5/125 μm) y fibras monomodo.

En general, la conectorización de fibras multimodo y de cables con estructura ajustada, puede realizarse de forma manual; pero en el caso de las fibras monomodo y de cables con estructura holgada, la mejor opción es empalmar un pigtail, esto garantiza menores valores de pérdidas por inserción y retorno.

En el campo laboral pueden surgir situaciones que requieran una conectorización manual, y su éxito dependerá de la habilidad del técnico y de las herramientas disponibles. A continuación se describen los métodos más utilizados:

- 1. Conectorización con adhesivo:** este método puede aplicarse de dos formas. En el primer caso, se utilizan dos compuestos químicos (una resina y un endurecedor) que luego de mezclarse y reposar por cierto tiempo, debe introducirse a un horno cuya temperatura oscile entre 110° C y 120° C por pocos minutos. En el segundo caso se requiere utilizar un compuesto adicional que acelera el secado del adhesivo, lo cual evita el uso del horno.
- 2. Conectorización con fijación mecánica:** en este caso, la fijación de la fibra óptica se realiza por presión utilizando una crimpadora. Los procesos de conectorización de este tipo varían según el fabricante del kit de conexión.
- 3. Montaje de conectores pre-pulidos:** es el método más utilizado en la actualidad ya que los conectores contienen fibras ópticas fijadas a una férula previamente pulida, esto facilita y agiliza el proceso de conectorización, además, garantiza un alto desempeño del conector.

1.6.1.7 Proceso de conectorización

El proceso de Conectorización es similar para todos los tipos de conectores y en los diferentes métodos la secuencia es la misma. A continuación se resume el proceso general para realizar la instalación de un conector de fibra óptica.

- a) Preparación del cable:** consiste en quitar la chaqueta exterior, cortar los elementos de refuerzo, remover el recubrimiento plástico y limpiar la fibra.

- b) Fijación de la fibra:** este paso varía en función del kit de conectorización que se adquiera, pero en el caso de utilizar adhesivos, se puede aplicar este compuesto en el interior de la férula o en la fibra óptica e insertarla hasta que sobrepase el extremo de la férula en al menos 3 cm para luego asegurarla. Para el montaje de conectores pre-pulidos, la fijación se realiza con la ayuda de los elementos que se incluyen en el kit.
- c) Secado y corte:** luego de que el adhesivo se endurezca y/o la fibra óptica se encuentre fija, se procede a cortar el exceso de la misma. En el caso de los conectores pre-pulidos, luego de realizado el empalme, éste debe protegerse con el manguito termocontraíble y asegurarse dentro del cuerpo del conector, según el procedimiento que recomiende el fabricante.
- d) Pulido:** con la ayuda de un disco de pulido (varía según el tipo de conector) se realizan movimientos en forma de “8” sobre lijas de distinto gramaje (empezando por la más gruesa) hasta tener una superficie totalmente lisa, lo cual debe verificarse con la ayuda de un microscopio.

1.6.2 EMPALMES ÓPTICOS ^[32] ^[33]

Son uniones permanentes entre dos tramos de fibra óptica; se usan para construir enlaces de largas distancias, ejecutar reparaciones, derivaciones, conexión de elementos pasivos (splitters, multiplexores, etc.) y para conectorizar. El éxito de los empalmes depende de los tres aspectos siguientes:

- ✓ Alineación de las fibras;
- ✓ Corte de la fibra; y
- ✓ Diámetro del núcleo de la fibra.

Cuando la alineación y corte de la fibra óptica son incorrectos, no se garantiza una máxima transferencia de la potencia óptica, por esta razón el corte debe ser exactamente perpendicular y totalmente liso. Además, la diferencia en el tamaño de los núcleos también genera pérdidas considerables. En la Figura 1.39 se esquematizan los fallos más comunes que se pueden suscitar durante un empalme:

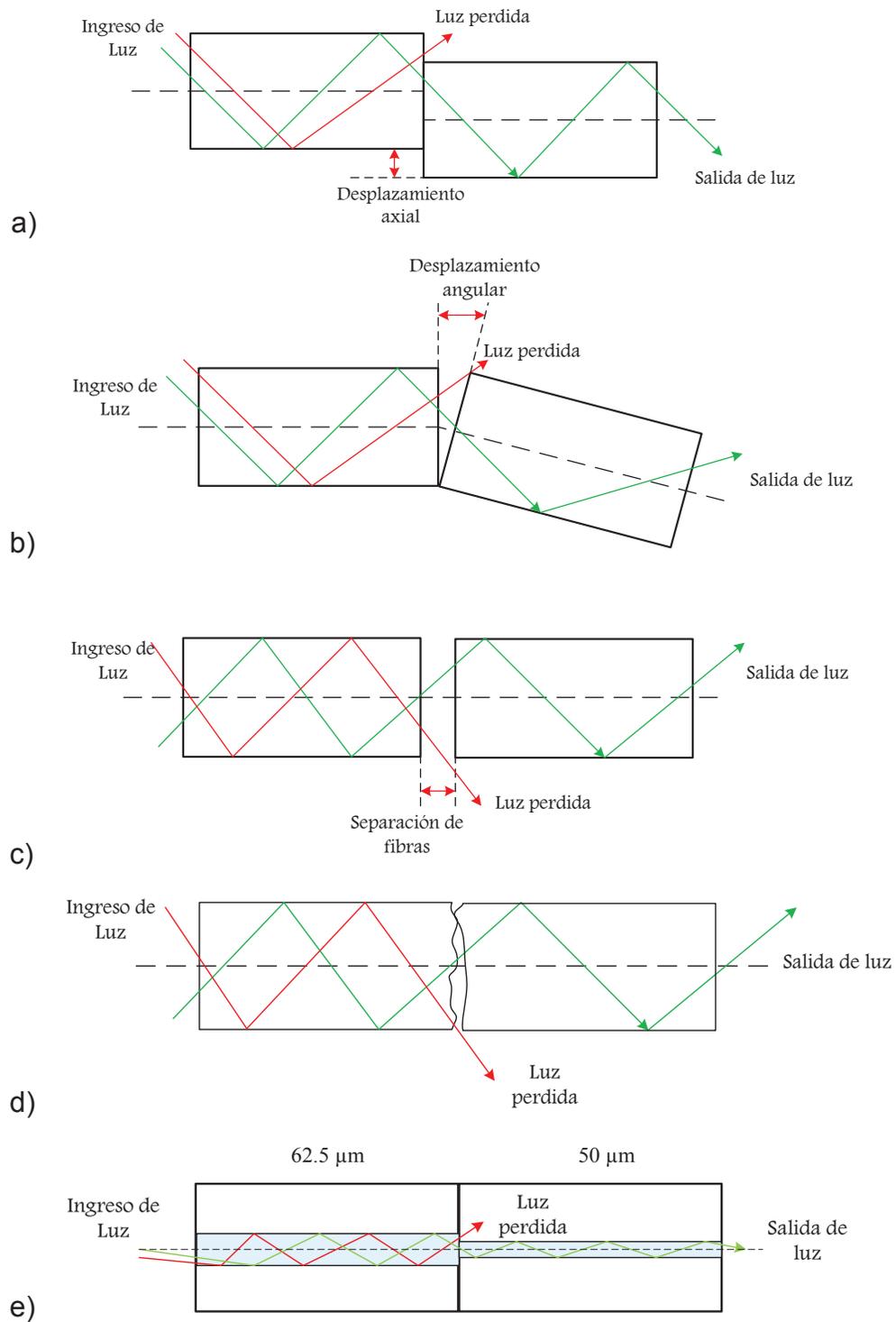


Figura 1.39 Pérdidas por: a) desplazamiento axial, b) desplazamiento angular, c) separación de fibras, d) cortes incorrectos y e) diferencia de tamaño de núcleos ^[89]

Existen dos tipos de empalmes y en ambos casos, el procedimiento es similar: alinear, enfrentar, juntar, asegurar y proteger el empalme.

1.6.2.1 Empalme Mecánico

Este tipo de empalme requiere de baja inversión, poco tiempo para su ejecución y puede ser permanente o temporal. Para su ejecución se requiere un dispositivo mecánico que permite alinear los extremos de las fibras, juntarlos y asegurarlos mediante abrazaderas o con pegamento especial. Es muy utilizado con fibras multimodo ya que producen atenuaciones relativamente altas (0.10 dB a 0.50 dB), aunque se los puede usar también con fibras monomodo pero a distancias cortas.

1.6.2.2 Proceso para la elaboración de empalmes mecánicos

El procedimiento para la ejecución de un empalme mecánico es similar para la mayoría de opciones existentes en el mercado y se describe a continuación:

- a) **Preparación del cable de fibra óptica:** para esto es necesario desprender por completo cada una de las cubiertas y elementos de refuerzo que tenga el cable. Se recomienda dejar al menos 3 cm de fibra óptica desnuda.
- b) **Limpieza de la fibra óptica desnuda:** con un paño impregnado con alcohol isopropílico se frota suavemente la fibra hasta que quede libre de impurezas.
- c) **Corte de la fibra óptica:** debe realizarse con la ayuda de una cortadora de precisión. Luego, sin contaminar ni dañar el corte, la fibra debe ser colocada en el dispositivo utilizado para fijar y asegurar el empalme.
- d) **Protección del empalme:** como último paso, los empalmes realizados deben ubicarse en una caja de empalmes de tal manera que queden perfectamente ordenados y protegidos;

1.6.2.3 Empalmes por fusión

Los empalmes de este tipo ofrecen alta confiabilidad ya que los procesos de alineación, enfrentamiento y juntura de las fibras ópticas se realizan de forma automática. Una vez que las fibras están en la posición correcta, dos electrodos emiten un arco eléctrico produciendo una fuente calorífica de temperatura suficientemente alta como para fusionar el material que compone la fibra óptica.

Puesto que las máquinas fusionadoras son muy sofisticadas, la probabilidad de tener un empalme defectuoso es muy baja, sin embargo, existen ciertas limitaciones que deben considerarse en torno a esta forma de conexión:

- El valor de atenuación medido por la máquina no es exacto y depende del tipo de fibra óptica fusionada (generalmente las pérdidas en fibras monomodo tienen menor error que las pérdidas en fibras multimodo).
- Pese a que los costos de las máquinas fusionadoras se han reducido (típicamente oscila entre USD 3000.00 y USD 12000.00 dependiendo del tipo de alineación: por núcleo o por manto), esta alternativa sigue siendo costosa.
- Las máquinas fusionadoras trabajan con energía eléctrica, por esto, es necesario tener un tomacorriente disponible o baterías adicionales.
- La máquina fusionadora debe estar diseñada para operar sin contratiempos dentro de un amplio rango de temperaturas y sobre cualquier altitud. Esta característica define su confiabilidad y eficacia.
- Generalmente el tiempo de realización de un empalme oscila entre 7 y 9 segundos, mientras que el calentamiento de un manguito termocontraíble requiere de al menos 15 segundos. Estos tiempos son relativamente altos y afectan directamente en el rendimiento de la máquina empalmadora.

1.6.2.4 Proceso para la ejecución de empalmes por fusión

El proceso de ejecución de un empalme por fusión es similar para cualquier marca de máquina. Se recomienda seguir la siguiente secuencia de pasos:

- 1) Configuración de la fusionadora:** la mayoría de máquinas permite configurar los siguientes parámetros: número de pasos para la ejecución del empalme, tipo de fibra que se va a fusionar, tiempo de calentamiento del manguito termocontraíble y duración e intensidad del arco eléctrico.
- 2) Preparación de la fibra:** consiste en retirar todos los recubrimientos y elementos de protección del cable de fibra óptica, dejando al menos 3 cm de longitud de fibra desnuda. Luego se coloca el manguito termocontraíble en la fibra y por último se limpia con un paño impregnado de alcohol isopropílico.
- 3) Corte de la fibra:** para realizar un corte adecuado es necesario seguir las indicaciones del fabricante con respecto al uso de la cortadora de precisión.
- 4) Fusión:** luego de realizado el corte, se colocan las fibras adecuadamente en el interior de la máquina, se cierra la cubierta y se inicia el empalme.

- 5) Evaluación del empalme:** una vez que ha finalizado la fusión, la máquina realiza una prueba de tensión y medición de pérdidas de potencia óptica. Si los niveles de atenuación son muy altos, será necesario repetir el empalme.
- 6) Protección del empalme:** cuando el empalme ha sido exitoso, se retira la fibra de la máquina y se desliza el manguito termocontraíble hasta que cubra por completo el tramo empalmado. Luego se lo introduce en el horno de calentamiento por un tiempo determinado (depende del tamaño del manguito), con lo cual el empalme queda reforzado y protegido. Es importante indicar que los empalmes deben ubicarse en bandejas especiales, en donde queden perfectamente fijos y ordenados.

1.7 DISPOSITIVOS ÓPTICOS ^[3] ^[45] ^[51]

Los avances tecnológicos en torno a los sistemas ópticos son muy notables, sin embargo, aún existen limitaciones que impiden que la fibra óptica sea utilizada al 100% de su capacidad. Con el propósito de optimizar el desempeño de los dispositivos ópticos, las investigaciones se centran en los siguientes aspectos:

- Las fuentes ópticas deben ser altamente coherentes y estables en fase y frecuencia. Deben emitir a una longitud de onda estable y su anchura espectral debe ser pequeña.
- Aunque la velocidad de transmisión se incremente y las fuentes de luz sean más eficaces, la latencia sigue siendo un limitante.
- Aún no se comercializan detectores de luz que sean capaces de seleccionar señales con determinada longitud de onda, sin embargo, existen detectores capaces de recibir señales emitidas en un rango de longitudes de onda.
- El desarrollo de componentes ópticos pasivos (splitters, multiplexores, etc.) ha permitido disminuir costos y masificar el uso de las redes de fibra óptica, sin embargo, aún existen limitaciones debido a la complejidad de esta tecnología.

En los párrafos posteriores se analizan los dispositivos ópticos de mayor utilización, mismos que se encuentran agrupados como: elementos activos y elementos pasivos.

1.7.1 DISPOSITIVOS ÓPTICOS ACTIVOS

Son aquellos que están en la capacidad de generar, detectar, amplificar y/o cambiar alguna característica de una señal óptica. Estos dispositivos requieren de una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento.

1.7.1.1 Transmisores

Los transmisores ópticos están compuestos usualmente por una fuente de luz, un modulador y un circuito controlador (driver). La fuente de luz está constituida por un dispositivo semiconductor (con uniones P-N) que emite luz en determinadas longitudes de onda. Para que dicha fuente de luz sea utilizada en la transmisión de señales debe cumplir con las siguientes características básicas:

- ✓ El haz de luz producido debe ser monocromático;
- ✓ La radiación emitida debe acoplarse fácilmente a la fibra óptica;
- ✓ La potencia óptica debe modularse por medios electrónicos;
- ✓ Debe soportar altas temperaturas;
- ✓ El tiempo de respuesta debe ser mínimo; y,
- ✓ El tiempo de vida útil debe ser considerablemente grande.

Existen varios tipos de fuentes de luz y su utilización depende de la velocidad de transmisión y del volumen de información que se desea transmitir.

1.7.1.1.1 Diodo LED (*Light Emitting Diode*)^[47]

El funcionamiento del diodo LED se basa en la emisión espontánea de fotones luego de la recombinación de un par electrón – hueco, generada por la acción de una corriente eléctrica. Esta fuente óptica es muy utilizada en aplicaciones de cortas distancias y de bajo costo. Sus principales características son:

- ✓ La luz emitida es incoherente y su espectro es ancho (entre 30 nm y 150 nm);
- ✓ Su tiempo de respuesta es alto, por eso no es óptimo para altas velocidades;
- ✓ La potencia óptica de un LED oscila entre -10 dBm y -30 dBm, es proporcional a la corriente inyectada y se satura cuando excede el límite permitido;
- ✓ A altas temperaturas la potencia óptica baja, sin embargo, sigue siendo estable;
- ✓ La vida útil de un LED es mayor que la de otras fuentes de luz y su envejecimiento no afecta al nivel de potencia emitida.

- ✓ Trabaja típicamente a 850 nm (GaAs – Arseniuro de Galio) o 1300 nm (InP – Fosforo de Indio).

Su estructura general se muestra en la Figura 1.40.

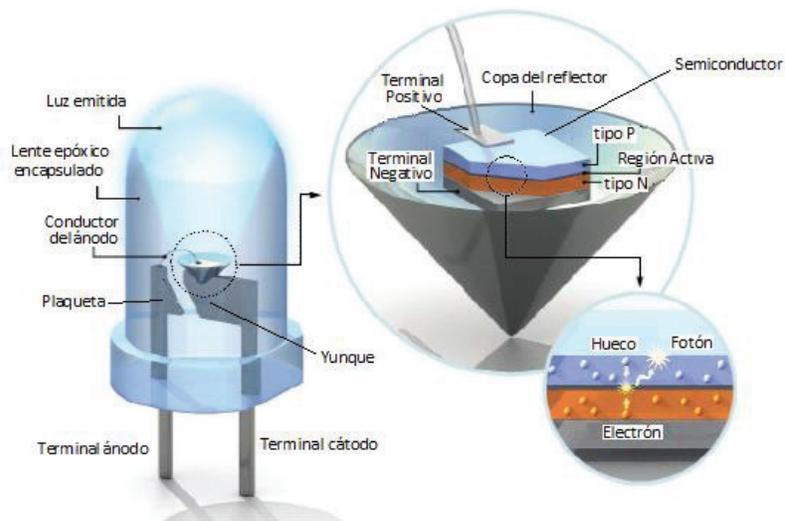


Figura 1.40 Estructura del diodo LED [47]

1.7.1.1.2 Diodo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [45]

Es un dispositivo semiconductor que emite luz en un amplio rango de longitudes de onda (entre 920 nm y 1650 nm), con potencia suficiente para alcanzar grandes distancias y son capaces de transmitir a altas velocidades. Su funcionamiento se basa en la emisión estimulada, misma que se produce cuando un fotón incita a un electrón a pasar de un estado a otro de menor energía. El fotón emitido posee la misma frecuencia y fase que el fotón estimulante. A continuación se citan las principales características de un diodo Láser:

- ✓ La luz emitida es coherente y sincronizada;
- ✓ Es más sencillo de acoplar a la fibra óptica y su eficiencia es mayor a la del LED. Es apto para su utilización con fibras monomodo;
- ✓ Emite con potencias altas (es apto para largas distancias);
- ✓ Emite luz monocromática (se reduce la dispersión por longitud de onda);
- ✓ Debido a que opera en condiciones extremas (altas potencias y elevadas temperaturas), su vida útil es menor que la del diodo LED;
- ✓ Es muy sensible a las variaciones de temperatura;

- ✓ El diodo láser presenta una estructura mucho más compleja que la del diodo LED, por tal motivo su costo es alto.

El láser está constituido por un medio activo que recibe energía óptica o corriente eléctrica para desequilibrar su estado y generar una ganancia óptica, y una cavidad resonante en la que se confinan los fotones que son obligados a sufrir varias reflexiones provocando alta concentración dentro de la cavidad. Existen diodos láser de diferentes tipos y se diferencian básicamente en la forma de la cavidad desde donde se emite la luz. Los más utilizados son:

- **Diodo láser con cavidad *Fabry-Perot* (DL FP):** en este tipo de láser, la realimentación se consigue por medio de una cavidad *Fabry-Perot* (cavidad resonante de tipo MML – *Multiple Longitudinal Mode*), la cual se compone de dos espejos paralelos, separados por una cierta distancia. La luz emitida es altamente coherente (los fotones emitidos poseen características similares de frecuencia, polarización y fase) y su longitud de onda permanece estable aunque la corriente de inyección varíe. En la Figura 1.41 se muestran la estructura básica del láser FP y su espectro óptico.

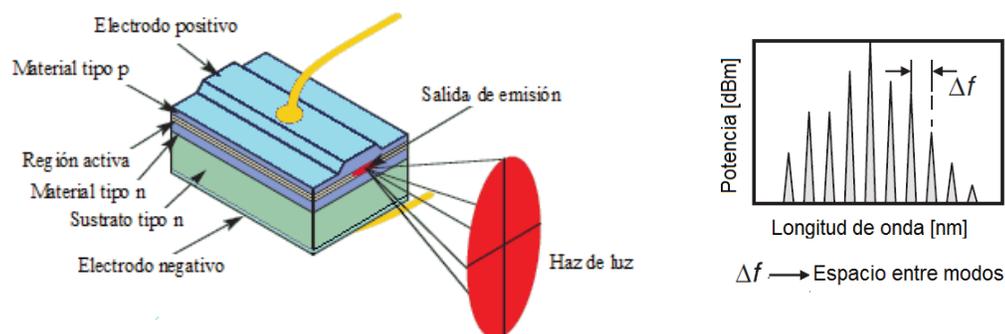


Figura 1.41 Estructura y espectro óptico del diodo láser con cavidad *Fabry – Perot* ^[48] ^[70]

El diodo láser *Fabry - Perot* emite luz en varias longitudes de onda (1310 nm, 1550 nm y 1625 nm) a altas potencias y su espectro óptico presenta gran cantidad de armónicos (varios modos longitudinales) con espaciamento espectral de entre 5 nm y 8 nm (Figura 1.41).

- **El láser de realimentación distribuida (DFB – *Distributed Feedback – Bragg reflector*):** su estructura (Figura 1.42) incorpora un enrejado periódico que actúa como espejo reflejando la luz de forma selectiva, según la longitud de onda dada por la condición de *Brag* (periodo del enrejado de *Brag*). Emiten luz coherente y permiten sintonizar una sola longitud de onda (un solo modo longitudinal). Presenta un “ancho espectral” angosto y su potencia de salida es menor al presentado por DL FP aunque requieren de control de temperatura permanente y monitoreo de la realimentación de longitud de onda.

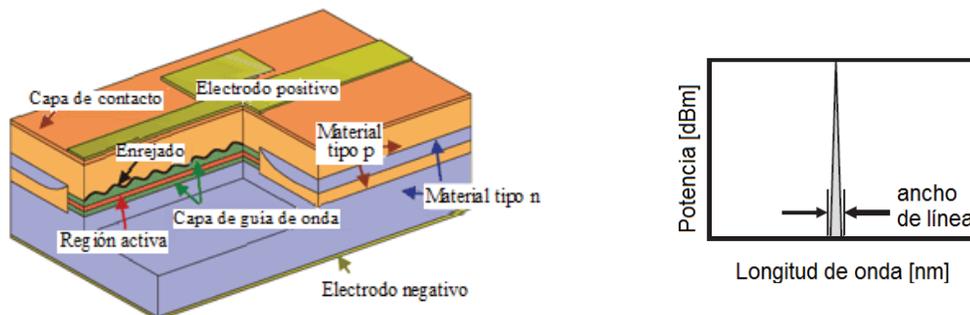


Figura 1.42 Estructura y espectro óptico del diodo láser con cavidad DFB ^[50]

- **Láser de Cavidad Externa (ECL – *External Cavity Laser*):** es de bajo costo, posee una rejilla de difracción externa y un reflector móvil (Figura 1.43). Es muy utilizado en aplicaciones WDM y en tareas como: disminución del ruido de fase, reducción del ancho del haz de luz emitida, sintonización de la longitud de onda de trabajo, entre otros.

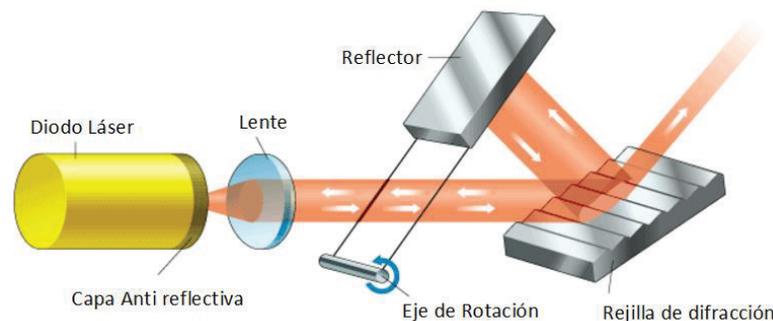


Figura 1.43 Estructura del diodo láser con cavidad externa ^[51]

- **Láser de cavidad vertical y emisión superficial (VCSEL – *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*):** este dispositivo emite luz a través de un haz perpendicular a la superficie del semiconductor ya que la cavidad resonante es

vertical. El VCSEL (Figura 1.44) es un dispositivo pequeño, razón por la que ofrece ciertas ventajas con respecto al láser de emisión lateral que generalmente ocupa espacios grandes. Su principal desventaja es el alto grado de calentamiento, lo cual limita la potencia máxima de emisión.

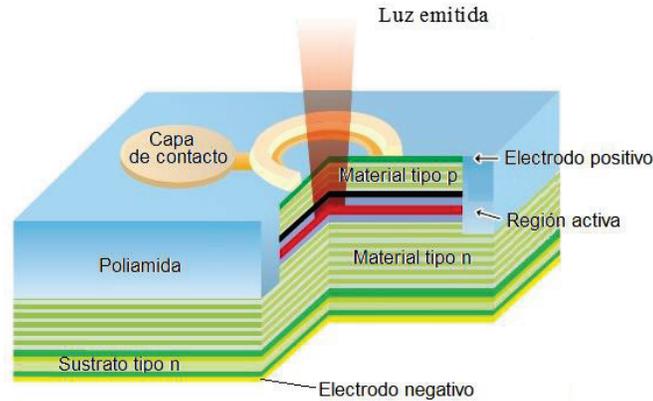


Figura 1.44 Estructura del diodo láser VCSEL [52]

1.7.1.2 Receptores [53] [54]

Son dispositivos que se encargan de detectar la señal óptica y convertirla en señal eléctrica. Para ser idóneos deben cumplir con las siguientes características:

- ✓ Alta sensibilidad;
- ✓ Respuesta rápida;
- ✓ Ruido interno mínimo;
- ✓ Alto rendimiento;
- ✓ Amplio ancho de banda;
- ✓ Larga vida útil y bajo costo.

1.7.1.2.1 Fotodiodo P-I-N (Positivo – Intrínseco – Negativo)

Son dispositivos semiconductores constituidos por tres capas (material tipo P, material Intrínseco y material tipo N, tal como se observa en la Figura 1.45), que al ser polarizados inversamente tienen la capacidad de conducir una cantidad de corriente eléctrica que es proporcional a la cantidad de luz que lo incide. Es de fácil construcción, posee bajo ruido, ancho de banda grande, una vida útil superior a la de otros dispositivos y su rendimiento es mayor cuando trabaja a longitudes de onda grandes. Es muy utilizado en aplicaciones de distancias cortas.

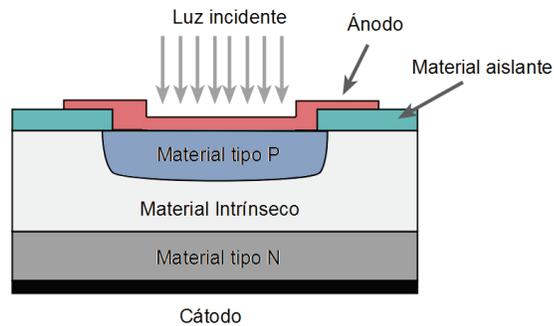


Figura 1.45 Estructura de un fotodiodo PIN [54]

1.7.1.2.2 Fotodiodo APD (Avalanche Photodiodes)

Estos dispositivos están formados por una estructura N-P-I-P (Figura 1.46) y se basan en el efecto avalancha, el cual genera una ganancia interna que a su vez provoca un tiempo de respuesta más largo. Es más susceptible a las variaciones de temperatura que el fotodiodo PIN. Puesto que su diseño es complejo, su costo es alto; sin embargo, su buena sensibilidad y responsividad los hace ideales para aplicaciones de alta velocidad y largas distancias.

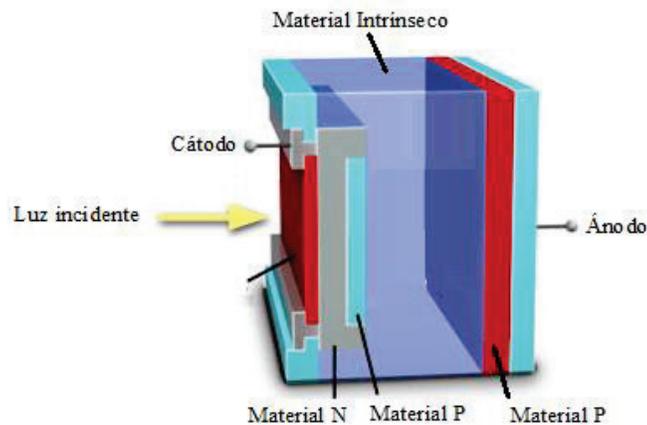


Figura 1.46 Estructura de un fotodiodo APD [54]

1.7.1.3 Amplificadores [3] [55]

Los métodos de amplificación tradicionales realizaban en primer lugar la conversión óptica a eléctrica, luego, amplificaban la señal y la procesaban, por último, ejecutaban la conversión electro - óptica e inyectaban la señal al nuevo tramo de fibra óptica. Este proceso aumentaba la complejidad y se convertía en un limitante al momento de repotenciar un sistema óptico. En la actualidad es posible tener sistemas con dispositivos totalmente ópticos, esto ayuda a incrementar la

capacidad del medio y la velocidad de transmisión, además, permite alcanzar las mayores distancias posibles. Los amplificadores ópticos de mayor utilización son:

1.7.1.3.1 Amplificador óptico semiconductor (SOA - Semiconductor Optical Amplifier) ^[54]

Este dispositivo posee una estructura similar a la de un láser con cavidad *Fabry-Perot*, pero no utiliza realimentación (Figura 1.47). Su tamaño es reducido y el bombeo se realiza de forma eléctrica. En general es menos costoso que otros amplificadores ópticos pero su trabajo es deficiente debido a su alto factor de ruido, poca ganancia, alta sensibilidad a la polarización y aunque su comportamiento a altas velocidades presenta no linealidades, es aprovechado en aplicaciones como: conmutación óptica, conversión de longitud de onda y otras que están en estudio (por ejemplo: implementación de puertas lógicas).

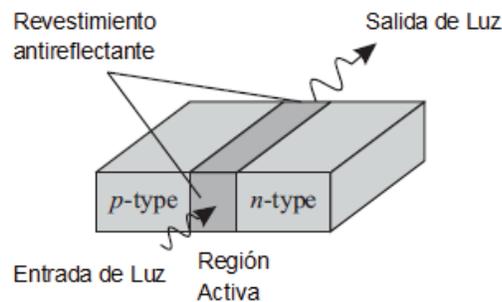


Figura 1.47 Esquema de un amplificador óptico semiconductor ^[54]

1.7.1.3.2 Amplificador de fibra dopada de Erblio (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier)

^[55]

Este dispositivo trabaja en el dominio óptico y permite amplificar la señal en rangos de 20 dB a 40 dB. Su funcionamiento se basa en la utilización de un tramo de fibra óptica dopada con Erblio, en la que se genera una emisión de fotones al ser estimulada con una señal de bombeo (Figura 1.48). Este amplificador presenta bajo ruido, alta ganancia y baja sensibilidad a la polarización de la luz de entrada; estas ventajas lo hacen ideal para aplicaciones que requieren alta capacidad y largas distancias (redes con tecnología DWDM). Entre las desventajas importantes se pueden indicar que sólo operan en la tercera ventana (con ciertas excepciones) y que su ganancia no es uniforme para todas las longitudes de onda (trabaja mejor cerca de su saturación, donde la curva de ganancia es plana).

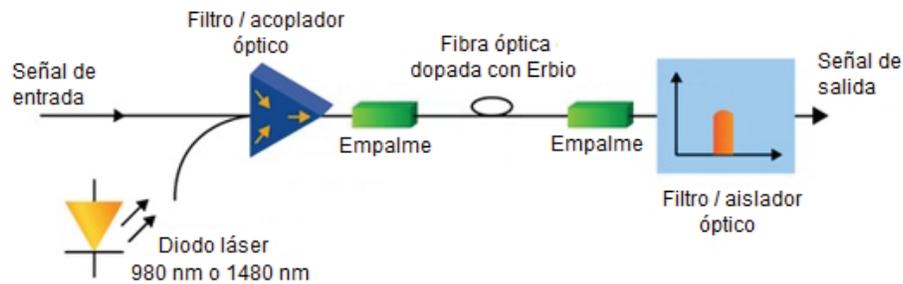


Figura 1.48 Amplificador EDFA ^[55]

1.7.1.3.3 Amplificador RAMAN ^[55]

Este dispositivo permite amplificar la señal en un rango de entre 10 dB y 15 dB (Figura 1.49); trabaja en base al efecto Raman (SRS - *Stimulated Raman Scattering*), mismo que constituye un efecto no lineal producido por la interacción de las ondas de luz con las moléculas del medio de transmisión. En este caso, la señal que provoca la amplificación es la misma señal que transmite la información. Si por la fibra se transmite más de un canal, cada uno dará lugar al efecto Raman en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre y cuando dichas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material. La señal de bombeo se puede acoplar a la fibra tanto en la misma dirección en la que se transmite la señal como en el sentido contrario, sin embargo, es preferible utilizar el bombeo en sentido contrario para evitar la amplificación de las componentes no lineales. La principal desventaja de este tipo de amplificadores es que requieren de alta potencia de bombeo. Entre sus principales ventajas se puede destacar que trabaja en un rango de longitudes de onda mayor a los EDFA.

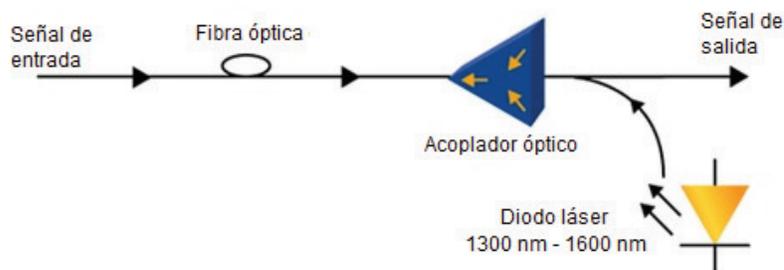


Figura 1.49 Amplificador RAMAN utilizando bombeo hacia atrás ^[55]

1.7.2 DISPOSITIVOS ÓPTICOS PASIVOS ^{[3] [10] [66]}

En la última década se ha observado un rápido crecimiento de las tecnologías de redes de acceso con fibra óptica. Esto se ha logrado gracias a la utilización de las arquitecturas PON (*Passive Optical Networks*), mismas que permiten eliminar todos los componentes activos que existen entre el proveedor y el cliente, y utilizan en su lugar componentes pasivos (para dividir, guiar y cambiar la dirección de una señal óptica) que ayudan a gestionar el tráfico en la red y a reducir costos. A continuación se detallan algunos de los componentes pasivos más utilizados en redes PON.

1.7.2.1 Splitter (Divisor de potencia óptica) ^{[56] [57]}

Es un dispositivo que posee un puerto de entrada y múltiples puertos de salida. Permite dividir la potencia de entrada en un factor que depende del número de salidas (2, 4, 8, 16, 32, 64 y hasta 128); la división de la señal puede ser balanceada (por ejemplo 50:50 para un splitter 1x2) o no balanceada (por ejemplo 10:90, 20:80, 30:70, etc. para un splitter 1x2). Cuando la división es balanceada, las pérdidas esperadas en cada ramal son:

NÚMERO DE PUERTOS	PÉRDIDAS POR DIVISIÓN (dB)
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18

Tabla 1.8 Pérdida en splitters (se excluyen conexiones y pérdidas en exceso) ^[56]

Para un splitter con $N=2^n$ salidas balanceadas (n es un entero positivo), en el que se inyecta una señal de potencia P_{in} , la potencia de salida en cada ramal es:

$$P_{Salida} = P_{in} [dBm] - 3n - \alpha_{exceso} [dBm] \quad \text{Ecuación 1.6} \supset [57]$$

Donde α_{exceso} representa al valor de las pérdidas adicionales existentes en un splitter, cuyo valor típico es de 2 dB.

Los splitters son comercializados en diferentes tipos y tamaños, su uso dependerá de la aplicación final. Por su estructura, los splitters más utilizados son:

1.7.2.1.1 PLC (Planar Lightwave Circuit) ^[58] ^[59]

Se lo conoce también como chip óptico (Figura 1.50), posee buena estabilidad y su probabilidad de fallos es muy baja. Las fibras de salida se empaquetan en forma de cinta y son utilizados generalmente en divisores con alto número de salidas. Su principal desventaja es que su producción es compleja y costosa debido a que su tamaño es muy reducido. En la Tabla 1.9 se muestran las principales características de este tipo de splitter.

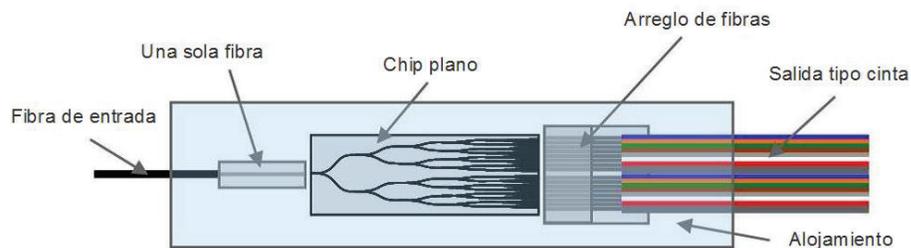


Figura 1.50 Estructura de un Splitter tipo PLC ^[58]

SPLITTER PLC						
	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64
Pérdidas de Inserción IL (dB)	≤4.0	≤7.3	≤10.5	≤13.8	≤16.8	≤20.4
Pérdidas de Retorno RL (dB)	≥55	≥55	≥55	≥55	≥55	≥55
Pérdida Dependiente de Polarización PDL (dB)	≤0.2	≤0.2	≤0.2	≤0.25	≤0.25	≤0.3
Uniformidad (dB)	≤0.5	≤0.6	≤0.8	≤1	≤1.2	≤1.5

Tabla 1.9 Parámetros característicos de un splitter tipo PLC ^[59]

1.7.2.1.2 FBT (Fused Biconical Tape) ^[56] ^[60]

Se construyen enrollando dos o más fibras, las cuales son calentadas hasta que sus núcleos se fusionen (Figura 1.51). Su tamaño depende del número de derivaciones, por lo que se utiliza en divisores con pocas salidas. Su costo es relativamente bajo ya que son fáciles de producir. Entre sus principales desventajas se pueden mencionar que no garantizan una división equitativa de la potencia de entrada y son susceptibles a fallos por temperaturas extremas o manipulación incorrecta. En la Tabla 1.10 se muestran sus principales características técnicas.

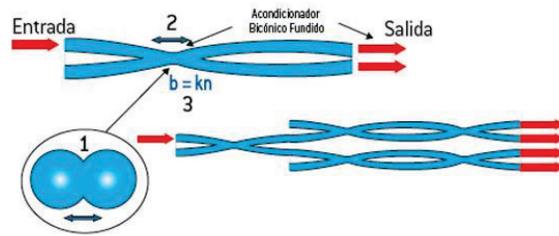


Figura 1.51 Estructura de un Splitter tipo FBT [56]

SPLITTER FBT					
	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32
Pérdidas de Inserción IL (dB)	<3.6	<7.2	<10.7	<14.0	<17.6
Pérdidas de Retorno RL (dB)	>55	>55	>55	>55	>55
Pérdida dependiente de Polarización PDL (dB)	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.6
Uniformidad (dB)	<0.8	<1	<1.3	<1.6	<1.9

Tabla 1.10 Parámetros característicos de un splitter tipo FBT [60]

1.7.2.2 Combinador (*Combiner* - Acoplador óptico)

Este dispositivo permite combinar la potencia óptica transportada por dos o más fibras de entrada en una sola fibra de salida (Figura 1.52). Si a un acoplador ingresan señales con potencias iguales P_{in} , la potencia de salida por cada grupo de 2^n (n es entero positivo) señales agregadas, se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{Salida} = P_{in} [dBm] + 3n - \alpha_{exceso} [dBm] \quad \text{Ecuación 1.7 [57]}$$

Donde α_{exceso} es el valor de las pérdidas adicionales existentes en el acoplador, cuyo valor típico se aproxima a 2 dB.

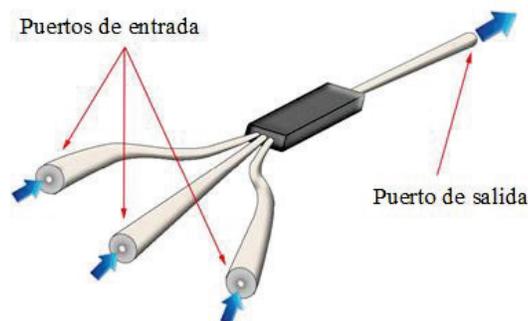


Figura 1.52 Acoplador óptico (*combiner*) 3x1 [61]

1.7.2.3 Multiplexor y demultiplexor óptico [63]

Son dispositivos que procesan la señal en función de su longitud de onda; son muy utilizados en sistemas de alta velocidad, redes de acceso y enlaces troncales. En la Figura 1.53 se muestra la estructura general de un multiplexor óptico común.

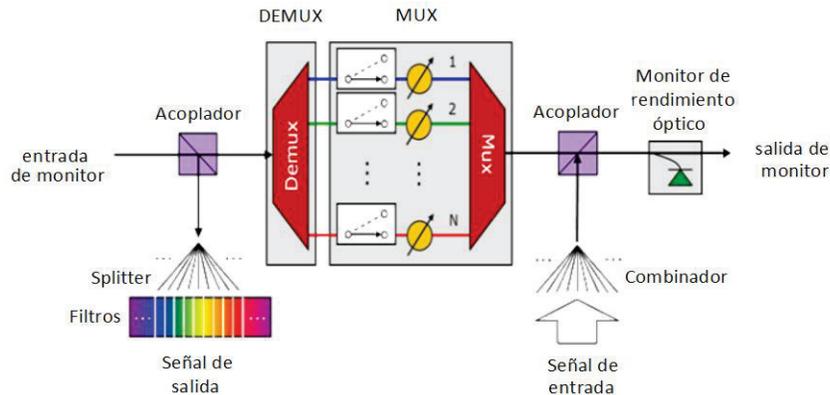


Figura 1.53 MUX/DEMUX óptico [63]

1.7.2.4 Atenuador óptico [64] [65]

Estos componentes permiten limitar la intensidad de la señal que se propaga a través de una fibra óptica con el fin de proporcionar estabilidad y evitar la saturación en el transmisor. Existen 2 tipos de atenuadores: fijos (permiten reducir la potencia a un valor fijo de atenuación) y variables (son capaces de atenuar la señal de entrada de manera controlada), los cuales se muestran en la Figura 1.54:

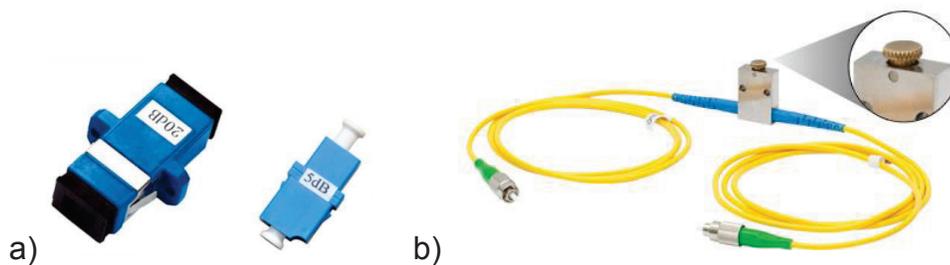


Figura 1.54 a) atenuador fijo y b) atenuador variable [64] [65]

1.8 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA [67] [68] [69]

En esta sección se revisa la estructura general de un enlace de fibra óptica, el proceso para su diseño y los tipos de redes ópticas más utilizadas por los proveedores de servicios de telecomunicaciones en el país.

1.8.1 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA

Un sistema de comunicaciones óptico guiado consta de tres partes fundamentales: transmisor (fuente de luz), medio de transmisión (fibra óptica) y receptor (detector de luz). La Figura 1.55 muestra el esquema básico de un enlace de fibra óptica.

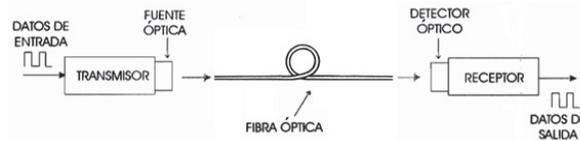


Figura 1.55 Esquema básico de un sistema de comunicaciones óptico ^[69]

1.8.2 DISEÑO DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA

El diseño de un enlace de fibra óptica es el proceso mediante el cual se identifican los parámetros que podrían influir directa e indirectamente en el correcto desempeño de una red. Algunos de los aspectos relevantes que deben considerarse al momento de diseñar una red de fibra óptica son:

- ✓ Potencia de transmisión;
- ✓ Atenuación del enlace;
- ✓ Factores medio ambientales del entorno de operación del cable;
- ✓ Situación geográfica;
- ✓ Tipo de fibra óptica a utilizar (monomodo o multimodo);
- ✓ Recomendaciones técnicas provistas por el fabricante del cable;
- ✓ Características técnicas de los elementos activos y pasivos que formarán parte del enlace (sensibilidad del receptor, longitud de onda de trabajo, pérdidas en conectores, pérdidas en empalmes, pérdidas por división, etc.);
- ✓ Normas técnicas para la implementación del enlace;
- ✓ Autorización para el uso de infraestructura existente (postes, torres o ductos subterráneos) o para la instalación de infraestructura nueva.

El diseño de la red permite además estimar los costos del proyecto, definir un cronograma de implementación, establecer reglamentos de seguridad industrial y preparar procedimientos de gestión de calidad. El primer paso del diseño es determinar el presupuesto de potencia del enlace, esto se detalla a continuación.

1.8.2.1 Cálculo de presupuesto de potencia ^{[67] [68]}

La atenuación total en un enlace de fibra óptica se calcula con la Ecuación 1.8:

$$A_T = La_{cable} + n_{emp}a_{emp} + n_{con}a_{con} + a_{res} \text{ [dB]} \quad \text{Ecuación 1.8} \text{ }^{[67]}$$

Donde:	A_T	→	atenuación total
	L	→	longitud del cable en Km
	a_{cable}	→	coeficiente de atenuación de la fibra óptica en dB/Km
	n_{emp}	→	número de empalmes
	a_{emp}	→	atenuación por empalme en dB
	n_{con}	→	número de conectores
	a_{con}	→	atenuación por conector en dB
	a_{res}	→	reserva de atenuación en dB

Se consideran valores típicos de pérdidas por empalmes de 0.1 dB y pérdidas por conectores de 0.5 dB. La reserva de atenuación considera empalmes futuros (por reparaciones), pérdidas por envejecimiento de la fibra óptica (mayor degradación por absorción de grupos OH) o cualquier otro aspecto que implique aumento de atenuación en el sistema óptico. El margen de resguardo se establece entre 3 dB a 10 dB, dependiendo de la red a implementarse y de los posibles riesgos que puedan afectar el correcto desempeño de la misma.

1.8.3 TIPOS DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA ^{[69] [70] [107] [108]}

1.8.3.1 Red pasiva simple

La red pasiva simple (Figura 1.56) consta de transmisor, canal óptico (que puede contener elementos pasivos como empalmes y conectores) y receptor. Es un enlace punto a punto y generalmente se lo utiliza en aplicaciones de largas distancias (interconexión de centrales telefónicas y nodos a distancias inclusive mayores a 100 Km) sin necesidad de utilizar elementos activos para regeneración y amplificación de la señal óptica. Actualmente este tipo de red no se utiliza en aplicaciones de cortas distancias (radio bases de telefonía móvil, última milla o gabinetes *outdoor*), ya que se prefiere el uso de tecnologías PON.

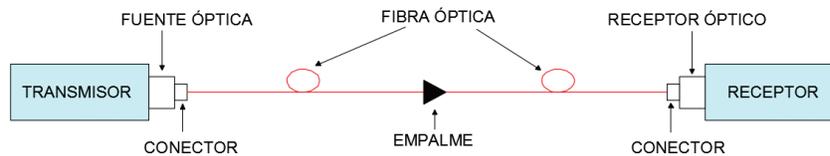


Figura 1.56 Esquema de un enlace pasivo simple ^[69]

1.8.3.2 Redes PON (*Passive Optical Network*) ^{[107] [108]}

Son redes de acceso punto – multipunto que permiten distribuir el servicio a varios clientes a partir de una sola fibra óptica sin necesidad de utilizar elementos activos en ningún punto intermedio. La tecnología PON más utilizada se conoce como GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) y sus características se definen en las normas ITU-T G.984.1/2/3/4. Algunas de sus características son: velocidad de transmisión de 1.2 Gbps en subida y 2.4 Gbps en descarga; la distancia física máxima entre OLT y ONU es de 20 Km; utiliza 3 canales para transmisión: 1310 nm (voz y datos en subida), 1490 nm (voz y datos en bajada) y 1550 nm (difusión de señales de TV); y la atenuación máxima de la red debe ser de 5 dB a 20 dB (Clase A), 10 dB a 25 dB (Clase B) o 15 dB a 30 dB (Clase C).

- **OLT (*Optical Line Terminal*):** es el equipo encargado de conectar la red troncal con la red PON. Generalmente se ubica en una central o nodo.
- **Splitter:** son aquellos que replican la señal de entrada a través de sus puertos de salida. Según sea el diseño de la red, pueden ser primarios o secundarios.
- **ONU (*Optical Network Unit*):** representa al terminal del usuario final.

1.8.3.2.1 Redes de acceso ^[10]

Conocidas también como redes de "última milla", comprenden el "último tramo" de la red que conecta la central o nodo del proveedor de servicios con el usuario final. Mediante estas redes es posible proporcionar acceso de alta velocidad a diferentes tipos de usuarios (empresas grandes, medianas, pequeñas y hogares individuales). Las redes de acceso permiten proveer un servicio completo de telecomunicaciones (que abarca una variedad de servicios como: telefonía, acceso a la ISDN (*Integrated Services Digital Network*), *broadcast* de video, video interactivo, acceso a internet, IPTV, video bajo demanda, video conferencia y servicios para negocios).

Las redes de acceso en la actualidad recurren a las tecnologías PON y presentan varias topologías, entre las más utilizadas están las siguientes:

➤ **Red tipo árbol con un nivel de splitteo**

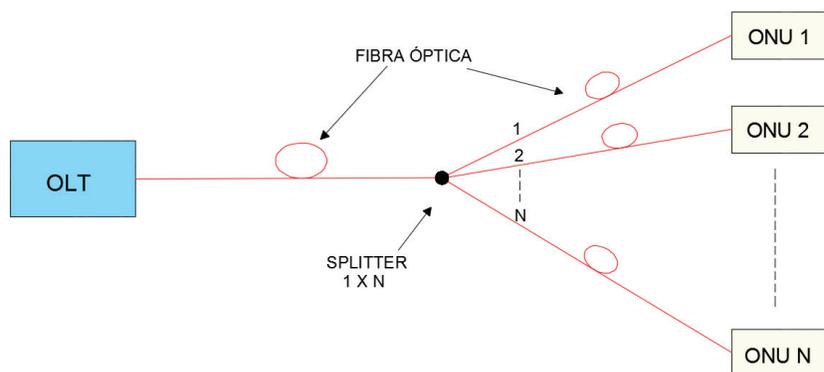


Figura 1.57 Esquema de una red PON tipo árbol con un nivel de splitteo [70]

➤ **Red tipo árbol con dos niveles de splitteo**

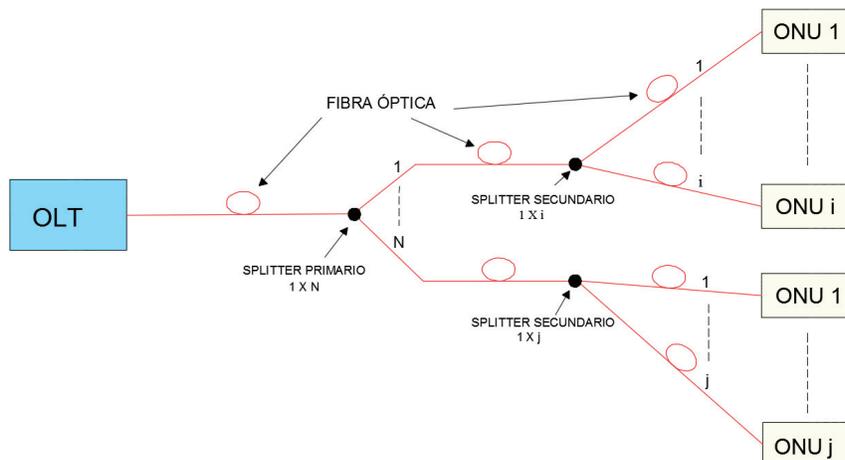


Figura 1.58 Esquema de una red PON tipo árbol con dos niveles de splitteo [70]

➤ **Red tipo bus**

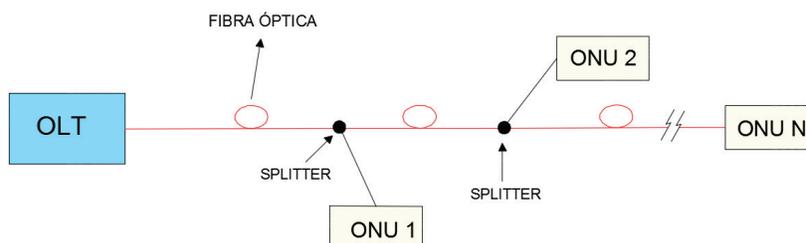


Figura 1.59 Esquema de una red PON tipo bus [70]

➤ **Red tipo anillo**

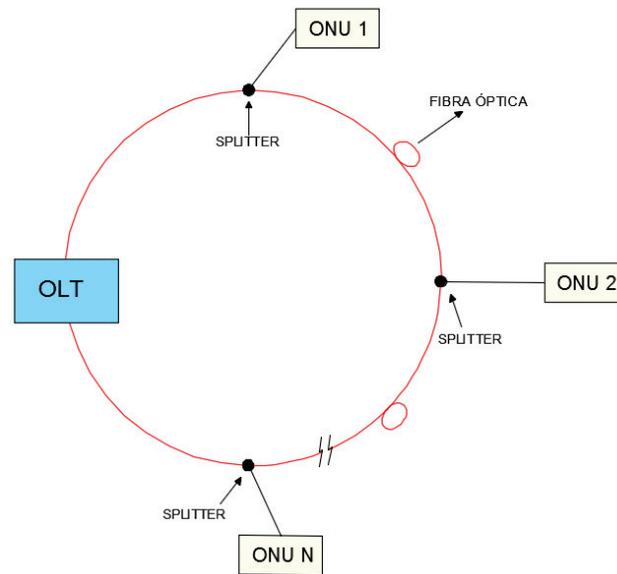


Figura 1.60 Esquema de una red PON tipo anillo [70]

1.8.3.3 **Redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [93] 94]**

Utilizan multiplexación por división de longitud de onda para transmitir por una sola fibra óptica varios canales con la misma velocidad, dejando una separación suficiente para evitar interferencias entre canales (Figura 1.61). Existen dos variantes de WDM:

- **DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*):** la multiplexación por división de longitud de onda densa posee un espacio estrecho entre canales (entre 12.5 GHz y 100 GHz o múltiplos de 100 GHz) con lo cual se obtiene mayor cantidad de canales; opera en las bandas C y L.
- **CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*):** la multiplexación por división aproximada de longitud de onda es menos compleja que DWDM porque posee un espaciamiento más ancho entre canales (alrededor de 20 nm), es ideal para cortas distancias, y opera en la segunda y tercera ventana.

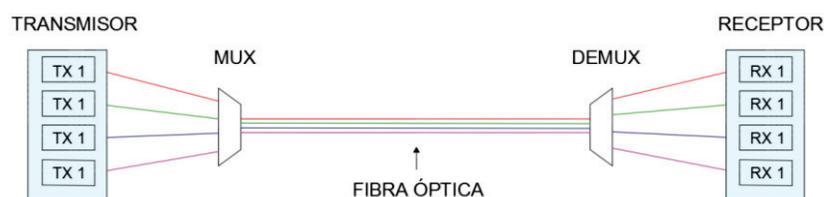


Figura 1.61 Esquema de una red WDM [71]

1.8.3.4 Redes WDM - PON

Esta tecnología es adecuada para redes de acceso (red de conexión entre suscriptores y proveedor) y *backhaul* (red de retorno), ofrecen una solución eficaz y económica para mejorar la escalabilidad de la red a través del uso eficiente de la fibra óptica, permitiendo llegar a más usuarios y a mayores distancias. En la Figura 1.62 se muestra un esquema de una red WDM-PON, la cual permite asignar un canal óptico diferente a cada usuario, esto quiere decir que tendrá un aumento significativo en la calidad del servicio a un costo mucho menor.

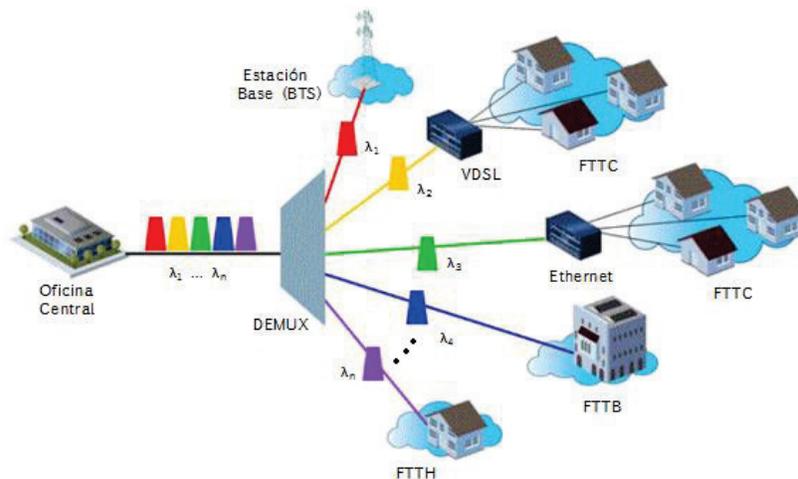


Figura 1.62 Esquema de una red WDM – PON [72]

1.9 NORMAS DE SEGURIDAD EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS [73] [74] [75] [76] [77]

El trabajo en el laboratorio presenta una serie de riesgos de origen y consecuencias muy variadas, relacionados básicamente con la manipulación de herramientas corto punzantes y con la operación de equipos cuyas emisiones presentan características de cierto grado de peligrosidad. La forma de minimizar los accidentes es identificando las fuentes de peligro, conociendo los riesgos asociados al trabajo con fibras ópticas y cumpliendo con las normativas de seguridad.

1.9.1 OBLIGACIONES

Tanto profesores como estudiantes están obligados a identificar las fuentes de peligro, conocer los riesgos y cumplir con las normativas correspondientes.

1.9.1.1 Obligaciones de los profesores

- Vigilar que los alumnos cumplan permanentemente lo establecido en el procedimiento de seguridad, así como de todas las disposiciones y normas establecidas para la actividad a desarrollarse;
- Comprobar que durante la ejecución de las prácticas no se encuentren personas no autorizadas en el laboratorio ya que podrían estar expuestos a riesgos producidos por:
 - ✓ Restos de fibra óptica y otros residuos desprendibles;
 - ✓ Vapores generados por solventes y otras sustancias;
 - ✓ Manipulación no adecuada de herramientas.
- Confirmar que los estudiantes estén capacitados para realizar la práctica respectiva.

1.9.1.2 Obligaciones de los estudiantes

- Es responsabilidad de los estudiantes, conocer las normas de seguridad establecidas para el correcto desempeño de las actividades prácticas;
- Controlar en todo momento los factores de riesgos inherentes a las actividades prácticas a desarrollarse.
- Comunicar al Profesor las novedades o situaciones que se consideren como generadoras de factores de riesgo;
- Mantener las zonas de trabajo en orden y libres de desperdicios generados durante la ejecución de las prácticas.

1.9.2 PRECAUCIONES QUE DEBEN CONSIDERARSE ANTES DE EMPEZAR A TRABAJAR EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

- Antes de empezar una actividad en el laboratorio, es necesario que el estudiante se familiarice con las normas de seguridad y los procedimientos establecidos para la ejecución de la práctica. Es importante que se

identifiquen los lugares donde se encuentra el extintor, botiquín, salida de emergencia y controles eléctricos. Además, el estudiante debe poseer los elementos de seguridad requeridos para la práctica respectiva (gafas protectoras, guantes, etc.).

- Es preciso comprobar el correcto funcionamiento de un equipo o herramienta antes de ser utilizado. En caso de encontrar novedades, se debe notificar a la brevedad posible al responsable del laboratorio.
- Los residuos de fibra óptica deben colocarse en contenedores cerrados y debidamente etiquetados. Este material es tan ligero que puede elevarse fácilmente y alcanzar el ojo humano o impregnarse en la piel (la extracción de la fibra puede ser muy compleja).
- Los elementos de refuerzo del cable de fibra óptica están constituidos por materiales rígidos y sus residuos constituyen un factor de alto riesgo para quien los manipula, además, podrían provocar daños en la fibra óptica.
- La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por esto, no se debe observar directamente y tampoco se debe apuntar al rostro de otra persona con un elemento que emita luz.
- Verificar que cada fuente óptica posea información acerca de la Clase o grupo de riesgo al que pertenece la luz emitida.
- Los líquidos que se utilizan para limpiar las fibras ópticas y para eliminar los compuestos de relleno, pueden irritar los ojos y la piel en algunas personas.
- La inhalación prolongada de grandes cantidades de alcohol isopropílico (utilizado para limpiar la fibra óptica desnuda) puede producir cefalea, náuseas y vómitos. Para evitar esto, es necesario utilizar los elementos de seguridad adecuados.

1.9.3 NORMAS PARA EL CORRECTO DESEMPEÑO DE LAS ACTIVIDADES EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

A continuación se describen ciertas normas básicas que deben ser aplicadas para el desempeño eficiente y seguro de cada una de las actividades prácticas en el laboratorio.

➤ **NORMAS PARA LOS ESTUDIANTES**

- ✓ Cada estudiante deberá utilizar obligatoriamente los implementos de seguridad requeridos según la actividad que se realice.
- ✓ Las personas que lleven el cabello largo, deben recogerlo antes de realizar cualquier actividad práctica.
- ✓ Está prohibido fumar y consumir alimentos o bebidas en el laboratorio.
- ✓ Considerar que los trabajos de conectorización y elaboración de empalmes requieren un alto grado de asepsia para obtener resultados adecuados.
- ✓ Colocar los residuos en los contenedores destinados para el efecto.

➤ **NORMAS PARA LA UTILIZACIÓN DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS**

- ✓ Mantener las mesas de trabajo perfectamente limpias y ordenadas;
- ✓ Colocar los equipos, herramientas y accesorios en los lugares destinados para su almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo, deben desconectarse de la red eléctrica.
- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
- ✓ No se debe manipular ni alterar la configuración de los equipos a menos que el Profesor indique lo contrario.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y SELECCIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS A UTILIZARSE EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

La Escuela Politécnica Nacional a través de sus áreas correspondientes ha realizado importantes inversiones con el propósito de implementar un Laboratorio de Comunicaciones Ópticas. En este capítulo se presenta un informe detallado de los equipos, herramientas y accesorios adquiridos, en el que se incluye una breve descripción de las características técnicas de los mismos. Mayor información técnica se encuentra en la documentación proporcionada por los fabricantes, adjunta en los anexos de este trabajo.

Las actividades prácticas serán eficaces siempre y cuando se cuente con los recursos suficientes para cumplir con los objetivos planteados, por esto, en este capítulo se incluyen sugerencias para la adquisición de equipos y accesorios que no están disponibles en el laboratorio, en función de un análisis técnico y económico de los bienes requeridos.

El laboratorio de comunicaciones ópticas requiere de un espacio suficiente y adecuado, en el que se disponga de mesas de trabajo apropiadas, un rack de piso para instalación de equipos, mobiliario para el almacenamiento de equipos y accesorios, instalaciones eléctricas y cableado estructurado funcional y correctamente etiquetado, y otras características que permitan contar con un lugar apropiado para la realización de prácticas enfocadas básicamente a:

- ✓ Comprobar los conceptos inherentes a la transmisión en fibra óptica;
- ✓ Adquirir habilidades para detectar y corregir fallas en enlaces de fibra óptica;
- ✓ Analizar las características de los dispositivos ópticos (pasivos y activos);
- ✓ Optimizar los procesos de mantenimiento preventivo y correctivo en sistemas de comunicaciones ópticos.

El adiestramiento de los estudiantes en las áreas mencionadas le permitirá ser partícipe activo y mantenerse a la vanguardia en el ámbito laboral.

2.1 INVENTARIO DE LOS RECURSOS DISPONIBLES EN LA FIEE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

En esta sección se detallan las principales características técnicas de los recursos con los que cuenta la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica para la implementación del laboratorio de comunicaciones ópticas.

2.1.1 EQUIPOS PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

Los equipos de medición constituyen la parte fundamental del laboratorio, de sus características y atributos dependerá la calidad de los resultados obtenidos en las prácticas experimentales. A continuación se citan los equipos disponibles para la el laboratorio de comunicaciones ópticas:

2.1.1.1 Analizador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*) ^[78]

El OSA YOKOGAWA AQ6370D mostrado en la Figura 2.1 está diseñado para evaluar y analizar los parámetros característicos de los canales ópticos, fuentes de luz y otros componentes de un sistema de comunicaciones óptico. El OSA es un instrumento de precisión que permite visualizar la distribución de potencia óptica durante un intervalo de longitud de onda específico. En la traza que muestra el OSA se presenta la potencia en el eje vertical y la longitud de onda en el eje horizontal. En la Tabla 2.1 se muestra el detalle y cantidad de los analizadores de espectros ópticos disponibles.

EQUIPO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Analizador de Espectro Óptico (OSA - <i>Optical Spectrum Analyzer</i>)	4	YOKOGAWA	AQ6370D

Tabla 2.1 Analizador de espectro óptico disponible en la FIEE

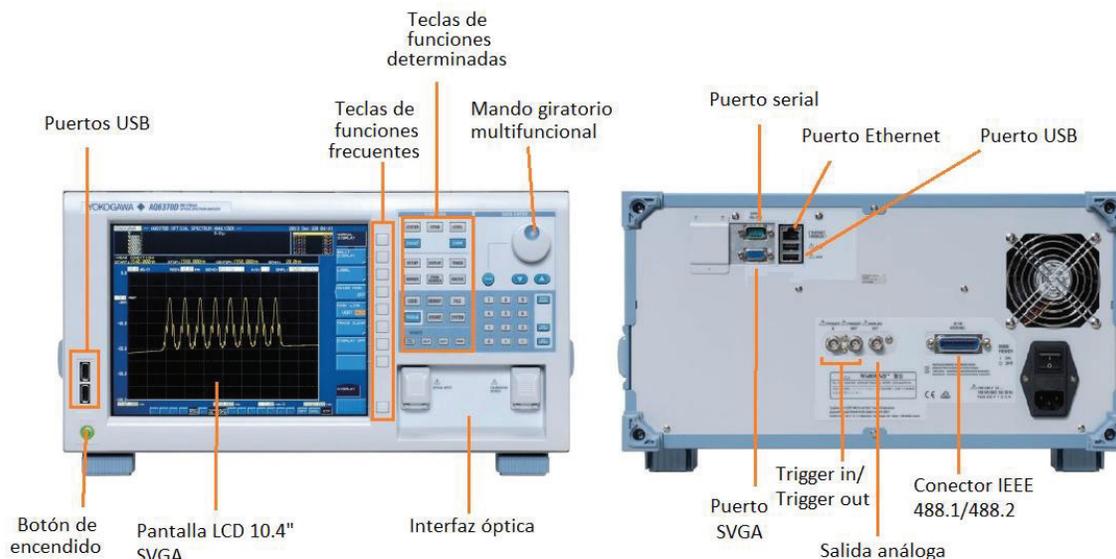


Figura 2.1 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D [78]

Algunas de las tareas específicas que este equipo permite realizar son:

- ✓ Medir la relación señal/ruido óptica (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*) para conocer el rendimiento de una red WDM;
- ✓ Medición del espacio entre canales en una fibra óptica determinada. Útil para conocer la posibilidad de incremento del número de canales y del ancho de banda total;
- ✓ Estimar los parámetros característicos de amplificadores ópticos;
- ✓ Analizar filtros ópticos (PK, BTM, WDM-PK, WDM-BTM);
- ✓ Evaluar la longitud de onda central y el ancho espectral de una señal;
- ✓ Analizar fuentes de luz láser tipo DFB y *Fabry - Perot* (VCSEL).

Entre las principales características técnicas del OSA AQ6370D se destacan:

- ✓ Trabaja con fibras monomodo (SM) y multimodo (MM);
- ✓ Opera en un rango de longitudes de onda que va de 600 nm a 1700 nm;
- ✓ Resolución de muestreo mínima: 0.001 nm;
- ✓ Utiliza conector FC y SC con terminaciones PC, UPC y APC;
- ✓ Capacidad de almacenamiento interno: 512 MB;
- ✓ Almacenamiento externo mediante puerto USB compatible con formato FAT32;
- ✓ Periodicidad de calibración: 1 año;
- ✓ Pérdidas por retorno típico: 35 dB (con conector APC);

- ✓ Potencia de entrada máxima: +20 dBm (nivel de guarda máximo de +25 dBm);
- ✓ Posee mecanismos de acoplamiento que impiden que las fibras internas se rayen o se ensucien;
- ✓ La calibración de longitud de onda y alineación óptica se realiza de forma automática utilizando la fuente de luz incorporada o una fuente externa;
- ✓ La resolución puede ser calibrada por el usuario utilizando una fuente de luz externa del tipo DFB-LD (*Distributed Feedback Laser - Laser Diode*);
- ✓ Posee una función para calibrar la resolución del ancho de banda;
- ✓ Puertos de conexión: Ethernet y USB;
- ✓ Los niveles de sensibilidad para una resolución superior a 0.05 nm son:

Sensibilidad [dBm]	Rango de longitudes de onda [nm]
-90	1300 - 1620
-85	1000 - 1300
-60	600 - 1000

Tabla 2.2 Sensibilidad del OSA YOKOGAWA AQ6370D ^[78]

- ✓ El rango dinámico depende de la resolución y del pico de longitud de onda:

Pico de longitud de onda [nm]	Resolución [nm]	Rango dinámico [dB]
± 0.1	0.02	37
± 0.2	0.02	55
± 0.2	0.05	45
± 0.4	0.05	62
± 1.0	0.05	73
± 0.2	0.1	40
± 0.4	0.1	57

Tabla 2.3 Rango dinámico del OSA YOKOGAWA AQ6370D ^[78]

2.1.1.2 OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) ^{[90] [91]}

El OTDR se utiliza para detectar fallas (eventos) y controlar los factores que podrían generar defectos en un enlace de fibra óptica. Para este propósito, el OTDR emite una ráfaga de pulsos de luz, los cuales, al encontrarse con un evento en la fibra óptica sufren una reflexión que se retrodispersa. La luz que retorna se detecta, se

procesa para encontrar la posición de la falla y se genera en el OTDR una traza en la que se representa la atenuación de la señal en función de la longitud de la fibra óptica. La distancia del evento se calcula considerando el tiempo que tarda la señal en retornar y la velocidad de transmisión en la fibra óptica. Para obtener mejores resultados, es necesario considerar las siguientes definiciones:

- ✓ **Rango dinámico:** determina la longitud máxima que puede analizar el OTDR.
- ✓ **Zona muerta:** es la distancia mínima a la cual un OTDR es capaz de detectar un evento luego de la ocurrencia de otro.
- ✓ **Resolución de muestreo:** se define como la distancia mínima entre dos puntos de muestreo consecutivos adquiridos por el instrumento. A menor distancia, se obtiene mayor cantidad de puntos de adquisición, lo cual indica una mayor exactitud de la información obtenida.
- ✓ **Precisión:** Es la capacidad de comparar la cantidad medida con un valor de referencia (por ejemplo pérdidas en el empalme, en conector, etc.).

Para la implementación del laboratorio se disponen de los siguientes equipos:

EQUIPO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
MINI OTDR	2	SUNRISE TELECOM	SUNSET MTT con módulo SSMTT-35
OTDR (<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>)	2	YOKOGAWA	AQ7283

Tabla 2.4 Detalle de OTDRs disponibles

➤ **MINI OTDR MODULE SSMTT-35** ^[91]

Este equipo se muestra en la Figura 2.2, es modular, compacto y ofrece la posibilidad de trabajar como OTDR gracias a su módulo SSMTT-35. Permite realizar pruebas tanto en fibras Multimodo (MM) como Monomodo (SM). Entre sus principales características técnicas se pueden mencionar las siguientes:



Figura 2.2 MICRO OTDR MODULE SSMTT-35 [91]

- ✓ Longitud de onda de trabajo: 850 nm \pm 20 nm, 1310 nm \pm 20 nm, 1550 nm \pm 20 nm;
- ✓ Rango dinámico: 28 dB a 1310 nm y 26 dB a 1550 nm.
- ✓ Zona muerta entre eventos: <5 m a 10 ns
- ✓ Alcance: hasta 120 Km;
- ✓ Ancho de pulso: desde 10 ns hasta 10000 ns;
- ✓ Resolución de muestreo mínimo: 0.6 m;
- ✓ Puntos de muestreo máximo: 16000;
- ✓ Tipo de conector: FC/UPC.

El módulo SSMTT-35 posee herramientas adicionales como: localizador visual de fallas (650 nm \pm 15 nm, 500 W – 1000 W), medidor de potencia óptica (850 nm: +3 a -60 dBm, 1310 nm y 1550 nm: +3 a -65 dBm) y una fuente de luz (1310 nm \pm 20 nm y 1550 nm \pm 20 nm, potencia de salida: >-5 dBm).

➤ **OTDR YOKOGAWA AQ7283** [90]

Este OTDR (Figura 2.3) ofrece importantes herramientas para el análisis de redes de acceso, enlaces de larga distancia con fibra monomodo, enlaces de cortas distancias con fibras multimodo y monomodo, redes PON y más. Las cualidades más relevantes son: su versatilidad (ya que posee accesorios que lo convierten en: localizador visual de fallas VLS, sonda microscópica para inspección de férulas, medidor de potencia óptica y fuente de luz) y su interfaz gráfica (pantalla *touch*) que facilita su operabilidad. El OTDR disponible tiene las siguientes características:

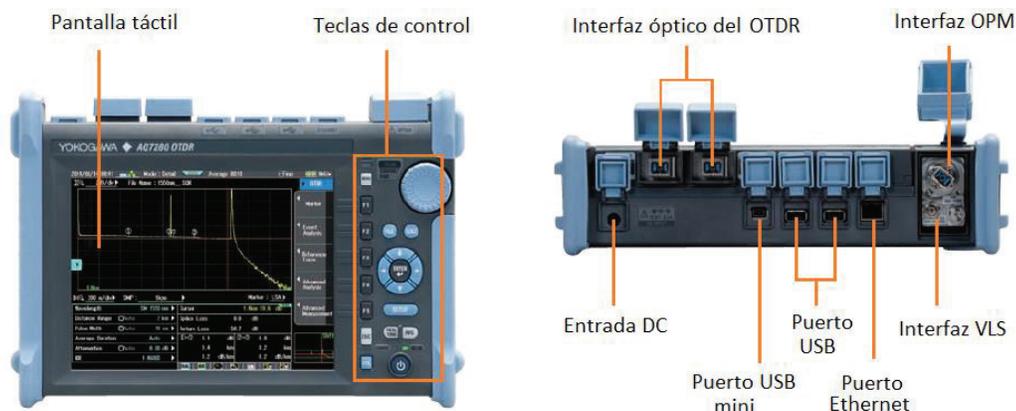


Figura 2.3 OTDR YOKOGAWA AQ7283 ^[90]

- ✓ Alcance: hasta 512 Km;
- ✓ Longitud de onda de trabajo: en el puerto 1: 1310 ± 25 nm y 1550 ± 25 nm; en el puerto 2: 1625 ± 25 nm;
- ✓ Ancho de pulso: desde 3 ns hasta 20000 ns;
- ✓ Zona muerta entre eventos: 0.6 m a 3 ns;
- ✓ Resolución de muestreo mínimo: 0.02 m;
- ✓ Puntos de muestreo máximo: 256000;
- ✓ Tipo de conector: adaptador universal para conectores de tipo SC/PC, FC/PC, LC/PC y SC/APC;
- ✓ Fuente de luz tipo láser de clase 1M¹⁵;

Adicionalmente, el OTDR ofrece otras utilidades como:

- ✓ *File report*: ayuda a generar reportes de mediciones en formato PDF;
- ✓ *Fault locator*: permite localizar y mostrar cortes en una fibra óptica;
- ✓ *OTDR Smart Mapper*: presenta un esquema en el que los eventos existentes aparecen como íconos;
- ✓ Análisis multi-traza: permite analizar y comparar hasta cuatro trazas mostradas de forma simultánea;
- ✓ Cálculo de la atenuación por dos métodos de extrapolación diferentes:

¹⁵ Clase 1M: es el láser que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda de 302.5 nm a 4000 nm son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa tales como prismas, binoculares, telescopios, microscopios o lupas ^[134].

- Aproximación de mínimos cuadrados (LSA – *Least Squares Approximation*): En este método, los errores en el valor calculado son pequeños porque utilizan todos los datos existentes en la sección (entre los dos puntos de análisis). Pero si existe presencia de pérdidas grandes, también se producen errores grandes. Por tal motivo, el uso de este método es adecuado cuando no hay presencia de eventos reflexivos ni empalmes. El LSA proporciona un valor que tiene un grado de error menor que el TPA.
 - Aproximación de dos puntos (TPA – *Two Point Approximation*): En este caso, el OTDR usa la diferencia entre los niveles de los dos puntos especificados para calcular la pérdida, razón por la que el nivel de fluctuación en el valor calculado puede variar mucho. Si se producen eventos con pérdidas grandes, como reflexiones y empalmes en la sección de cálculo, el TPA proporciona menor grado de error que el LSA.
- ✓ Operación en tres modos diferentes:
- **Modo simple:** el equipo configura automáticamente ciertos parámetros de medición (rango, ancho de pulso, etc.), el usuario otros (longitud de onda).
 - **Modo detalle:** el usuario configura todas las condiciones para la medición.
 - **Modo PON:** el usuario debe configurar las etapas de splitteo (división de potencia óptica), sentido de la medición (OLT – ONT o viceversa), distancia y longitud de onda para analizar una red PON. En este modo, el OTDR utiliza una aplicación denominada *Smart Mapper* para mostrar los eventos encontrados en forma de íconos (Figura 2.4).

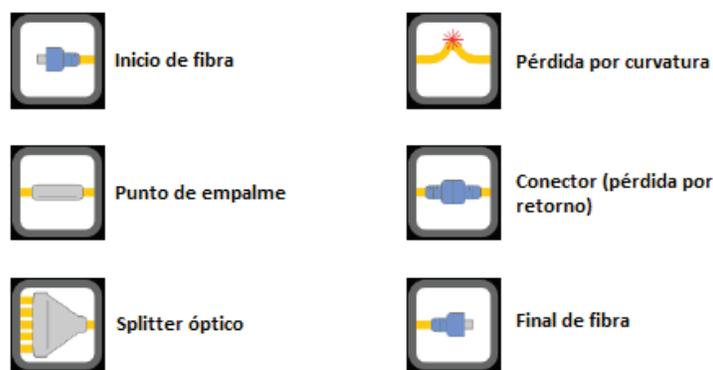


Figura 2.4 Íconos utilizados en modo de operación PON ^[90]

2.1.1.3 Medidor de potencia óptica (OPM - *Optical Power Meter*)

Estos equipos permiten medir tanto potencias absolutas (en receptores, fuentes o amplificadores) expresadas en dBm como potencias relativas (atenuaciones o ganancias) expresadas en dB. Para el laboratorio se dispone de lo siguiente:

EQUIPO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Medidor de potencia óptica	2	NEWPORT	1916-C
Medidor de potencia óptica	2	YOKOGAWA	AQ2180
Medidor de potencia óptica	1	JDSU	OLP-55

Tabla 2.5 Medidores de potencia óptica disponibles para el laboratorio

➤ MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA NEWPORT 1916-C ^[92]

En la Figura 2.5 se presenta este dispositivo que constituye un medio económico para realizar mediciones en campo tanto de bajas como de altas potencias (según el detector utilizado). Está provisto de un conector DB15, mismo que permite la interconexión con diferentes accesorios para la ejecución de tareas adicionales.



Figura 2.5 Medidor de potencia óptica Newport 1916-C ^[92]

Las principales características de este equipo son:

Medición en baja potencia con detector Newport, modelo 918D:

- ✓ Potencia mínima detectable: 5.3 pW
- ✓ Potencia máxima de entrada: 2 W
- ✓ Longitud de onda de operación: entre 190 nm y 1800 nm
- ✓ Adaptador para conector FC.

Medición en alta potencia con detector Newport, modelo 818P:

- ✓ Potencia mínima detectable: 1 mW
- ✓ Potencia máxima de entrada: 400 W
- ✓ Longitud de onda de operación: entre 200 nm a 10 μm

➤ **MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA – YOKOGAWA AQ2180** ^[95]

El OPM (*Optical Power Meter*) AQ2180 (Figura 2.6) es un equipo de mano que posee todas las funciones necesarias para medir las pérdidas producidas en un enlace con fibra óptica. Posee un detector fotodiodo de Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs) y trabaja con siete longitudes de onda.



Figura 2.6 Medidor de potencia óptica YOKOGAWA – AQ2180 ^[95]

Las características básicas que ofrece este equipo son:

- ✓ Es óptimo para trabajar con fibra óptica monomodo (ITU-T G.652), multimodo 50/125 μm y multimodo 62.5/125 μm .
- ✓ Rango de potencia: -70 dBm a +10 dBm
- ✓ Nivel de ruido: -60 dBm
- ✓ Longitud de onda de operación: 850/1300/1310/1490/1550/1625/1650 nm
- ✓ Adaptador para conector FC, SC y LC.
- ✓ Interfaz de comunicación: USB-B;
- ✓ Modulación: CW, 270 Hz, 1 KHz y 2 KHz

➤ **MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA JDSU OLP-55** ^[96]

El medidor de potencia óptica OLP-55 (Figura 2.7) es un instrumento de alto rendimiento que puede ser utilizado en la implementación y mantenimiento de redes de fibra óptica monomodo y multimodo. Trabaja con un detector fotodiodo de Germanio (Ge) y posee una función de reconocimiento automático de longitud de onda de la señal.



Figura 2.7 Medidor de potencia óptica JDSU OLP-55 ^[96]

Las características principales que ofrece este medidor de potencia óptica son:

- Potencia máxima de entrada: +20 dBm;
- Longitud de onda de operación: 850, 1310, 1550, 1625 nm;
- Compatibilidad con fibras de dimensiones: 9/125 μm hasta 100/140 μm ;
- Adaptador universal *push-pull* de 2.5 mm (para conector FC, ST, SC, DIN y E2000) y de 1.25 mm (LC y adaptador MU);
- Rango de presentación: -70 dBm a +20 dBm.

2.1.1.4 Fusionadora de fibra óptica

Éste equipo permite unir dos fibras ópticas de forma permanente, obteniendo alta resistencia y bajas pérdidas. Una máquina empalmadora por fusión alinea los

núcleos (y mantos en algunos equipos) de dos fibras, las enfrenta y luego las fusiona a alta temperatura por la acción de un arco eléctrico. Para el laboratorio se dispone de las máquinas empalmadoras que se detallan a continuación:

EQUIPO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Empalmadora por fusión	1	NANJING	DVP-730
Empalmadora por fusión	2	FUJIKURA	12S

Tabla 2.6 Detalle de fusionadoras disponibles para el laboratorio

➤ **Empalmadora por fusión NANJING DVP-730 OE TECH CO, LTD [97] [98]**

Esta máquina empalmadora (Figura 2.8) posee una pantalla color reversible, con teclas de control en dos lados; es completamente configurable y tiene la capacidad de ejecutar empalmes tanto de modo manual como automático. Opera con tecnología de alineación por núcleo. Trae consigo un estuche rígido, una batería, un adaptador AC, un cargador, un juego de dos electrodos de repuesto, un dispositivo para enfriamiento de tubillos termocontraíbles y una cortadora de precisión DVP-105 (Figura 2.8). El disco de corte de la fibra óptica posee 16 posiciones, cuando el corte falla de forma reiterada, es necesario cambiar la posición del disco con la herramienta adecuada y siguiendo las instrucciones mostradas por el fabricante.

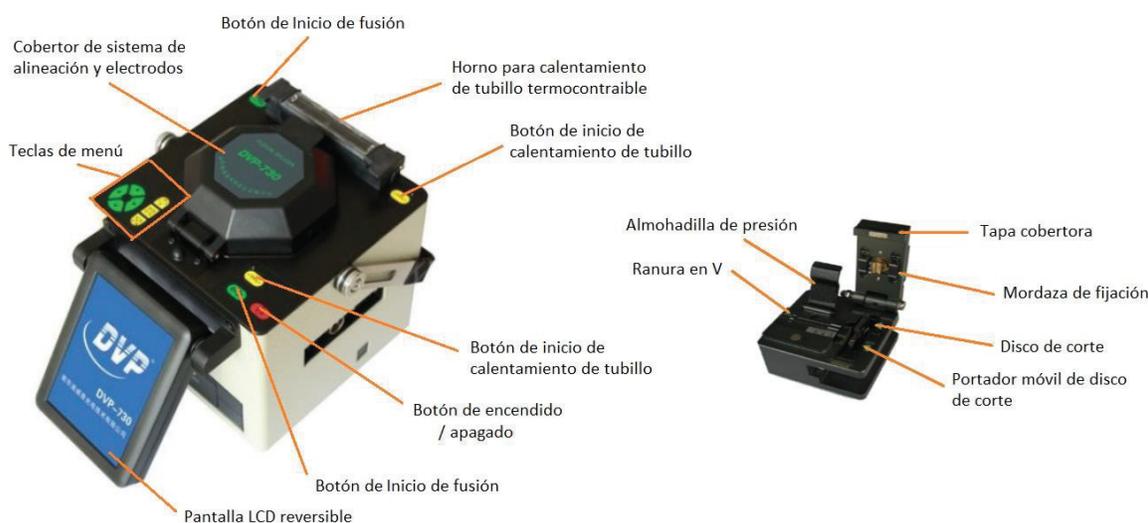


Figura 2.8 Fusionadora DVP-730 y cortadora DVP-105 [97] [98]

Las principales características técnicas de la fusionadora DVP-730, son:

- ✓ Soporta fibras: monomodo (SM), multimodo (MM), de dispersión desplazada (DS), de dispersión desplazada no nula (NZ-DS) y dopada de erbio (EDF);
- ✓ Diámetro del manto: 100 μm – 150 μm ;
- ✓ Diámetro del recubrimiento: 100 μm – 1000 μm ;
- ✓ Pérdidas promedio por fusión: 0.02 dB (SM), 0.01 dB (MM), 0.04 dB (DS) y 0.04 dB (NZ-DS);
- ✓ Pérdidas de retorno: ≥ 60 dB;
- ✓ Prueba de tensión: 2.0 N (estándar);
- ✓ Longitud de tubillos: 20 mm, 40 mm y 60 mm;
- ✓ Condiciones de operación: -25°C a $+50^{\circ}\text{C}$ (temperatura), de 0 a 95% (humedad), 0 a 5000 m (altitud).

➤ **Empalmadora por fusión FUJIKURA 12S** ^[99] ^[100] ^[101]

La fusionadora Fujikura 12S (Figura 2.9) es una máquina muy pequeña, ligera y portátil, sin embargo, presenta una estructura robusta que ofrece protección contra golpes, polvo y humedad. Además, su estuche de transporte incluye una bandeja que permite optimizar el espacio de trabajo disponible. Posee una batería de larga duración que proporciona energía para ejecutar hasta 100 empalmes (incluyendo el calentamiento de los tubitos termocontraíbles).



Figura 2.9 Fusionadora Fujikura 12s y cortadora de precisión CT-30 ^[99] ^[100]

La cortadora de precisión CT-30 posee un disco de corte de 16 posiciones que permite realizar 48000 cortes de una fibra o 4000 cortes de cintas de 12 fibras antes de ser sustituido. Dispone de un recipiente para almacenar provisionalmente los desechos de las fibras cortadas que luego serán eliminados de forma definitiva. El kit completo incluye un juego de electrodos para repuesto, cable de alimentación y cargador CA, dos pares de porta fibras (250 μm y 900 μm , Figura 2.10), batería, dispensador de alcohol, maleta de transporte y bandeja de trabajo.



Figura 2.10 Portador de fibras Fujikura (250 μm y 900 μm)

Las principales características técnicas de la fusionadora Fujikura 12S son:

- ✓ Trabaja con fibras: monomodo (G.652 & G.657), multimodo (G.651), de dispersión desplazada (G.653) y de dispersión desplazada no nula (G.655);
- ✓ Diámetro del manto: 125 μm / 160 μm a 3 mm según el portador de fibra;
- ✓ Diámetro del revestimiento: 250 μm – 900 μm ;
- ✓ Pérdidas típicas por fusión: 0.05 dB (SM), 0.02 dB (MM), 0.08 dB (DS) y 0.08 dB (NZ-DS);
- ✓ Tiempo de fusión típico: 15 s (con fibra monomodo);
- ✓ Tiempo de calentamiento de manguito: típico 30 s (60 mm);
- ✓ Longitud compatible de manguitos: 40 mm, 60 mm y micro manguitos Fujikura;
- ✓ Prueba de tensión: desde 1.96 a 2.25 N
- ✓ Tiempo de vida de los electrodos: 3000 fusiones;
- ✓ Condiciones de operación: de 0 a 3660 m sobre el nivel del mar, de -10°C a 50°C de temperatura y desde 0% a 95% de humedad.

2.1.1.5 Fuente de luz

En el laboratorio se disponen de fuentes de luz o generadores que proveen señales ópticas con características especiales y que permiten configurar parámetros como: potencia óptica de salida, longitud de onda, anchura espectral, tipo de modulación,

etc. También existen fuentes con tecnologías menos complejas, diseñadas para ejecutar tareas específicas y que permiten asignar valores predeterminados de ciertos parámetros característicos de una señal óptica. La utilización de uno u otro tipo de generador, dependerá de la aplicación a ejecutarse. Los equipos disponibles para la implementación del laboratorio son los siguientes:

EQUIPO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Módulo generador óptico láser en banda L	2	OSICS YENISTA	TLS WDM SOURCE AG L-Band W
Módulo generador óptico láser en banda C	2	OSICS YENISTA	TLS WDM SOURCE AG C-Band W
Módulo generador óptico láser CWDM (1610 nm)	1	OSICS YENISTA	DFB DIODE SOURCE CWDM (1610 nm)
Módulo generador óptico láser CWDM (1625 nm)	1	OSICS YENISTA	DFB DIODE SOURCE CWDM (1625 nm)
Módulo generador óptico láser CWDM (1650 nm)	1	OSICS YENISTA	DFB DIODE SOURCE CWDM (1650 nm)
Fuente de Luz	1	AFL	NOYES OLS4
Fuente de Luz	2	AFL	NOYES OLS7

Tabla 2.7 Fuentes ópticas disponibles para el laboratorio

➤ **Plataforma Multifunción OSICS, Yenista Optics** ^[102]

La plataforma multifunción modular (Figura 2.11) está diseñada para realizar prácticas e investigación con fibras ópticas, componentes de sistemas ópticos y en especial para evaluar sistemas DWDM. La plataforma permite instalar hasta 8 unidades modulares *plug-and-play* OSICS de similares dimensiones (35 mm x 128 mm x 230 mm), que no requieren hardware o software adicional. Una sola plataforma puede contener fuentes con diferentes características, ofreciendo alta flexibilidad y óptimos resultados en las aplicaciones que se requieran.

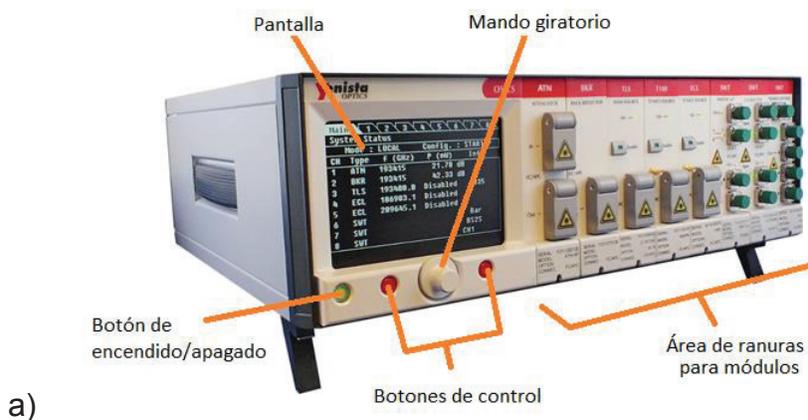




Figura 2.11 Plataforma Multifunción OSICS a) vista frontal y b) vista posterior ^[102]

En la Tabla 2.7 se indican los módulos que existen en el laboratorio de comunicaciones ópticas, los cuales están instalados en cuatro plataformas multifunción diferentes, distribuidos de la siguiente manera:

- ❖ Plataforma 1: dos fuentes WDM en banda L y en banda C;
- ❖ Plataforma 2: una fuente WDM en banda L;
- ❖ Plataforma 3: una fuente WDM en banda C;
- ❖ Plataforma 4: tres fuentes CWDM de 1610 nm, 1625 nm y 1650 nm.

➤ **OSICS-TLS-AG WDM Tunable Laser Source Module** ^[103]



Figura 2.12 Módulos OSICS TLS, generador WDM en banda L y banda C

El módulo OSICS-TLS (*Tunable Laser Source*) mostrado en la Figura 2.12, tiene una fuente láser sintonizable en las bandas L y C. Está diseñada para probar

sistemas y componentes de redes de fibra óptica, en especial para aplicaciones DWDM. Este módulo puede combinarse con otros tipos de fuentes modulares, como: láser de Cavidad Externa Ajustable (ECL - *External Cavity Laser*), diodo láser DFB (*Distributed FeedBack*), atenuadores y switches ópticos. El láser utilizado en éste generador pertenece a la categoría 1M y posee un ancho de línea muy estrecho.

Las principales características que presenta la fuente TLS-AG son:

- ✓ Espacio entre canales: ITU-T (100 GHz, 50 GHz, etc.) o el valor que se asigne.
- ✓ Longitud de onda de trabajo:
 - Banda C: 196.25 THz a 191.5 THz (1527.60 nm a 1565.5 nm); y
 - Banda L: 190.95 THz a 186.35 THz (1570.01 nm a 1608.76 nm).
- ✓ Potencia de salida: 20 mW (+13 dBm);
- ✓ Rango de Potencia de salida (típico): + 7 dBm a +14 dBm;
- ✓ Exactitud de frecuencia (longitud de onda) relativa: ± 0.5 GHz (± 4 pm);
- ✓ Resolución de ajuste de frecuencia: 1 GHz;
- ✓ Resolución de ajuste fino de frecuencia: 1 MHz;
- ✓ Estabilidad de potencia: ± 0.03 dB;
- ✓ Ancho de línea: <100 KHz;
- ✓ Interfaz óptico: conector FC/APC.

Otra característica importante que debe ser mencionada es que el módulo OSICS-TLS ofrece la posibilidad de variar el modo de operación de la siguiente manera:

- **Modo *grid*:** el usuario puede seleccionar una longitud de onda inicial y el tamaño del rango de frecuencias. Por defecto, el espacio mínimo que ocupa un rango de frecuencias es de 100 MHz.
- **Modo *manual*:** en este caso, la longitud de onda (frecuencia) puede seleccionarse directamente como en cualquier otra fuente de láser sintonizable. La resolución es de 100 MHz / 1 pm.
- **Modo de alta resolución:** permite que el usuario ingrese directamente la longitud de onda (frecuencia) requerida. La resolución es de 1 MHz / 0.01 pm.

- **OSICS DFB - DISTRIBUTED FEEDBACK LASER DIODE SOURCE MODULE** [104]



Figura 2.13 Módulos OSICS DFB de 1610 nm, 1625 nm y 1650 nm.

La Figura 2.13 muestra el módulo OSICS-DFB que contiene una fuente de diodo láser de realimentación distribuida, mismo que está diseñado especialmente para aplicaciones CWDM. Este módulo puede combinarse con otras fuentes modulares como: el láser de cavidad externa sintonizable ECL y fuentes WDM de láser sintonizable (TLS).

Las longitudes de onda de emisión de las fuentes se configuran en fábrica según los requerimientos del usuario, deben elegirse al momento de realizar el pedido del módulo y preferiblemente deben coincidir con uno de los canales establecidos en la recomendación de la ITU-T.

A continuación se presentan algunas de las características del módulo DFB:

- ✓ Longitud de onda de trabajo (ITU): 1527.2 nm – 1610.05 nm;
- ✓ Rango de sintonización de longitud de onda: 1.6 nm (1.8 nm típico);
- ✓ Exactitud de longitud de onda: ± 0.03 nm;
- ✓ Potencia de salida: +13 dBm;
- ✓ Ancho espectral: <30 MHz;
- ✓ Interfaz óptico: conector FC/APC;
- ✓ Interfaz eléctrico utilizado para entrada de señal de modulación: coaxial SMB (*SubMiniature version B*).

Como detalle importante, se indica que el módulo OSICS-DFB admite dos tipos de modulación: digital (TTL - *Transistor-Transistor Logic*) y analógica. Además, permiten dos métodos para modular señales: modulación interna y modulación externa. La combinación de los métodos de modulación y los tipos de señales de modulación permiten diseñar una modulación especial para una determinada aplicación. Por último, el fabricante recomienda que el equipo tenga un calentamiento previo de al menos una hora antes de empezar a utilizar.

➤ **Fuente de luz AFL NOYES OLS4** ^[105] ^[106]

El generador OLS4 (Figura 2.14) ofrece dos puertos de salida con dos fuentes de luz diferentes: en el primer puerto se encuentra una fuente de luz láser de Clase 1 (1310 nm / 1550 nm), útil para aplicaciones con fibras monomodo; en cambio, el puerto dos posee una fuente de luz LED (850 nm / 1300 nm), apta para trabajar con fibras multimodo. Cada longitud de onda de trabajo puede transmitirse individualmente como onda continua (CW – *Continuous Wave*) o con un tono de modulación habilitado manualmente por el usuario (únicamente en la fuente LASER). El modo de transmisión Wave ID, permite la transmisión de pares de longitudes de onda en un patrón alterno (850 nm / 1300 nm o 1310 nm / 1550 nm).



Figura 2.14 Fuente de luz NOYES OLS4 ^[106]

A continuación se resumen algunas de las características técnicas del OLS4:

- ✓ Tipo de fibra óptica: Monomodo y multimodo;
- ✓ Longitud de onda: 850 ± 30 nm y $1300 \pm 30 / -20$ nm (LED); 1310 ± 20 nm y 1550 ± 20 nm (láser);

- ✓ Ancho espectral: 45 nm a 850 nm (típico) y 120 nm a 1300 nm (típico) en LED; 5 nm a 1310 nm (máx.) y 5 nm a 1550 nm (máx.) en láser;
- ✓ Potencia de salida: >-20 dBm en fibra multimodo (62.5 μm) y 0 dBm en fibra monomodo (9 μm);
- ✓ Tono de modulación: 2 KHz (únicamente en el puerto monomodo);
- ✓ Conectores adaptables: SC, FC, ST y LC

➤ **Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH** [105] [106]

Este equipo portátil (Figura 2.15) posee una fuente de luz láser de clase 1 que opera en 3 longitudes de onda distintas a través de un solo puerto. Está diseñado para ejecutar pruebas en redes PON (1310 nm para *uplink*; 1490 nm y 1550 nm para *downlink*, según recomendación ITU-T G.984.1/2), para certificar enlaces de fibras ópticas monomodo (con el estándar TIA/EIA) y para identificar fibras ópticas. La señal puede transmitirse con una longitud de onda individual, en modo continuo (CW) o modulado en un tono seleccionado por el usuario. Además, tiene la capacidad de transmitir en modo Wave ID (transmisión de dobles o triples longitudes de onda en un orden secuencial).



Figura 2.15 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH

Algunas de las características de mayor relevancia de este equipo son:

- ✓ Longitud de onda de trabajo (± 20 nm): 1310 nm, 1490 nm y 1550 nm;
- ✓ Ancho espectral: 5nm (1310 nm), 3 nm (1490 nm) y 5 nm (1550 nm);
- ✓ Potencia de salida: -5 dBm (típico) en fibra monomodo (9/125 μm);

- ✓ Tono de modulación: 270 Hz, 330 Hz, 1 KHz y 2 KHz;
- ✓ Conectores adaptables: SC, FC, ST y LC.

Mayor información sobre los equipos detallados en esta sección se encuentra en los manuales provistos por los fabricantes que se encuentran en los Anexos de este trabajo.

2.1.2 DISPOSITIVOS, COMPONENTES Y HERRAMIENTAS

En este numeral se detallan los dispositivos y componentes de redes de fibra óptica, y el conjunto de herramientas existentes en el laboratorio que serán útiles para la ejecución de las prácticas propuestas en el Capítulo 4. Los recursos disponibles son: sonda de video digital, localizador visual de fallas (VFL – *Visual Fault Locator*), atenuadores, splitters, multiplexores, kit para simular redes PON (FTTx), set de herramientas para conectorización y set de herramientas para trabajos con fibra óptica en general.

2.1.2.1 Sonda microscópica de video digital para inspección de conectores de fibra óptica *Lightel DI-1000* ^[109]

Es una sonda microscópica de video digital diseñada para examinar las férulas de conectores de fibra óptica. Este accesorio (Figura 2.16) puede conectarse directamente a un computador u otro dispositivo que posea una interfaz para visualizar imágenes; funciona con conexión USB y no requiere de una fuente de alimentación adicional, cuenta con un control sencillo de enfoque, un botón para captura de imagen, e incluye el software *ConnectorView* estándar que posibilita la captura de imágenes, zoom digital y posee herramientas de análisis básico. Para ejecutar un análisis más detallado y obtener otras funcionalidades, es necesario adquirir la versión *ConnectorView Plus*.

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Sonda microscópica de video	2	<i>Lightel</i>	DI-1000

Tabla 2.8 Sonda microscópica de video disponible en el laboratorio



Figura 2.16 Sonda microscópica de video *Lightel* DI-100 ^[109]

Características técnicas:

- ✓ Campo de visión: 425 μm x 320 μm (aproximadamente);
- ✓ Resolución: 0.5 μm ;
- ✓ Enfoque: ajuste manual hasta 2 mm;
- ✓ Fuente de luz: LED azul;
- ✓ Incluye puntas para conectores FC, SC y LC.

2.1.2.2 Localizador visual de fallas VFL (*Visual Fault Locator*)

El VFL (Figura 2.17) es un generador de luz visible que permite identificar, localizar y comprobar fallas (fisuras, curvaturas excesivas o empalmes defectuosos) en las fibras ópticas. Tiene la capacidad de emitir luz de manera continua o intermitente a una frecuencia de 2 Hz.

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Localizador visual de fallas	4	SM	SM

Tabla 2.9 Localizador visual de fallas disponible para el laboratorio



Figura 2.17 Localizador visual de fallas

Los VFL disponibles para el laboratorio, tienen las siguientes características:

- ✓ Tipo de emisor: FP-LD Clase 2M¹⁶;
- ✓ Potencia de salida mínima: 1 mW;
- ✓ Alcance mínimo: 5 Km;
- ✓ Tipo de conectores: FC, SC y ST.

2.1.2.3 Atenuador óptico

Este dispositivo está diseñado para disminuir la potencia de la señal óptica. Se aplica en pruebas de linealidad, sensibilidad de receptores y análisis de BER. Para el laboratorio se dispone de lo siguiente:

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
ATENUADOR VARIABLE	4	FIS	F1-0031-LBR
ATENUADOR VARIABLE	2	KINGFISHER	KI 7013B
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	FC SM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	FC MM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	LC SM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	LC MM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	SC SM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	SC MM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	ST SM
ATENUADOR FIJO 5dB	2	JFOPT	ST MM

Tabla 2.10 Atenuadores ópticos disponibles para el laboratorio

➤ **Atenuador óptico variable FIS F1-0031-LBR** ^[110]

Este elemento (Figura 2.18) de alta precisión utiliza tecnología de lente colimador que permite al usuario cambiar la atenuación por medio de un control giratorio. El atenuador variable FIS presenta un rango de atenuación útil para simular pérdidas en sistemas ópticos. Entre sus características se pueden destacar las siguientes:

- ✓ Precisión: 0.1 dB;
- ✓ Rango de atenuación: de 0.8 dB a 60 dB;

¹⁶ Clase 2M: luz láser que emite radiación visible (desde 400 a 700 nm). La protección ocular se realiza por simple reacción corporal, sin embargo, la visión de la luz utilizando instrumentos ópticos puede ser peligrosa.

- ✓ Pérdidas de inserción: <math><0.8\text{ dB}</math>;
- ✓ Pérdida de retorno (ORL): $\geq 30\text{ dB}$;
- ✓ Pérdida dependiente de polarización (PDL): 0.15 dB ;
- ✓ Longitudes de onda de trabajo: $1310\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$ y $1550\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$;
- ✓ Características del cable: monomodo ($9/125\text{ }\mu\text{m}$) de 2 m de longitud;
- ✓ Tipo de conector: FC/UPC.



Figura 2.18 Atenuador variable FIS F1-0031-LBR [109]

➤ **Atenuador óptico variable *Kingfisher* KI 7013B** [111]

Este atenuador es óptimo para probar componentes y sistemas de transmisión con fibra óptica en general. Es útil para evaluar aplicaciones de alta velocidad y sistemas de alta potencia, además, posee un alto nivel de confiabilidad y desempeño para realizar pruebas en sistemas CWDM / DWDM. El atenuador (Figura 2.19) trabaja con fibras monomodo ($9.5 / 125\text{ }\mu\text{m}$), en cuatro longitudes de onda, posee una pantalla LCD y requiere calibración cada 3 años.



Figura 2.19 Atenuador variable *Kingfisher* KI 7013B [111]

Otras características destacadas son:

- ✓ Rango de atenuación: de 2 dB a 60 dB ;

- ✓ Resolución: 0.05 dB;
- ✓ Potencia máxima de entrada: +30 dBm;
- ✓ Pérdida dependiente de polarización (PDL): <0.1 dB;
- ✓ Pérdidas de retorno: 60 dB;
- ✓ Longitudes de onda de trabajo: 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm y 1625 nm;
- ✓ Tipo de conector: adaptador FC/PC, SC/PC, ST/PC y LC/PC.

➤ **Atenuadores ópticos fijos JFOPT** ^[112]

Proveen un valor fijo de atenuación que es muy útil en aplicaciones que requieren mejorar la calidad de señal. En el laboratorio se encuentran atenuadores (Figura 2.20) que ofrecen valores aproximados a 5 dB en 1310 nm y 1550 nm. Están disponibles en adaptadores FC, SC, LC y ST para fibras monomodo y multimodo.



Figura 2.20 Atenuadores fijos JFOPT FC, SC, LC y ST ^[112]

Las características técnicas que presentan estos elementos de forma general son:

- ✓ Atenuación: 5 dB;
- ✓ Pérdida dependiente de polarización (PDL): 0.2 dB;
- ✓ Longitudes de onda de trabajo: 1310 nm y 1550 nm.

2.1.2.4 **Divisor de potencia óptica (power splitter)** ^[113]

Es un elemento (Figura 2.21) muy utilizado en redes pasivas para dividir la potencia de la señal y distribuir la misma información a diferentes usuarios pero con menores potencias. En el laboratorio se disponen de los siguientes splitters.

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
SPLITTER 1X2	2	JFOPT	NO CONECTORIZADO
SPLITTER 1X4	2	JFOPT	NO CONECTORIZADO
SPLITTER 1X8	2	JFOPT	NO CONECTORIZADO

Tabla 2.11 Detalle de splitters disponibles para el laboratorio

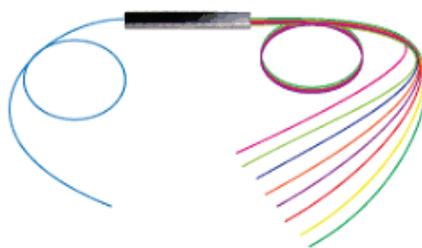


Figura 2.21 Splitter óptico ^[13]

Sus principales características son:

- ✓ Tecnología tipo FBT;
- ✓ División de potencia de tipo simétrica;
- ✓ Pérdidas de inserción máxima: SP 1x2 (4 dB), SP 1x4 (7.4 dB) y SP 1x8 (10.7 dB);
- ✓ Longitudes de onda de trabajo: 1310 nm y 1550 nm;
- ✓ Mínima pérdida de retorno: ≥ 50 dB;
- ✓ Rango de temperatura de operación: -20°C a 75°C .

2.1.2.5 Multiplexor / demultiplexor WDM

Este elemento (Figura 2.22) es utilizado para transmitir múltiples señales por una misma fibra. El mismo multiplexor funciona como demultiplexor; en el laboratorio se encuentran los siguientes elementos:

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
WDM MUX/DEMUX	4	JFOPT	WDM-S-13/15

Tabla 2.12 Detalle de MUX/DEMUX disponibles para el laboratorio

Sus principales características son:

- ✓ Estándar: GR-1221-CORE¹⁷;
- ✓ Pérdidas de inserción máxima: 0.25 dB;
- ✓ Longitudes de onda de trabajo: $1310\text{ nm} \pm 15\text{ nm}$ / $1550\text{ nm} \pm 15\text{ nm}$;
- ✓ Pérdida de reflexión: ≥ 50 dB;
- ✓ Rango de temperatura de operación: -20°C a 75°C .

¹⁷ La norma GR-1221 presentada por Telcordia, indica los requisitos para garantizar la confiabilidad de los componentes ópticos pasivos como: divisores, acopladores, WDM - Mux y WDM - Demux.

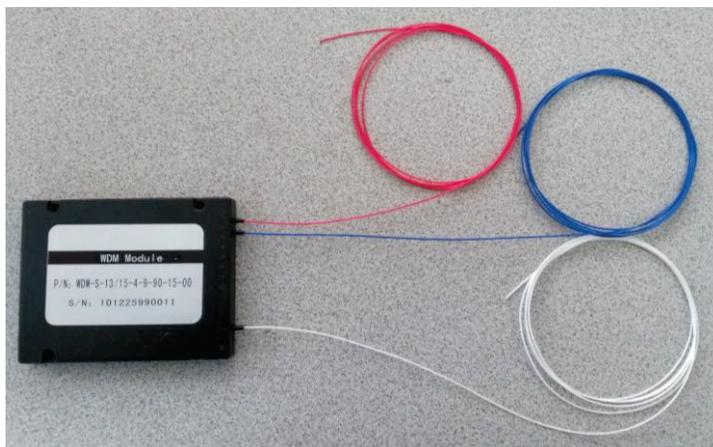


Figura 2.22 MUX/DEMUX WDM 1X2 ^[113]

2.1.2.6 Kit de simulación de redes PON (FTTx) ^[114]

Este kit permite simular diferentes arquitecturas de redes PON con tecnologías FTTx. Es totalmente portátil por lo que puede utilizarse en una gran variedad de aplicaciones tanto en laboratorio como en campo. Puede ser utilizado en tareas como: diseño de redes, prácticas para cuadrillas de instalación de redes, prueba de rendimiento de OLT/ONT, entrenamiento para capacitadores, investigación y fabricación de nuevas tecnologías, demostraciones para ventas, entre otras. El kit de simulación (mostrado en las figuras 2.23 y 2.24) incluye los accesorios que se detallan a continuación:

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Kit de simulación de redes PON FTTx	2	AFL	PONS-00-0900PZ

Tabla 2.13 Kit de simulación de redes PON (FTTx)

- ✓ Divisores de potencia (Splitters): 1 de 1x2, 1 de 1x4 y 2 de 1x8;
- ✓ Bobina de fibra óptica monomodo de 4 Km con 3 eventos (conector, empalme y macro-curvatura) que se incluye en el interior del simulador;
- ✓ Bobinas de fibra óptica monomodo de 200 m, 300 m, 500 m y 1000 m;
- ✓ Todos los conectores de bobinas y splitters tienen terminación SC/APC;
- ✓ *Patchcord* simplex de 2 m SC/APC – SC/APC;
- ✓ *Patchcord* simplex de 2 m SC/UPC – SC/APC;



Figura 2.23 Kit para simulación de redes PON (FTTx) ^[114]

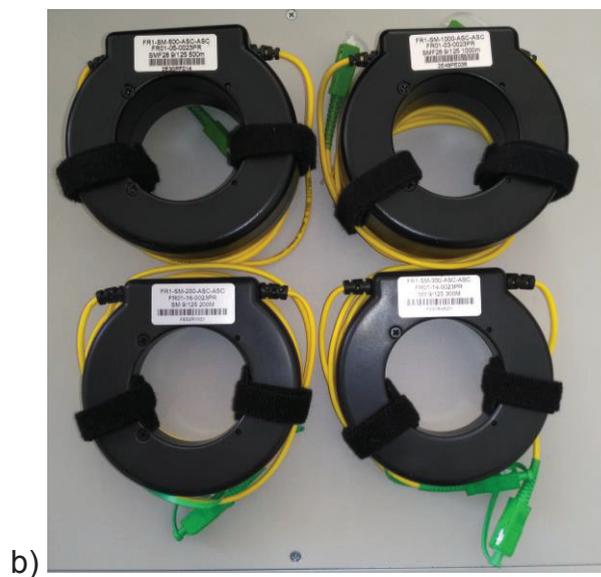
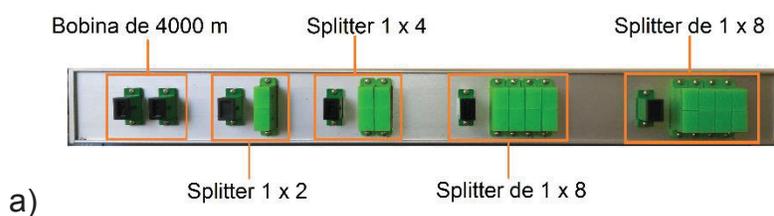


Figura 2.24 a) Simulador de redes PON (FTTx) y b) bobinas de 200 m, 300 m, 500 m y 1000 m de fibra óptica ^[114]

Este set incluye además la fuente de luz láser NOYES OLS7-FTTH, cuyas características se revisan en el numeral 2.1.1.5.

2.1.2.7 Herramientas para trabajo con fibra óptica

La implementación y mantenimiento de un enlace de fibra óptica requiere de la utilización de herramientas que faciliten actividades como: preparación del cable, corte, medición, limpieza de las fibras y otras acciones propias del trabajo con fibra óptica. En el laboratorio de comunicaciones ópticas se dispone de dos kits de herramientas según se detallan a continuación:

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Kit de herramientas para conectorización de fibra óptica	1	INTELLINET	HT-K3032
Kit de herramientas para empalmes de fibra óptica	1	JFOPT	JF-100A

Tabla 2.14 Kit de herramientas

➤ **Kit de herramientas para conectorización de fibra óptica INTELLINET HT-K3032** ^[115]

El set mostrado en la Figura 2.25 contiene 15 herramientas para realizar la conectorización de fibras ópticas con conectores no preparados, los cuales se fijan con un pegamento especial que también se incluye en el kit.



Figura 2.25 Kit de herramientas para conectorización INTELLINET ^[115]

Los elementos que conforman el kit Intellinet HT-3032:

- ✓ Lápiz cortador de fibra con punta de diamante;

- ✓ 2 jeringas;
- ✓ Pelador de fibra óptica;
- ✓ Pegamento epoxi de secado rápido;
- ✓ Líquido de limpieza;
- ✓ Disco para pulido de conector ST;
- ✓ Disco para pulido de conector SC;
- ✓ Toallas limpiadoras anti estáticas;
- ✓ Tijeras para corte de elementos de refuerzo del cable (kevlar);
- ✓ Cristal para superficie de trabajo (6"x8");
- ✓ Crimpadora para conector de fibra óptica;
- ✓ Lija para pulir (color marrón), 6 μm ;
- ✓ Lija para pulir (color rosa), 1 μm ;
- ✓ Lija para pulir (color blanca), 0,05 μm ;
- ✓ Tela para superficie de trabajo (10 cm x 15 cm).

➤ **Kit de herramientas para empalmes de fibra óptica JFOPT JF-100A** ^[116]

Este kit (Figura 2.26) es muy completo e incluye las herramientas necesarias para preparar los cables de fibra óptica con el fin de elaborar empalmes, preparar ODFs, y realizar mantenimiento y/o reparaciones.



Figura 2.26 Kit de herramientas JFOPT JF-100A ^[116]

Las herramientas que se incluyen en este kit son las siguientes:

1. Peladora de fibra óptica;
2. Peladora de chaqueta;
3. Navaja multipropósito;
4. Tijeras para kevlar;
5. Alicates de corte de cable;
6. Alicates convencionales;
7. Juego de destornilladores de precisión;
8. Cortadora de buffer;
9. Llave inglesa;
10. Set de llaves hexagonales;
11. Bombilla de caucho para succión;
12. Pinzas;
13. Dispensador de alcohol;
14. Juego de destornilladores;
15. Flexómetro;
16. Marcador permanente;
17. Crimpadora.

2.1.2.8 **Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica**

Una de las actividades más básicas e importantes del mantenimiento de los sistemas de comunicaciones ópticos, es limpiar los conectores y adaptadores. Cuando los extremos (férulas) de los conectores tienen el máximo nivel de limpieza posible, la transferencia de luz entre los componentes de una red es óptima. Cualquier tipo de contaminación podría ocasionar errores en la transmisión o errores en la operación de algún componente. Por otro lado, las partículas de polvo atrapadas entre dos férulas pueden producir daños físicos en las superficies de la fibra óptica, además, una partícula situada en el revestimiento de la fibra provoca una desalineación de núcleos, degradando la señal óptica.

Para la realización de limpieza y mantenimiento, en el laboratorio se tiene un kit que consta de:

ACCESORIO	CANTIDAD	MARCA	MODELO
Limpiador de férulas <i>One click cleaner</i> SC	2	Fujikura	SC-CLK-B
Limpiador de conectores	2	AFL	8500-30-0900MZ

Tabla 2.15 Kit de herramientas para limpieza de conectores

➤ **Limpiador de férulas *One click cleaner* SC-CLK-B (figura 2.26)** ^[128]

Esta herramienta tipo lápiz (Figura 2.27) es apta para limpiar conectores y adaptadores de tipo: SC, FC y ST. Ofrece al menos 500 limpiezas y utiliza un paño seco, sin químicos ni solventes.



Figura 2.27 Limpiador de férulas en conectores y adaptadores ^[128]

➤ **Limpiador de conectores AFL *Clean Connect 500*** ^[129]

El limpiador de conector de fibra óptica AFL 8500-30-0900MZ *CleanConnect 500* (Figura 2.28) elimina contaminantes como: aceite, polvo y otras partículas de suciedad presentes en los conectores de fibra óptica, evitando pérdidas por reflectancia y posibles daños permanentes en el conector. Utiliza una tela de microfibra antiestática sin pelusa, en la que todos los contaminantes quedan atrapados sin dejar residuos de solventes ni alcohol. Este limpiador funciona para al menos 500 limpiezas antes de cambiar el casete reemplazable; es apto para conectores: SC, FC, ST, LC, MU, E2000 y más, tanto con pulido UPC como APC.



Figura 2.28 Limpiador de conectores AFL ^[129]

2.1.3 ACCESORIOS VARIOS

Son aquellos elementos de red (adaptadores, conectores, patchcords, aisladores, bobinas de fibra óptica y otros) que se encuentran disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas y que no fueron revisados en numerales anteriores. Esta información fue recopilada gracias a la ayuda de los profesores responsables de la custodia de los recursos y se registra en las tablas 2.16, 2.17 y 2.18, en donde se incluyen todos los accesorios que se usan en las prácticas propuestas en este trabajo y otros que podrían utilizarse en trabajos futuros.

	Laboratorio de comunicaciones ópticas		
	Inventario de equipos, herramientas y accesorios		
Item	Descripción	Cantidad	Marca
1	Adaptador FO monomodo, FC con pérdidas de inserción de 0.3 dB	2	JFOPT
2	Adaptador FO monomodo, LC con pérdidas de inserción de 0.3 dB	2	JFOPT
3	Adaptador FO monomodo, SC con pérdidas de inserción de 0.3 dB	2	JFOPT
4	Adaptador FO monomodo, ST con pérdidas de inserción de 0.3 dB	2	JFOPT
5	Aislador óptico 1310 nm, tipo pigtail monomodo con conector FC/UPC de 1 m de longitud. Aislamiento mayor a 29 dB.	2	SM
6	Aislador óptico 1550 nm, tipo pigtail monomodo con conector FC/UPC de 1 m de longitud. Aislamiento mayor a 29 dB.	2	SM
7	Bobina FO (Supresor de pulsos), 1000 m, 9/125 SM, FC/UPC-FC/UPC	2	FIS
8	Cable de fibra óptica 1000 m, 9/125 SM sin conectorizar	1	SM
9	Conector FC para fibra monomodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
10	Conector FC para fibra multimodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
11	Conector LC para fibra monomodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
12	Conector LC para fibra multimodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
13	Conector SC para fibra monomodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
14	Conector SC para fibra multimodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
15	Conector ST para fibra monomodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT
16	Conector ST para fibra multimodo de 3 mm de diámetro de revestimiento externo.	2	JFOPT

Tabla 2.16 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 1

 Laboratorio de comunicaciones ópticas			
Inventario de equipos, herramientas y accesorios			
Item	Descripción	Cantidad	Marca
17	Conector para armado en campo por empalme de fusión Fujikura SC-SF-SM-20/30	30	Fujikura
18	Controlador de polarización tipo pigtail con pulido de férula APC	2	Newport
19	Controlador de temperatura y corriente para diodo láser	4	SM
20	Convertor de FO a Ethernet, compatible con IEEE802.3x, 10/100 Base TX, 100Base FX, monomodo 1310 nm y 1550 nm, distancia 20 Km, 5 W	2	JFOPT
21	Convertor electro - óptico, Ancho de banda: 10 GHz, Conector FC	2	FIS
22	Convertor electro - óptico, Gigabit Ethernet, tecnología WDM 1550 nm / 1310 nm; G.652 y G.655; alcance 20 Km; Conector SC.	2	SM
23	Detector de luz APD, potencia de incidencia máxima: 5 dBm	2	JDSU
24	Detector de luz PIN, tipo pigtail, opera entre 1000 nm y 1620 nm, sensibilidad: -25 dBm	2	Qphotonics
25	Diodo láser tipo pigtail monomodo, trabaja a 1310 nm, 1.5 mW con conector FC/PC	2	Newport
26	Diodo láser tipo pigtail monomodo, trabaja a 1550 nm, 1.5 mW con conector FC/PC	2	Newport
27	Filtro óptico. Resolución 5 pm; AB: 50 pm (6.25 GHz) - 950 pm (120 GHz); Potencia de entrada máxima: 30 dBm, monomodo FC/PC.	1	SM
28	Láminas para pulimento de fibra óptica PAQX20	3	IDEAL
29	Manga para empalme de 24 fibras, de tipo lineal y con espacio para ingreso de cinco cables.	1	JFOPT
30	Modulador FO RCVR APD COAX 1310 - 1550 nm, FC/APC, 2.5 Gbps APD	6	JDSU
31	Modulador de intensidad óptica: con conector RF, opera en bandas C y L, AB de 10 GHz	2	JDSU
32	ODF de 12 puertos para Rack de 19", incluye adaptadores, bandeja de empalmes y tubillos termocontraíbles.	1	JFOPT
33	Patchcord FO simplex con conectores FC/APC-FC/APC, monomodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	12	SM
34	Patchcord FO simplex con conectores FC/UPC-FC/UPC, G.652, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
35	Patchcord FO simplex con conectores FC/UPC - FC/UPC, multimodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
36	Patchcord FO simplex con conectores LC/UPC - LC/UPC, monomodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
37	Patchcord FO simplex con conectores LC/UPC - LC/UPC, multimodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
38	Patchcord FO simplex con conectores SC/UPC - SC/UPC, 3 m de longitud, monomodo, pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
39	Patchcord FO simplex con conectores SC/UPC - SC/UPC, multimodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT

Tabla 2.17 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 2

 Laboratorio de comunicaciones ópticas			
Inventario de equipos, herramientas y accesorios			
Item	Descripción	Cantidad	Marca
40	Patchcord FO simplex con conectores ST/UPC-ST/UPC, monomodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
41	Patchcord FO simplex con conectores ST/UPC-ST/UPC, multimodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB.	2	JFOPT
42	Pigtail FO con conector FC/APC, monomodo, 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	12	SM
43	Pigtail FO con conector FC/APC, multimodo, de 3 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	12	SM
44	Pigtail FO con conector FC/UPC, monomodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
45	Pigtail FO con conector FC/UPC, multimodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
46	Pigtail FO con conector LC/UPC, monomodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	4	JFOPT
47	Pigtail FO con conector LC/UPC, multimodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
48	Pigtail FO con conector SC/UPC, monomodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
49	Pigtail FO con conector SC/UPC, multimodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
50	Pigtail FO con conector ST/UPC, monomodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT
51	Pigtail FO con conector ST/UPC, multimodo, de 1 m de longitud con pérdidas de inserción de 0.3 dB y diámetro externo 900 μm	2	JFOPT

Tabla 2.18 Recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Parte 3

En las tablas 2.16, 2.17 y 2.18 se utiliza “SM” (Sin Marca) en la columna “MARCA” para indicar que se desconoce el nombre del fabricante del recurso respectivo.

2.2 ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS QUE SE REQUIEREN EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

Luego de revisar y analizar cada uno de los equipos, herramientas y accesorios disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas, se puede indicar que los recursos son suficientes para cumplir con los objetivos de este trabajo de titulación, sin embargo, es importante indicar que para mejorar la calidad de los procesos

experimentales y ampliar el espectro de actividades inherentes al estudio de redes de fibra óptica en general, es necesario complementar la infraestructura existente. Para este propósito se recomienda la adquisición de los elementos cuyos detalles técnicos y económicos se presentan a continuación.

2.2.1 TÉRMINOS DE REFERENCIA (TDR) PARA LA ADQUISICIÓN DE EQUIPOS, HERRAMIENTAS O ACCESORIOS PARA COMPLEMENTAR LA INFRAESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

El desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticos ha permitido que las redes de distribución óptica (ODN – *Optical Distribution Network*) con tecnología GPON tengan cada vez mayor presencia en el mercado nacional y mundial, por esta razón es necesario que el estudio de dicha tecnología deba realizarse con mayor detenimiento y con los recursos suficientes. Para este propósito, se recomienda adquirir componentes y herramientas, tales como: equipos terminales (OLT y ONT), elementos pasivos, herramientas y una licencia para la utilización de un software de simulación.

Los TDRs (términos de referencia) de los recursos que se recomienda adquirir son:

	Escuela Politécnica Nacional
	Laboratorio de Comunicaciones Ópticas
Descripción del bien o servicio requerido	Kit académico para la implementación y análisis de redes GPON ^[117] [118]
Características fundamentales	<p>Características de la OLT</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interfaz de transporte: 4 puertos 1000Base-T; - Compatible con ITU-T G.984.1, G.984.2, G.984.3, G.984.4 y G.988; - Gestión remota de ONTs; - 802.1ad, 802.1Q, 802.1p para soportar diferentes escenarios de VLAN de BBF TR-156;

- QoS en conmutación;
- DHCP relay;
- Filtrado Multicast (hasta 256 direcciones IP Multicast);
- Codificación FEC en ambas direcciones;
- Cuatro puertos SFP GPON;
- Cuatro puertos GbE de transporte;
- Un puerto de gestión *Fast Ethernet*;
- Un puerto USB como interfaz de consola;
- Modo de configuración DUAL (de bajo nivel y vía web);
- Interfaz óptica: OLT B+ y C+.

Características de la ONT

- Velocidad de transmisión: 2.488 Gbps (*Downstream*) y 1.244 Gbps (*Upstream*);
- Cuatro puertos 10/100/1000 Base-T Ethernet, conector RJ45;
- Dos Puertos de interfaz telefónica para VoIP;
- Transmisor/Receptor óptico Clase B+, compatible con ITU-T G.984.2;
- WiFi 802.11b/g/n;
- Interfaz óptica: conector SC/APC;
- Longitud de onda: 1310 nm (US) y 1490 nm (DS)

Características del SFP¹⁸:

- Velocidad de transmisión: 2.5 Gbps / 1.25 Gbps;
- Tipo de Láser: DFB-LD, OLT B+;
- Alcance: 20 Km;
- Multiplexación: WDM bidireccional;
- Fibra óptica monomodo;
- Interfaz óptica: SC/APC;
- Longitud de onda: 1490 nm TX / 1310 nm RX
- Potencia de salida: 1.5 – 5 dBm

¹⁸ Un SFP (*Small Form-factor Pluggable*) es un transceptor que se utiliza como interface entre un equipo de comunicaciones (*switch, router, conversor de medios*) y un enlace de fibra óptica.

Propiedades de uso	El kit debe contener los elementos activos necesarios para implementar una red de acceso GPON y simular diferentes tipos de servicios. El kit debe contener una OLT y dos ONU's, y debe ser apto para actividades de docencia, investigación, estudio de la tecnología GPON y FTTR (<i>Fiber to the Room</i>).
Requisitos funcionales y tecnológicos	Los equipos que componen el kit deben poseer dimensiones reducidas y de fácil transportación. La OLT debe tener las adecuaciones respectivas para su instalación en un rack de 19". Además, debe disponer de un software para gestión de red. OLT: Fuente de alimentación 110 - 220 VAC, 50 - 60 Hz ONT: Fuente de alimentación 110 - 240 VAC, 50 - 60 Hz, 12 VDC
Cantidad	2
Presupuesto referencial sin impuestos	USD 6,770.58
Presupuesto unitario	USD 3,385.29

	Escuela Politécnica Nacional
	Laboratorio de Comunicaciones Ópticas
Descripción del bien o servicio requerido	Set de elementos pasivos para la implementación y análisis de una red GPON ^[119]
	<p>Características de la Manga porta splitter</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad para ingreso de 6 cables; - Cuatro bandejas para 12 fusiones; - Una bandeja porta splitter: 2 de 2x16 o 1 de 2x32; - Diámetro de cables: 10 a 22 mm; - Tipo domo.

Características fundamentales	<p>Características de la caja de distribución NAP (<i>Network Access Point</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad para 12 hilos; - Un puerto para sangrado; - Dos puertos adicionales para derivación; - De 8 a 16 puertos para cable tipo DROP; - Cuatro bandejas abatibles para 12 empalmes; - Posibilidad de alojamiento de splitter 1x8 o 1x16; <p>Características del splitter para rack de 19"</p> <ul style="list-style-type: none"> - Debe estar contenido en una caja metálica, cuyas dimensiones deben ser adecuadas para su instalación en rack de 19"; - Un puerto de entrada y ocho puertos de salida; - Conector: SC/APC; - Adaptador: SC/APC; <p>Características de la roseta óptica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Espacio para dos puertos con adaptador SC/APC; - Dos pigtaills de 1 m, G.652 con conector SC/APC; - Capacidad para fijar dos tubos termocontraíbles y la reserva de fibra óptica.
Propiedades de uso	Los elementos pasivos son necesarios para conocer la forma de implementación de una red de acceso GPON, encontrar las posibles causas de fallos y definir procesos de solución en una red que se encuentra en funcionamiento.
Requisitos funcionales y tecnológicos	Los equipos deben poseer manual de instrucciones; el splitter debe tener las adecuaciones respectivas para su instalación en un rack de 19".
Cantidad	2
Presupuesto referencial sin impuestos	USD 1,848.00
Presupuesto unitario	USD 924.00

	Escuela Politécnica Nacional
	Laboratorio de Comunicaciones Ópticas
Descripción del bien o servicio requerido	Herramientas para sangrado de cables y buffer de fibra óptica ^[119]
Características fundamentales	<p>Características de la cortadora de cable (<i>Armored Cable Slitter</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Debe permitir cortes longitudinales o transversales de la chaqueta de cables con blindaje metálico; - Cuchilla giratoria (0 a 90°) y ajustable para conseguir una profundidad de hasta 5.5 mm; - Capacidad de corte de cables con diámetros de 8 mm a 28.6 mm <p>Sangradora de FO (<i>Mid span access tool</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Apta para buffers de 1.9 mm a 3 mm; - Debe contener varias ranuras con diferente medida, para diferente tamaño de buffer ; - Mecanismo de bloqueo para fijar el buffer y realizar el corte de forma segura.
Propiedades de uso	El uso de estas herramientas hace posible que los trabajos de implementación y mantenimiento cumplan con los parámetros de calidad y seguridad que las nuevas tecnologías lo exigen.
Requisitos funcionales y tecnológicos	Se debe incluir cuchillas de repuesto.
Cantidad	2
Presupuesto referencial sin impuestos	USD 922.28
Presupuesto unitario	USD 461.14

	Escuela Politécnica Nacional
	Laboratorio de Comunicaciones Ópticas
Descripción del bien o servicio requerido	Rack de piso abierto de 19" ^[120]
Características fundamentales	<ul style="list-style-type: none"> - Columnas de láminas de acero de 2 mm de espesor, multi plegado para combatir los efectos de flexión o torsión; - Base compuesta por dos piezas angulares de acero de 3 mm de espesor; - Separación entre columnas de 19"; - Disponibilidad de 42 UR (unidades de rack); - Ancho: 53 cm; - Altura: 2.10 m.
Propiedades de uso	Debe cumplir con la norma ANSI/TIA-568, estándares de fabricación C.2 ¹⁹ .
Requisitos funcionales y tecnológicos	Las piezas metálicas deben poseer todos los orificios necesarios tanto para su ensamblaje como para su instalación al piso. Además, se deben incluir todos los tornillos y tuercas para la sujeción de equipos y para el ensamblaje.
Cantidad	1
Presupuesto referencial sin impuestos	USD 250.00
Presupuesto unitario	USD 250.00

¹⁹ ANSI/TIA-568-C.2: estándar de componentes y cableado de telecomunicaciones de par trenzado balanceado.

	Escuela Politécnica Nacional
	Laboratorio de Comunicaciones Ópticas
Descripción del bien o servicio requerido	Licencia de Software para diseño y simulación de redes ópticas [121]
Características fundamentales	<ul style="list-style-type: none"> - Biblioteca que incluyan componentes que permitan reproducir el comportamiento real de un dispositivo y la modificación de sus parámetros característicos; - Diseño de sistemas y subsistemas de forma intuitiva en una interfaz amigable con el usuario; - Los parámetros modificables de los componentes deben ser aquellos que se puedan medir en dispositivos reales; - El software debe realizar cálculos y análisis de señales basados en algoritmos adecuados que garanticen precisión y eficiencia en la simulación; - Herramientas de visualización avanzada como: analizador de espectros óptico, osciloscopio óptico y visualizador del diagrama del ojo. Además se debe incluir herramientas para análisis de señales WDM; - Opción para almacenar los datos generados por cada uno de los componentes de tal manera que se pueda ejecutar la simulación las veces que sea necesario sin necesidad de volver a calcular; - Simulación jerárquica: para lograr una simulación flexible y detallada, es necesario tener diferentes niveles de abstracción (sistemas, subsistemas y componentes); - Incorporación de componentes definidos por el usuario, basados en componentes y librerías predefinidas o mediante el uso de otras herramientas como Matlab; - Creación de parámetros mediante expresiones matemáticas, que puedan ser compartidos por varios componentes o subsistemas;

	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización del tiempo de diseño y tiempo de cálculo, gracias a la creación de múltiples diseños en un mismo proyecto y al control del número de subprocesos a ejecutarse; - Eficiente gestión de gráficos y resultados.
Propiedades de uso	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas DWDM/CWDM amplificados (por ejemplo: EDFA, MultiPump Raman, SOA, Amplificador Híbrido); - Sistemas FTTx/PON; - Sistemas OTDM / OCDMA; - Sistemas analógicos y digitales de CATV; - LAN's Ópticas; - Interconexiones ópticas;
Requisitos funcionales y tecnológicos	<p>El software debe permitir lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Presentación visual de la red diseñada; - Acceso a un amplio conjunto de parámetros característicos de los sistemas de comunicaciones ópticos y sus componentes; - Análisis global del rendimiento de un sistema; - Evaluación de los parámetros de sensibilidad y tolerancia de los componentes de un sistema óptico; - Visualización de los posibles escenarios para la implementación de una red; <p>El servicio incluye licencia permanente para 5 computadores PC con SO Windows 10 y capacitación virtual de hasta 50 usuarios;</p>
Cantidad	1
Presupuesto referencial sin impuestos	USD 17,640.00
Presupuesto unitario	USD 17,640.00

Nota: Los valores que constan como presupuesto del bien que se recomienda adquirir no incluye impuestos y su última cotización se realizó en octubre del 2017.

CAPÍTULO 3

SOFTWARE PARA DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS

Uno de los objetivos de este trabajo es proporcionar información acerca de las herramientas computacionales que ayuden a fortalecer los conocimientos teóricos de las comunicaciones ópticas, ya que el entrenamiento con elementos reales resulta poco viable, especialmente por sus elevados costos, es necesario buscar alternativas que presenten pocas limitaciones pero altos beneficios. Por otro lado, los avances en las tecnologías computacionales y el intento constante por modelar situaciones de la vida real a través de un programa computacional, motivan la creación de nuevas herramientas para apoyar el proceso de toma de decisiones y para adquirir destrezas de forma rápida, a bajo costo y sin altos riesgos.

La simulación por computadora permite que el estudiante sea capaz de diseñar un sistema, modelarlo y determinar su desempeño mediante el análisis de los parámetros que caracterizan a cada uno de sus componentes, además, gracias a la simulación se pueden visualizar los posibles escenarios de trabajo y encontrar soluciones a problemas de distinta complejidad. Un software de simulación es intuitivo y de fácil comprensión, proporciona control total sobre el tiempo y ayuda a la innovación, ya que permite al usuario observar y experimentar con un modelo cuyas características son rápidamente modificables, lo cual constituye una gran ventaja, ya que generalmente es más barato mejorar un sistema por simulación que hacerlo en el sistema físico o real.

3.1 SIMULADORES DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS

En general, la simulación debe ser una solución fiable y de bajo costo, sin embargo, buena parte de las opciones existentes en el mercado son poco eficientes y su alto costo económico, constituye una gran desventaja. A continuación se describen

algunas de las opciones que cumplen con los requerimientos del laboratorio propuesto, se realiza una comparación y se elige el simulador más adecuado.

3.1.1 *RSOFT OPTSIM*TM [122]

*OptSim*TM (Figura 3.1) es un producto *RSoft* de *Synopsys* que permite diseñar y optimizar componentes y sistemas de comunicaciones ópticos. Presenta una interfaz gráfica amigable para el usuario y ofrece alta similitud entre sus instrumentos y aquellos que se encuentran en un laboratorio. Este software provee una variada biblioteca de componentes de gran flexibilidad y algoritmos de simulación que brindan alta exactitud en sus resultados.

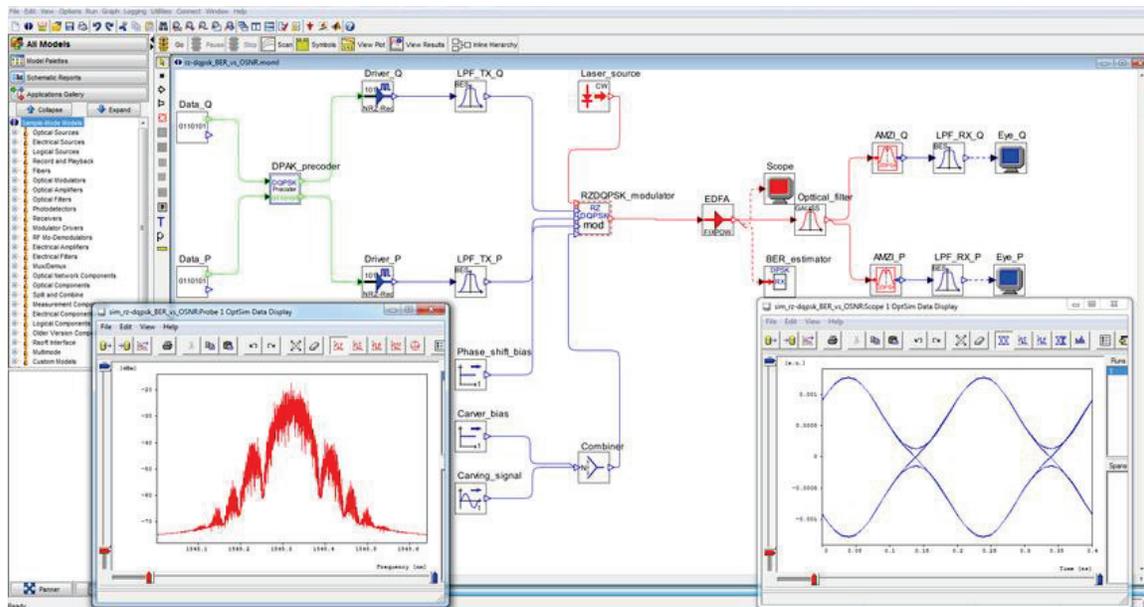


Figura 3.1 Interfaz gráfica de *OptSim*TM [122]

Es muy utilizado por organizaciones dedicadas a la investigación y a la industria, puesto que sus beneficios permiten crear prototipos virtuales de sistemas de comunicación óptica para mejorar la productividad y reducir tiempos de comercialización. Sus aplicaciones se centran principalmente en análisis, diseño, validación, simulación y evaluación dentro de las siguientes áreas:

- ✓ Sistemas DWDM/CWDM amplificadas (por ejemplo: EDFA, MultiPump Raman, SOA, Amplificador Híbrido);

- ✓ Sistemas FTTx/PON;
- ✓ Sistemas OTDM / OCDMA;
- ✓ Sistemas analógicos y digitales de CATV;
- ✓ Redes completamente ópticas;
- ✓ Sistemas terrestres y submarinos de largo alcance;
- ✓ Sistemas solitón;
- ✓ LAN's ópticas;
- ✓ Interconexiones ópticas;
- ✓ Sistemas ópticos en el espacio libre (FSO).

El entorno de *OptSim* incluye varios motores de simulación, eficaces utilidades para procesar datos y un alto número de modelos de componentes. Otras características que se pueden mencionar son:

- ✓ Permite interactuar con MATLAB™ para facilitar el diseño de modelos definidos por el usuario, extendiendo las capacidades de análisis y personalizando la simulación;
- ✓ Posee interfaces para integrar equipos de medición de laboratorio con las herramientas de simulación, permitiendo mejorar la eficiencia de los diseños;
- ✓ Utiliza interfaces con otras herramientas de simulación de dispositivos como *BeamPROP*, *GratingMODE*, y *LaserMOD* para diseñar circuitos y sistemas opto-electrónicos;
- ✓ Permite combinar simuladores de circuitos electrónicos con simuladores de sistemas de comunicaciones ópticos para ejecutar un análisis de extremo a extremo, ofreciendo exactitud en los resultados, optimizaciones en el diseño de circuitos de control de las fuentes de luz láser y la simulación de sistemas de comunicaciones de dominio mixto (electro – ópticos);
- ✓ Ofrece interfaces con aplicaciones para programar en lenguajes como C/C++ para el desarrollo de modelos personalizados por el usuario;
- ✓ Posee extensas bases de datos con información de componentes predefinidos, esto facilita el modelado de componentes comerciales;
- ✓ Las mediciones son intuitivas y flexibles gracias a las interfaces gráficas que actúan como un instrumento de laboratorio virtual;

De acuerdo a los beneficios y características que otorga *OptSim*TM, se puede indicar que este simulador cumple con los requerimientos del laboratorio, sin embargo, existen ciertas desventajas que dificultan su elección, estas son:

- ✓ Alta dependencia de otros simuladores para cumplir con los objetivos;
- ✓ Para tener accesibilidad a todo tipo de usuarios, es necesario que el simulador sea de fácil manejo y de diferentes niveles de abstracción,
- ✓ Manipular varios programas de simulación a la vez, aumenta la complejidad y los tiempos de desarrollo de una aplicación. Además, la dependencia de otros simuladores implica el incremento en los costos, ya que se debe adquirir la licencia de cada software adicional.

3.1.2 VPITRANSMISSIONMAKERTM [123]

Este simulador fue creado por *VPIphotonics Design Automation* para agilizar los procesos de diseño de sistemas y subsistemas de transmisión óptica de corto y largo alcance, redes de acceso y redes metropolitanas mediante el desarrollo de tecnologías y estrategias de sustitución de componentes en redes de fibra óptica ya existentes. La combinación entre su interfaz gráfica, el sofisticado y robusto simulador, y un modelado de instrumentos muy realistas, junto con las representaciones de señales ópticas en diferentes grados de abstracción, permiten modelar de forma precisa y eficiente cualquier sistema de transmisión óptica.

Este sofisticado entorno virtual (Figura 3.2) permite ejecutar pruebas para definir los requisitos de los diferentes componentes de un sistema y evaluar los riesgos en la elección de los mismos. Además, ofrece una gama incomparable de módulos fotónicos y electrónicos (más de 700) y de plantillas de diseño (más de 500) que se actualizan periódicamente.

*VPItransmissionMaker*TM ofrece una simulación detallada de señales ópticas en el dominio del tiempo, permitiendo por ejemplo, estimar el BER y realizar el análisis del diagrama del ojo. La representación de la señal en un tiempo promedio facilita el modelado de sistemas complejos sin necesidad de ejecutar largas simulaciones.

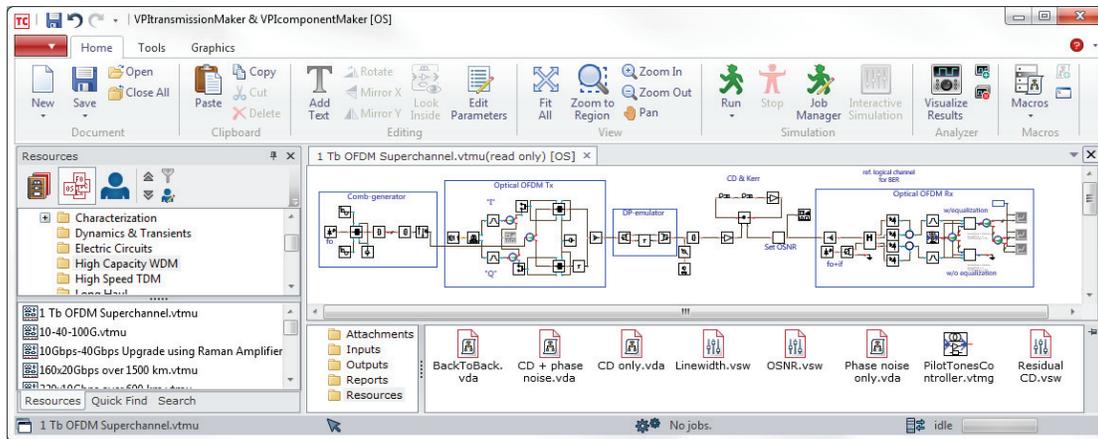


Figura 3.2 Interfaz gráfica de *VPItransmissionMaker*TM [123]

A continuación se citan algunas de las aplicaciones de *VPIphotonics*TM:

- ✓ Simulación de redes ópticas;
- ✓ Modulación con una o varias portadoras (OFDM, Nyquist, WDM);
- ✓ Constelaciones en 2 y 4 dimensiones;
- ✓ Herramientas avanzadas de visualización y análisis (BER - *Bit Error Rate*, EVM - *Error Vector Magnitude*, diagrama de ojo, espectro y otros);
- ✓ Rápida evaluación del diseño de sistemas WDM, utilizando funciones de análisis de rendimiento del enlace y reglas de diseño de ingeniería;
- ✓ Modelado de componentes físicos de acuerdo a su comportamiento real (según sus *data-sheet*) de varios conversores electro – ópticos como DML (*Directly Modulated Laser*), EML (*Electro - absorption Modulated Laser*) y MZM (*Mach-Zehnder Modulator Laser*);
- ✓ Amplia biblioteca de algoritmos para ecualización basada en DSP (filtro MIMO, *Back-propagation*, *Viterbi & Viterbi*, MLSE y otros) y FEC (LDPC, Hamming);
- ✓ Modelados de fibra óptica avanzados (incluyendo *Raman*, *Rayleigh*, *Brillouin* y efectos de polarización aleatoria);
- ✓ Ambiente de simulación versátil, apto para investigar eventos dinámicos de red en escalas de tiempo lento (respuestas en EDFA y esquemas de control) y escalas de tiempo rápido (efectos transitorios a nivel de bit);
- ✓ Soporte para transmisión de corto alcance y alta velocidad sobre fibras multimodo, y transmisión MIMO sobre fibras monomodo;

- ✓ Transmisión óptica en el espacio libre;
- ✓ Análisis de radio sobre fibra (RoF) y transmisiones de microondas (SNR, CNR, IMD3, IP3, y otros).

El simulador de *VPIphotonics™* es una herramienta eficiente para la planificación técnica, proporciona un entorno dinámico para diseñar, evaluar, demostrar y comparar técnica y económicamente cada una de las soluciones encontradas. Este software es utilizado tanto por empresas privadas (proveedores de servicios, integradores de sistemas y fabricantes de equipos), como por instituciones públicas y universidades.

El costo del paquete para propósitos universitarios por cinco licencias fijas en un año es de USD 3,550.00 y el costo de cinco licencias para servidor por un año es de USD 5,325.00 (según proforma adjunta en el Anexo O).

3.1.3 *SIMULINK® DE MATLAB®* ^[124] ^[125]

Simulink® (Figura 3.3) presenta un entorno de diagramas de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos. Permite realizar diseños a nivel de sistema, simulaciones, generación automática de códigos, pruebas y verificación continua de sistemas integrados. Ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y soluciones para modelar y simular sistemas dinámicos. Trabaja de forma integrada con *MATLAB®*, lo cual permite incorporar algoritmos en los modelos y exportar los resultados de la simulación para posteriores análisis.

El *Simulink®* puede utilizarse en una amplia gama de aplicaciones que incluyen: procesamiento de señales en tiempo real y diseño de redes. Las aplicaciones que se desarrollen sobre *Simulink®* utilizan módulos, los cuales evitan la necesidad de programar directamente en *MATLAB®* y permiten la creación de sistemas más complejos mediante la interconexión de módulos elementales. Una de las grandes ventajas de *Simulink®* es que no requiere ningún tipo de licencia comercial para desarrollar aplicaciones sobre él.

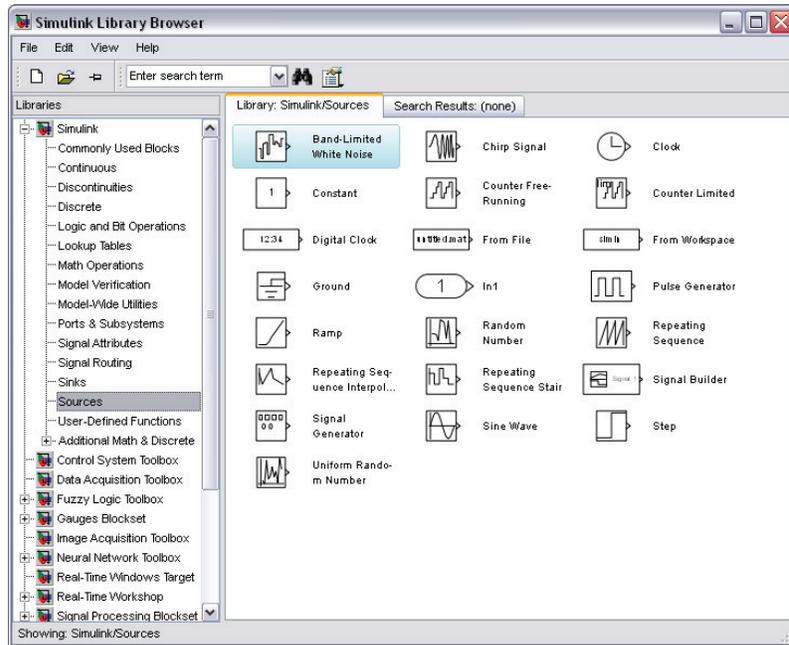


Figura 3.3 Interfaz gráfica de *Simulink*® [124]

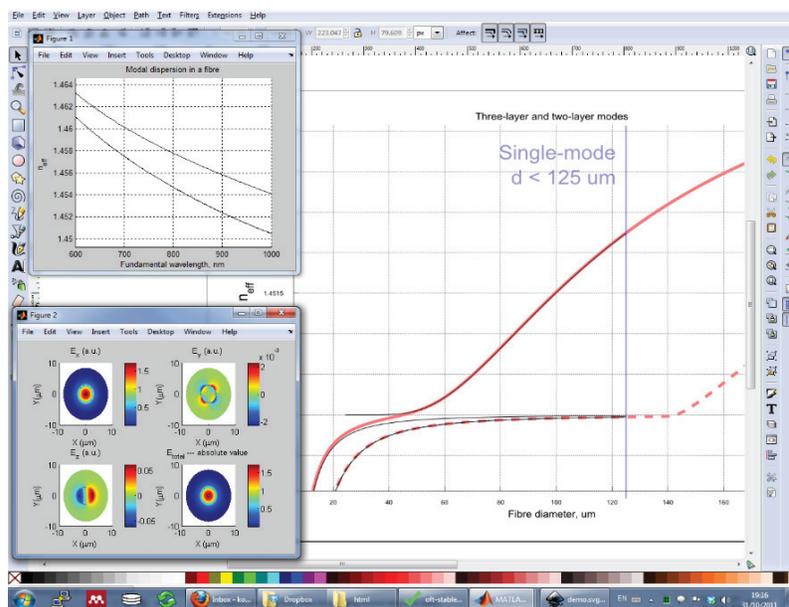


Figura 3.4 Simulación con *Optical fibre Toolbox* de *Simulink*® [125]

Existe un grupo de instrucciones llamado *Optical fibre Toolbox* - OFT (Figura 3.4), mismo que provee funciones para realizar cálculos automáticos en transmisión por fibra óptica considerando la dispersión del material. Además, permite:

- ✓ Determinar los modos de propagación;
- ✓ Calcular los campos eléctrico y magnético en los modos de propagación.

- ✓ Calcular el índice de refracción efectivo de cada modo para un diámetro y longitud de onda dados, o para diámetros o la longitud de onda variables.

Al ser una herramienta optimizada para el desarrollo de componentes en base de modelos matemáticos, se puede indicar que el *Simulink*® de *Matlab*® no se ajusta a los objetivos que se persiguen en este trabajo, ya que no se contempla el desarrollo de aplicaciones computacionales, sino que se busca una herramienta que ofrezca soluciones rápidas tanto en sistemas básicos como complejos.

El costo de una licencia individual para docentes o investigadores en una institución educativa que requiera operar, instalar y administrar el software personalmente y que puede activar hasta en cuatro computadoras diferentes, es de USD 550,00 (información obtenida de la página web del proveedor).

3.1.4 *OPTISYSTEM* ^[126]

OptiSystem es un paquete completo de software que permite diseñar, probar y simular una amplia gama de redes ópticas en la capa física. La simulación se realiza a nivel de sistema y se basa en un modelado realista de los sistemas de comunicaciones ópticos. *OptiSystem* posee un entorno de simulación eficaz; constituye una herramienta de simulación flexible y eficiente, ya que sus modelos corresponden a diferentes niveles de abstracción (sistema, subsistema y componentes). Sus prestaciones pueden ampliarse fácilmente con la personalización de componentes y con la gran cantidad de herramientas disponibles.

Presenta una interfaz gráfica muy completa (Figura 3.5), desde la cual se puede controlar el diseño de los componentes ópticos y eléctricos, y las presentaciones gráficas. Su amplia librería contiene componentes ópticos activos y pasivos con parámetros característicos muy realistas (dependientes de la longitud de onda). Algunos beneficios específicos que ofrece *OptiSystem* son:

- ✓ Proporciona información global sobre el rendimiento de un sistema;

- ✓ Evalúa la sensibilidad de los parámetros que determinan el grado de tolerancia de un diseño;
- ✓ Presenta visualmente las opciones de diseño y posibles escenarios de trabajo;
- ✓ Ofrece acceso directo a un amplio conjunto de datos que caracterizan al sistema;
- ✓ Proporciona barrido automático de parámetros y optimización de los mismos;
- ✓ Integración con otros productos específicos de la familia *Optiwave* (OptiSPICE, OptiBPM, OptiGrating y OptiFiber).

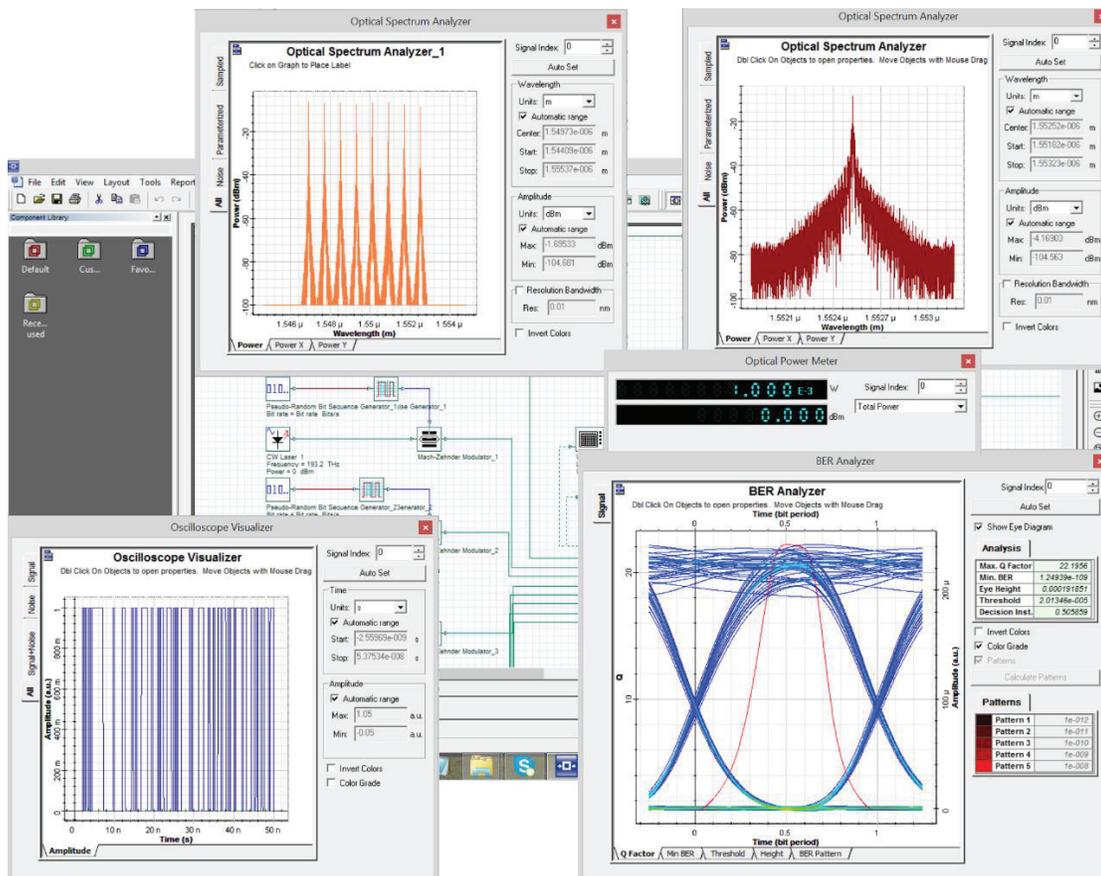


Figura 3.5 Interfaz gráfica de *OptiSystem*

OptiSystem proporciona una herramienta de diseño potente y fácil de usar; permite a los usuarios planificar, probar y simular (en el dominio del tiempo y de la frecuencia) sistemas destinados a aplicaciones como:

- ✓ Diseños de redes ópticas que incluyen anillos OTDM, SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, OCDMA;

- ✓ Transmisión monomodo y multimodo;
- ✓ Óptica de espacio libre (FSO), radio sobre fibra (ROF), OFDM (directo, coherente);
- ✓ Amplificadores y láseres (EDFA, SOA, Raman, Híbrido, optimización GFF);
- ✓ Procesamiento de señal digital en el dominio eléctrico y completamente óptico;
- ✓ Transmisor y receptor (directo / coherente), diseño de sub sistemas;
- ✓ Formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64);
- ✓ Análisis del rendimiento del sistema (diagrama del ojo, factor Q, BER, potencia de señal, OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, pérdidas lineales y no lineales)

OptiSystem es muy popular porque minimiza los requisitos de tiempo y reduce los costos inherentes al diseño de sistemas ópticos, enlaces y componentes. Es una herramienta de diseño de software innovadora y de rápida evolución en un campo de alto interés para muchos investigadores, docentes y estudiantes de pregrado, postgrado y doctorados.

El costo de la licencia para propósitos académicos por un usuario durante 12 meses es de USD 3,430.00 y el costo de la licencia para un usuario adicional es de USD 686.00. La licencia perpetua posee un costo de USD 9,800.00 para un usuario y USD 1,960.00 por cada usuario adicional (según proforma adjunto en el Anexo O).

3.2 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SIMULADOR

Se examinaron cuatro opciones para simular sistemas de comunicaciones ópticos: *OptSim™*, *VPItransmissionMaker™*, *Simulink®* de *Matlab®* y *OptiSystem*. Todos ofrecen enormes ventajas y beneficios, sin embargo, es necesario realizar una comparación entre las principales características que presenta cada simulador (tal como se muestra en la Tabla 3.1), para elegir aquel que cumpla con los requerimientos de este proyecto de titulación.

COMPARACIÓN ENTRE SIMULADORES DE COMUNICACIONES ÓPTICAS				
Características	<i>Optsim</i>	<i>VPTransmission Maker</i>	<i>Simulink de Matlab</i>	<i>OptiSystem</i>
Diseño de enlaces de fibra óptica	✓	✓	✓	✓
Interfaz gráfica amigable	✓	✓	✓	✓
Herramientas para diseño en 3D de componentes fotónicos	✓			✓
Mejoras constantes en la interfaz gráfica	✓			✓
Mejor interacción entre proveedor y usuario			✓	✓
Actualizaciones periódicas de tecnologías y componentes de red	✓	✓		✓
Flexibilidad para desarrollar componentes y algoritmos personalizados	✓		✓	✓
Poca dependencia de programas adicionales		✓	✓	✓
Simulación a diferentes niveles de abstracción	✓	✓		✓
Facilidad para obtener licencias de uso de software			✓	✓
Flexibilidad en costos (variedad en tipos de licencias)			✓	✓

Tabla 3.1 Comparación entre simuladores de sistemas de comunicaciones ópticos

Puesto que cada simulador presenta una gran variedad de funcionalidades y atributos, efectuar una comparación exhaustiva entre ellos demandaría una extensión en el alcance de este trabajo; por lo tanto, la selección se realiza considerando una lista de preferencias y requisitos que cada software debe cumplir. Luego de hacer el *checklist* respectivo, se puede concluir que el simulador más adecuado para alcanzar los objetivos de este trabajo es el *OptiSystem*.

3.3 ENTORNO DE TRABAJO EN OPTISYSTEM

OptiSystem es una herramienta eficaz y fácil de usar. Permite realizar tareas de diseño y simulación de sistemas ópticos de diferente grado de complejidad sin necesidad de recurrir a herramientas adicionales. Sus componentes tienen una configuración inicial apropiada, lo cual constituye una enorme ventaja para aquellos usuarios con poca experiencia en el área de las comunicaciones ópticas. Además, provee varios ejemplos de simulaciones a través de su plataforma virtual, que pueden ser de mucha utilidad para agilizar el proceso de aprendizaje.

3.3.1 INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz principal de *OptiSystem* presenta dos ventanas principales (Figura 3.6):

- ✓ Área de trabajo (*Layout*): es el espacio en el que se ubican los bloques que representan a los componentes del sistema;
- ✓ Librería de componentes (*Component Library*): en este espacio se encuentran las carpetas que contienen a los diferentes tipos de componentes.

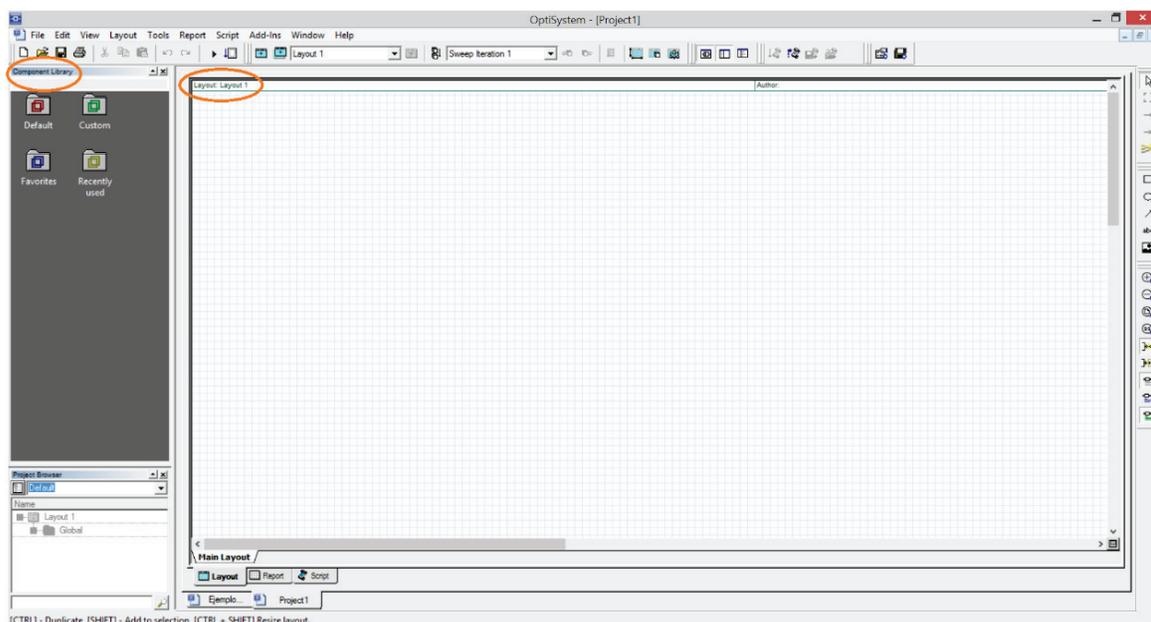


Figura 3.6 Interfaz principal de *OptiSystem*

Los componentes se agregan al *Layout* de manera sencilla (arrastrar y soltar) y la conexión se realiza de manera automática (la conexión automática es configurable). Existen tres tipos de conexiones: óptica, eléctrica y lógica; todas las conexiones representan algún tipo de canal y no necesariamente simbolizan un objeto físico (cable). Las conexiones se realizan únicamente cuando los componentes tienen puertos con características similares.

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de diseño de un sistema que permite analizar un transmisor WDM con varios equipos de medición (OTDR, Analizador de espectro óptico y medidor de potencia óptica). Se observa además que cada bloque posee una simbología y contiene información característica adjunta. Las conexiones entre componentes se representan con la línea entrecortada y las flechas indican el sentido del flujo de datos.

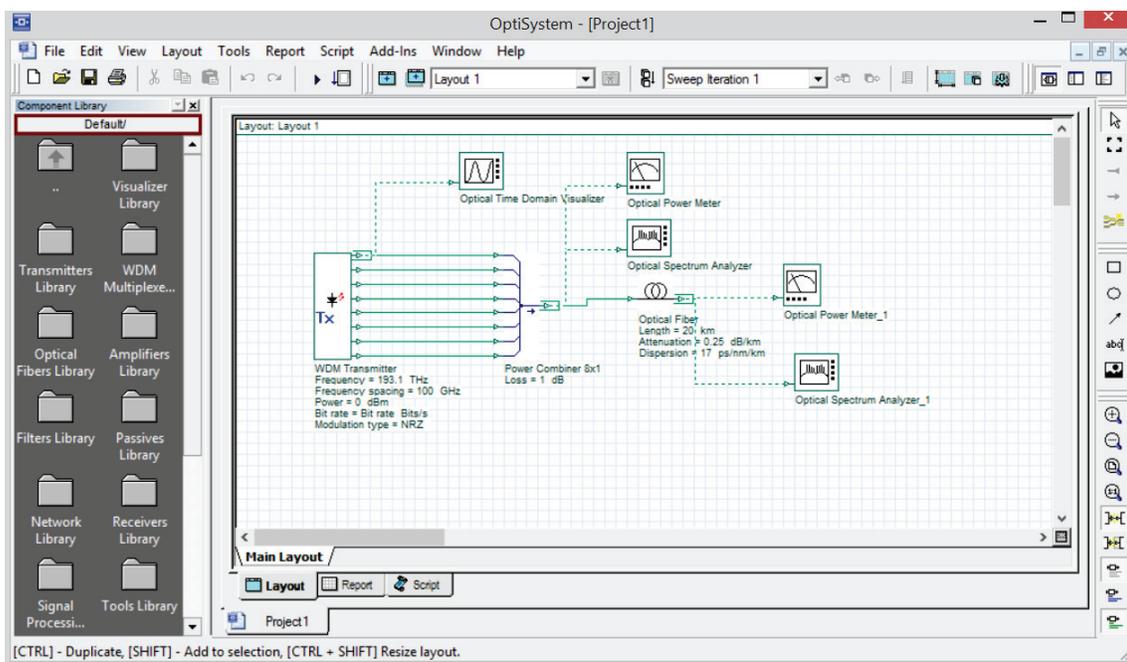


Figura 3.7 Ejemplo de sistema construido en el área de trabajo

3.3.2 LIBRERÍAS DE COMPONENTES DE OPTISYSTEM

Optisystem provee una biblioteca de componentes ópticos y eléctricos, e instrumentos de medición y análisis que proporcionan datos de forma numérica y gráfica de los resultados de una simulación.

Cada componente tiene un conjunto de parámetros que pueden ser: valores constantes, parte de un rango de valores determinados por un script (archivo que contiene un programa simple) o extraídos desde un archivo (tabla de búsqueda). También hay parámetros generales (velocidad de transmisión), algunos de los cuales pueden ser definidos por el usuario. Por defecto, todos los componentes están configurados con valores típicos en sus parámetros característicos.

Optisystem presenta un considerable número de componentes, mismos que están agrupados en diferentes librerías. En este trabajo se analizan las librerías y componentes de mayor utilización en el modelado de redes de acceso con fibra óptica. Sin embargo, también se presenta un resumen de todas las librerías y componentes que se encuentran en una versión estándar.

- **Librería de Visualizadores:** en la Figura 3.8 se observa esta librería, misma que contiene bloques para realizar mediciones y análisis tanto en el dominio eléctrico como en el dominio óptico.

Librería de Visualizadores	Eléctrico	Set de pruebas <ul style="list-style-type: none"> S Parameter Extractor Electrical Filter Analyzer
		<ul style="list-style-type: none"> Electrical Carrier Analyzer Electrical Constellation Visualizer Electrical Power Meter Visualizer BER Analyzer Eye Diagram Analyzer RF Spectrum Analyzer Oscilloscope Visualizer
	Óptico	Set de pruebas <ul style="list-style-type: none"> Differential Mode Delay Analyzer Photonic All-parameter Analyzer Optical Filter Analyzer
		<ul style="list-style-type: none"> Encircled Flux Analyzer Spatial Visualizer Polarization Meter Polarization Analyzer Dual Port WDM Analyzer WDM Analyzer Optical Power Meter Optical Time Domain Visualizer Optical Spectrum Analyzer

Figura 3.8 Librería de visualizadores en *OptiSystem*

- **Librería de transmisores:** se muestran en las figuras 3.9 y 3.10, y contiene varios tipos de fuentes y generadores.

Librería de Transmisores	Fuentes ópticas	<ul style="list-style-type: none"> Spatiotemporal VCSEL Spatial VCSEL Spatial LED Spatial Laser Rate Equations Spatial CW Laser Controlled Pump Laser VCSEL Laser CW Laser Array ES Directly Modulated Laser Measured CW Laser Measured CW Laser Array Pump Laser Array Pump Laser White Light Source LED Laser Measured Laser Rate Equations CW Laser
	Generador de secuencia de Bits	<ul style="list-style-type: none"> User Defined Bit Sequence Generator Pseudo-Random Bit Sequence Generator
	Generador de pulsos	<p>Eléctrico</p> <ul style="list-style-type: none"> M-ary Raised Cosine Pulse Generator M-ary Pulse Generator Predistortion Noise Source Electrical Jitter Duobinary Pulse Generator Bias Generator Measured Pulse Sequence Measured Pulse Sine Pulse Generator Raised Cosine Pulse Generator Impulse Generator Saw-Down Pulse Generator Saw-Up Pulse Generator Triangle Pulse Generator Sine Generator Hyperbolic-Secant Pulse Generator Gaussian Pulse Generator NRZ Pulse Generator RZ Pulse Generator
		<p>Óptico</p> <ul style="list-style-type: none"> Spatial Optical Sech Pulse Generator Spatial Optical Impulse Generator Spatial Optical Gaussian Pulse Generator TRC Measurement Data Measured Optical Pulse Sequence Measured Optical Pulse Optical Impulse Generator Optical Sech Pulse Generator Optical Gaussian Pulse Generator

Figura 3.9 Librería de transmisores en *OptiSystem*. Parte 1

Biblioteca de Transmisores	Moduladores ópticos	 LiNb Mach-Zehnder Modulator  Dual Port Dual Drive Mach-Zehnder Modulator Measured  Single Drive Mach-Zehnder Modulator Measured  Electroabsorption Modulator Measured  Dual Drive Mach-Zehnder Modulator Measured  Frequency Modulator  Phase Modulator  Amplitude Modulator  Electroabsorption Modulator  Mach-Zehnder Modulator
	Transmisores ópticos	 Optical Transmitter  Spatial Optical Transmitter  WDM Transmitter
	Multimodo	 Measured Transverse Mode Generator  Donut Transverse Mode Generator  Hermite Transverse Mode Generator  Laguerre Transverse Mode Generator  Multimode Generator

Figura 3.10 Librería de transmisores en *OptiSystem*. Parte 2

- **Librería de multiplexores WDM:** mostrada en la Figura 3.11, contiene bloques que simulan a MUX/DEMUX y AWGs de número de puertos de entrada y salida fijos o variables.

Biblioteca de Multiplexores WDM	AWG	 AWG NxN Bidirectional  AWG NxN
	Multiplexores	 Nx1 Mux Bidirectional  WDM Mux ES  Ideal Mux  WDM Mux  WDM Mux 8x1  WDM Mux 4x1  WDM Mux 2x1
	Demultiplexores	 WDM Interleaver Demux  WDM Demux ES  Ideal Demux  WDM Demux  WDM Demux 1x8  WDM Demux 1x4  WDM Demux 1x2
	Add and drop	 WDM Add and Drop  WDM Drop  WDM Add

Figura 3.11 Librería de multiplexores en *OptiSystem*

- **Librería de fibra óptica:** contiene bloques que representan a cables de fibra óptica, cuyos parámetros como longitud, atenuación y otros, son completamente configurables. Los componentes que se encuentran en esta librería se observa en la Figura 3.12.

Librería de Fibras ópticas	Multimodo	 Parabolic-Index Multimode Fiber  Measured-Index Multimode Fiber  Linear Multimode Fiber
		 Bidirectional Optical Fiber  Optical Fiber CWDM  Optical Fiber

Figura 3.12 Librería de fibra óptica en *OptiSystem*

- **Librería de componentes que simulan amplificadores eléctricos y ópticos:** esta librería se muestra en la Figura 3.13.

Librería de Amplificadores	Eléctrico	 AGC Amplifier  Limiting Amplifier  Transimpedance Amplifier  Electrical Amplifier
	Waveguide Amplifier	 Er Yb Codoped Waveguide
	SOA	 Reflective SOA  Wideband Traveling Wave SOA  Traveling Wave SOA
	RAMAN	 Raman Amplifier - Dynamic Model  Raman Amplifier - Average Power Model
Óptico	EDFA	 Er-Yb Codoped Fiber Dynamic  Yb Doped Fiber Dynamic  Yb Doped Fiber  Er-Yb Codoped Fiber  EDF Dynamic Analytical  EDF Dynamic  EDFA Measured  Optical Amplifier  EDFA Black Box  EDFA  Erbium Doped Fiber

Figura 3.13 Librería de componentes que simulan amplificadores en *OptiSystem*

- **Librería de componentes que simulan filtros eléctricos y ópticos:** en la Figura 3.14 se muestra la amplia gama de amplificadores que ofrece el simulador.

Librería de Filtros	Eléctrico	 S Parameters Measured Filter  Band Pass Squared Cosine Roll Off Filter  Band Pass Cosine Roll Off Filter  Band Pass Raised Cosine Filter  Band Pass RC Filter  Band Pass Chebyshev Filter  Band Pass Bessel Filter  Band Pass Butterworth Filter  Band Pass Gaussian Filter  Band Pass Rectangle Filter  Measured Filter  Low Pass Squared Cosine Roll Off Filter  Low Pass Cosine Roll Off Filter  Low Pass Raised Cosine Filter  Low Pass RC Filter  Low Pass Chebyshev Filter  Low Pass Bessel Filter  Low Pass Butterworth Filter  Low Pass Gaussian Filter  Low Pass Rectangle Filter  IIR Filter
	Óptico	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> FBG <ul style="list-style-type: none">  Ideal Dispersion Compensation FBG  Uniform Fiber Bragg Grating  Fiber Bragg Grating </div>  Transmission Filter Bidirectional  Reflective Filter Bidirectional  3 Port Filter Bidirectional  Measured Group Delay Optical Filter  Periodic Optical Filter  Delay Interferometer  Gain Flattening Filter  Inverted Bessel Optical Filter  Inverted Butterworth Optical Filter  Inverted Gaussian Optical Filter  Inverted Trapezoidal Optical Filter  Inverted Rectangle Optical Filter  Inverted Optical IIR Filter  Mach Zehnder Interferometer  Acousto Optical Filter  Fabry Perot Optical Filter  Bessel Optical Filter  Butterworth Optical Filter  Gaussian Optical Filter  Trapezoidal Optical Filter  Rectangle Optical Filter  Measured Optical Filter  Optical IIR Filter

Figura 3.14 Librería de componentes que simulan filtros en *OptiSystem*

- **Librería de componentes que simulan elementos eléctricos y ópticos pasivos:** en las figuras 3.15 y 3.16 se observan los diferentes elementos pasivos que ofrece *OptiSystem*.

Librería de elementos pasivos	Eléctrico	Componentes medidos	 4 Port S Parameters  3 Port S Parameters  2 Port S Parameters  1 Port S Parameters
		Combinadores	 Combiner Nx1  Combiner 2x1
		Splitters	 Splitter 1xN  Splitter 1x2
		Bloqueador DC	 DC Block
		Acopladores	 180 Degree Hybrid Coupler  90 Degree Hybrid Coupler
		Atenuadores	 Electrical Attenuator
			 Electrical Phase Shift  Electrical Signal Time Delay
	Óptico	Multimodo	 Vortex Lens  Thin Lens  Spatial Aperture
		Componentes medidos	 Luna Technologies OVA Measurement  Measured Component
		Taps	 Tap Bidirectional
		Reflectores	 Reflector Bidirectional
		Conectores	 Spatial Connector  Connector Bidirectional  Connector
		Circuladores	 Circulator Bidirectional  Ideal Circulator  Circulator
		Aisladores	 Isolator Bidirectional  Ideal Isolator  Isolator
Polarización	 Polarization Combiner Bidirectional  Polarization Waveplate  Polarization Phase Shift  Polarization Delay  PMD Emulator  Polarization Splitter  Polarization Rotator  Polarization Controller  Polarization Combiner  Polarization Attenuator  Circular Polarizer  Linear Polarizer		

Figura 3.15 Librería de componentes que simulan elementos pasivos. Parte 1

Librería de elementos pasivos	Óptico	Combinadores de potencia	<ul style="list-style-type: none"> Power Combiner Power Combiner 8x1 Power Combiner 4x1 Power Combiner 2x1
		Divisores de potencia (splitters)	<ul style="list-style-type: none"> 1xN Splitter Bidirectional Power Splitter Power Splitter 1x8 Power Splitter 1x4 Power Splitter 1x2
		Acopladores	<ul style="list-style-type: none"> Pump Coupler Bidirectional Coupler Bidirectional Pump Coupler Counter-Propagating Pump Coupler Co-Propagating X Coupler
		Atenuadores	<ul style="list-style-type: none"> Attenuator Bidirectional Optical Attenuator
			<ul style="list-style-type: none"> Time Delay Phase Shift

Figura 3.16 Librería de componentes que simulan elementos pasivos. Parte 2

- **Librería de componentes que simulan elementos de red:** mostrados en la Figura 3.17.

Librería de red	switches ópticos	<ul style="list-style-type: none"> 2x2 Switch Bidirectional Dynamic Space Switch Matrix NxM Dynamic Space Switch Matrix NxM Measured Dynamic Y Select Nx1 Dynamic Y Switch 1xN Dynamic Y Switch 1xN Measured Dynamic Y Select Nx1 Measured Ideal Y Switch 1xN Ideal Y Select Nx1 Ideal Y Select 8x1 Ideal Y Switch 1x8 Ideal Y Select 4x1 Ideal Y Switch 1x4 Ideal Y Select Ideal Y Switch Ideal Switch 2x2 Optical Y Select Optical Y Switch Digital Optical Switch Optical Switch
	Conversión de frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> Ideal Frequency Converter

Figura 3.17 Librería de elementos de red en *OptiSystem*

- **Librería de componentes que simulan canales en el espacio libre:** se muestran en la Figura 3.18.

Librería de óptica en el espacio libre	<ul style="list-style-type: none"> OWC Channel FSO Channel
----------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3.18 Librería de óptica en el espacio libre

➤ **Librería de componentes que simulan receptores:** Figura 3.19.

Librería de receptores	Multimodo	<ul style="list-style-type: none"> Mode Selector Mode Combiner
	Receptores ópticos	<ul style="list-style-type: none"> Optical Receiver Spatial Optical Receiver
	Fotodetectores	<ul style="list-style-type: none"> Spatial APD Photodetector Spatial PIN Photodetector Photodetector APD Photodetector PIN
	Regeneradores	<ul style="list-style-type: none"> Integrate And Dump MLSE Equalizer Electronic Equalizer 3R Regenerator Data Recovery Ideal Phase Demodulator Ideal Frequency Demodulator Clock Recovery

Figura 3.19 Librería de componentes que simulan receptores en *OptiSystem*

➤ **Librería de herramientas:** Figura 3.20

Librería de herramientas	Swap Horiz.
	Command Line Application
	Electrical Ring Controller
	Initializer
	Limiter
	Select
	Switch
	Load from file
	Save to file
	Duplicator
	Optical Ring Controller
	Electrical Delay
	Optical Delay
	Binary Delay
	Electrical Null
	Optical Null
	Binary Null
	Fork 1xN
Buffer Selector	
Ground	
Loop Control	
Fork 1x2	

Figura 3.20 Librería de herramientas en *OptiSystem*

- **Librería de componentes para simular procesamiento de señales:** Figura 3.21.

Librería de procesamiento de señales	Lógicos	Binario	 4-DPSK Precoder  Duobinary Precoder  Delay  Binary XNOR  Binary NOR  Binary NAND  Binary XOR  Binary OR  Binary AND  Binary NOT
		Eléctrico	 Electrical XNOR  Electrical NOR  Electrical NAND  Electrical XOR  Electrical OR  Electrical AND  Electrical NOT
	Ariméticos	Eléctrico	 Electrical Sgn  Electrical Abs  Electrical Reciprocal  Electrical Rescale  Electrical Integrator  Electrical Differentiator  Electrical Norm  Electrical Bias  Electrical Multiplier  Electrical Subtractor  Electrical Adder  Electrical Gain
		Óptico	 Optical Hard Limiter  Optical Multiplier  Optical Bias  Optical Subtractor  Optical Adder  Optical Gain
	Herramientas	Eléctrico	 Convert From Electrical Individual Samples  Convert To Electrical Individual Samples
		Óptico	 Convert To Sampled Signals  Channel Attacher  Signal Type Selector  Optical Downsampler  Convert From Optical Individual Samples  Convert To Optical Individual Samples  Convert To Noise Bins  Convert To Parameterized  Merge Optical Signal Bands

Figura 3.21 Librería de componentes para procesamiento de señales en *OptiSystem*

- **Librería de componentes de Matlab:** en la Figura 3.22 se muestran las herramientas que *OptiSystem* ofrece para interactuar con Matlab.

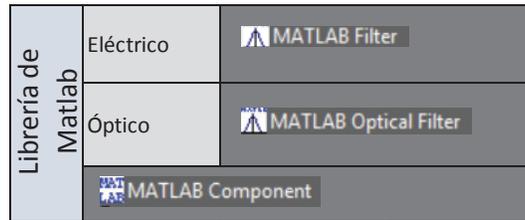


Figura 3.22 Librería de componentes de MATLAB en *OptiSystem*

- **Herramientas para uso de otras aplicaciones de Optiwave:** en la Figura 3.23 se muestran las herramientas que permite hacer uso de otras aplicaciones desarrolladas por *OptiSystem*.

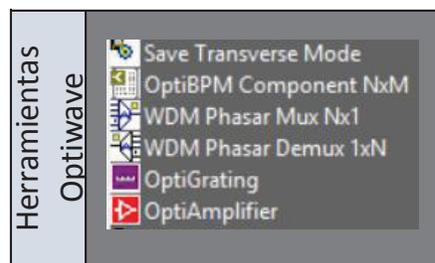


Figura 3.23 Herramientas *Optiwave* en *OptiSystem*

- **Librería de componentes para cosimulación EDA (*Electronic Design Automation*):** Figura 3.24.

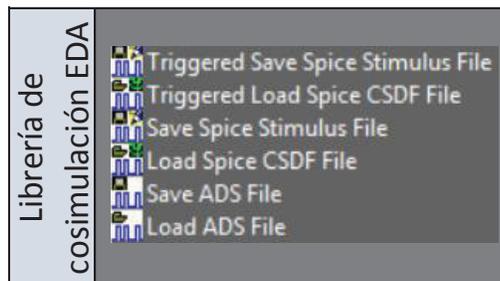


Figura 3.24 Librería de componentes para cosimulación EDA en *OptiSystem*

➤ **Librería de componentes para acceso por cable:** Figura 3.25.

Librería de acceso por cable	Receptores	Detectores	M-ary Threshold Detector
		Decodificadores	DPSK Sequence Decoder PSK Sequence Decoder QAM Sequence Decoder PAM Sequence Decoder
		Demoduladores	Quadrature Demodulator Electrical Frequency Demodulator Electrical Phase Demodulator Electrical Amplitude Demodulator
	Transmisores	Generadores de secuencia	DPSK Sequence Generator PSK Sequence Generator QAM Sequence Generator PAM Sequence Generator
		Generadores de pulso	MSK Pulse Generator OQPSK Pulse Generator DPSK Pulse Generator PSK Pulse Generator QAM Pulse Generator PAM Pulse Generator
		Moduladores	Quadrature Modulator Electrical MSK Modulator Electrical OQPSK Modulator Electrical CPFSK Modulator Electrical FSK Modulator Electrical DPSK Modulator Electrical PSK Modulator Electrical QAM Modulator Electrical PAM Modulator Electrical Phase Modulator Electrical Frequency Modulator Electrical Amplitude Modulator
	Generadores de portadora	Carrier Generator Measured Carrier Generator	

Figura 3.25 Librería de componentes de acceso por cable en *OptiSystem*

Según la información presentada, se puede indicar que *OptiSystem* posee una variada cantidad de componentes y herramientas que permiten hacer simulaciones en diferentes escenarios y en una amplia gama de aplicaciones, sin embargo, es necesario revisar con detalle aquellos componentes y herramientas que serán utilizados en las prácticas que se recomiendan en este trabajo.

3.3.3 COMPONENTES QUE SIMULAN EQUIPOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

- **Medidor de potencia óptica (*Optical Power Meter*):** muestra la potencia óptica (en dBm y en Watts) de la señal medida (Figura 3.26).



Figura 3.26 Medidor de potencia óptica en *OptiSystem*

- **Analizador de espectros ópticos (*Optical Spectrum Analyzer*):** muestra el espectro de una señal óptica ya sea en función de la longitud de onda o de la frecuencia óptica (Figura 3.27).

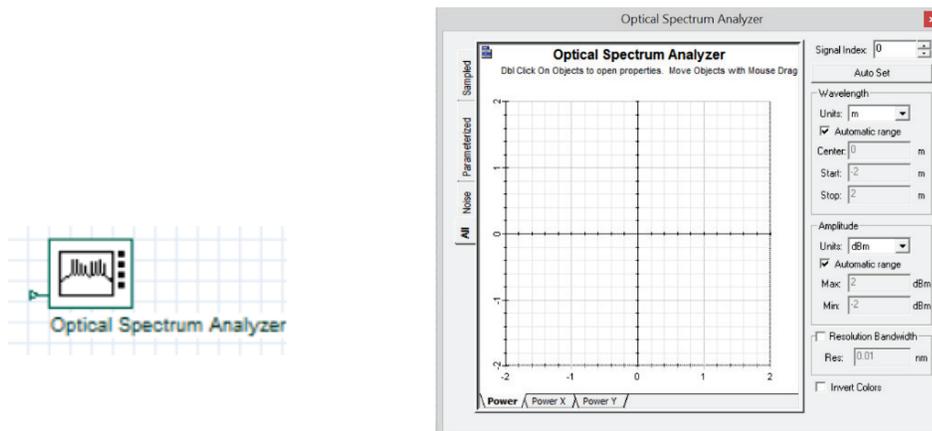


Figura 3.27 Analizador de espectro óptico en *OptiSystem*

- **Osciloscopio (*Oscilloscope Visualizer*):** Es un osciloscopio convencional, que muestra la señal eléctrica en el dominio del tiempo (Figura 3.28).

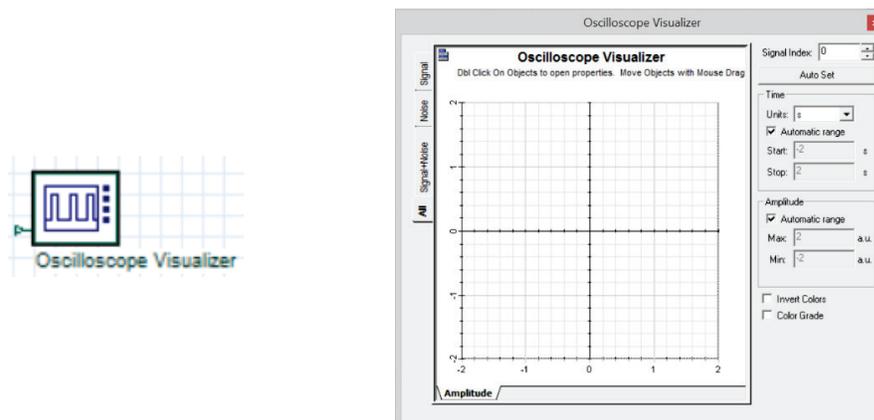


Figura 3.28 Osciloscopio eléctrico *OptiSystem*

- **Analizador de espectro eléctrico (*RF Spectrum Analyzer*):** muestra las componentes espectrales de una señal eléctrica en un cierto rango de frecuencias (Figura 3.29).

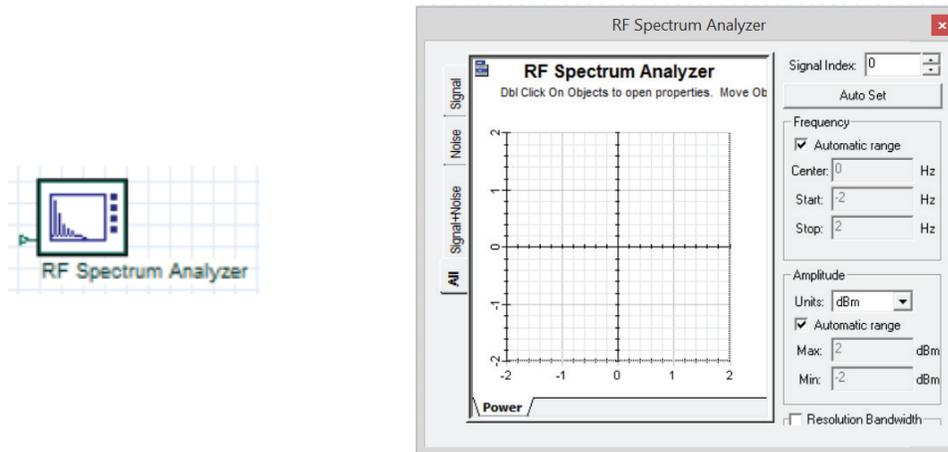


Figura 3.29 Analizador de espectro eléctrico en *OptiSystem*

- **Analizador del diagrama del ojo (*Eye Diagram Analyzer*):** permite analizar el comportamiento de un enlace de comunicación por el método del diagrama del ojo (Figura 3.30).

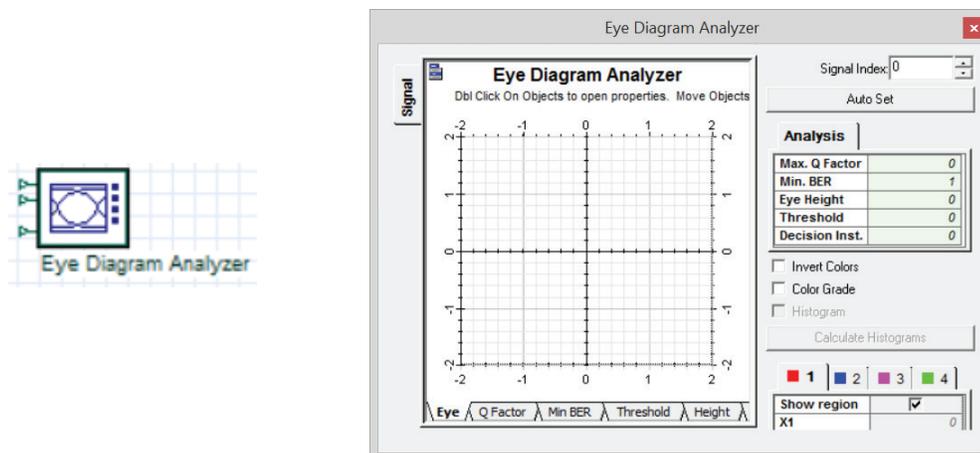


Figura 3.30 Analizador del diagrama del ojo en *OptiSystem*

- **Analizador de tasa de error (*BER Analyzer*):** permite estimar la tasa de error de bits en una señal transmitida (Figura 3.31).

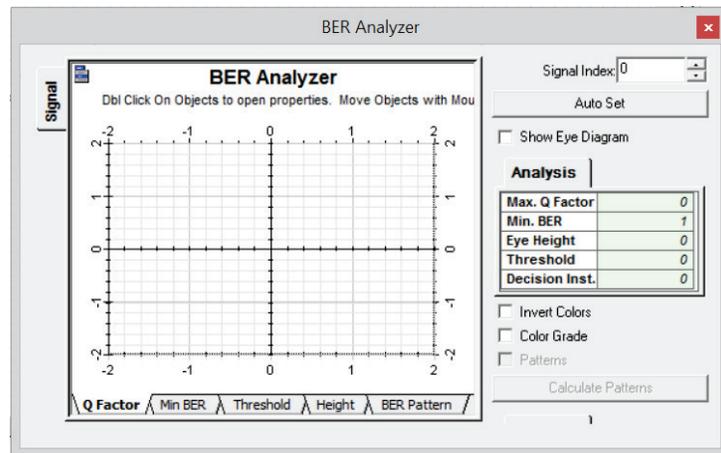
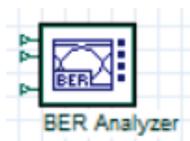


Figura 3.31 Analizador de BER en *OptiSystem*

- **Analizador WDM (*WDM Analyzer*):** herramienta que permite analizar señales WDM, para lo cual presenta valores de frecuencia, potencia, ruido y la relación de señal a ruido óptico OSNR (Figura 3.32).

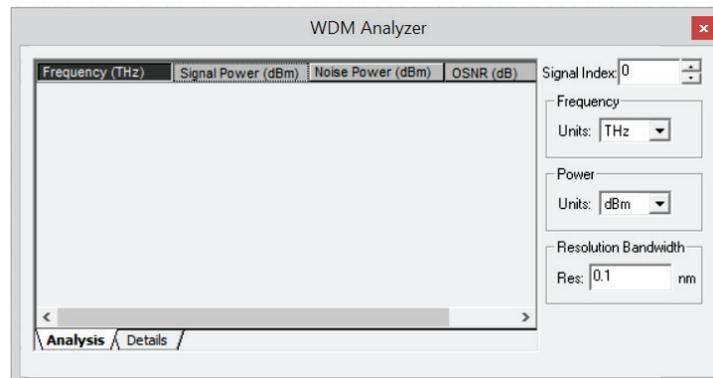
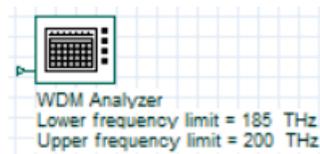


Figura 3.32 Analizador WDM en *OptiSystem*

3.3.4 COMPONENTES PARA SIMULAR REDES ÓPTICAS

A continuación se describen los componentes de red de mayor utilidad para la construcción de redes de comunicaciones ópticas.

- **Generador de secuencia pseudos-aleatoria de bits (*Pseudo-random bit sequence generator*):** genera una secuencia aleatoria de bits (Figura 3.33).

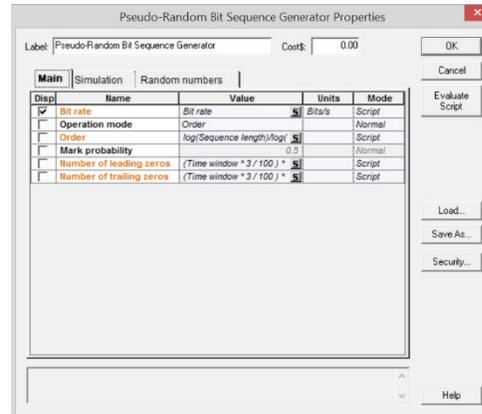
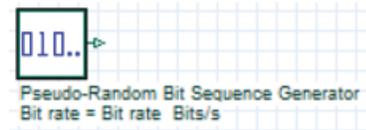


Figura 3.33 Generador de secuencia aleatoria de bits

- **Generador de pulsos NRZ (NRZ pulse generator):** permite que una señal binaria se convierta en una señal con modulación NRZ (Figura 3.34).

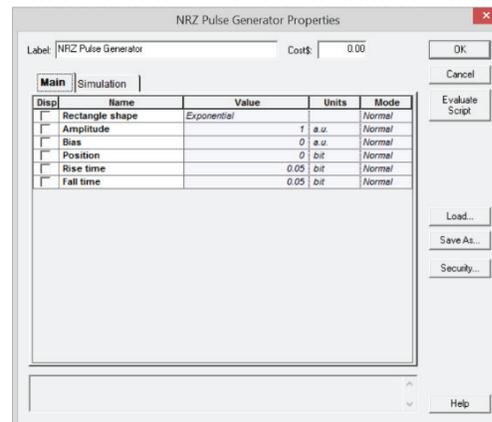
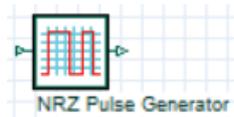


Figura 3.34 Generador de pulsos NRZ

- **Generador de pulsos RZ (RZ pulse generator):** se usa para modular una señal binaria en formato con retorno a cero (Figura 3.35).

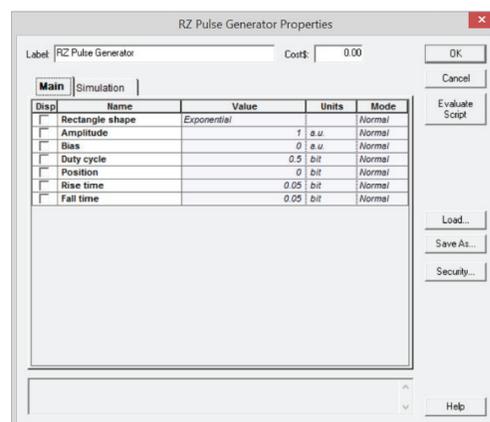
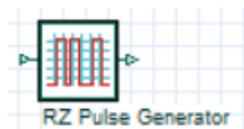


Figura 3.35 Generador de pulsos RZ

- **Láser de onda continua (*Continuous Wave Laser*):** simula una fuente de luz tipo láser sin posibilidad de modulación directa (Figura 3.36).

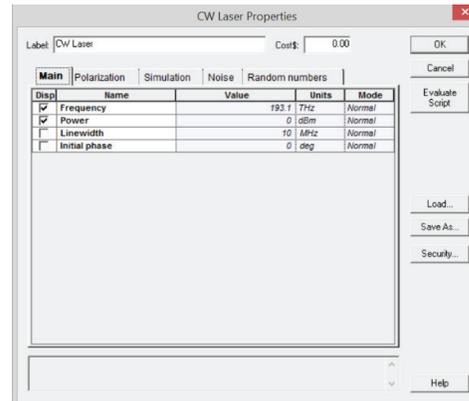
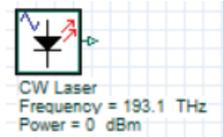


Figura 3.36 Generador de láser de onda continua

- **LED:** simula una fuente de luz tipo LED (Figura 3.37).

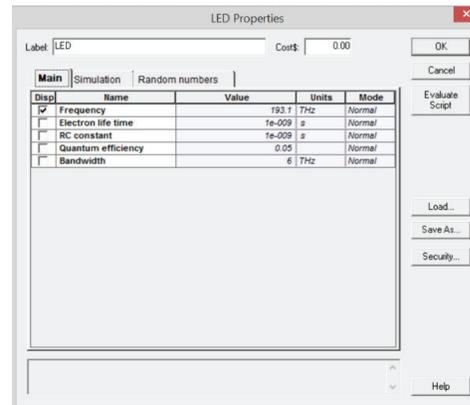
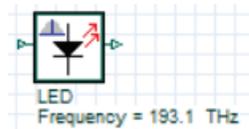


Figura 3.37 Fuente de luz LED

- **Láser directamente modulado (*Directly modulated laser measured*):** es un componente que simula un láser directamente modulado (Figura 3.38).

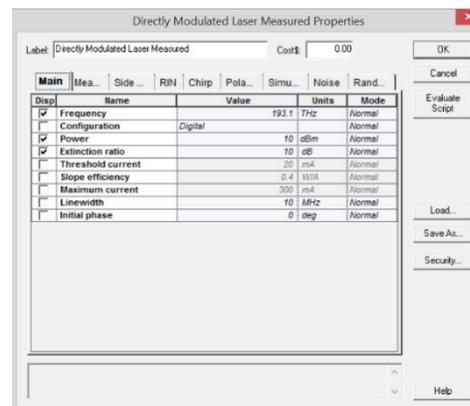
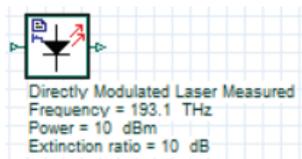


Figura 3.38 Generador láser directamente modulado

- **Modulador de *Mach-Zehnder* (*Mach-Zehnder modulator*):** es un dispositivo que modula la intensidad de una señal óptica (Figura 3.39).

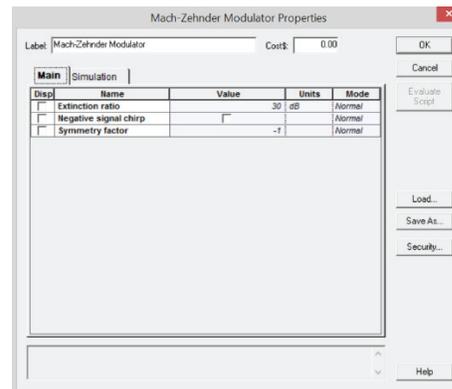
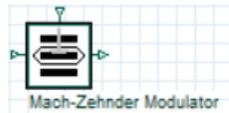


Figura 3.39 Modulador de *Mach-Zehnder*

- **Fibra óptica (*Optical fiber*):** es el modelo general de fibra óptica monomodo; permite modificar parámetros como: atenuación, dispersión, etc. (Figura 3.40)

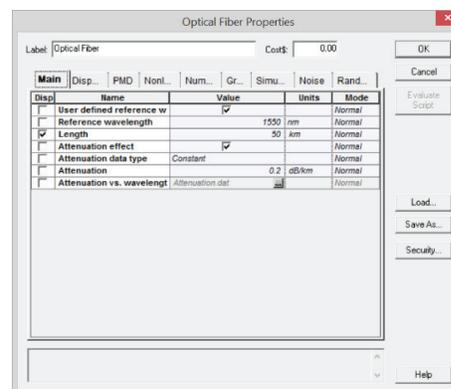
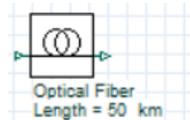


Figura 3.40 Componente que simula una fibra óptica monomodo

- **Fibra óptica multimodo (*Linear multimode fiber*):** simula a una fibra óptica multimodo (Figura 3.41).

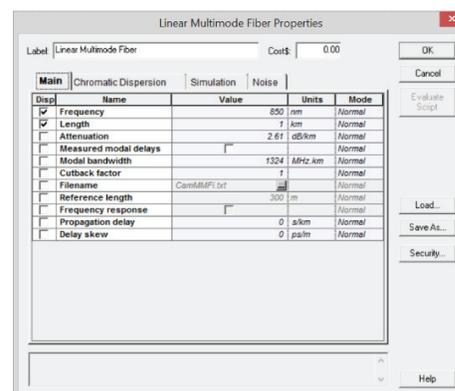
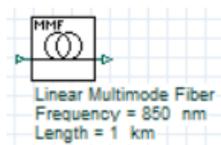


Figura 3.41 Componente que simula una fibra óptica multimodo

- **Amplificador de fibra dopada con Erbio (*Erbium-doped fiber amplifier EDFA*):** elemento que simula a un amplificador óptico (Figura 3.42).

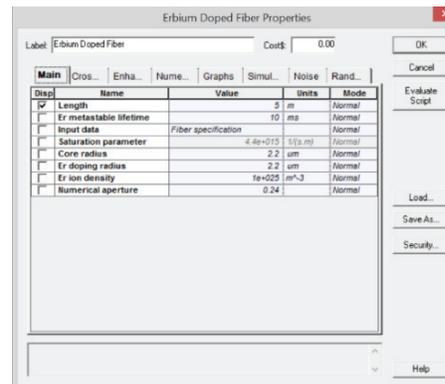
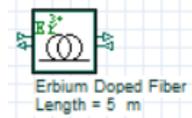


Figura 3.42 Componente que simula un amplificador de fibra dopada de erbio

- **Atenuador óptico (*Optical attenuator*):** permite configurar un nivel de atenuación deseado (Figura 3.43).

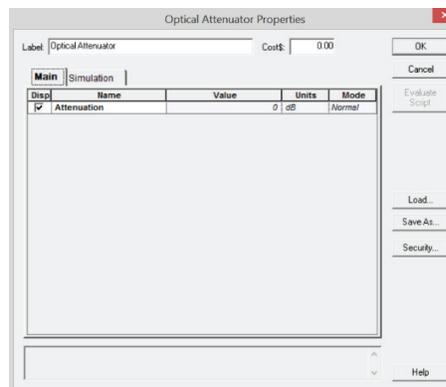
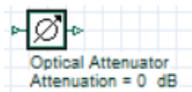


Figura 3.43 Componente que simula un atenuador óptico

- **Splitter (*power splitter*):** posee una sola entrada y permite configurar el número de salidas (Figura 3.44).

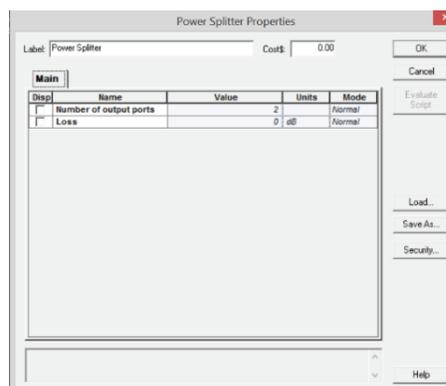
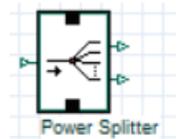


Figura 3.44 Componente que simula un splitter

- **Combinador (*power combiner*):** presenta un puerto de salida y un número configurable de entradas (Figura 3.45).

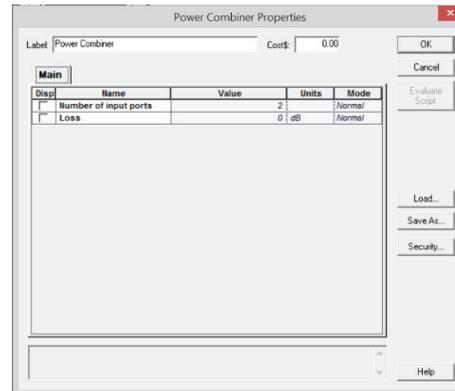
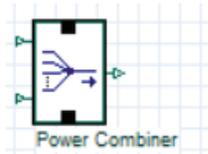


Figura 3.45 Componente que simula un combinador óptico

- **Fotodetector PIN (*Photodetector PIN*):** elemento que simula un fotodetector tipo PIN (Figura 3.46).

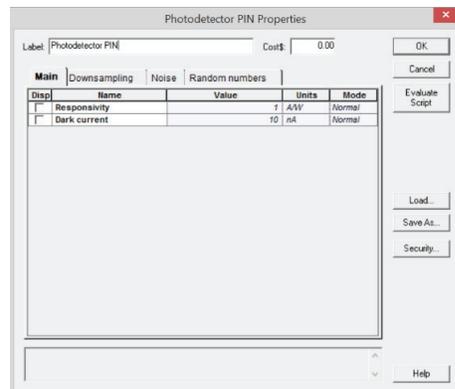
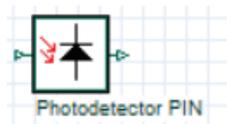


Figura 3.46 Componente que simula un fotodetector PIN

- **Fotodetector APD (*Photodetector APD*):** elemento que simula un fotodetector de tipo APD (Figura 3.47).

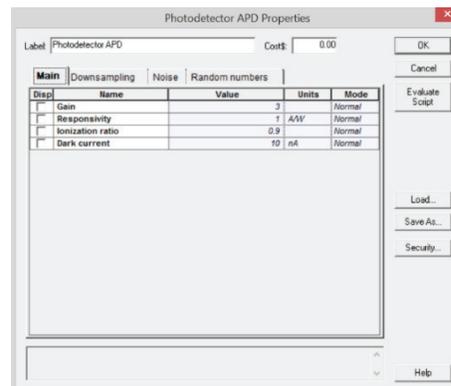
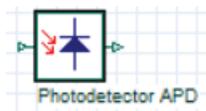


Figura 3.47 Componente que simula un fotodetector APD

- **Multiplexor WDM (WDM Mux):** simula a un MUX con una salida y un número de entradas configurable (Figura 3.48).

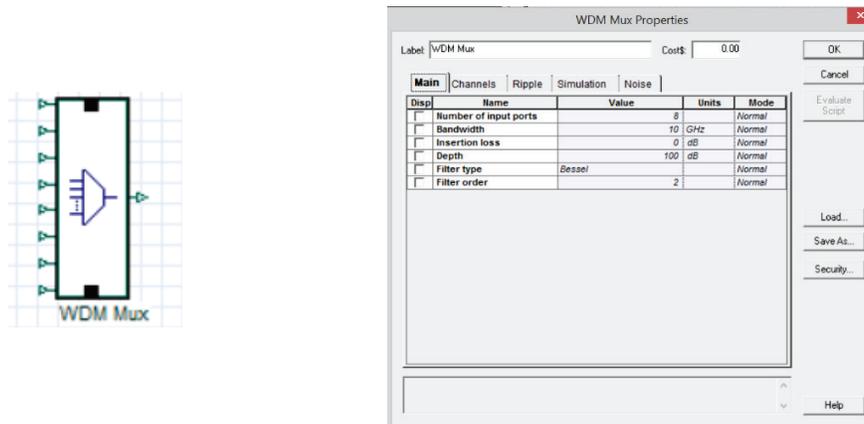


Figura 3.48 Componente que simula un multiplexor WDM

- **Demultiplexor WDM (WDM Demux):** simula a un DEMUX con una sola entrada y un número de salidas que puede configurarse (Figura 3.49).

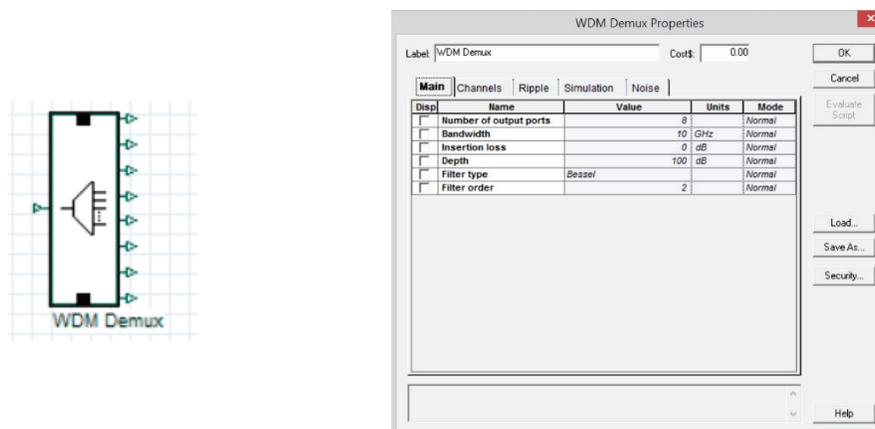


Figura 3.49 Componente que simula un demultiplexor WDM

3.4 SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS CON OPTISYSTEM ^[127]

Para iniciar en el manejo del simulador *OptiSystem*, se presenta un ejemplo de diseño de una red WDM de ocho canales en banda C. El sistema es totalmente pasivo (no contiene elementos activos intermedios) y está formado por el transmisor (OLT), la red primaria o FEEDER y un receptor (ONT). El sistema WDM completo se presenta en la Figura 3.50.

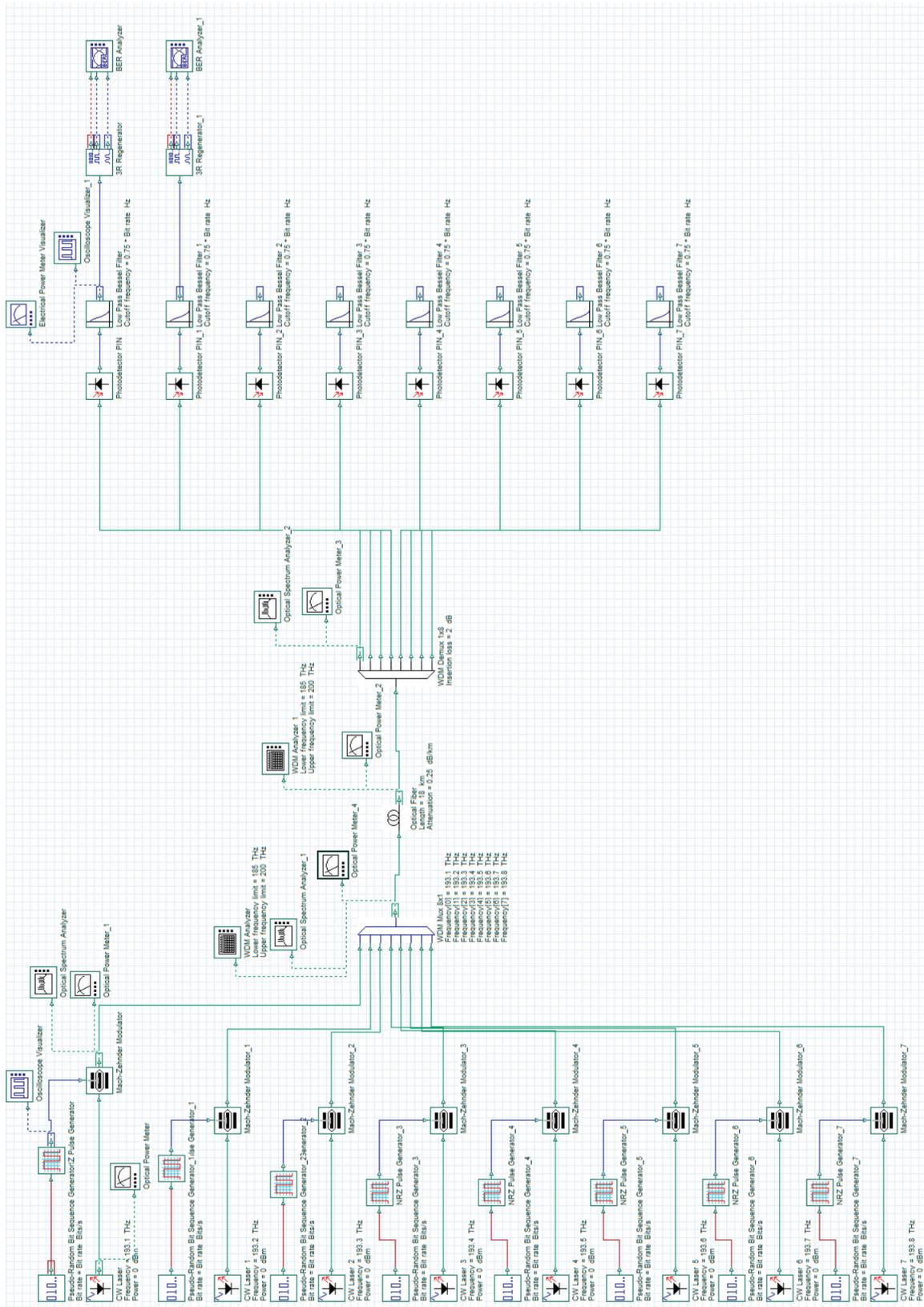


Figura 3.50 Sistema de comunicación óptica con tecnología WDM – PON

Las características técnicas del sistema a implementarse son:

- a) Para ejecutar este ejercicio de simulación se construyen ocho generadores de señal óptica que operan en banda C con frecuencias de: 193.1 THz, 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, 193.5 THz, 193.6 THz, 193.7 THz y 193.8 THz.
- b) Cada transmisor está compuesto de un láser, un generador de pulsos NRZ y un generador de secuencia de bits aleatorios. Las tres señales se unirán mediante un modulador de *Mach-Zehnder* (modulador electro - óptico basado en el interferómetro de *Mach - Zehnder*).
- c) Las ocho señales ópticas se multiplexan con la ayuda de un MUX WDM 8x1, con lo cual se logra la transmisión por canales diferentes a través de una sola fibra óptica.
- d) El tramo de fibra óptica a utilizarse se configura con una longitud de 18 Km y un valor de atenuación típica de 0.25 dB/Km.
- e) La demultiplexación de la señal WDM se realiza con la ayuda de un DEMUX WDM óptico 1x8, configurado con una pérdida de inserción típica de 2 dB.
- f) Para el receptor se utilizan los siguientes componentes: un detector de luz tipo PIN y un filtro eléctrico pasa bajo. Para analizar el desempeño del sistema, se utilizará el componente “*3R Regenerator*”, el cual permite simplificar las conexiones para ejecutar un análisis por el método del diagrama del ojo.

3.4.1 DISEÑO DEL TRANSMISOR

En la Figura 3.51 se muestran los bloques que componen el transmisor, mismos que simulan a:

- Un generador de bits (*Pseudo-Random Bit Sequence Generator*), ubicado en *Transmitters Library – Bit Sequence Generators*;
- Un generador de pulsos NRZ (*NRZ Pulse Generator*), ubicado en *Transmitters Library – Pulse Generators*;

- Un láser de onda continua (*CW Laser*), ubicado en *Transmitters Library – Optical Sources*;
- Un modulador de *Mach – Zender* (*Mach – Zehnder Modulator*), ubicado en *Transmitters Library – Optical Modulator*;

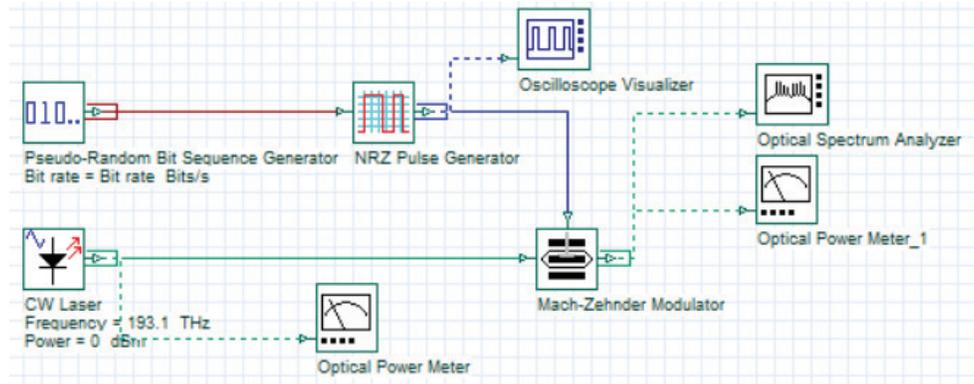


Figura 3.51 Transmisor de una señal óptica

En la Figura 3.51 se observa que la señal de luz está configurada a 193.1 THz de frecuencia y su potencia de salida es de 0 dBm. También se aprecia que las conexiones entre los componentes adquieren diferentes colores (la línea roja representa una conexión lógica, la línea azul es una conexión eléctrica y la línea verde es una conexión óptica). Además, se conectan dos medidores de potencia óptica, un osciloscopio eléctrico y un analizador de espectros óptico, mismos que arrojan los resultados mostrados en las figuras 3.52 y 3.53.

Para iniciar la simulación, se hace clic en el ícono , luego aparece una ventana en la que se escoge la opción simular . Si la simulación es exitosa, al final del script aparece el mensaje “*Calculation finished*”. Se cierra la ventana haciendo clic en el botón  y para visualizar los resultados de la simulación se hace doble clic en los instrumentos de medición respectivos.

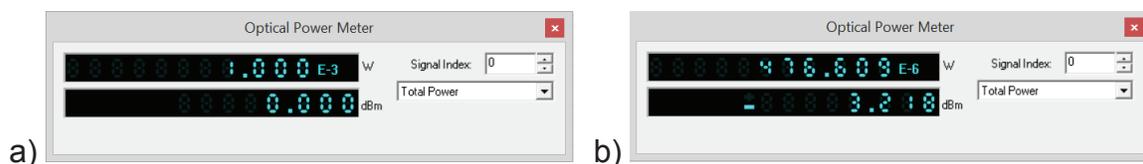


Figura 3.52 Valor de potencia de la señal óptica a) de entrada y b) modulada

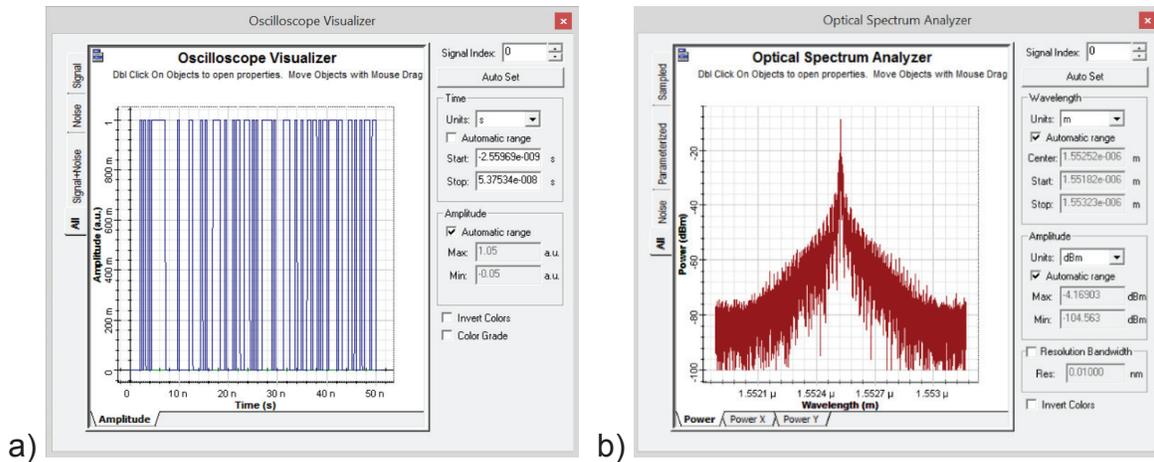


Figura 3.53 a) secuencia de bits y b) espectro de la señal óptica modulada

Para transmitir ocho señales diferentes a través de una sola fibra óptica, se realiza la multiplexación con la ayuda del *MUX WDM 8x1*, el cual se encuentra en *WDM Multiplexers Library – Multiplexers*.

Los resultados del análisis de la señal WDM se muestran en las figuras 3.54, 3.55 y 3.56:

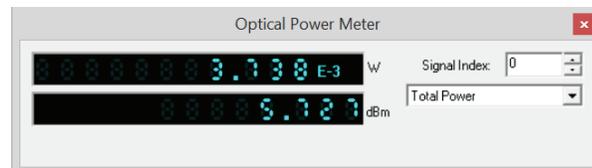


Figura 3.54 Potencia de la señal WDM en el puerto de salida del MUX

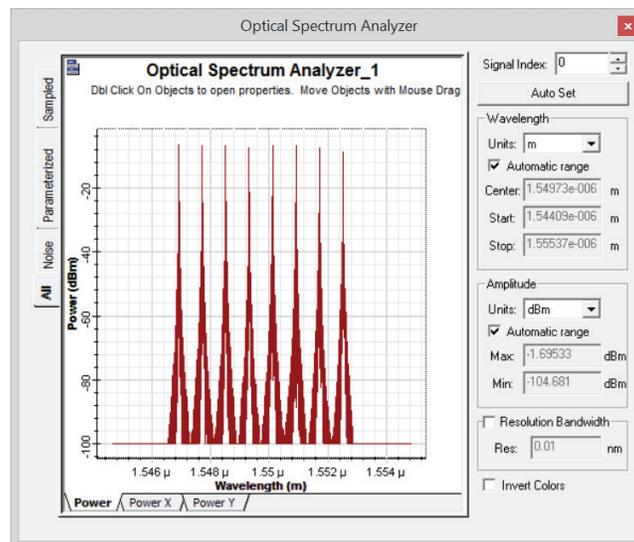


Figura 3.55 Espectro de la señal WDM

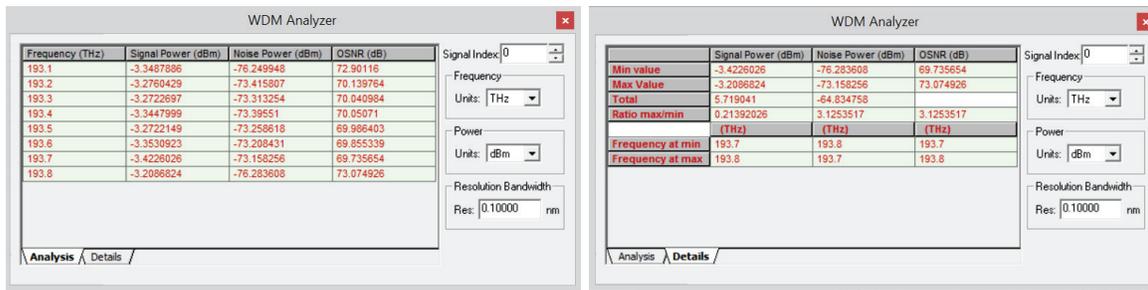


Figura 3.56 Análisis de la señal WDM en el puerto de salida del MUX.

3.4.2 DISEÑO DEL FEEDER

Es el tramo de fibra óptica que conecta el transmisor (OLT) con el elemento de distribución (DEMUX) en el que se separan las señales ópticas para dirigirlas hasta el usuario respectivo. Para la simulación se utiliza un tramo de fibra óptica de 18 Km de longitud, considerando además un valor de atenuación típica de 0.25 dB/Km (Figura 3.57). El componente que simula a un tramo de fibra óptica se encuentra en: *Optical Fibers Library*;

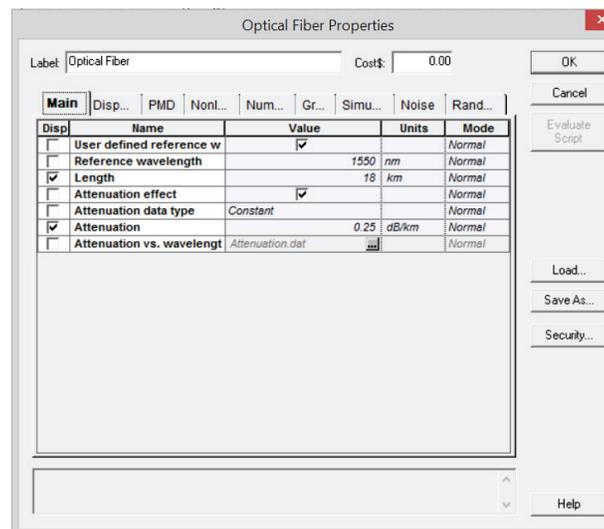


Figura 3.57 Cuadro de configuración de parámetros de la fibra óptica

Al final del tramo de fibra óptica se obtienen los datos presentados en las figuras 3.58, 3.59 y 3.60:

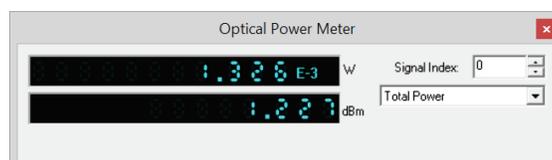


Figura 3.58 Potencia óptica medida en el extremo final de la fibra óptica

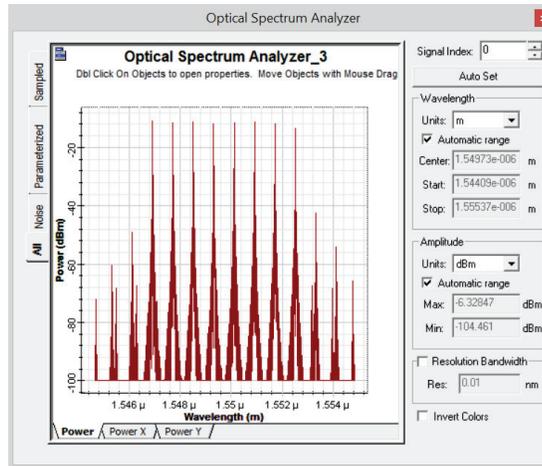


Figura 3.59 Espectro de la señal obtenido en el extremo final de la fibra óptica

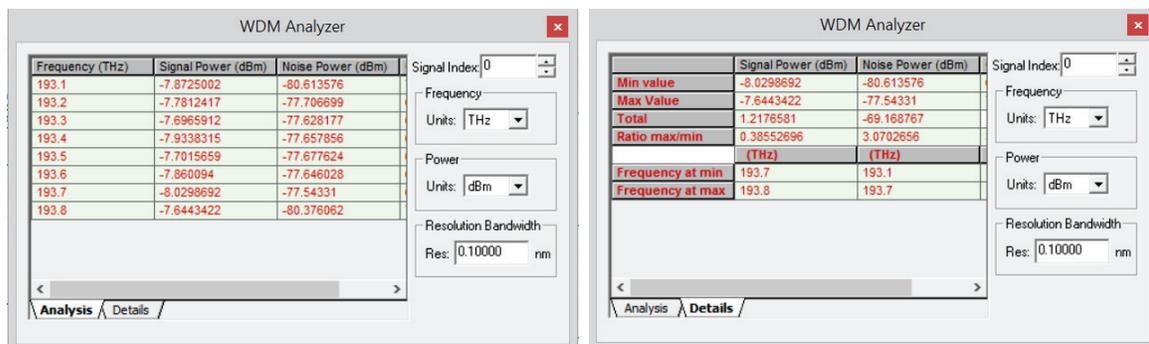


Figura 3.60 Análisis de la señal WDM en el extremo final de la fibra óptica

3.4.3 DISEÑO DEL RECEPTOR WDM

Como primer paso, se realiza la demultiplexación de la señal con la ayuda de un DEMUX WDM 1x8 con 2 dB de pérdida de inserción. A la salida del DEMUX, en el primer puerto se obtiene la siguiente información (figuras 3.61 y 3.62):

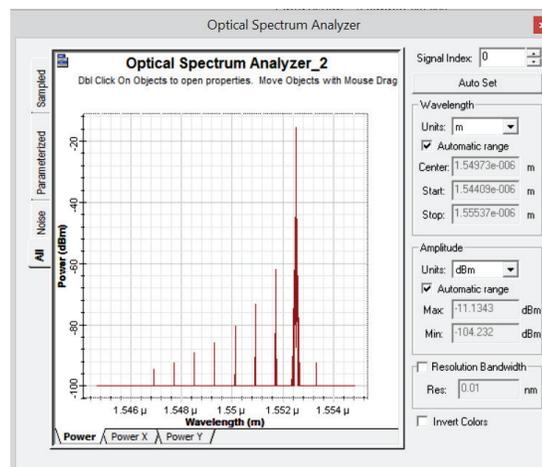


Figura 3.61 Espectro de la señal en el puerto de salida "1" del DEMUX

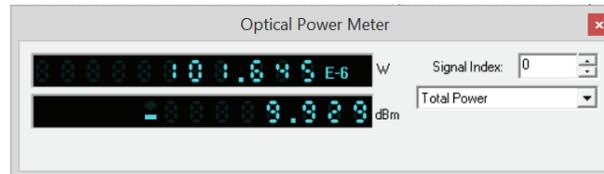


Figura 3.62 Potencia óptica medida en el puerto de salida “1” del DEMUX

Luego de realizar la demultiplexación, la señal que corresponde al puerto uno se detecta en el receptor formado por un fotodetector tipo PIN y un filtro eléctrico pasa bajo. El DEMUX, el fotodetector y el filtro se encuentran en las siguientes librerías:

- *WDM Demux 1x8*: ubicado en *WDM Multiplexers Library – Demultiplexers*;
- *Photodetector PIN*: ubicado en *Receivers Library – Photodetectors*;
- *Low Pass Bessel Filter*: ubicado en *Filters Library – Electrical*.

Los resultados obtenidos en esta etapa se presentan en las figuras 3.63 y 3.64.

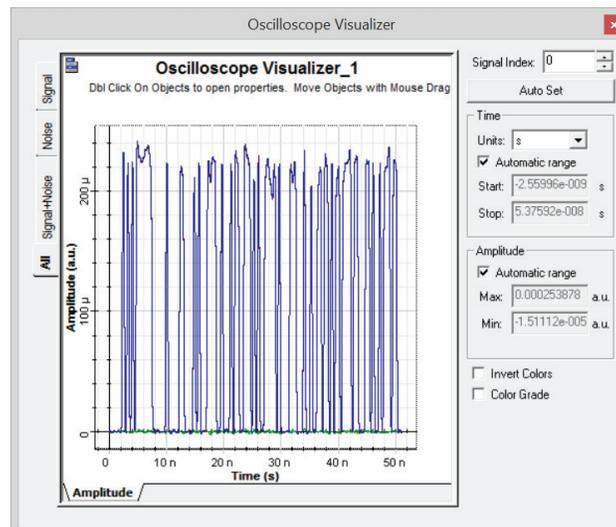


Figura 3.63 Secuencia de bits recuperada en el receptor

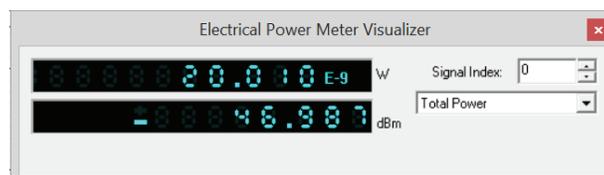


Figura 3.64 Potencia de la señal recibida

Para finalizar, se ejecuta un análisis de la señal recibida con el método del diagrama del ojo, mismo que permite concluir que el sistema trabaja óptimamente ya que el BER estimado (1.249×10^{-109}) está dentro de los márgenes adecuados.

- *Photodetector PIN*: ubicado en *Receivers Library – Photodetectors*;
- *Low Pass Bessel Filter*: ubicado en *Filters Library – Electrical*.

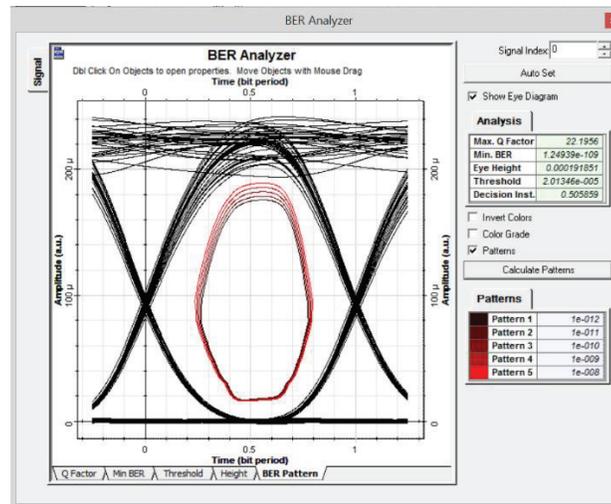


Figura 3.65 Diagrama del ojo y estimación del BER en el canal 1

Para mejorar la calidad de la señal recibida se puede colocar un amplificador tipo EDFA en la salida del multiplexor configurado con una ganancia de 10 dB. Además se puede colocar un filtro óptico Gaussiano antes del fotodetector tipo PIN, mismo que ayuda a reducir el ruido producido en la transmisión de datos por la fibra óptica. Estos componentes se encuentran en:

- *Amplifiers Library - Optical – EDFA*
- *Filters Library - Optical - Gaussian Optical Filter*.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

El propósito de las prácticas de laboratorio es que los estudiantes desarrollen habilidades analíticas mediante la observación y manipulación de equipos, herramientas y demás recursos destinados a ejecutar tareas de diseño, implementación y evaluación de redes de fibra óptica, por esta razón, en el presente capítulo se propone la realización de ocho prácticas, mismas que están estructuradas de tal forma que el estudiante no requiera experiencia previa.

Para el desarrollo de las prácticas se ha elaborado un conjunto de hojas guías en las que se detallan los procedimientos que permitirán conseguir los objetivos y cumplir con las normas de seguridad que demandan las actividades inherentes al trabajo con fibras ópticas y a la operación de equipos que emiten radiaciones nocivas para la salud.

4.1 PRÁCTICA # 1

4.1.1 TEMA: INDUCCIÓN AL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

4.1.2 OBJETIVOS

- 1)** Inducir al estudiante a utilizar las normas de seguridad necesarias para la manipulación de herramientas, cables de fibra óptica, fuentes de luz y correcto manejo de desechos;
- 2)** Familiarizar al estudiante con la operación de los equipos e instrumentos utilizados para caracterizar enlaces de fibra óptica y componentes de sistemas de comunicaciones ópticos;
- 3)** Conocer las técnicas y herramientas requeridas para preparar un cable de fibra óptica;
- 4)** Revisar los métodos elementales para limpiar conectores y adaptadores.

4.1.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D;
- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Medidor de potencia óptica YOKOGAWA AQ2180;
- ✓ Empalmadora por fusión FUJIKURA 12S;
- ✓ Plataforma Multifunción OSICS, Yenista Optics;
- ✓ Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH;
- ✓ Sonda Microscópica para inspección de conectores Linghtel DI-1000;
- ✓ Localizador visual de fallas VFL (*Visual Fault Locator*);
- ✓ Kit de simulación de redes PON (FTTX);
- ✓ Herramientas para trabajar con fibra óptica JFOPT JF-100A.
- ✓ *Patchcords* (de diferentes longitudes y con diferentes conectores).

4.1.4 MARCO TEÓRICO

4.1.4.1 Normas de seguridad en el laboratorio de comunicaciones ópticas ^[73] ^[74] ^[75] ^[76] ^[77]

El trabajo en el laboratorio presenta una serie de riesgos de origen y consecuencias muy variadas, relacionados básicamente con la manipulación de herramientas corto punzantes y con la operación de equipos cuyas emisiones presentan características de cierto grado de peligrosidad. La forma de minimizar los accidentes es identificando las fuentes de peligro, conociendo los riesgos asociados al trabajo con fibras, dispositivos y equipos ópticas y cumpliendo con las normas de seguridad respectivas.

➤ **Antes de iniciar actividades en el laboratorio de comunicaciones ópticas es necesario considerar las siguientes recomendaciones:**

- ✓ El estudiante debe conocer las normas de seguridad y procedimientos establecidos para la ejecución de cada práctica. Es importante que se identifiquen los lugares donde se encuentran: el extintor, botiquín, salida de emergencia y controles eléctricos. Además, el estudiante debe poseer los implementos de seguridad requeridos (gafas protectoras, mascarilla y/o guantes) según la actividad a ejecutarse.

- ✓ Es preciso comprobar el correcto funcionamiento del equipo o herramienta asignado, antes de ser utilizado. En caso de encontrar novedades, se debe notificar al responsable del laboratorio.
 - ✓ Los residuos de fibra óptica deben colocarse en contenedores cerrados y debidamente etiquetados. Este material es tan ligero que puede elevarse fácilmente y alcanzar el ojo humano, impregnarse en la piel o peor aún ir al torrente sanguíneo. La extracción de dichos residuos puede convertirse en una tarea muy compleja.
 - ✓ Los elementos de refuerzo de un cable de fibra óptica son construidos con materiales rígidos, mismos que constituyen un factor de riesgo tanto para la persona que manipula dicho cable como para la integridad de la fibra óptica.
 - ✓ Verificar la información de Clase o grupo de riesgo al que pertenece la luz emitida por un equipo. La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por esto, no se debe observar directamente al extremo de una fibra o de un conector iluminado, tampoco se debe apuntar al rostro de otra persona con una fuente de luz láser.
 - ✓ Los líquidos que se utilizan para limpiar las fibras ópticas y para eliminar los compuestos de relleno, pueden irritar los ojos y la piel en algunas personas. Además, la inhalación prolongada de alcohol isopropílico (utilizado para limpiar la fibra óptica desnuda) puede producir cefalea, náuseas y vómitos.
- **Normas para el correcto desempeño de las actividades en el laboratorio de comunicaciones ópticas**
- ✓ Considerar que los trabajos de conectorización y elaboración de empalmes requieren un alto grado de asepsia para obtener resultados adecuados.
 - ✓ Mantener las mesas de trabajo perfectamente ordenadas y limpias;
 - ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
 - ✓ Colocar los equipos, herramientas y accesorios en los lugares destinados para su almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo, deben desconectarse de la red eléctrica.
 - ✓ No se debe manipular ni alterar la configuración de los equipos a menos que el instructor indique lo contrario.

- ✓ La capacidad de un láser para producir un riesgo viene determinada principalmente por: la longitud de onda, tiempo de exposición y potencia del haz de luz. Las fuentes ópticas disponibles en el laboratorio, utilizan la norma IEC (*International Electrotechnical Commission*) 60825-1-2007 para identificar el tipo de luz que emiten.

➤ **Manipulación del cable de fibra óptica**

- ✓ Cuando se corta y se prepara un cable de fibra óptica es necesario considerar las siguientes normas de seguridad:
- ✓ Para realizar cortes de cable y desprendimiento de chaqueta, es necesario utilizar guantes resistentes para evitar cualquier tipo de accidente ya sea por mala maniobra de las herramientas o por manipulación incorrecta de desechos sólidos (elementos de refuerzo de los cables de fibra óptica);
- ✓ Para trabajar con hilos de fibra óptica, se debe utilizar gafas y guantes de látex, además, se debe considerar que los trozos de fibra pueden volar fácilmente por lo que se recomienda la utilización de mascarillas.
- ✓ Por último, se recomienda utilizar las herramientas adecuadas para cada tarea, procurando mantenerlas siempre en óptimas condiciones.

4.1.4.2 **Equipos e instrumentos disponibles en el laboratorio**

La instalación, mantenimiento y reparación de redes de fibra óptica requiere de la utilización de equipos específicos para examinar el comportamiento de los componentes de una red óptica. A continuación se describen los equipos y dispositivos existentes en el laboratorio de comunicaciones ópticas:

➤ **Analizador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*)** ^[78]

El OSA disponible en el laboratorio es el modelo AQ6370D, fabricado por YOKOGAWA (Figura 4.1) y está diseñado para medir los parámetros característicos de los canales ópticos y de las fuentes de luz, permitiendo analizar su rendimiento.

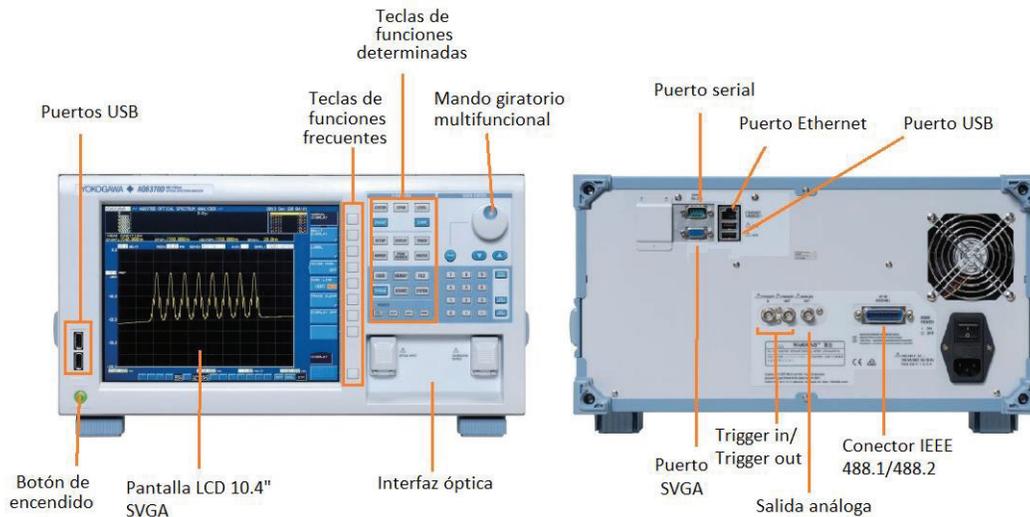


Figura 4.1 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D [78]

➤ **OTDR YOKOGAWA AQ7283** [90]

Este OTDR (Figura 4.2) ofrece importantes herramientas para el análisis de redes de acceso, enlaces de larga y corta distancia con fibra monomodo, enlaces de cortas distancias con fibras multimodo, redes PON y más. Sus cualidades más relevantes son: versatilidad (posee accesorios que lo convierten en: localizador visual de fallas VLS, sonda microscópica para inspección de férulas, medidor de potencia óptica y fuente de luz) e interfaz gráfica (pantalla *touch*) que facilita su operabilidad.

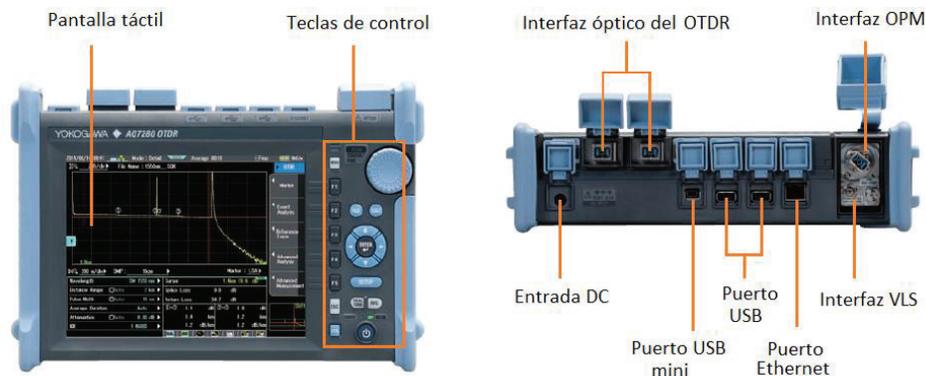


Figura 4.2 OTDR YOKOGAWA AQ7283 [90]

➤ **OPM (OPTICAL POWER METER) – YOKOGAWA AQ2180** [95]

El OPM AQ2180 (Figura 4.3) posee todas las funciones necesarias para medir las pérdidas producidas en un enlace con fibra óptica. Posee un detector fotodiodo de Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs) y trabaja con siete longitudes de onda distintas.



Figura 4.3 Medidor de potencia óptica (OPM) YOKOGAWA – AQ2180 [95]

➤ Empalmadora por fusión **FUJIKURA 12S** [99] [100] [101]

La fusionadora *Fujikura 12S* (Figura 4.4) es una máquina automática de empalme por alineación de núcleo. Su batería proporciona energía para ejecutar hasta 100 empalmes (incluyendo el calentamiento de los tubitos termocontraíbles). Incluye una cortadora de precisión modelo CT-30 de *Fujikura*, misma que está dotada de un disco de corte de 16 posiciones que permite realizar 48000 cortes de una fibra o 4000 cortes de cintas de 12 fibras antes de ser sustituida. Dispone de un recipiente para almacenar provisionalmente los desechos de las fibras cortadas. El kit completo incluye un juego de electrodos para repuesto, cable de alimentación y cargador CA, dos pares de porta fibras (250 μm y 900 μm), batería, dispensador de alcohol, maleta de transporte y bandeja de trabajo.



Figura 4.4 Fusionadora *Fujikura 12s* y cortadora de precisión CT-30 [99] [100]

➤ **Plataforma multifunción OSICS, Yenista Optics** ^[102]

Este instrumento (Figura 4.5) permite instalar hasta ocho módulos de la misma dimensión y tamaño (35 mm x 128 mm x 230 mm), son unidades *plug-and-play* que no requieren hardware o software adicional. Para el laboratorio se disponen de siete módulos instalados en cuatro plataformas:

- ✓ Plataforma 1 → dos fuentes WDM en banda L y en banda C;
- ✓ Plataforma 2 → una fuente WDM en banda L;
- ✓ Plataforma 3 → una fuente WDM en banda C;
- ✓ Plataforma 4 → tres fuentes CWDM de 1610 nm, 1625 nm y 1650 nm.

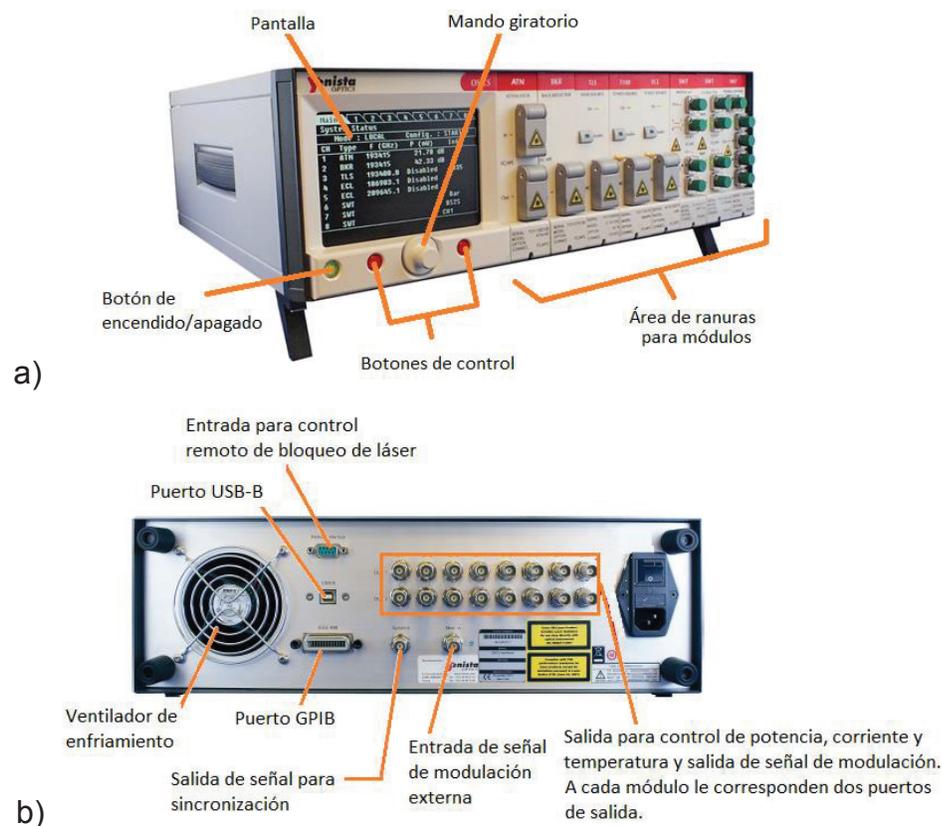


Figura 4.5 Plataforma multifunción OSICS a) vista frontal y b) vista posterior ^[102]

➤ **Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH** ^{[105] [106]}

Este equipo (Figura 4.6) posee una fuente de luz láser de Clase 1 que opera en 3 longitudes de onda distintas a través de un solo puerto. Está diseñado para ejecutar pruebas en redes PON (1310 nm para *uplink*; 1490 nm y 1550 nm para *downlink*, según recomendación ITU-T G.984.1/2), para certificar enlaces de fibras ópticas

monomodo (con el estándar ANSI/TIA) y para identificar fibras ópticas. La señal puede transmitirse con una longitud de onda individual, en modo continuo (CW) o modulado en un tono seleccionado por el usuario. Además, cada longitud de onda puede ser transmitida en modo Wave ID (transmisión de dobles o triples longitudes de onda en un orden secuencial).



Figura 4.6 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH

➤ **Sonda microscópica de video para inspección de conectores de fibra óptica Linghtel DI-1000 [109]**

Es una sonda microscópica de video digital diseñada para examinar los extremos de conectores y adaptadores de fibra óptica. Este accesorio (Figura 4.7) puede conectarse directamente a un computador u otro dispositivo que posea una interfaz para visualizar imágenes; funciona con conexión USB y no requiere de una fuente de alimentación adicional, posee una perilla de control de enfoque, un botón para captura de imagen, e incluye un software para realizar análisis básicos.



Figura 4.7 Sonda microscópica de video Lightel DI-100 [109]

➤ **Localizador visual de fallas VFL (*Visual Fault Locator*)**

El VFL (Figura 4.8) es un generador de luz visible que permite identificar, localizar y comprobar fallas (fisuras, curvaturas excesivas o empalmes defectuosos) en las fibras ópticas. Tiene la capacidad de emitir luz de manera continua o intermitente a una frecuencia de 2 Hz.



Figura 4.8 Localizador visual de fallas

➤ **Kit de simulación de redes PON (FTTx) ^[114]**

Este kit permite simular diferentes arquitecturas de redes PON con tecnologías FTTx. Es apto para tareas como: diseño de redes, prácticas para cuadrillas de instalación de redes, prueba de rendimiento de OLT/ONT, entrenamiento para capacitadores, investigación y fabricación de nuevas tecnologías, demostraciones para ventas, entre otras. El kit de simulación (mostrado en las figuras 4.9 y 4.10) incluye los accesorios que se detallan a continuación:



Figura 4.9 Kit para simulación de redes PON (FTTx) ^[114]

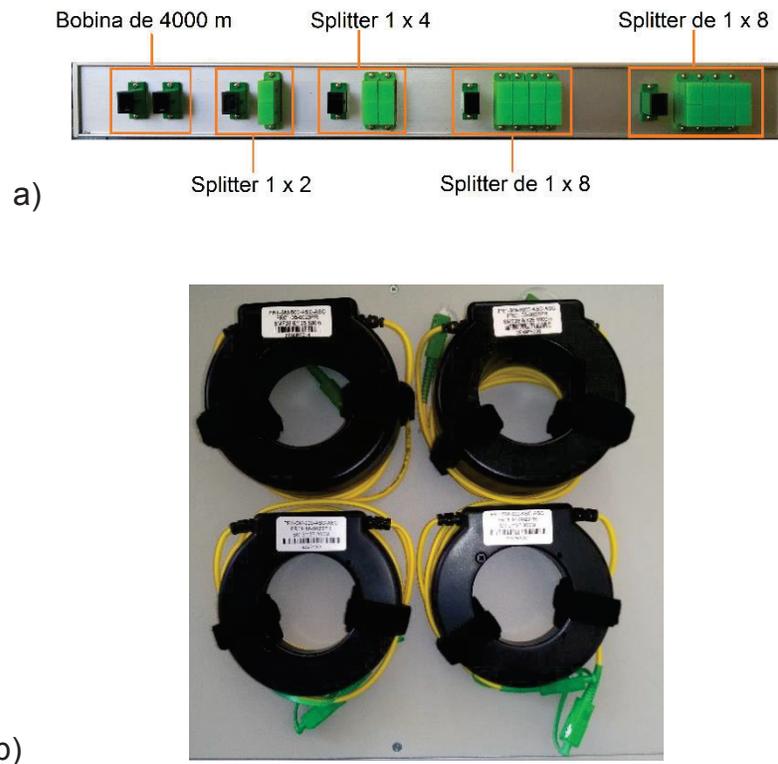


Figura 4.10 a) Simulador de redes PON (FTTx) y b) bobinas de 200 m, 300 m, 500 m y 1000 m de fibra óptica ^[114]

4.1.4.3 Herramientas para trabajar con fibra óptica JFOPT JF-100A

Para el trabajo en el laboratorio de comunicaciones ópticas, se utiliza un conjunto de herramientas adecuadas para diferentes tipos de actividades, mismas que se encuentran en un maletín (Figura 4.11) y se detallan a continuación:



Figura 4.11 Kit de herramientas para trabajos con fibra óptica

- ✓ Tijeras para cortar hilos de kevlar;
- ✓ Cortadora de buffer o tubo holgado;
- ✓ Peladora de fibra óptica de 125 μm con recubrimiento de 250 μm ;
- ✓ Alicates de corte;
- ✓ Navaja multipropósito;
- ✓ Solución para eliminar gel de relleno de cables de fibra óptica;
- ✓ Toallas secas libre de pelusa para limpieza de fibra óptica;
- ✓ Alcohol isopropílico;
- ✓ Bombilla de caucho para succión;

Antes de iniciar alguna actividad práctica, recuerde utilizar el equipo de protección básico: guantes, mascarilla y gafas de protección.

4.1.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

a) Identificación de fibras ópticas y conectores: en el laboratorio existen diferentes tipos de cables y conectores de fibra óptica, los cuales deben ser perfectamente identificados para darle un uso correcto y evitar errores en mediciones y daños de equipos.

Actividad 1: Utilizando los cables de fibra óptica suministrados en el laboratorio, completar la Tabla 4.1:

Tipo de cable	Longitud [m]	Tipo		Tipo de conector 1	Tipo de conector 2	Número de fibras
		Monomodo	Multimodo			
<i>Patchcord simplex</i>						
<i>Patchcord dúplex</i>						
Pigtail						
Fibra con un recubrimiento						
Fibra con dos recubrimientos						

Tabla 4.1 Identificación de cables de fibra óptica

Actividad 2: Con los conectores provistos en el laboratorio, completar la Tabla 4.2.

Tipo de conector	Tipo de pulido	Color	Imagen

Tabla 4.2 Identificación de conectores de fibra óptica

b) Preparación de cables de fibra óptica: todos los cables de fibra óptica poseen diversos elementos de protección, mismos que deben ser retirados para trabajar con la fibra desnuda. En esta actividad se utilizarán las herramientas mostradas en la Figura 4.12 (tijeras para kevlar, peladora de buffer, pinzas de corte y navaja multipropósito).

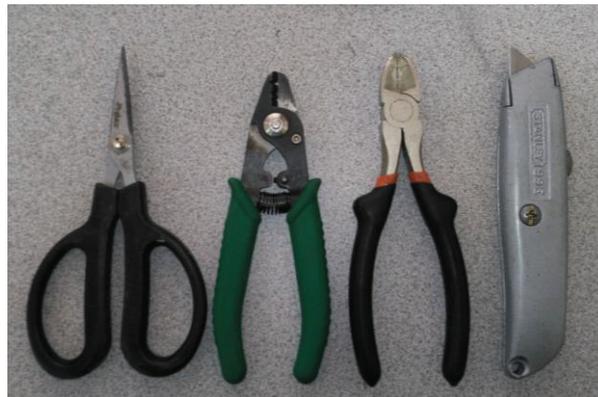


Figura 4.12 Herramientas utilizadas para preparar un cable de fibra óptica

El procedimiento para preparar un cable de fibra óptica varía en función del cable, sin embargo, de forma general se pueden ejecutar los siguientes pasos:

- Retirar la cubierta exterior y demás elementos de refuerzo del cable. Mantener extremo cuidado para no provocar tensiones ni dobleces que puedan dañar la fibra óptica. Los cables diseñados para exteriores están dotados de hilos de desgarre (generalmente de color rojo) para realizar un corte longitudinal en dos lados de la chaqueta (Figura 4.13a).

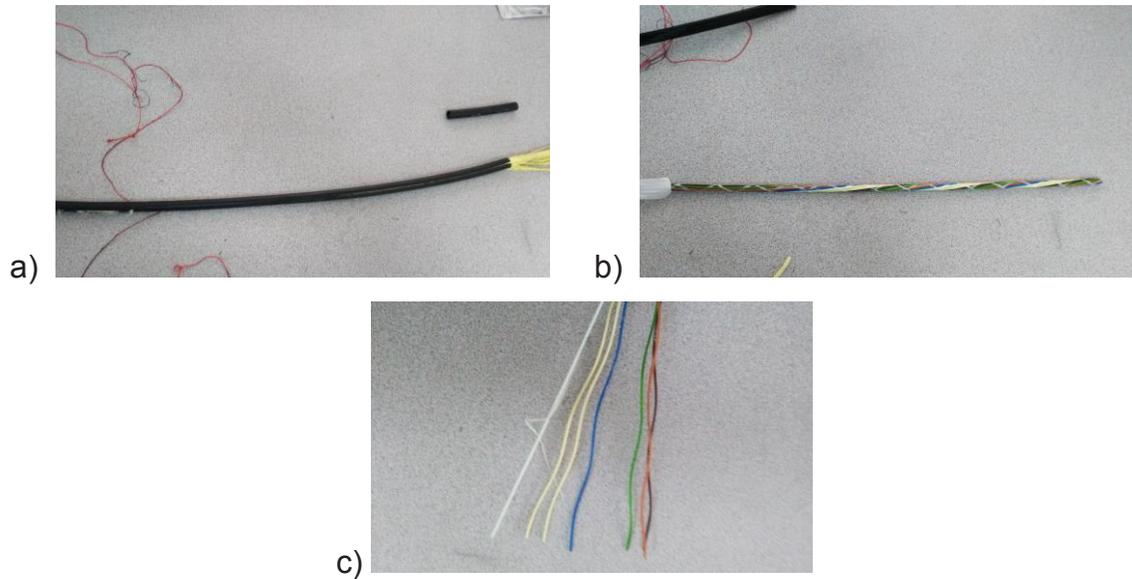


Figura 4.13 Preparación de cable de fibra óptica para exteriores

- Una vez descubiertos los buffers (Figura 4.13c), se retira la protección secundaria holgada y se limpia el gel de relleno con paños impregnados de solución para eliminar el gel (Figura 4.14b y 4.14d).

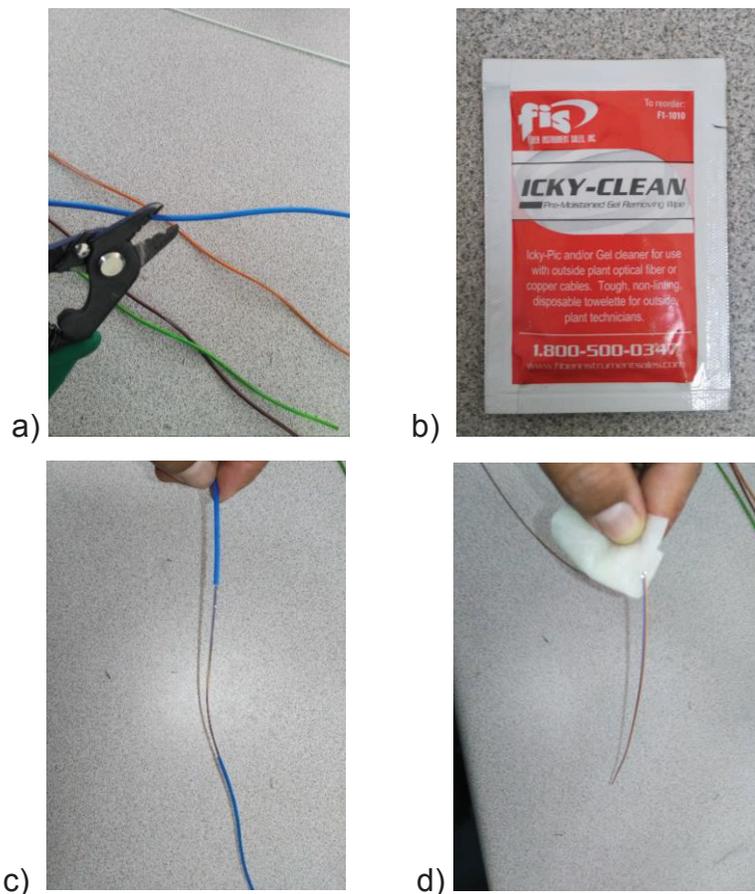


Figura 4.14 Retiro de protección secundaria (buffer) y limpieza de gel

En el caso de fibras para interiores (*patchcords*) se retira la protección secundaria ajustada y se cortan los elementos de refuerzo (hilos de kevlar).

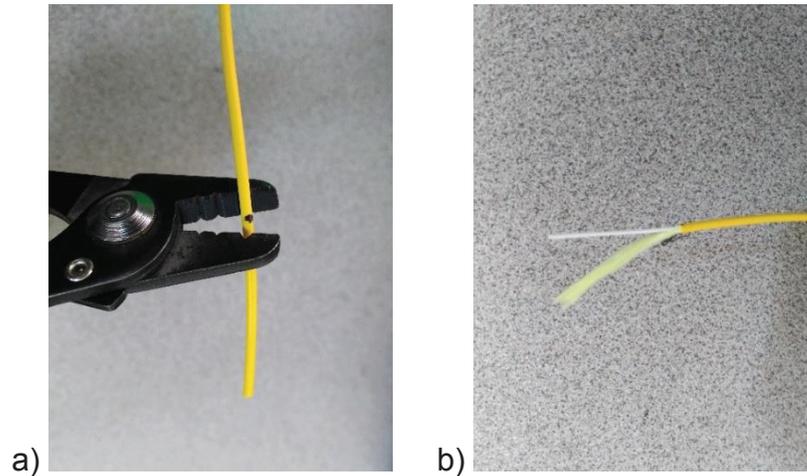


Figura 4.15 Preparación de cable de fibra óptica para interiores a) corte de protección externa y b) corte de elementos de refuerzo

- Retirar la protección primaria que cubre el hilo de fibra óptica utilizando la ranura de 125 μm de la peladora (Figura 4.16a). Generalmente los cables para interiores tienen doble protección primaria (Figura 4.16b): una de color (quitar con la ranura de 250 μm) y otra transparente (quitar con la ranura de 125 μm de la peladora). Una vez que la protección primaria sea desprendida, es necesario limpiar la fibra antes de realizar el corte. Los residuos de fibra deben almacenarse en un contenedor cerrado y debidamente etiquetado, antes de arrojarlos al depósito de basura.

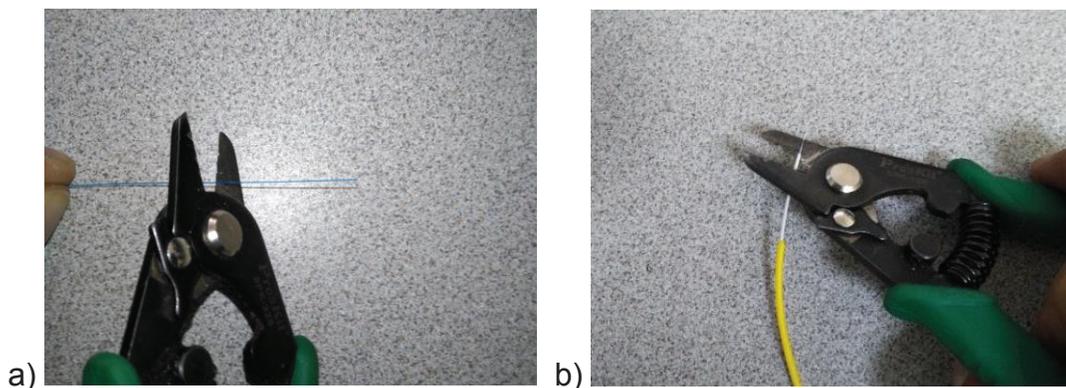


Figura 4.16 Retiro de protección primaria de fibra óptica a) cable de exteriores y b) cable de interiores

c) **Técnica de limpieza y mantenimiento general de conectores:** una de las actividades más básicas e importantes del mantenimiento de los sistemas de comunicaciones ópticos, es limpiar los conectores y adaptadores. Si los extremos (férulas) de los conectores tienen un alto nivel de limpieza, la transferencia de luz entre los componentes de una red es óptima. Cualquier tipo de contaminación podría ocasionar errores en la transmisión, en la operación de algún componente o cualquier tipo de daño físico en la superficie de la fibra óptica. En el laboratorio se utilizan dos herramientas para realizar el mantenimiento de férulas en conectores y adaptadores.

- ✓ El limpiador de conector AFL 8500-30-0900MZ *CleanConnect* 500 (Figura 4.17a) utiliza una tela de microfibra antiestática sin pelusa, y es apto para conectores: SC, FC, ST, LC, MU, E2000 y otros, tanto con pulido UPC como APC. Posee un mecanismo que permite cubrir o descubrir la ranura en donde se encuentra la tela de limpieza; para limpiar la férula, es necesario descubrir la tela y pasar suavemente el conector sobre la ranura dos o tres veces, según sea necesario.

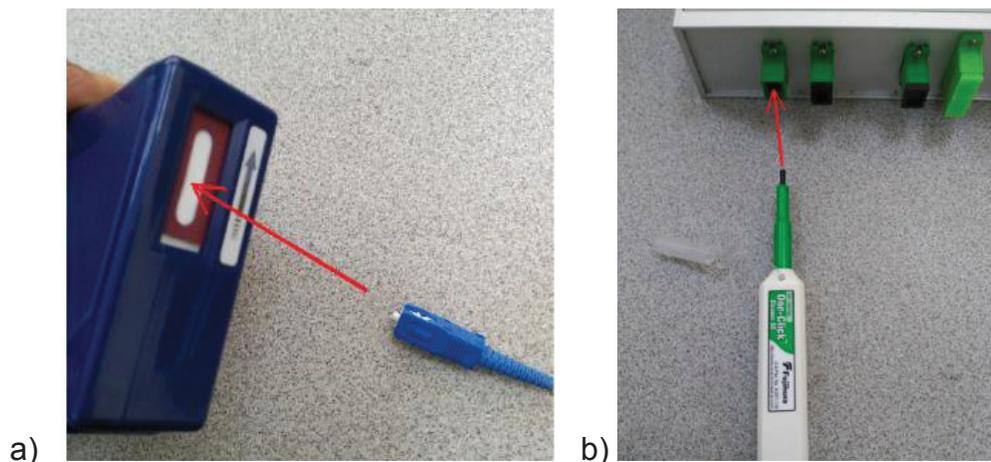


Figura 4.17 Limpiador para conectores de fibra óptica a) AFL y b) *one click*

- El limpiador de férulas *One click cleaner* SC-CLK-B (Figura 4.17b) tiene la forma de un lápiz, utiliza un paño seco sin químicos ni solventes y es adecuado para limpiar conectores y adaptadores de tipo: SC, FC y ST.

- Además de los accesorios de limpieza mostrados, es necesario examinar visualmente las férulas de conectores de fibra óptica. Esto se logra con una sonda microscópica de video. Este instrumento (Figura 4.18a) se conecta directamente a un computador u otro dispositivo que posea una interfaz para visualizar imágenes; funciona con conexión USB y no requiere de fuentes de alimentación adicional, cuenta con controles para enfoque, captura de imagen e incluye adaptadores para diferentes tipos de conectores y diámetros de férula (Figura 4.18b).

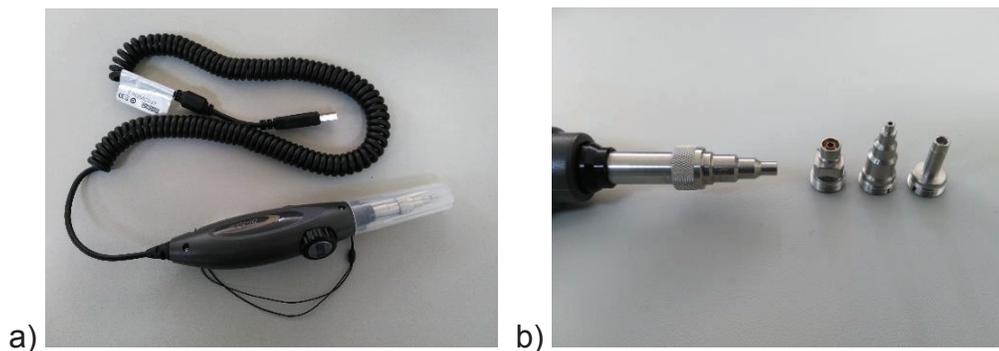


Figura 4.18 Sonda microscópica de video Lightel DI-100 ^[109]

- Procedimiento de inspección general y limpieza de conectores ^[130]:
 - ✓ Examine el conector de fibra con la sonda microscópica, utilizando la punta adaptadora respectiva, tal como se muestra en la Figura 4.19;

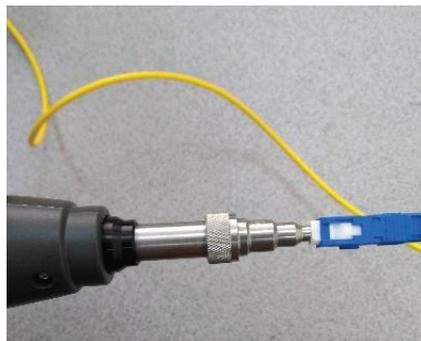


Figura 4.19 Examinando el conector SC/UPC con la sonda microscópica

- ✓ Si el conector está sucio (Figura 4.20), ejecute una técnica de limpieza en seco utilizando el limpiador de conector de fibra óptica AFL 8500-30-0900MZ *CleanConnect* 500 (Figura 4.17a).

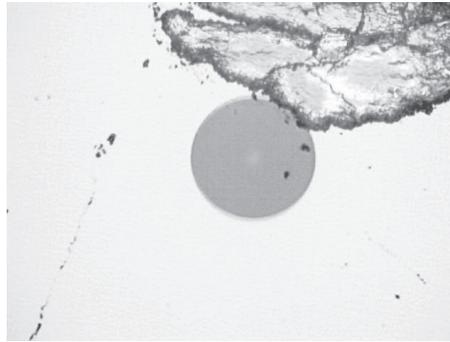


Figura 4.20 Imagen de una férula contaminada

- ✓ Examine el conector nuevamente;

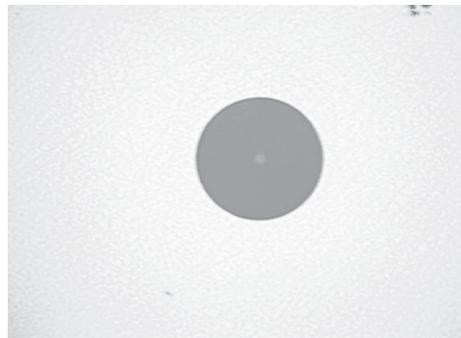


Figura 4.21 Imagen de la férula luego de la limpieza

- ✓ Si el conector continúa sucio, repita la técnica de limpieza en seco una vez más; si la contaminación persiste, utilice la técnica de limpieza húmeda, para lo cual se emplea un paño suave (que no deje pelusa) impregnado con alcohol isopropílico. Seguidamente aplique la técnica de limpieza en seco para asegurarse que no queda humedad o residuo alguno. Por último, examine la férula, repita el procedimiento hasta que la férula quede completamente limpia.
- Para finalizar con esta actividad, verifique que todos los conectores y adaptadores tengan sus tapones respectivos.

Actividad 3: realice la inspección y mantenimiento de los adaptadores del simulador PON, así como de los conectores de las bobinas de fibra óptica que se incluyen en el kit del simulador PON.

4.1.6 INFORME

- 1) Complete la información solicitada en las tablas 4.1 y 4.2. Adjunte fotografías de los cables y conectores proporcionados;
- 2) Exponga las ventajas y desventajas de utilizar conectores con terminaciones UPC y APC;
- 3) Según las etiquetas de seguridad de los equipos revisados en el laboratorio, indique las características generales de la luz emitida;
- 4) Presente un informe de la inspección y mantenimiento de los adaptadores del simulador PON y de los conectores de las bobinas de fibra óptica que se incluyen en el kit del simulador PON. Presente las imágenes de las férulas examinadas;
- 5) Conclusiones y recomendaciones.

4.2 PRÁCTICA # 2

4.2.1 TEMA: SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS

4.2.2 OBJETIVOS

- 1) Conocer el entorno, herramientas y procedimiento para simular sistemas de comunicaciones ópticos con el software OPTISYSTEM;
- 2) Configurar los parámetros característicos de los principales componentes de un sistema de comunicaciones óptico;
- 3) Comprobar visualmente que los datos simulados se ajustan a un modelo teórico;
- 4) Aplicar transformaciones a un modelo simulado para optimizar un sistema de comunicaciones ópticas.

4.2.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ Computador PC (Windows 7/8/10);
- ✓ Software para simulación *OptiSystem*.

4.2.4 MARCO TEÓRICO

Durante el periodo de aprendizaje, es necesario adquirir experiencia en el manejo de al menos una herramienta para simulación, lo cual sirve principalmente para el mejoramiento de las técnicas de diseño, evaluación y resolución de problemas de forma rápida, a bajo costo y sin altos riesgos.

4.2.4.1 *OptiSystem*

Optisystem es un paquete de software que permite diseñar, probar y simular una amplia gama de redes ópticas en la capa física. Posee un entorno de simulación eficaz; constituye una herramienta de simulación flexible y eficiente, ya que sus modelos corresponden a diferentes niveles de abstracción (sistema, subsistema y componentes). Presenta gran cantidad de herramientas y sus prestaciones pueden ampliarse fácilmente con la personalización de los componentes.

Su interfaz gráfica es muy completa (Figura 4.22), desde la cual se puede controlar el diseño de componentes ópticos y eléctricos, y las presentaciones gráficas. Su amplia librería contiene componentes ópticos activos y pasivos con parámetros característicos muy realistas (dependientes de la longitud de onda).

Algunos beneficios específicos que ofrece *OptiSystem* son:

- ✓ Proporciona información global sobre el rendimiento de un sistema;
- ✓ Evalúa la sensibilidad de los parámetros que determinan el grado de tolerancia de un diseño;
- ✓ Presenta visualmente las opciones de diseño y los posibles escenarios de trabajo;
- ✓ Ofrece acceso directo a un amplio conjunto de datos que caracterizan al sistema;
- ✓ Proporciona barrido automático de parámetros y optimización de los mismos;
- ✓ Integración con otros productos específicos de la familia *Optiwave* (OptiSPICE, OptiBPM, OptiGrating y OptiFiber).

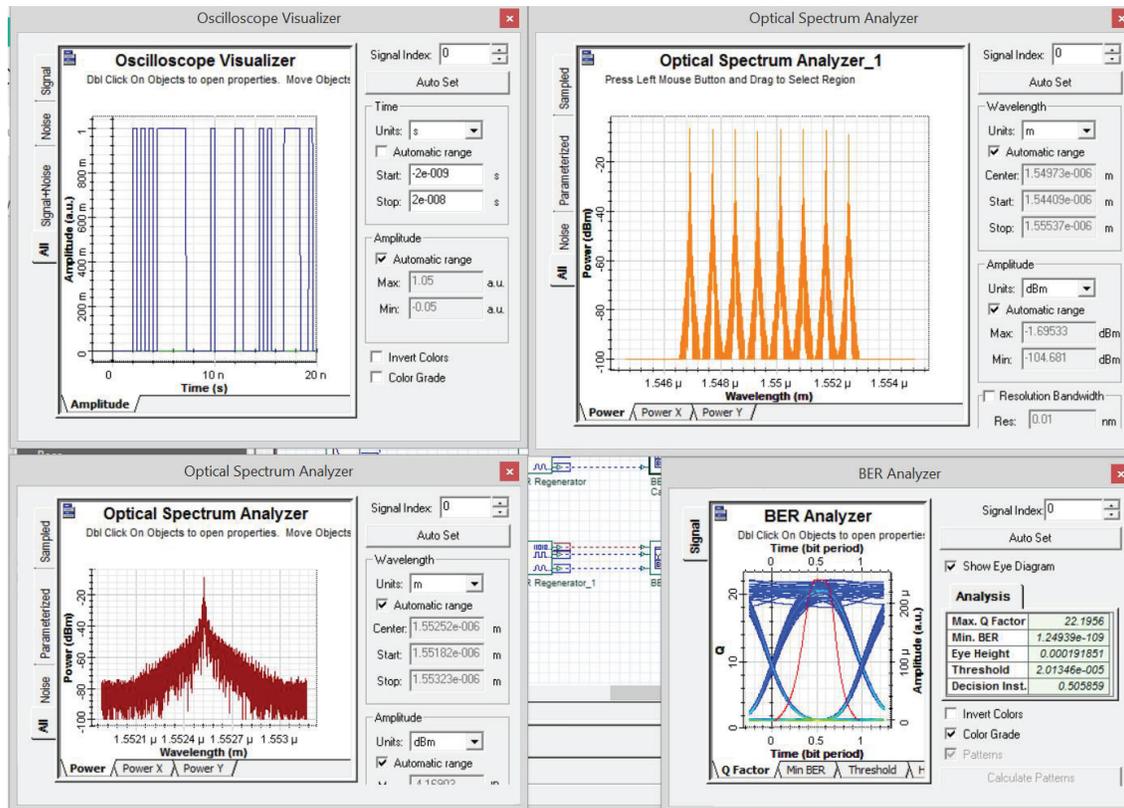


Figura 4.22 Interfaz gráfica de *OptiSystem*

OptiSystem es una herramienta de diseño potente y fácil de usar, permite a los usuarios planificar, probar y simular (en el dominio del tiempo y de la frecuencia) sistemas destinados a aplicaciones como:

- ✓ Diseños de redes ópticas que incluyen anillos OTDM, SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, OCDMA;
- ✓ Transmisión monomodo y multimodo;
- ✓ Óptica en el espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (ROF), OFDM;
- ✓ Amplificadores y láseres (EDFA, SOA, Raman, Híbrido, optimización GFF);
- ✓ Procesamiento de señal (eléctrico, digital, completamente óptico);
- ✓ Transmisor y receptor (directo / coherente), diseño de sub sistemas;
- ✓ Formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64);
- ✓ Análisis del rendimiento del sistema (diagrama del ojo, factor Q, BER, potencia de señal, OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, pérdidas lineales y no lineales).

4.2.4.2 Interfaz gráfica

La interfaz principal de *OptiSystem* presenta dos ventanas principales:

- ✓ Área de trabajo (*Layout*): es el espacio en el que se ubican los bloques que representan a los componentes del sistema;
- ✓ Librería de componentes (*Component Library*): en este espacio se encuentran las carpetas que contienen a los diferentes tipos de componentes.

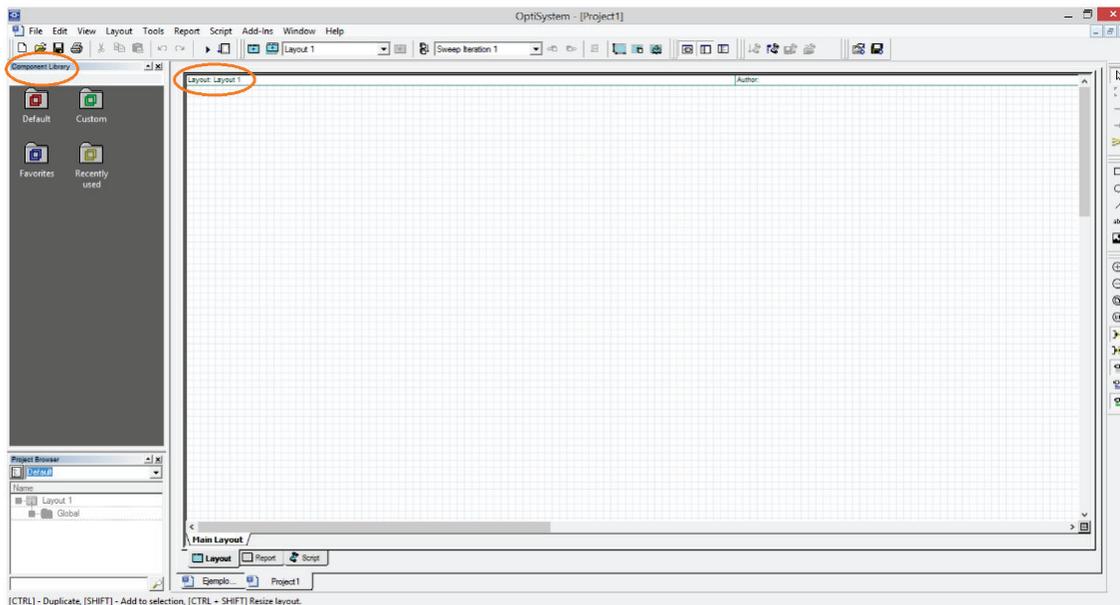


Figura 4.23 Ventana principal de *OptiSystem*

Los componentes se agregan al *Layout* de manera sencilla (arrastrar y soltar) y la conexión se realiza de manera automática (la conexión automática es configurable). Existen tres tipos de conexiones: óptica, eléctrica y lógica; todas las conexiones representan algún tipo de canal y no necesariamente simbolizan un objeto físico (cable). Las conexiones se realizan únicamente cuando los componentes tienen puertos con características similares.

4.2.4.3 Librerías de componentes de *OptiSystem*

OptiSystem provee una biblioteca de componentes ópticos y eléctricos, e instrumentos de medición y análisis que proporcionan resultados de una simulación de forma gráfica y numérica. Los parámetros de un componente pueden ser: valores constantes, parte de un rango de valores, determinados por un script

(archivo que contiene un programa simple) o extraídos desde un archivo (tabla de búsqueda). También hay parámetros generales (velocidad de bits transmitidos), algunos de los cuales pueden ser definidos por el usuario. Por defecto, todos los componentes están configurados con valores típicos semejantes a los reales y se agrupan en librerías de la siguiente manera:

- ✓ Librería de visualizadores: contiene bloques que permiten realizar mediciones y análisis tanto en el dominio eléctrico como en el dominio óptico;
- ✓ Librería de Transmisores: contiene diferente tipo de fuentes y generadores;
- ✓ Librería de elementos de red;
- ✓ Librería de multiplexores WDM: contiene bloques que simulan a MUX/ DEMUX y AWGs de número de puertos de entrada y salida fijos o variables;
- ✓ Librería de fibra óptica: contiene bloques que representan cables de fibra óptica, cuyos parámetros (longitud, atenuación y otros), son configurables;
- ✓ Librería de amplificadores eléctricos y ópticos;
- ✓ Librería de filtros eléctricos y ópticos;
- ✓ Librería de elementos eléctricos y ópticos pasivos;
- ✓ Librería de canales en el espacio libre;
- ✓ Librería de receptores;
- ✓ Librería de herramientas;
- ✓ Librería de componentes para procesamiento de señales;
- ✓ Librería de componentes de Matlab;
- ✓ Herramientas para uso de otras aplicaciones de *Optiwave*;
- ✓ Librería para cosimulación EDA (*Electronic Design Automation*);
- ✓ Librería de componentes para acceso por cable;

4.2.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el propósito de cumplir con los objetivos de la práctica se realiza el diseño y simulación de una red WDM-PON de ocho canales en banda C. El sistema a implementarse se presenta en la Figura 4.24.

Actividad 1: construya el sistema WDM-PON mostrado en la Figura 4.24.

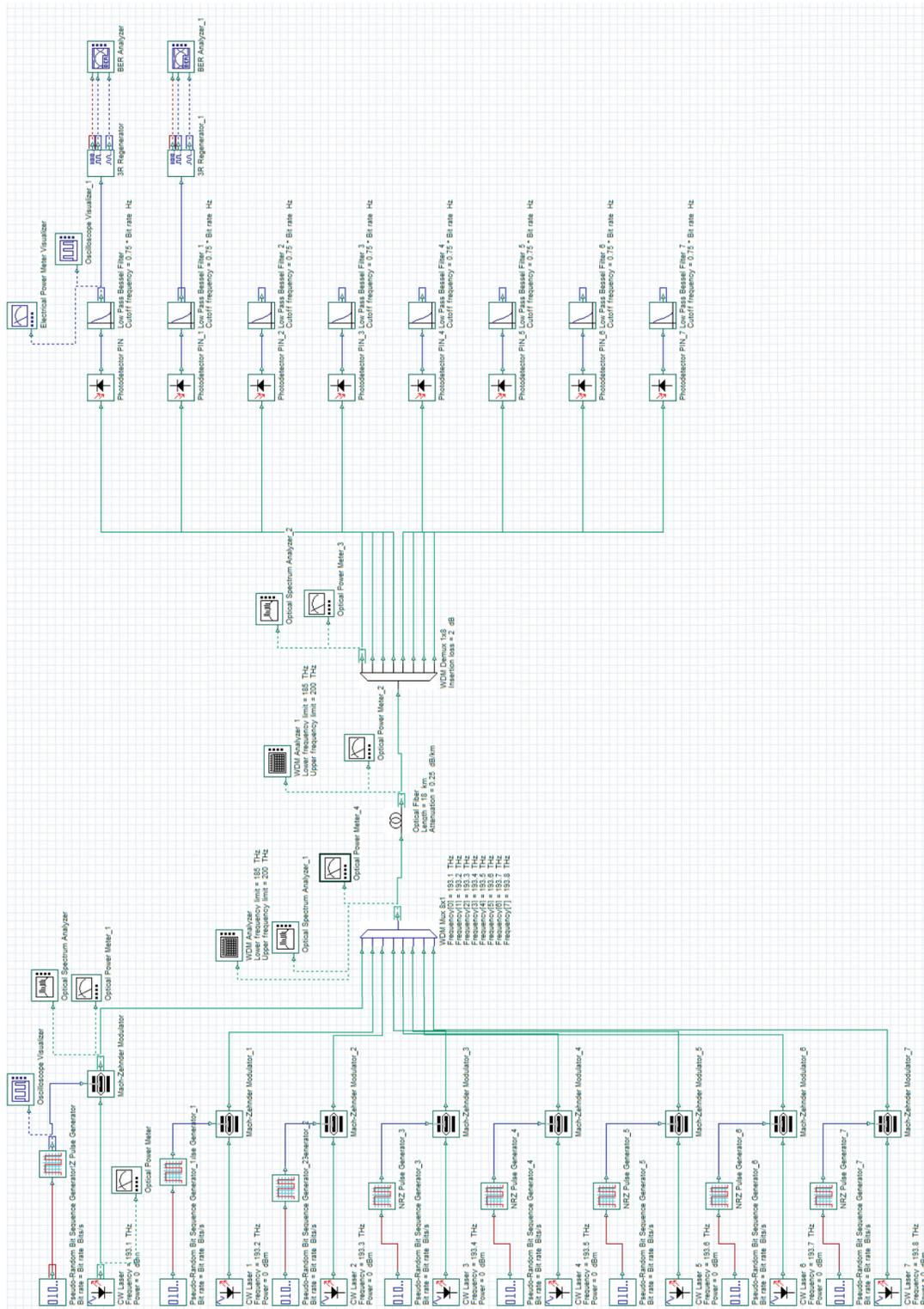


Figura 4.24 Sistema de comunicación óptica con tecnología WDM – PON

- a) **Creación de un nuevo proyecto:** luego de iniciado el programa, en la barra de herramientas estándar de *OptiSystem* haga clic en nuevo (). Despliegue la carpeta “*Default*” para visualizar las librerías de componentes (Figura 4.25).

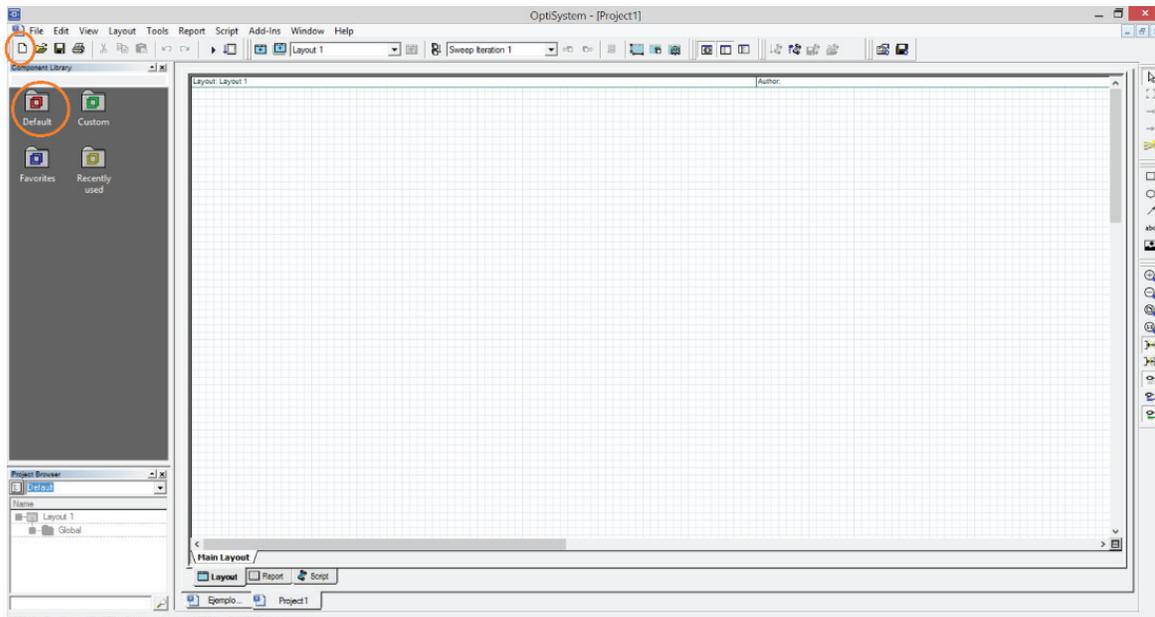


Figura 4.25 Creación de un nuevo proyecto en *OptiSystem*

b) Diseño del transmisor: cada transmisor está compuesto de un láser, un generador de pulsos NRZ y un generador de secuencia aleatoria de Bits. La señal óptica se modula con la señal de bits codificada mediante el modulador de *Mach-Zehnder* (modulador electro - óptico basado en el interferómetro de *Mach - Zehnder*). Para iniciar el diseño busque los componentes requeridos y arrastre a la ventana de simulación. Siga el siguiente procedimiento:

- ✓ En la librería *Transmitters Library – Bit Sequence Generators*, seleccione el generador *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* y coloque en el área de trabajo. Dejar la configuración por defecto;
- ✓ En la librería *Transmitters Library – Pulse Generators*, seleccione el generador *NRZ Pulse Generator* y coloque en el área de trabajo. Dejar la configuración por defecto;
- ✓ En la librería *Transmitters Library - Optical Sources*, seleccione la fuente *CW Laser* y coloque en el área de trabajo. Haciendo doble clic sobre el componente, configure la frecuencia de operación a 193.1 THz y la potencia de salida en 0 dBm;
- ✓ En la librería *Transmitters Library - Optical Modulator*, seleccione *Mach – Zehnder Modulator*. Deje la configuración por defecto.

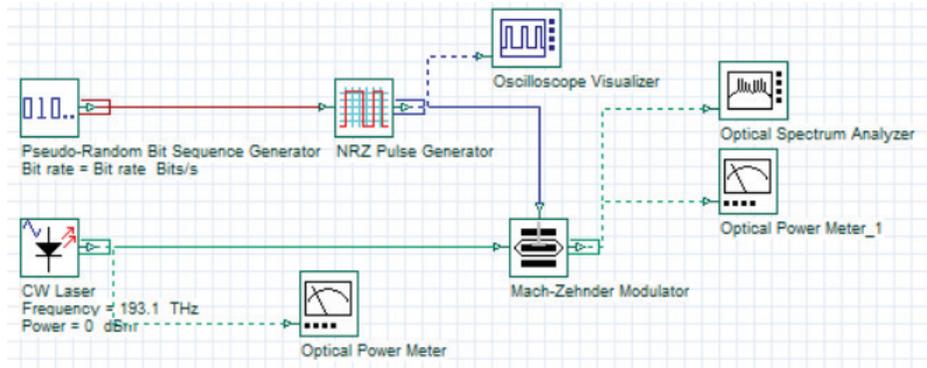


Figura 4.26 Transmisor de una señal óptica en *OptiSystem*

Las conexiones entre los componentes se realizan de forma automática y adquieren diferentes colores (la línea roja es una conexión lógica, la línea azul es una conexión eléctrica y la línea verde es una conexión óptica). Para visualizar las características de la señal generada en el transmisor, utilice las siguientes herramientas:

- ✓ *Optical Power Meter*: se ubica en *Visualizer Library – Optical*;
- ✓ *Oscilloscope Visualizer*: se ubica en *Visualizer Library – Electrical*;
- ✓ *Optical Spectrum Analyzer*: se ubica en *Visualizer Library – Optical*.

Actividad 2: inicie la simulación utilizando el botón , luego, en la ventana que aparece, escoja la opción simular (). Si la simulación es exitosa, al final del script aparecerá el mensaje “*Calculation finished*”. Cierre la ventana () y haga doble clic en los instrumentos de medida. Complete las tablas 4.3 y 4.4 con las imágenes solicitadas de la simulación:

Potencia óptica del diodo láser	Potencia óptica de la señal modulada

Tabla 4.3 Resultado de la simulación en el transmisor. Parte 1

Secuencia de bits	Espectro de la señal óptica emitida

Tabla 4.4 Resultado de la simulación en el transmisor. Parte 2

c) Repita el literal “b” y construya siete transmisores adicionales; configure 0 dBm como potencia de salida y frecuencias de operación de: 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, 193.5 THz, 193.6 THz, 193.7 THz y 193.8 THz, respectivamente. Para transmitir los ocho canales a través de una sola fibra óptica, se utiliza un multiplexor 8x1, además, para analizar los datos obtenidos en esta etapa, conecte un medidor de potencia óptica, un analizador de espectro óptico y un analizador WDM.

- ✓ *WDM Mux 8x1*: ubicado en *WDM Multiplexers Library – Multiplexers*;
- ✓ *WDM Analyzer*: ubicado en *Visualizer Library – Optical*;

Actividad 3: guarde los cambios realizados y ejecute la simulación. Complete la información solicitada en las tablas 4.5 y 4.6.

Potencia óptica medida en el puerto de salida del MUX 8x1	Espectro de la señal WDM

Tabla 4.5 Imágenes de la simulación en el puerto de salida del MUX

Análisis de la señal WDM	Detalles de la señal WDM

Tabla 4.6 Imágenes del análisis de la señal WDM en el puerto de salida del MUX

d) La red primaria o *feeder* de la red, se diseña con un tramo de fibra óptica, cuya longitud es de 18 Km y su valor de atenuación típica es de 0,25 dB/Km.

✓ *Optical fiber*: se encuentra en *Optical Fibers Library*;

Actividad 4: para analizar los datos obtenidos en esta etapa, conecte un medidor de potencia óptica, un analizador de espectro óptico y un analizador WDM. Ejecute la simulación y complete las tablas 4.7 y 4.8 con las imágenes solicitadas.

Potencia óptica medida en el puerto de salida del tramo de fibra óptica	Espectro de la señal WDM que aparece en el puerto de salida del tramo de fibra óptica

Tabla 4.7 Resultado de la simulación en el extremo de salida de la fibra óptica

Análisis de la señal WDM	Detalles de la señal WDM

Tabla 4.8 Análisis de la señal WDM en el extremo de salida de la fibra óptica

e) La demultiplexación de la señal WDM se logra con la ayuda de un DEMUX WDM óptico 1x8, configurado con una pérdida de inserción típica de 2 dB. Note que al insertar el componente, los canales se configuran automáticamente en el valor requerido.

✓ *WDM Demux 1x8*: se ubica en la librería *WDM Multiplexers Library – Demultiplexers*;

f) El receptor se construye con un detector de luz tipo PIN y un filtro eléctrico pasa bajo para reducir el ruido generado por la conversión óptico - eléctrica. La responsividad del PIN y la frecuencia de corte del filtro pasa bajos no se modifican.

✓ *Photodetector PIN*: ubicado en *Receivers Library – Photodetectors*;

✓ *Low Pass Bessel Filter*: ubicado en *Filters Library - Electrical*;

Actividad 5: con la ayuda de un analizador de espectro óptico y un medidor de potencia óptica analice la señal obtenida en el puerto de salida “1”. Complete la Tabla 4.9 con las imágenes solicitadas y compare los valores de potencia medidos con los dos instrumentos.

Potencia óptica medida en el puerto "1" del DEMUX	Espectro de la señal que aparece en el puerto "1" del DEMUX

Tabla 4.9 Análisis de la señal óptica recibida

g) Repita el literal "f" para construir los 7 receptores faltantes. Para analizar la calidad del sistema construido, coloque los componentes "*3R Regenerator*" y "*BER Analyzer*", luego del filtro pasa bajo en el transmisor 1 (como se muestra en la Figura 4.24).

- ✓ *3R Regenerator*: ubicado en *Receivers Library – Regenerator*;
- ✓ *BER Analyzer*: ubicado en *Visualizer Library – Electrical*;

Actividad 6: complete la Tabla 4.10 con la imagen solicitada.

Diagrama del ojo de la señal recibida

Tabla 4.10 Diagrama del ojo de la señal recibida

4.2.6 INFORME

- 1) Presente la información solicitada en las actividades correspondientes;
- 2) En el diseño simulado, coloque un filtro óptico Gaussiano (*Gaussian Optical Filter*: ubicado en *Filters Library – Optical*) antes del fotodetector del transmisor. Explique el beneficio de usar este filtro y presente el espectro de la señal óptica antes del fotodetector con y sin filtro.
- 3) ¿Observando el diagrama del ojo y los valores de desempeño (especialmente el BER), se puede concluir que la transmisión es aceptable?
- 4) Coloque un amplificador tipo EDFA (*Amplifiers Library – Optical*) con ganancia de 10 dB en la salida del multiplexor. Simule y analice el diagrama del ojo. Indique si el sistema mejora.
- 5) Conclusiones y recomendaciones.

4.3 PRÁCTICA # 3

4.3.1 TEMA: EL OTDR (*OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETER*)

4.3.2 OBJETIVOS

- 1) Comprender el funcionamiento de un OTDR;
- 2) Conocer cuál es la utilidad fundamental del OTDR;
- 3) Analizar las trazas reflectométricas y detectar eventos encontrados en una fibra oscura;
- 4) Utilizar otras herramientas que ofrece el equipo disponible en el laboratorio.

4.3.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Sonda Microscópica de video para inspección de conectores de fibra óptica *Linghtel DI-1000*;
- ✓ Kit de simulación de redes PON (FTTX);
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ *Patchcord* FO simplex con conectores SC/UPC – SC/APC;
- ✓ *Patchcord* FO simplex con conectores SC/APC – SC/APC;
- ✓ Adaptadores SC/APC – SC/APC.

4.3.4 MARCO TEÓRICO

4.3.4.1 OTDR (Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo) ^{[90] [91] [131]}

El OTDR es un instrumento de medida que permite evaluar el desempeño de una red de fibra óptica en base a la ejecución de las siguientes tareas:

- ✓ **Caracterización de una fibra óptica:** con la ayuda del OTDR, se puede conocer el estado del cable de fibra óptica antes y después de su instalación. Es importante verificar que el cable se encuentre en perfecto estado y que la atenuación debido a la longitud de la fibra óptica, cumpla con las especificaciones técnicas que el fabricante garantiza;
- ✓ **Caracterización de los componentes de un sistema de comunicaciones ópticas:** el OTDR permite analizar las pérdidas producidas en cada uno de los componentes pasivos (conectores, empalmes, splitters, etc.) de la red;
- ✓ **Localización de eventos:** con el OTDR se puede determinar con alta precisión la longitud a la que se encuentra un evento que provoca pérdidas de potencia de la señal transmitida.
- ✓ **Localizador visual de fallas:** el OTDR posee una fuente de luz visible (650 nm) que permite detectar roturas visibles en el cable de fibra óptica.
- ✓ **Chequeo de conectores:** el OTDR tiene una aplicación que permite observar en tiempo real el grado de contaminación de la férula de un conector. Para esto, es necesario conectar a uno de los puertos USB una sonda microscópica de video que tiene controles para enfocar y capturar la imagen de la férula que se está examinando.

4.3.4.2 Principio de funcionamiento de un OTDR

El OTDR aprovecha los principios de dispersión de *Rayleigh* (debido a pequeñas variaciones en la densidad de la fibra óptica, la energía de un pulso óptico se dispersa a todas partes y sólo una mínima cantidad de luz regresa al OTDR), y de Reflexión de *Fresnel* (los pulsos de luz se reflejan en los puntos donde existe discontinuidad o cambio del índice de refracción del medio de transmisión). En la Figura 4.27 se muestra el esquema de funcionamiento del OTDR:

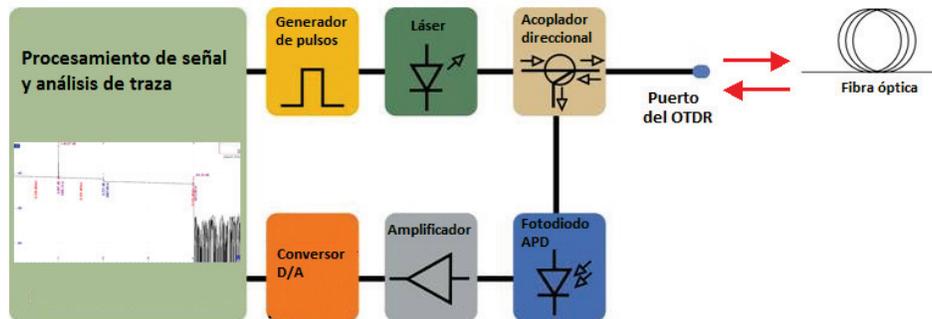


Figura 4.27 Esquema de funcionamiento del OTDR ^[131]

- ✓ Un generador de pulsos alimenta al transmisor óptico que se encarga de hacer la conversión electro – óptica, para luego enviar la señal al acoplador;
- ✓ En el acoplador se separan las señales que salen a la fibra óptica y que regresan de la misma;
- ✓ La señal que llega de la fibra óptica por el acoplador ingresa al receptor óptico y convierte la señal óptica a eléctrica para luego amplificarla;
- ✓ Luego pasa a la etapa de conversión digital – analógica;
- ✓ Por último en la unidad de procesamiento se analiza la señal y se presentan los resultados en la pantalla del OTDR.

4.3.4.3 Detección de eventos

Para interpretar una traza reflectométrica generada por un OTDR, se debe considerar que la potencia de la señal óptica es una función lineal decreciente que depende de la longitud del cable de fibra óptica. Por tanto, la pendiente de dicha función representa la atenuación (medida generalmente en dB/Km) de la fibra en cada punto. A lo largo del enlace pueden suscitarse varios tipos de eventos que alteran la característica lineal de la atenuación. En la Figura 4.28 se observan eventos típicos que pueden encontrarse en un enlace de fibra óptica común. Dichos eventos se pueden agrupar de la siguiente forma:

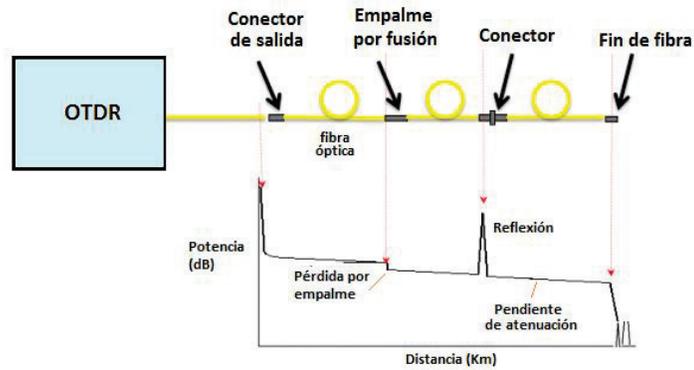


Figura 4.28 Traza reflectométrica ^[131]

- ❖ **Eventos no reflexivos:** son aquellos en los que no se produce un cambio de medio por lo que no tiene lugar una reflexión y el único efecto apreciable es una pérdida de potencia. Ejemplos: empalmes por fusión y microcurvaturas.
- ❖ **Eventos reflexivos:** se producen cuando aparece un cambio de medio que provoca que parte de la potencia se refleje en dirección al OTDR. En estos casos se observará un aumento de potencia. Generalmente estos eventos se producen con la presencia de conectores y en el final de fibra óptica.

4.3.4.4 Parámetros de un OTDR

Antes de probar un enlace, es necesario configurar ciertos parámetros en el OTDR para que la medición tenga un alto nivel de exactitud:

- ✓ **Rango dinámico:** determina la longitud máxima que puede analizar el OTDR.
- ✓ **Zona muerta:** es la distancia mínima a la cual un OTDR es capaz de detectar un evento luego de la ocurrencia de otro.
- ✓ **Resolución de muestreo:** se define como la distancia mínima entre dos puntos de muestreo consecutivos adquiridos por el instrumento. A menor distancia, se obtiene mayor cantidad de puntos de adquisición, lo cual indica una mayor exactitud de la información obtenida.
- ✓ **Precisión:** Es la capacidad de comparar la cantidad medida con un valor de referencia (por ejemplo pérdidas en el empalme, en conector, etc.).

4.3.4.5 Métodos de cálculo de la atenuación

El OTDR calcula la atenuación utilizando dos métodos de extrapolación:

➤ **Aproximación de mínimos cuadrados (LSA – *Least Squares Approximation*):** En este método, los errores en el valor calculado son pequeños porque utilizan todos los datos existentes en la sección (entre los dos puntos de análisis). Pero si existe presencia de pérdidas grandes, también se producen errores grandes. Por tal motivo, el uso de este método es adecuado cuando no hay presencia de eventos reflexivos ni empalmes. El LSA proporciona un valor que tiene un grado de error menor que el TPA.

➤ **Aproximación de dos puntos (TPA – *Two Point Approximation*):** En este caso, el OTDR usa la diferencia entre los niveles de los dos puntos especificados para calcular la pérdida, razón por la que el nivel de fluctuación en el valor calculado puede variar mucho. Si se producen eventos con pérdidas grandes, como reflexiones y empalmes en la sección de cálculo, el TPA proporciona menor grado de error que el LSA.

4.3.4.6 Modos de operación del OTDR

El OTDR trabaja en tres modos diferentes:

- ❖ **Modo simple:** el equipo configura automáticamente ciertos parámetros de medición (rango, ancho de pulso, etc.), el usuario otros (longitud de onda);
- ❖ **Modo detallado:** el usuario configura todas las condiciones para la medición;
- ❖ **Modo PON:** el usuario debe configurar las etapas de splitteo (división de potencia óptica), sentido de la medición (OLT – ONT o viceversa), distancia y longitud de onda para analizar una red PON. En este modo, el OTDR utiliza una aplicación denominada *Smart Mapper* para mostrar los eventos encontrados en forma de íconos (Figura 4.29).

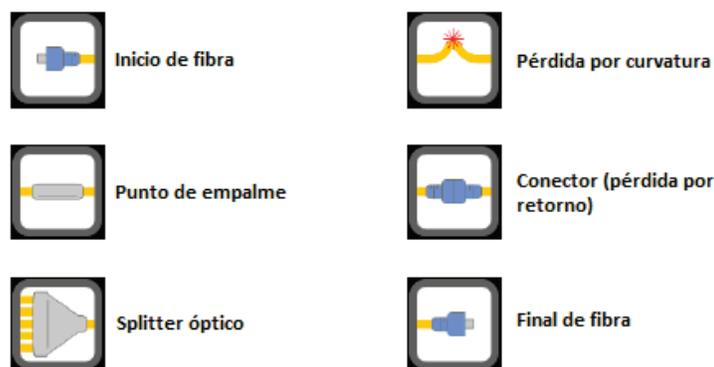


Figura 4.29 Íconos utilizados en modo PON ^[90]

4.3.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el laboratorio se dispone del OTDR YOKOGAWA AQ7283 (Figura 4.30), el cual ofrece importantes herramientas para el análisis de redes de acceso, enlaces de larga distancia con fibra monomodo, enlaces de cortas distancias con fibras multimodo y monomodo, redes PON y más. Posee accesorios que lo convierten en: localizador visual de fallas VLS, sonda microscópica para inspección de férulas, medidor de potencia óptica y fuente de luz.

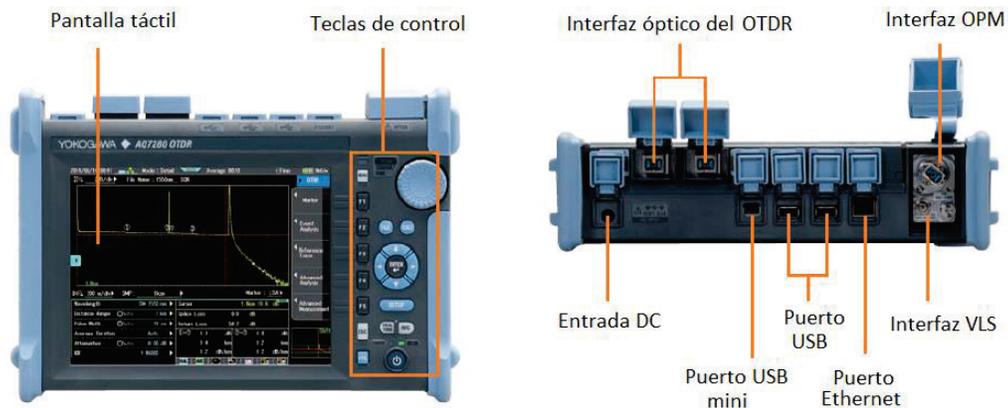


Figura 4.30 OTDR YOKOGAWA AQ7283 [90]

- a) Antes de iniciar la práctica recuerde limpiar los conectores y adaptadores. Luego, implemente la red mostrada en la Figura 4.31; utilice un *patchcord* simplex SC/UPC – SC/APC para conectar el puerto 1 del OTDR ($\lambda=1310$ nm y 1550 nm) con la bobina de 4000 m que se incluye en el simulador PON.

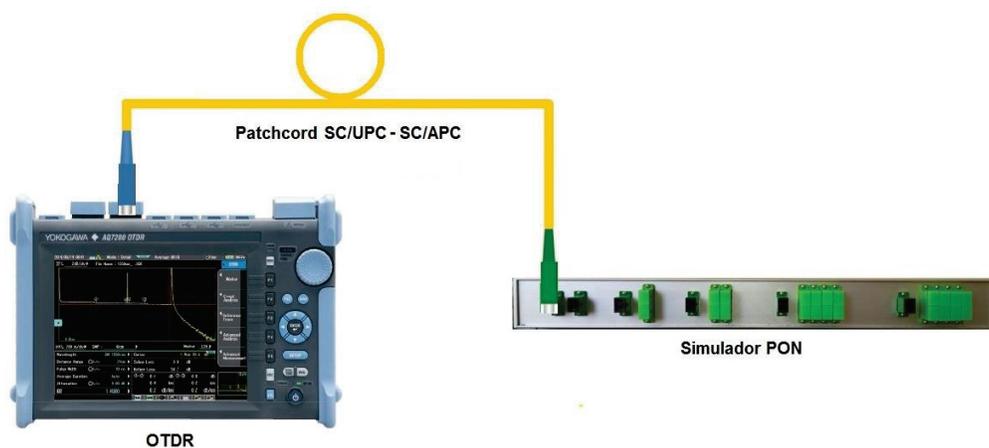


Figura 4.31 Conexión para evaluar un tramo de fibra óptica de 4000 m

Encienda el OTDR, escoja la aplicación que corresponde a OTDR (); en el teclado principal, presione  para desplegar las opciones de modo de operación del OTDR; en la opción “Modo”, elija “Simple” (Figura 4.32). No es necesario cambiar las configuraciones predeterminadas por defecto.

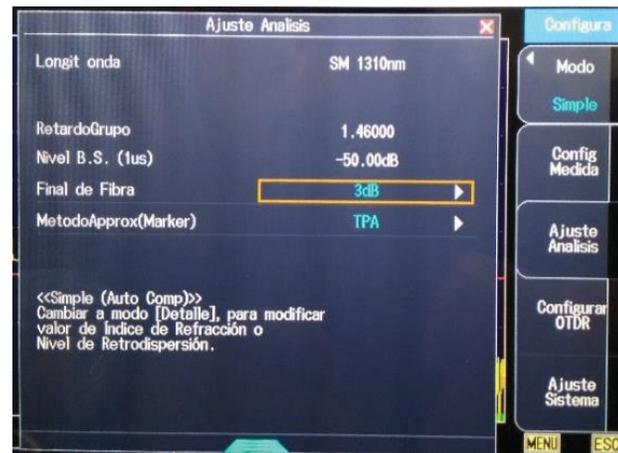


Figura 4.32 Configuración del OTDR en modo “Simple”

En el modo simple, la medición se hace en tiempo real (mientras se emite la señal óptica, los valores medidos se actualizan y se muestran en tiempo real); para iniciar la prueba, presione la tecla “REAL TIME” (), luego de 20 segundos detenga la medición presionando la misma tecla.

Para hacer una captura de pantalla y almacenar el archivo generado, coloque una memoria externa en uno de los puertos USB, presione “FILE” y en el menú que aparece configure el modo de almacenamiento (externo), el nombre del archivo y su extensión (se recomienda el formato JPG).

En la Tabla 4.11 se muestran las capturas de pantalla de la prueba ejecutada. En la traza obtenida se observan las condiciones de medición, mismas que han sido configuradas por el equipo de forma automática (rango de distancia de 5 Km y ancho de pulso de 100 ns). Además, nótese que al inicio de la traza aparece una “S”, este punto representa un nivel de referencia que se utiliza para evaluar la pérdida en los puntos restantes del enlace. El nivel de referencia “S” se utiliza por defecto cuando no se especifica una referencia.

En el análisis de eventos se observan dos de tipo reflexivo (“1” a 1006,15 m de distancia medida desde el OTDR que puede ser un conector y “E” a 4012.29 m que indica el fin de fibra) y uno de tipo no reflexivo (“2” a 2007.17 m de distancia que puede ser un empalme o una macro curvatura). Considerando únicamente la información que presenta el OTDR, no se puede afirmar de forma exacta la causa que genera el evento, sin embargo, los valores de distancia y atenuación son parámetros relevantes al momento de ejecutar el mantenimiento o reparación de un enlace de fibra óptica.

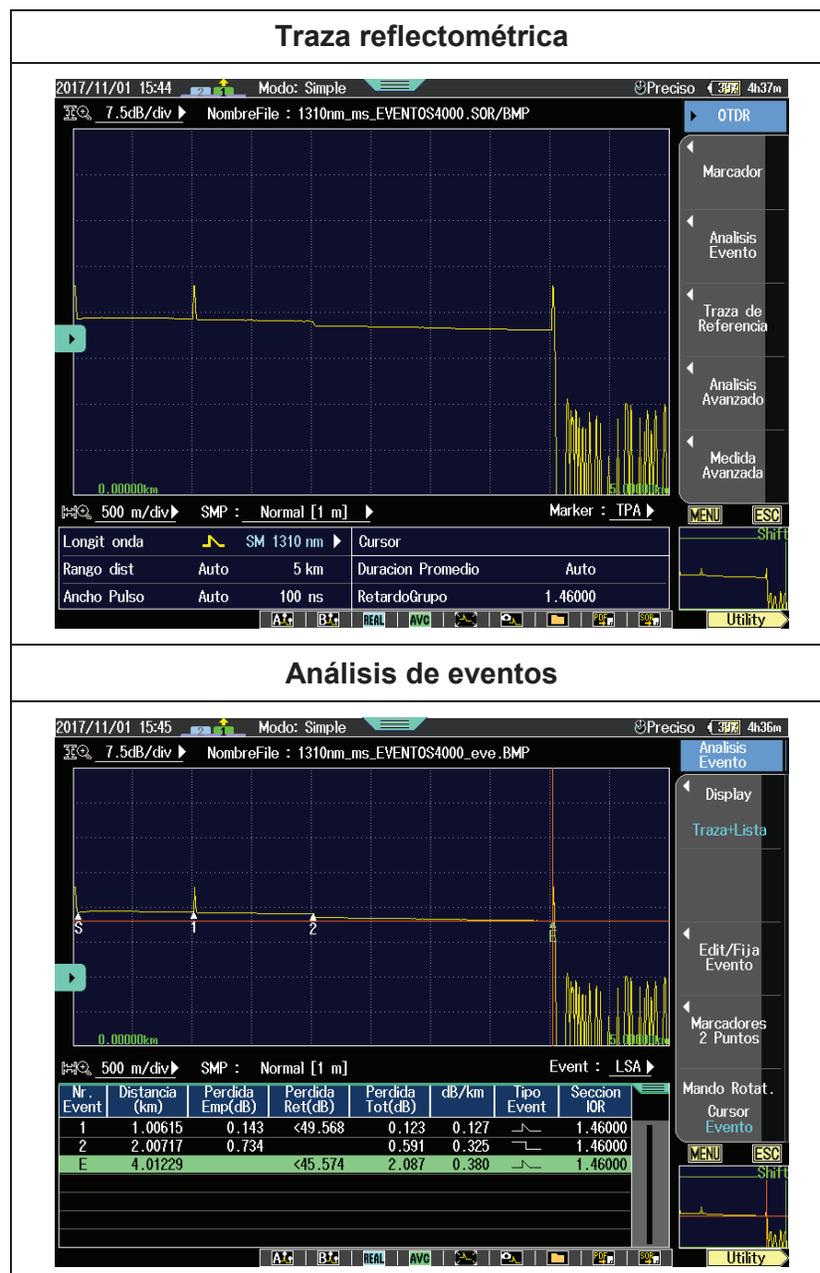


Tabla 4.11 Traza reflectométrica y análisis de eventos

Actividad 1: configure el OTDR en modo “Simple” para evaluar la red mostrada en la Figura 4.33 y complete la Tabla 4.12 con la información solicitada.

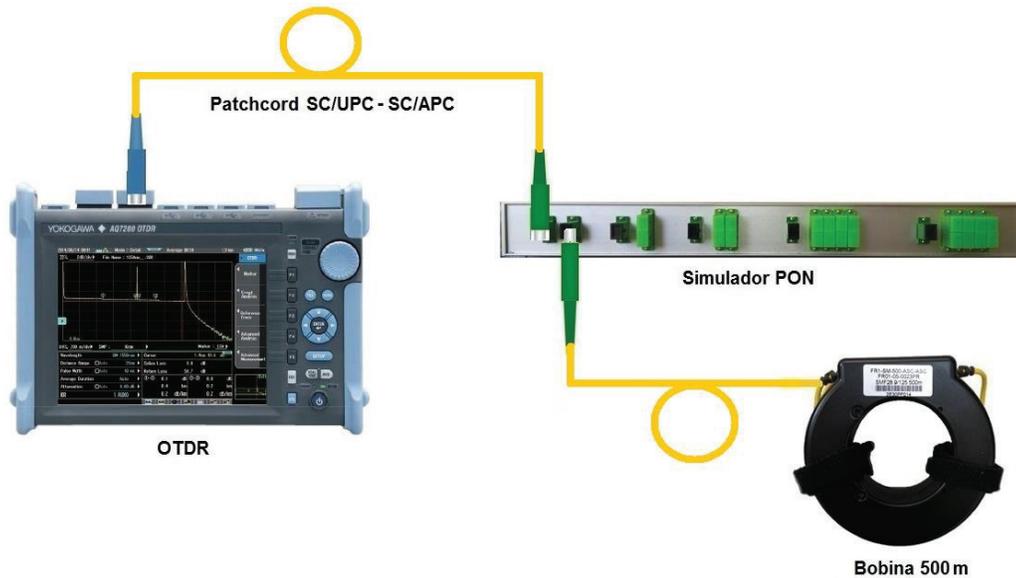


Figura 4.33 Conexión de dos tramos de fibra óptica, uno de 4000 m (que se incluye en el simulador PON) y otro de 500 m

Traza reflectométrica	Análisis de eventos

Tabla 4.12 Traza reflectométrica y análisis de eventos de la red de la Figura 4.33

Actividad 2: configure el OTDR para operar en modo “Detalle”. En el menú desplegado (Figura 4.34) configure los siguientes parámetros de medición: ancho de pulso igual a 50 nm y rango de distancia igual 5 Km. Implemente la red mostrada en la Figura 4.33, ejecute la prueba respectiva y complete la información que se solicita en la Tabla 4.13.



Figura 4.34 Configuración del OTDR en modo “Detalle”

Traza reflectométrica	Análisis de eventos

Tabla 4.13 Traza reflectométrica y análisis de eventos (utilizando un ancho de pulso igual a 50 nm)

Cambie el ancho de pulso a 100 nm y mantenga el rango de distancia de 5 Km. Complete la información solicitada en la Tabla 4.14.

Traza reflectométrica	Análisis de eventos

Tabla 4.14 Traza reflectométrica y análisis de eventos (utilizando un ancho de pulso igual a 100 nm)

b) Configure el OTDR en modo PON (Figura 4.35) con los siguientes parámetros de análisis:

- ✓ Etapa de divisor óptico → 1;
- ✓ Dirección de la prueba → ONU a OLT;
- ✓ Número de puertos de salida del splitter igual a 8 (valor por defecto);
- ✓ El resto de parámetros quedan en el valor por defecto.



Figura 4.35 Configuración del OTDR en modo “PON”

Implemente la red mostrada en la Figura 4.36 y ejecute la prueba utilizando la función de medición promediada . El OTDR finaliza la prueba de forma automática luego de que la barra de progreso indique que la medición se ha completado al 100%.

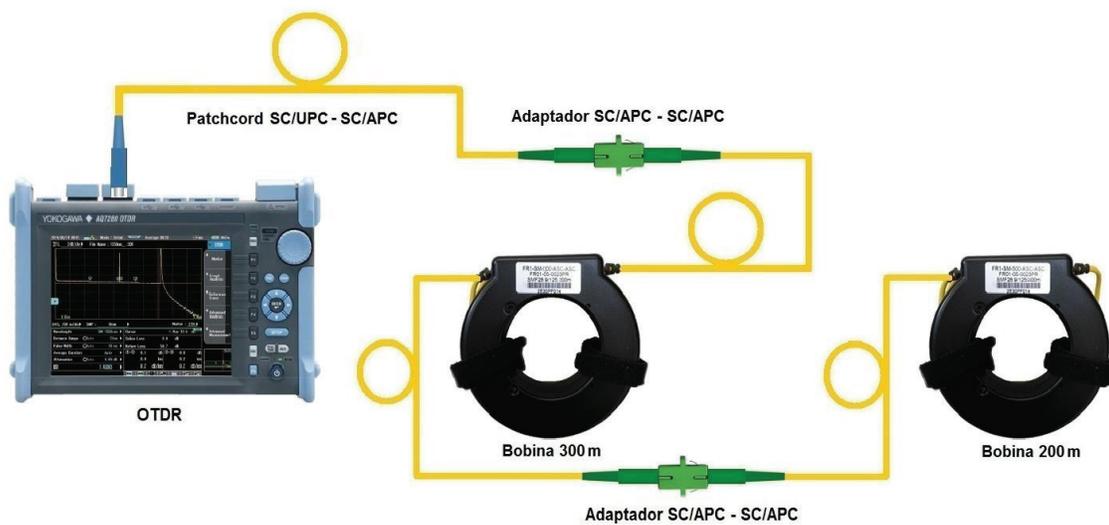


Figura 4.36 Red formada por dos tramos de FO (300 m y 200 m) unidos con adaptadores SC/APC - SC/APC

Cuando se opera en modo PON, los resultados pueden presentarse con la aplicación *Smart Mapper*, la cual utiliza íconos para mostrar explícitamente el tipo de evento encontrado en la red. En la Tabla 4.15 se aprecia que el OTDR detectó un evento de tipo reflexivo a 0.31068 Km y lo representa como la unión de dos conectores, además detectó un segundo evento a 0.51232 Km, mismo que está representado como el final de la fibra óptica.

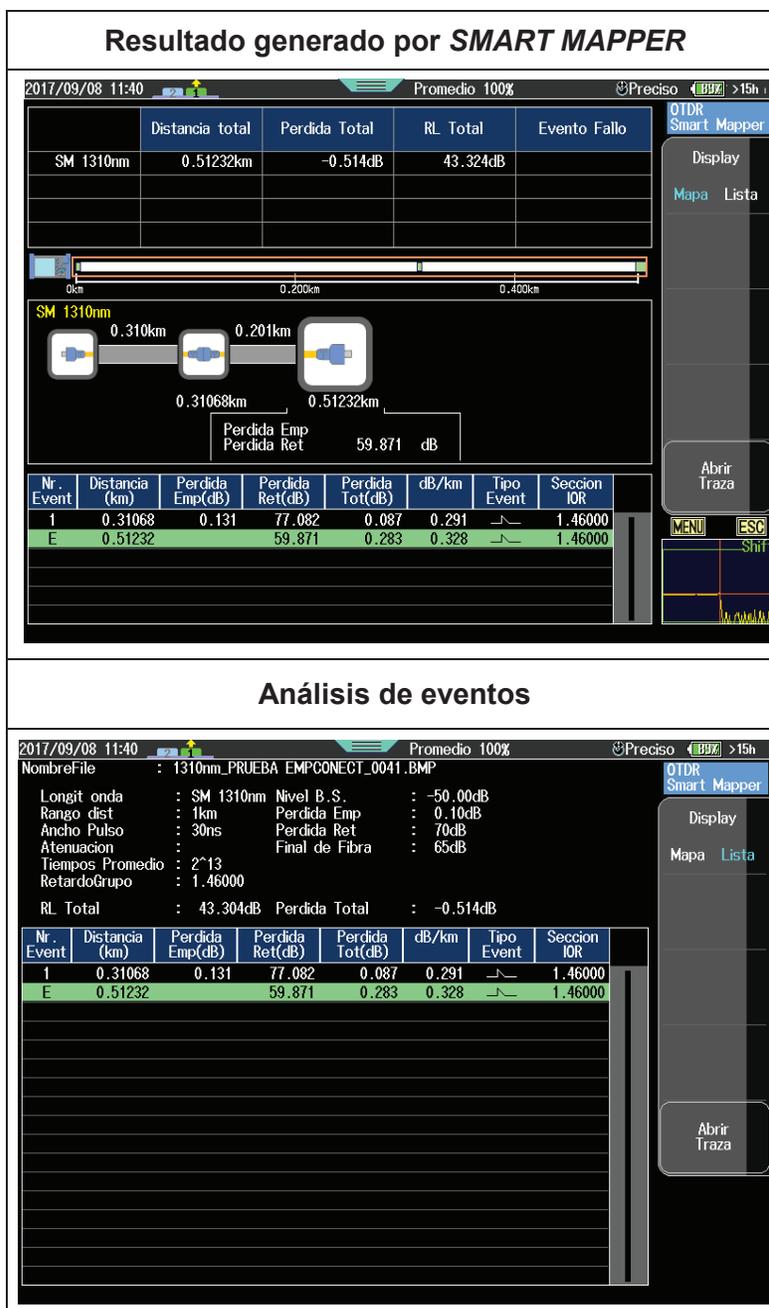


Tabla 4.15 Resultados obtenidos con la aplicación *Smart Mapper* de la red presentada en la Figura 4.36.

Actividad 3: Configure el OTDR para trabajar en modo “Detalle” y obtenga la traza de la red mostrada en la Figura 4.36, utilice un ancho de pulso de 50 ns y rango de distancia de 1 Km. Compare los resultados con la información que se muestra en la Tabla 4.15.

Actividad 4: Implemente la red de la Figura 4.37 y configure el OTDR en modo “PON” con los parámetros que se indican a continuación:

- ✓ Etapa de divisor óptico → 1;
- ✓ Dirección de la prueba → OLT a ONU;
- ✓ Número de puertos de salida del splitter igual a 2;
- ✓ Los demás parámetros quedan en el valor por defecto.

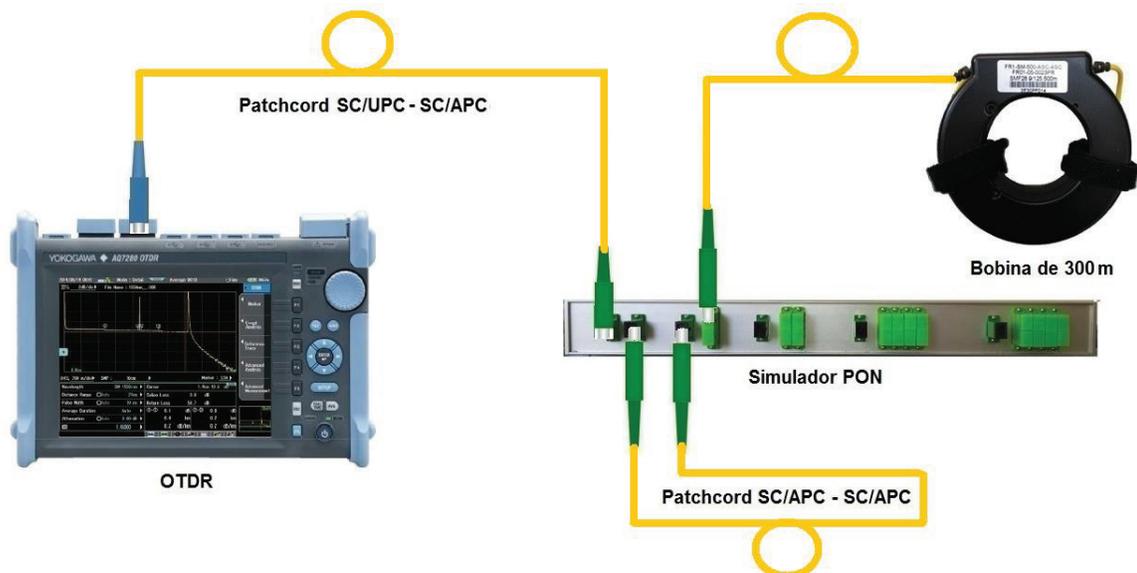


Figura 4.37 Red de FO formada por un tramo de 4000 m (incluido en el simulador PON), un *patchcord* SC/APC – SC/APC, 1 splitter de 1x2 (incluido en el simulador PON) y un tramo de 300 m de fibra óptica

Obtenga el esquema de eventos generado por el OTDR en la aplicación *Smart Mapper* y complete la información que se solicita en la Tabla 4.16. Luego, configure el OTDR en modo “Detalle” y ejecute la prueba y obtenga la traza que caracteriza al enlace de fibra óptica. Complete la Tabla 4.17 con la información solicitada y compare los resultados obtenidos en los dos modos.

Resultado generado por <i>SMART MAPPER</i>	Análisis de eventos

Tabla 4.16 Resultados obtenidos con la aplicación *Smart Mapper*

Traza reflectométrica	Análisis de eventos

Tabla 4.17 Resultados obtenidos con el OTDR en modo “Detalle”

- c) Conecte la sonda microscópica a uno de los puertos USB del OTDR, introduzca la férula del conector de prueba en la punta de la sonda de video, tal como se muestra en la Figura 4.38. Inicie la aplicación “Sonda Insp. Fibra” (Figura 4.39) para empezar a monitorear la férula del conector de prueba.

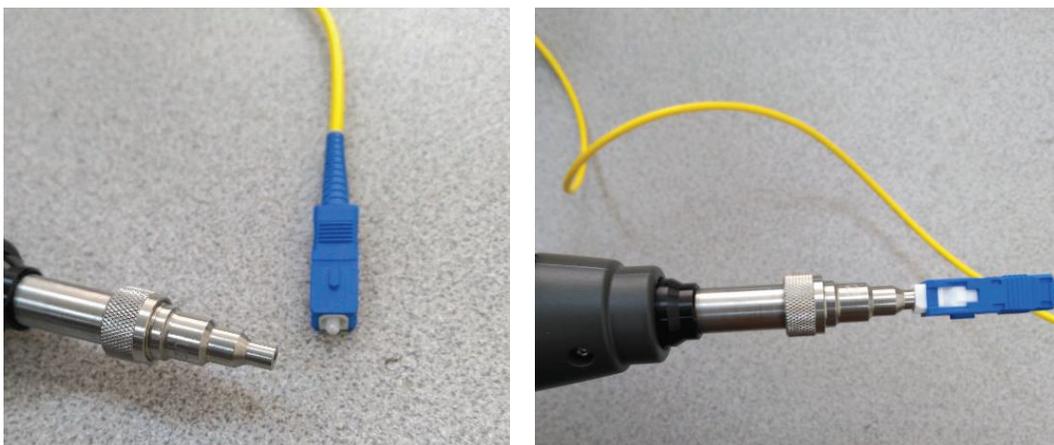


Figura 4.38 Inspección de conector SC/UPC

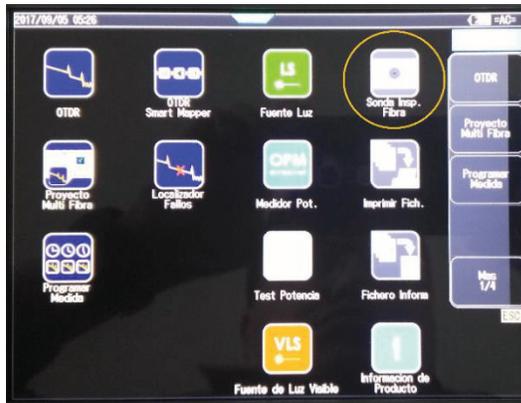


Figura 4.39 Pantalla de inicio del OTDR

La prueba realizada al conector SC/UPC indica que la férula tiene alto grado de contaminación (Figura 4.40a) por lo que es necesario realizar una limpieza en seco, luego, se examina nuevamente la férula y se observa que aún existen vestigios de suciedad (Figura 4.40b). Para eliminar por completo cualquier tipo de contaminación de la férula se realiza una limpieza con paño húmedo (impregnado de alcohol isopropílico) y seco. Finalmente se observa la férula (Figura 4.40c) y se comprueba que ya no existen impurezas.

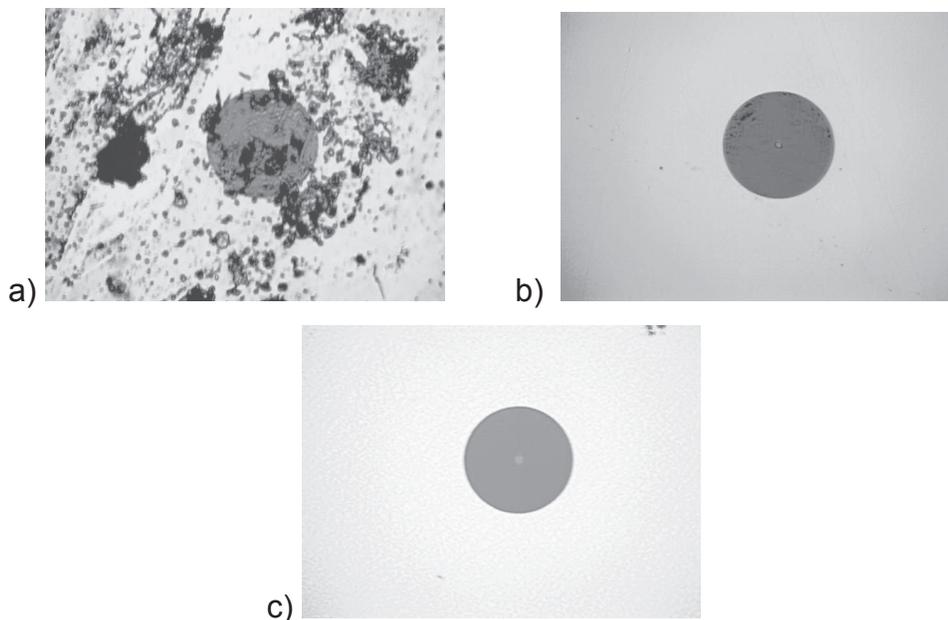


Figura 4.40 Vista de a) férula contaminada, b) férula luego de limpieza en seco y c) férula después de limpieza húmeda

Actividad 5: Examine los conectores y adaptadores del Simulador PON y de las bobinas que se incluyen en el Kit de simulación de redes PON (FTTX).

- d) Con el propósito comprobar la continuidad de una fibra óptica, el OTDR presenta una herramienta muy eficaz, se trata de una fuente de luz visible que opera a 650 nm (luz roja). Para utilizar esta aplicación, en la pantalla de inicio elija “Fuente de Luz Visible” (Figura 4.41a), seguidamente aparecerá la interfaz gráfica que permite operar dicha herramienta (Figura 4.41b).

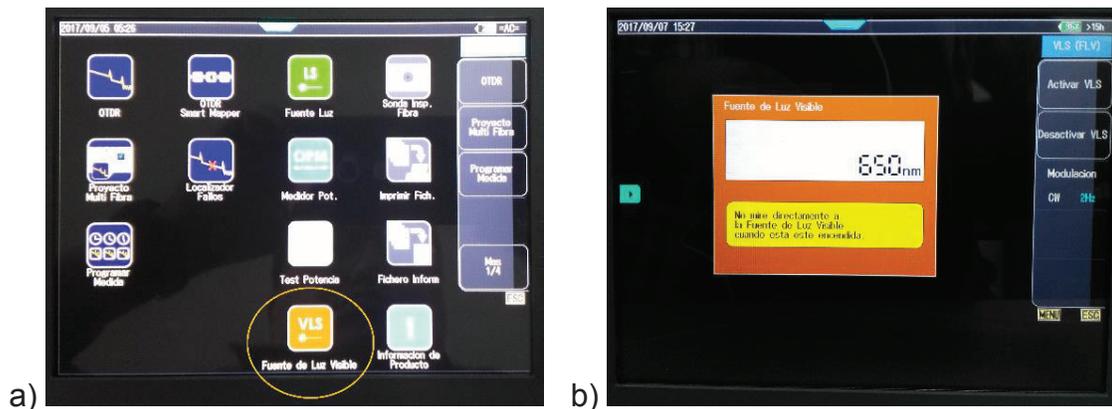


Figura 4.41 a) Pantalla de inicio del OTDR, b) Interfaz para operar la fuente de luz visible

Para entender el funcionamiento de la fuente de luz visible, se va a examinar un *pigtail* que posee conector SC/UPC y que está fusionado con una fibra óptica cuyo revestimiento es de color azul. Antes de activar la fuente de luz, introduzca la férula del conector en el puerto del OTDR etiquetado con “VLS LASER APERTURE”, tal como se muestra en la Figura 4.42.



Figura 4.42 Conexión de pigtail de prueba en el puerto de salida de la fuente de luz visible (diámetro de férula típico de 2.5 mm)

Para iniciar la prueba escoja la opción “Activar VLS”. En la Figura 4.43 se puede apreciar cuando hay presencia o ausencia de luz en el extremo de la fibra óptica, además se observa que existe fuga de luz en el empalme.

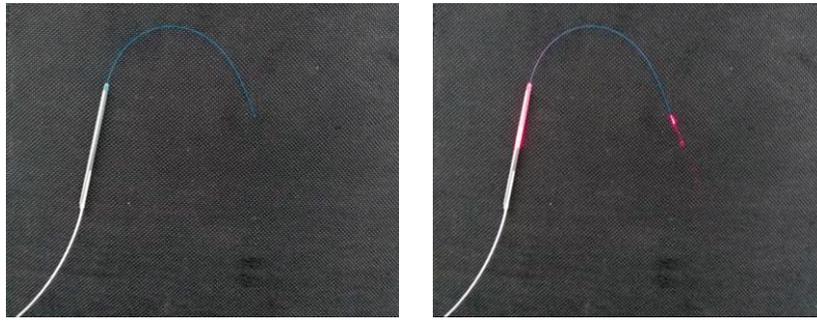


Figura 4.43 Prueba con luz visible de un pigtail que incluye una fusión

En la Figura 4.44 se muestra otro tipo de prueba realizada con la aplicación VLS. En este caso se determina el radio de curvatura mínimo de un *pigtail* antes de que se produzca pérdida de la señal lumínica.

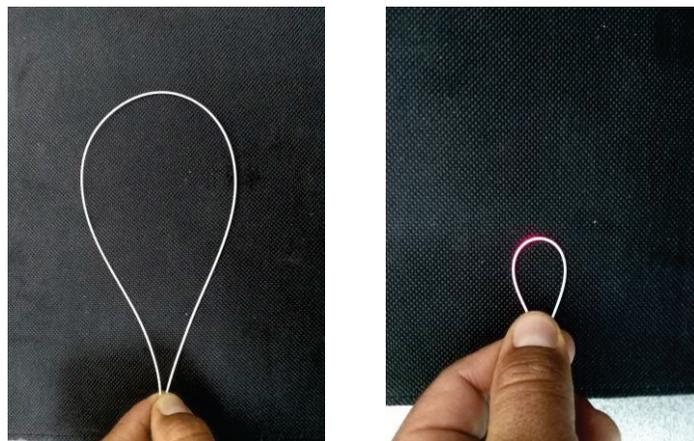


Figura 4.44 Prueba del radio de curvatura con luz visible

Actividad 6: Utilizando una hoja de papel milimetrado de fondo, realice el ejercicio mostrado en la Figura 4.44. Tome tres medidas del radio de curvatura mínimo.

4.3.6 INFORME

- 1) Presentar los datos obtenidos en cada una de las actividades prácticas;
- 2) Redactar una ventaja y una desventaja de cada uno de los modos de operación que presenta el OTDR;
- 3) Analizar los resultados obtenidos en la Actividad 2. Indicar en qué casos se debe utilizar anchos de pulso cortos (5 nm, 10 nm, 20 nm o 50 nm) y cuándo es mejor utilizar anchos de pulso largos (100 nm, 200 nm o más);
- 4) Analizar y comparar los resultados obtenidos en la Actividad 4;
- 5) Conclusiones y recomendaciones.

4.4 PRÁCTICA # 4

4.4.1 TEMA: EMPALMES POR FUSIÓN Y CONECTORIZACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS

4.4.2 OBJETIVOS

- 1) Conocer y aplicar el procedimiento adecuado para la realización de empalmes de fibra óptica por fusión;
- 2) Manipular de forma correcta la máquina fusionadora Fujikura 12s;
- 3) Ejecutar el proceso de conectorización de fibra óptica con conectores pre-pulidos.

4.4.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Fusionadora Fujikura 12s y cortadora de precisión Fujikura CT-30;
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ Un *patchcord* FO simplex monomodo de 3 m FC/PC – FC/PC;
- ✓ Un pigtail G.652 de 1 m SC/UPC;
- ✓ Adaptadores FC/PC – FC/PC.
- ✓ Conector pre-pulido Fujikura SC-SF-SM-20/30;
- ✓ Kit de herramientas para empalmes de fibra óptica JFOPT JF-100A

Nota: el *patchcord* y el pigtail deben ser adquiridos por cada grupo de trabajo.

4.4.4 MARCO TEÓRICO

Para la construcción de redes de fibra óptica es necesario utilizar técnicas y dispositivos para la interconexión de tramos de fibra óptica, siendo los empalmes y conectores los más utilizados. Cualquiera de los tipos de interconexión que se realicen, contribuyen con pérdidas que deben considerarse en el presupuesto de potencia del sistema, por lo tanto es necesario que los procesos sean ejecutados de forma eficiente con el fin de minimizar dichas pérdidas.

4.4.4.1 Empalmes por fusión

Consiste en la unión permanente de las fibras ópticas mediante la fusión de las mismas al exponerlas a temperaturas suficientemente altas, producidas por un arco eléctrico, el cual es generado por dos electrodos. El empalme por fusión puede durar menos de un minuto, y cumple los siguientes pasos:

- a. Aproximación de las fibras;
- b. Alineamiento;
- c. Fusión;
- d. Estimación de pérdidas; y,
- e. Calentamiento del tubito termo – contraíble (protege la zona del empalme).

El empalme por fusión permite obtener atenuaciones entre 0.03 y 0.05 dB, sin embargo, esos valores pueden ser menores (llegando incluso a 0.00 dB en fibras monomodo) dependiendo del equipo que se utilice y de la experiencia del técnico empalmador. En el laboratorio se encuentra disponible una máquina fusionadora de última generación, misma que se revisa a continuación.

➤ Empalmadora por fusión FUJIKURA 12S ^[99] ^[100] ^[101]

La fusionadora Fujikura 12S (Figura 4.45) es una máquina portátil que permite ejecutar hasta 100 empalmes (incluyendo el calentamiento de los tubitos termocontraíbles) con una sola carga de batería. Trae como accesorio la cortadora de precisión CT-30, misma que posee un disco de corte de 16 posiciones que permite realizar 48000 cortes de una fibra óptica antes de ser sustituido.



Figura 4.45 Fusionadora Fujikura 12s y cortadora de precisión CT-30 ^[99] ^[100]

El kit completo incluye dos pares de porta fibras de 250 μm y 900 μm (Figura 4.46), las cuales se utilizan tanto en la cortadora de fibras como en la máquina fusionadora.



Figura 4.46 Portador de fibras Fujikura (250 μm y 900 μm)

4.4.4.2 Conectorización

Los conectores constituyen uno de los elementos más importantes dentro del grupo de los dispositivos pasivos que forman un sistema de comunicaciones ópticos. Su tarea es permitir el alineamiento y unión temporal de dos fibras entre sí, manteniendo las mejores condiciones ópticas para que la transmisión de la luz sea eficiente y las pérdidas mínimas. Los conectores para fibra óptica en general se componen de cinco partes (Figura 4.47): manguito o bota, cuerpo del conector (plástico o metal), tubo de crimpado, férula (cerámica) y tapón de férula.



Figura 4.47 Partes de un conector óptico [36] [38]

➤ Conector pre-pulido Fujikura SC-SF-SM-20/30 [132]

Este conector posee una férula pre-pulida en fábrica, no utiliza productos adhesivos y elimina el uso de herramientas crimpadoras. Su estructura interna se muestra en la Figura 4.48a y sus componentes se observan en la Figura 4.48b.

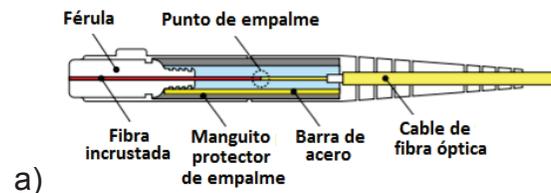




Figura 4.48 a) Estructura interna del conector prepulido y **b)** componentes del conector prepulido

4.4.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Antes de iniciar con el proceso de empalme o conectorización de fibra óptica, es importante recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- ✓ Considerar que los trabajos de conectorización y elaboración de empalmes requieren un alto grado de asepsia para obtener resultados adecuados.
- ✓ Mantener las mesas de trabajo perfectamente ordenadas y limpias;
- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
- ✓ No se debe manipular ni alterar la configuración de los equipos a menos que el instructor indique lo contrario.
- ✓ Para realizar cortes de cable y desprendimiento de chaqueta, es necesario utilizar guantes resistentes para evitar accidentes, ya sea por mala maniobra de las herramientas o por manipulación incorrecta de los desechos (elementos de refuerzo) de los cables de fibra óptica;
- ✓ Para trabajar con hilos de fibra óptica, se debe utilizar gafas y guantes de látex, además, se debe considerar que los trozos de fibra óptica pueden volar fácilmente por lo que se recomienda la utilización de mascarillas;
- ✓ Por último, se recomienda utilizar las herramientas adecuadas para cada tarea, procurando mantenerlas siempre en óptimas condiciones.

Además, es necesario disponer de las herramientas y accesorios de limpieza presentados en las figuras 4.49 y 4.50.



Figura 4.49 Herramientas para preparar un cable de fibra óptica: tijeras para kevlar, pelador de revestimientos y buffer, alicate de corte y navaja multiuso



Figura 4.50 Paño impregnado con sustancia para remover gel, paño seco anti pelusa y alcohol isopropílico

4.4.5.1 Procedimiento para elaborar un empalme de fibra óptica por fusión

Para esta parte de la práctica se utiliza la fibra óptica monomodo número 1 (hilo azul del buffer azul) de un cable para exteriores de tipo ADSS de 48 hilos y un pigtail monomodo con conector SC/UPC (Figura 4.51).

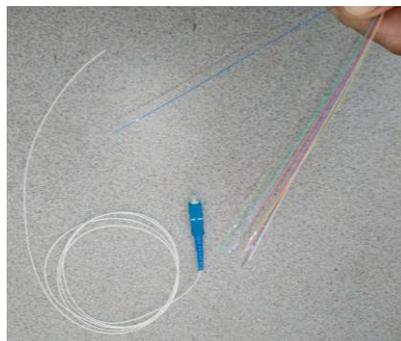
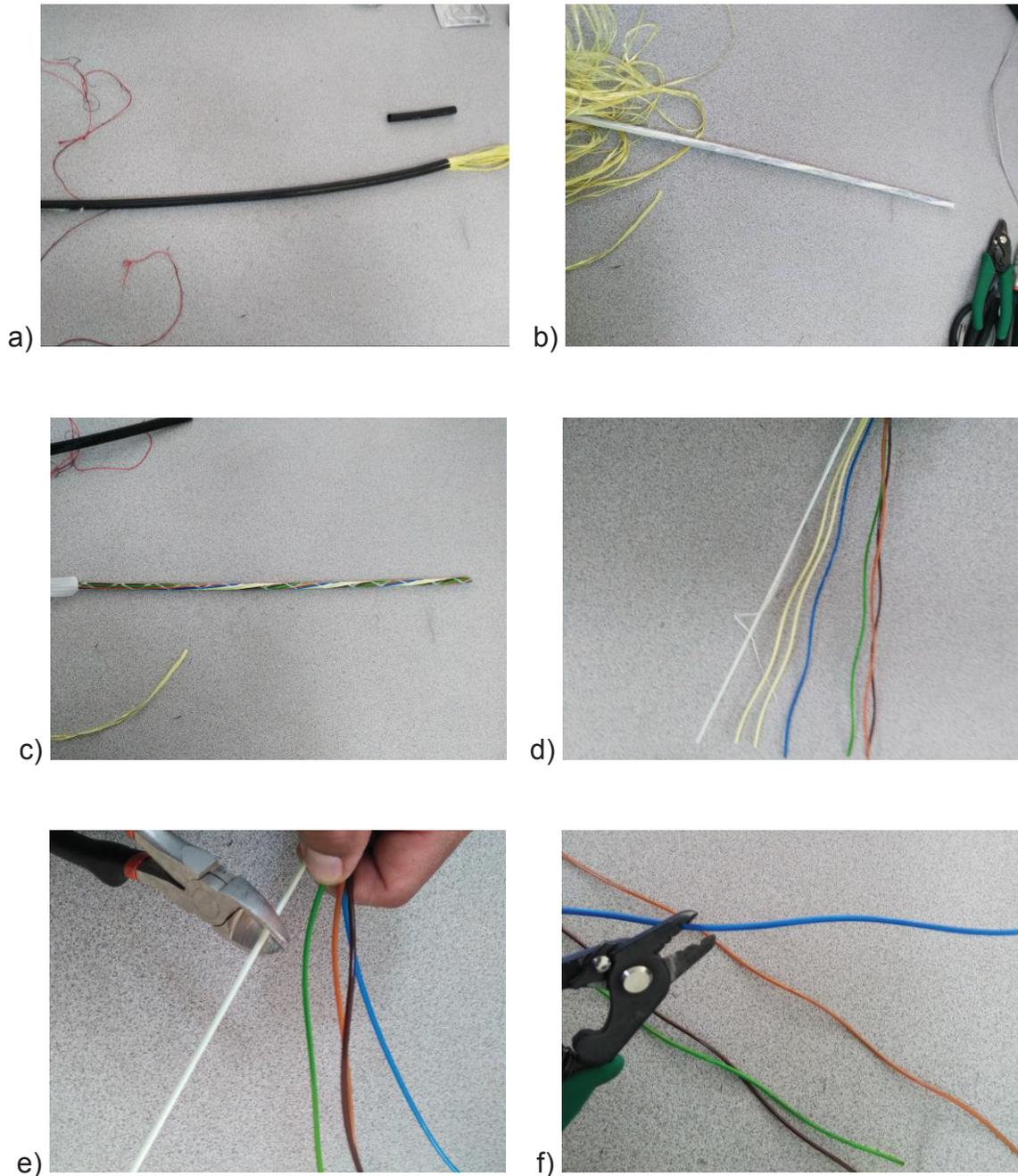


Figura 4.51 Fibra número uno (hilo azul del buffer azul) y pigtail

- 1) **Preparación del cable:** para poder utilizar una fibra óptica, es necesario retirar todas las protecciones que posee el cable y quitar los recubrimientos primarios (si tuviera más de uno) de tal manera que se tenga al menos 3 cm de fibra totalmente desnuda. Para dicho propósito se utilizarán las herramientas adecuadas y los accesorios que ayudan a eliminar el gel hidrófugo y otras impurezas que se puedan encontrar en la fibra óptica. En las imágenes de la Figura 4.52, se muestran los pasos a seguir:



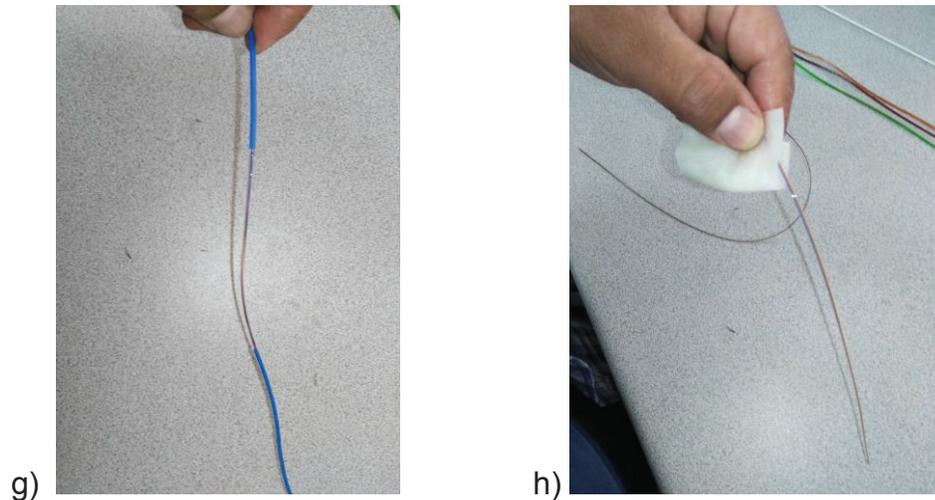


Figura 4.52 a) corte de chaqueta utilizando hilos de rasgado, b) retiro de kevlar y cinta de polietileno, c) retiro de cintas de sujeción, d) destrenzado, e) corte de elemento de refuerzo, f) y g) retiro de buffer y h) limpieza con sustancia quita gel

Cuando la fibra óptica no tenga residuos de grasa o gel, se coloca el manguito termo contraíble y por último se retira el recubrimiento primario (Figura 4.53). En este momento, la fibra está lista para limpiar y llevar a la cortadora de precisión.

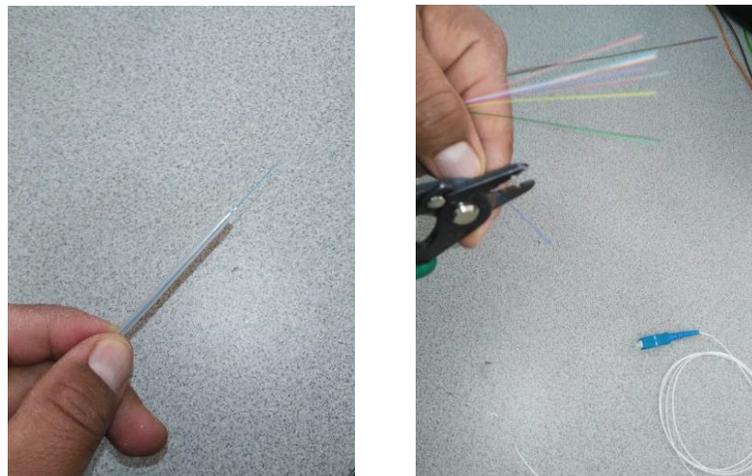


Figura 4.53 a) colocación de manguito termo contraíble y b) retiro de revestimiento primario

El pigtail utilizado tiene doble protección (una capa muy fina de silicona de alrededor de 250 μm de diámetro y una segunda capa de alrededor de 900 μm de diámetro), por tanto, es necesario retirar ambas para utilizar la fibra óptica. En la Figura 4.54 se muestra la forma de preparar un pigtail.

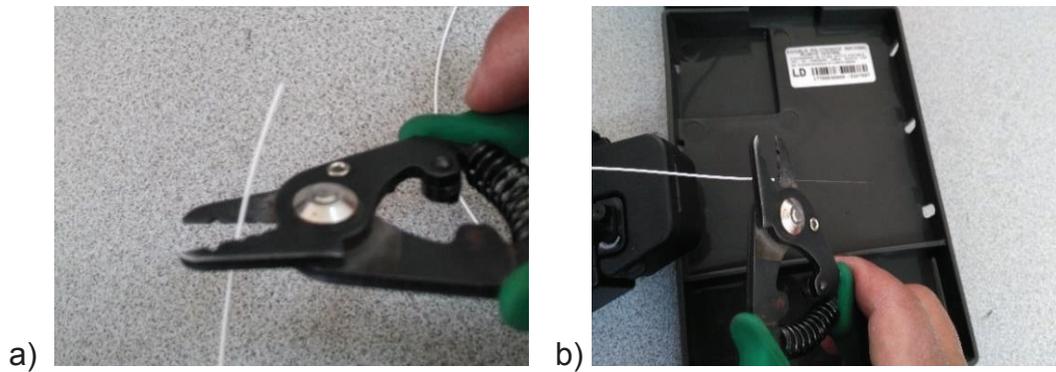


Figura 4.54 a) retiro de la protección primaria gruesa y b) retiro de la protección primaria fina

2) **Limpieza y corte de la fibra óptica:** una vez que las fibras están completamente desnudas, se colocan en el dispositivo portador (Figura 4.55a) según el diámetro de la protección primaria al que corresponda (250 μm o 900 μm). Luego, utilizando un paño impregnado de alcohol isopropílico (Figura 4.55b) se frota al menos dos veces la fibra para eliminar cualquier tipo de contaminación.

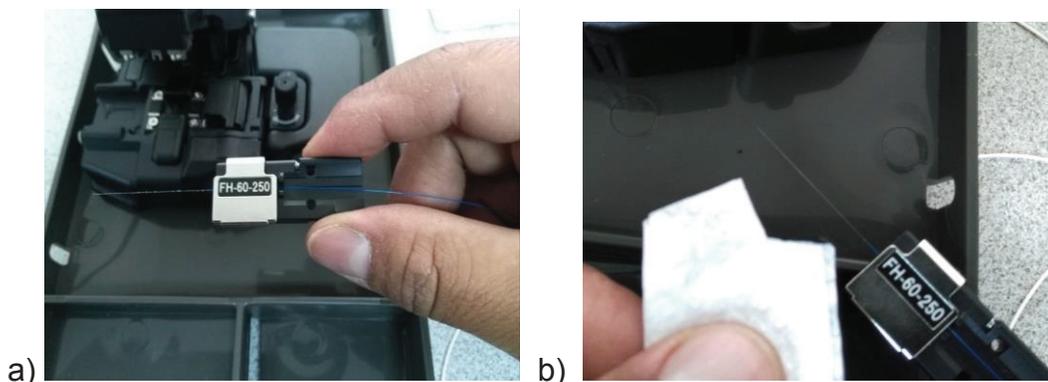


Figura 4.55 a) Colocación de la fibra en el dispositivo portador y b) limpieza de la fibra desnuda

Antes de colocar la fibra en la máquina cortadora, se debe presionar el botón deslizante que acciona el mecanismo de corte (Figura 4.56a); luego se coloca el porta fibra en el lugar respectivo (Figura 4.56b) y se presiona la palanca de corte para finalizar el proceso (Figura 4.56c). La máquina tiene un mecanismo que lleva el residuo de la fibra cortada al depósito de desechos; algunas veces será necesario girar la perilla para llevar el residuo al depósito de desechos.

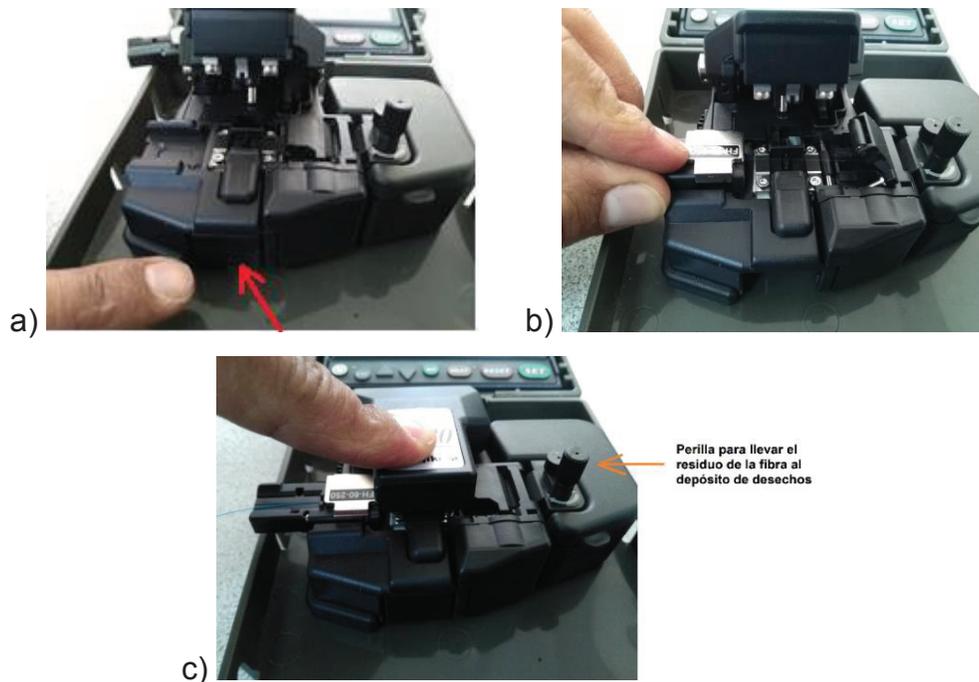


Figura 4.56 a) activación de mecanismo de corte, b) colocación de porta fibra en la cortadora y c) ejecución de corte de fibra

Actividad 1: realice el proceso de limpieza y corte del pigtail.

3) Enfrentamiento y alineación: luego de realizado el corte, se traslada el dispositivo portador de fibra a la máquina fusionadora y se coloca en el espacio respectivo (Figura 4.57a). El traslado de la fibra debe realizarse con mucho cuidado, ya que si la punta roza o choca con otra superficie, podría contaminarse o dañar el corte, lo que obliga a repetir los pasos 1 y 2. Cuando las fibras estén en su lugar, se cierra la tapa de la máquina, para iniciar la alineación y enfrentamiento (Figura 4.57b).

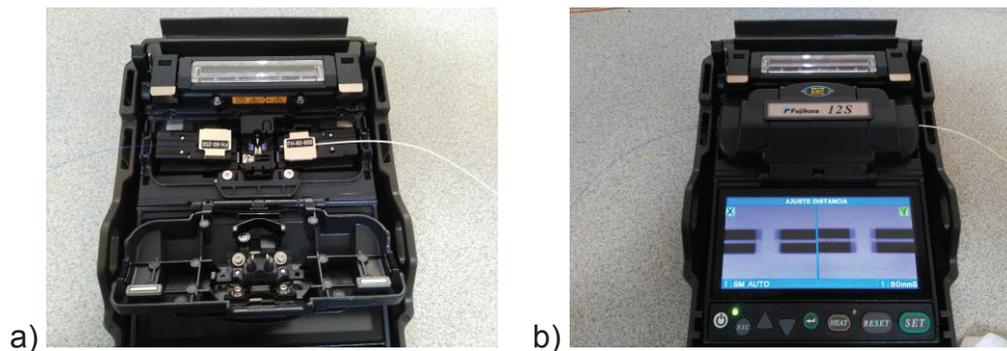


Figura 4.57 a) colocación de porta fibras en la fusionadora y b) alineación y enfrentamiento de las fibras

- 4) **Fusión:** cuando las fibras están alineadas y enfrentadas, la máquina empalmadora emite un arco eléctrico que eleva la temperatura a un nivel suficiente para provocar la fusión de las fibras (Figura 4.58).



Figura 4.58 Fusión de las fibras ópticas

- 5) **Verificación del empalme:** una vez que haya terminado la fusión, la máquina aplica una curvatura a una de las fibras ópticas para inyectar un haz de luz, el cual es utilizado para evaluar de manera aproximada la pérdida producida en el empalme (Figura 4.59).



Figura 4.59 Evaluación de pérdidas en el empalme

- 6) **Protección del empalme:** cuando el análisis de pérdidas finalice, la máquina emite una señal sonora indicando que se puede levantar la tapa y extraer la fibra fusionada; si el valor de la pérdida producida en el empalme sobrepasa el nivel permitido (generalmente 0.1 dB), será necesario repetir el proceso de empalme desde el numeral 1, caso contrario, se lleva el manguito a la zona de empalme (Figura 4.60a) y se introduce en el calefactor. Para iniciar el calentamiento es necesario presionar la tecla "HEAT" (Figura 4.60b) y luego de un tiempo predefinido (que depende del tamaño del manguito) el horno se apaga y una

alarma sonora indica que puede retirarse el manguito y ubicarla en la ranura de enfriamiento (Figura 4.60c). El empalme está terminado.

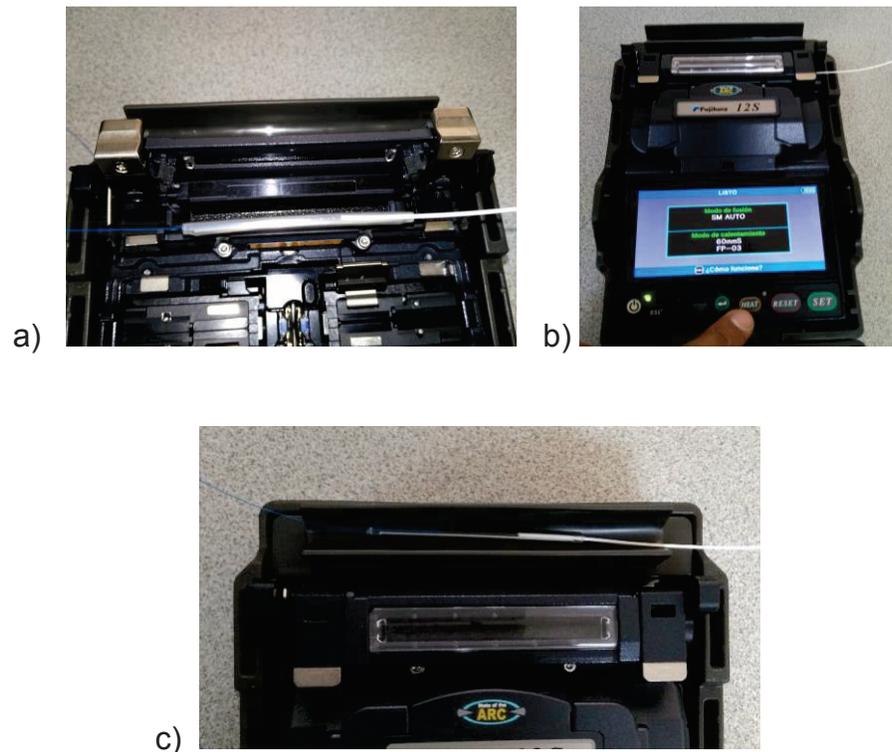


Figura 4.60 a) Ubicación del manguito en la zona del empalme, b) inicio del calentamiento del manguito y c) colocación del tubito en la ranura de enfriamiento

4.4.5.2 Proceso de conectorización de fibra óptica

Para conectorizar un pigtail, se utiliza un conector pre pulido de fábrica “Fujikura SC-SF-SM-20/30” (Figura 4.61). Este conector incluye un pequeño tramo de fibra instalada en la férula, por lo que el trabajo se limita a empalmar esa fibra con el pigtail. Las herramientas que se requieren son básicamente las mismas que se utilizaron para elaborar el empalme por fusión. A continuación se detalla el procedimiento a seguir:



Figura 4.61 Conectorización de un pigtail

Nota: manipule con mucha precaución el dispositivo, ya que la férula contiene un tramo corto de fibra óptica que puede romperse dejando al conector inservible.

- 1) Corte el *patchcord* FC/PC por la mitad, utilice uno de los segmentos para conectorizar. Coloque la bota del conector en el cable (Figura 4.62).

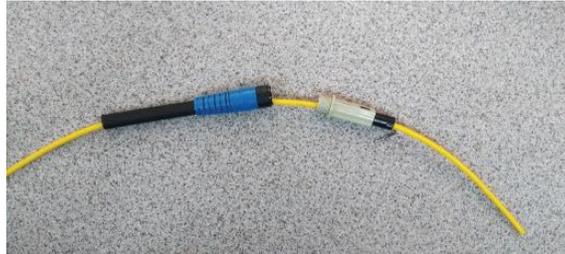


Figura 4.62 Colocación de la bota y dispositivo de fijación con rosca

- 2) Marque 90 mm en el pigtail y con la herramienta respectiva retire el recubrimiento secundario (Figura 4.63a), luego marque en 30 mm y quite el recubrimiento primario hasta dicha marca.

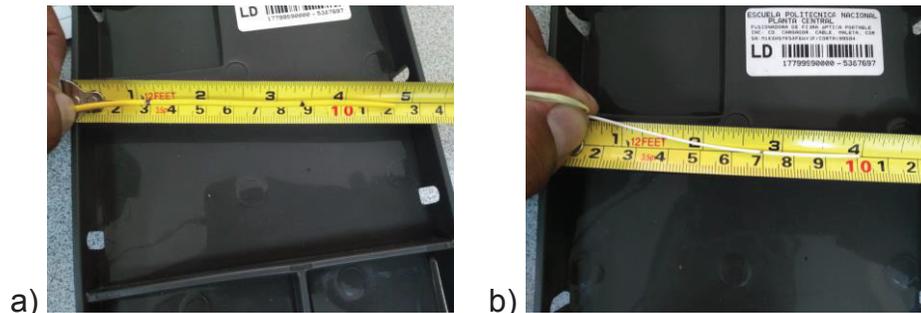


Figura 4.63 Retiro de recubrimientos de la fibra óptica

- 3) Introducir el tubito termocontraíble, colocar la fibra en el dispositivo portador de 900 μm (Figura 4.64a), limpiar y cortar (Figura 4.64b). Verificar que los hilos de kevlar queden fuera de la cortadora.

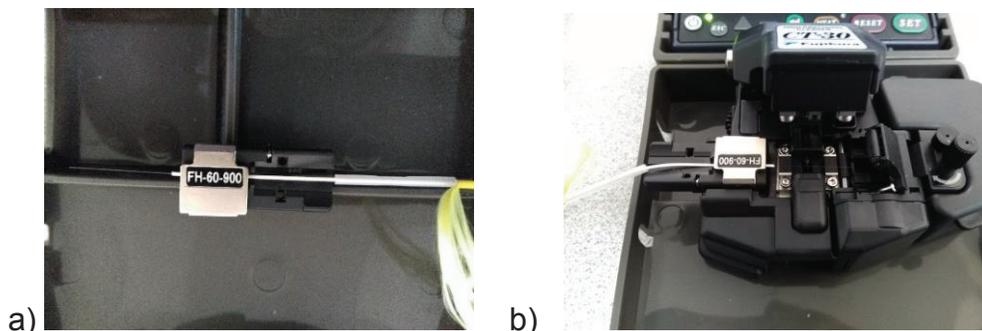


Figura 4.64 a) fibra con tubillo en porta fibra de 900 μm y b) corte de fibra

- 4) Luego de realizado el corte, se lleva la fibra a la fusionadora para empalmar con la fibra que se encuentra incrustada en la férula del conector (Figura 4.65a). Una vez que haya finalizado el empalme, coloque el tubillo de protección como se muestra en la Figura 4.65b y lleve al horno para calentarlo.

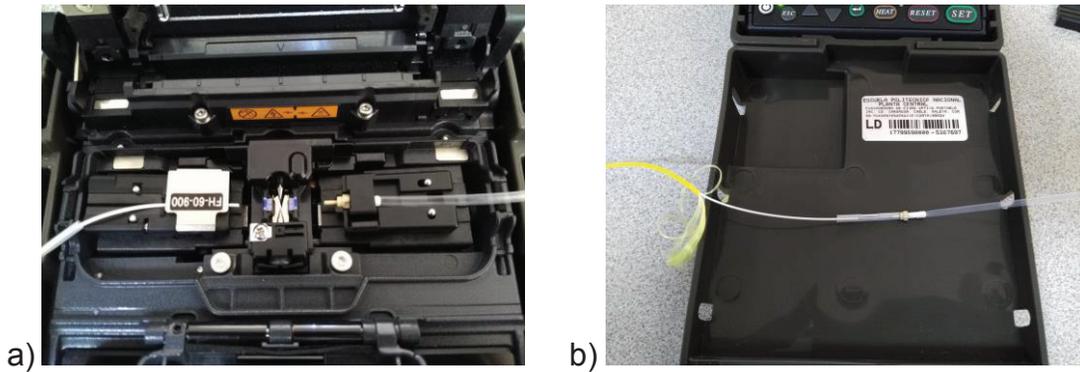


Figura 4.65 a) fusión de pigtail con tramo de fibra incrustada en la férula y b) colocación del tubillo de protección

- 5) Para terminar con el proceso de empalme, la férula debe introducirse en el dispositivo de fijación y alineamiento; luego, se asegura la bota y se retira la cubierta de la férula para colocar el acoplamiento (Figura 4.66a). Por último, es necesario cortar los hilos de kevlar sobrantes y verificar que el cuerpo del conector quede correctamente fijado (Figura 4.66b).

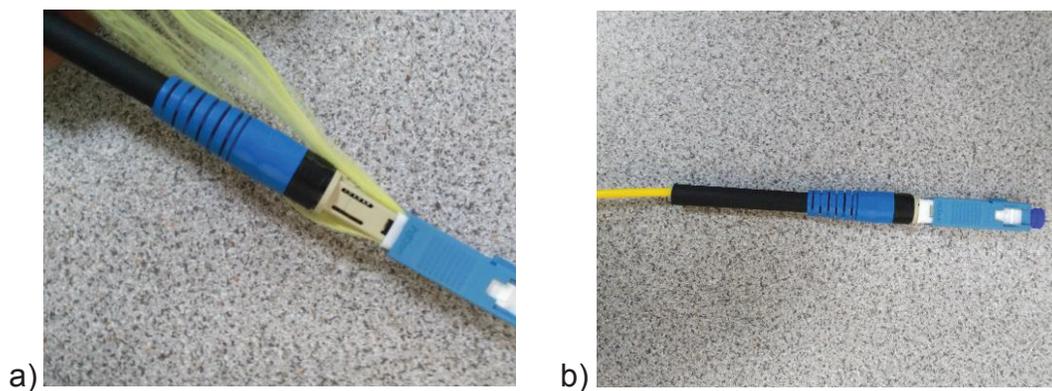


Figura 4.66 a) fijación de bota y acoplamiento y b) conector instalado

Actividad 2: implemente la red mostrada en las figuras 4.67 y 4.68, conecte al OTDR y utilizando el generador de luz visible, verifique el estado del empalme realizado y del conector instalado.



Figura 4.67 Red para probar el empalme de fibra óptica

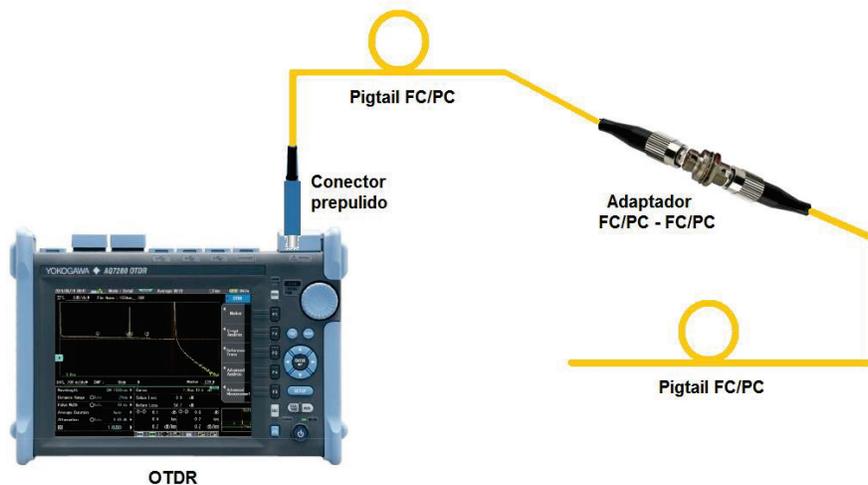


Figura 4.68 Red para probar el conector SC/UPC prepulido

4.4.6 INFORME

- 1) Utilizar el cable para exteriores de tipo ADSS preparado en la “actividad 1” para construir una tabla de identificación de hilos en función de sus colores y del color del buffer respectivo.
- 2) ¿Es confiable la información de pérdida de potencia por empalme que presenta la máquina empalmadora? Si o no, explicar.
- 3) Investigar dos procesos de conectorización diferentes al realizado en esta práctica.
- 4) Conclusiones y recomendaciones.

4.5 PRÁCTICA # 5

4.5.1 TEMA: MEDICIÓN DE POTENCIAS ÓPTICAS

4.5.2 OBJETIVOS

- 1) Conocer los equipos disponibles en laboratorio para realizar medición de potencias;
- 2) Aprender los procedimientos más adecuados para medir potencias ópticas;
- 3) Medir los valores de potencia de las señales generadas por fuentes ópticas;
- 4) Evaluar los valores típicos de pérdidas de potencia por conectores, empalmes, splitters y tramos de fibra óptica.
- 5) Caracterizar enlaces de fibra óptica simples.

4.5.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH;
- ✓ Medidor de potencia óptica – YOKOGAWA AQ2180;
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ Kit de simulación de redes PON (FTTX);
- ✓ *Patchcord* FO simplex monomodo SC/UPC – SC/APC;
- ✓ *Patchcord* FO simplex monomodo SC/UPC – FC/PC;
- ✓ Adaptadores SC/UPC – SC/UPC, FC/PC – FC/PC y SC/APC – SC/APC;
- ✓ Atenuadores fijos de 5 dB SC y FC.

4.5.4 MARCO TEÓRICO

4.5.4.1 Atenuación ^[3]

La atenuación del cable es el factor fundamental que limita el rendimiento de una fibra óptica, ya que disminuye la potencia de la señal en proporción inversa a su longitud. El valor de atenuación está directamente relacionado con la ventana (longitud de onda) de trabajo. Tradicionalmente existen tres ventanas principales en las que se presenta baja atenuación, y en donde los transmisores y receptores son más eficientes. Además, existen dos ventanas que se consideran como aptas

para transmisión con ciertos tipos de fibra óptica. Las ventanas de trabajo para fibra óptica se presentan en la Tabla 4.18.

Ventana	Banda	Rango de Longitud de Onda [nm]
Primera		820 - 880
Segunda	O (Original)	1260 - 1360
	E (Extended)	1360 - 1460
Quinta	S (Short)	1460 - 1530
Tercera	C (Conventional)	1530 - 1565
Cuarta	L (Long)	1565 - 1625
	U (Ultralong)	1625 - 1675

Tabla 4.18 Ventanas de operación de la fibra óptica ^[1]

En la Figura 4.69 se muestra la curva de atenuación de una fibra óptica típica de silicio en la que se pueden destacar las siguientes características:

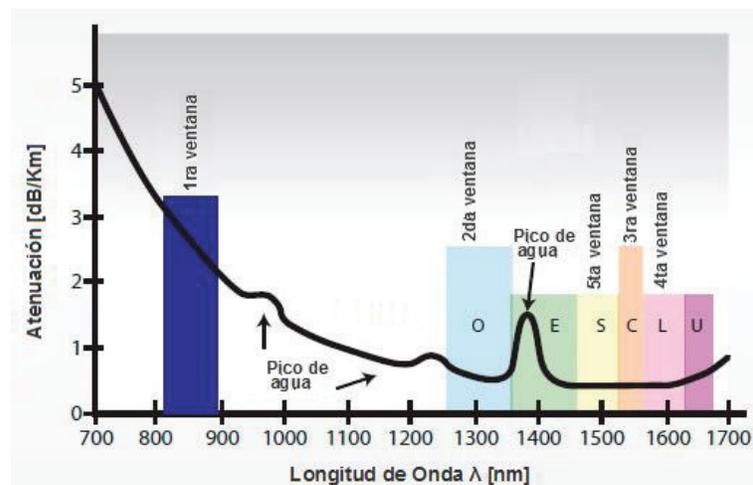


Figura 4.69 Ventanas de transmisión de la fibra óptica ^[1]

- ✓ En ciertas zonas, la atenuación es mínima (850 nm, 1330 nm, 1550 nm y 1625 nm). Estas son óptimas para el trabajo con fibras ópticas;
- ✓ Por arriba de 1625 nm la atenuación tiende a aumentar debido a las pérdidas provocadas por la absorción infrarroja;
- ✓ Existen picos de absorción asociados al ion hidroxilo (OH⁻). Estos aparecen por impurezas e imperfecciones originadas durante el proceso de fabricación de la fibra óptica; a 1390 nm se encuentra el pico más grande. Sin embargo,

gracias a los avances tecnológicos se han podido mejorar los procesos de fabricación y desarrollar las fibras ópticas de tipo LWP (*Low Water Peak*) y ZWP (*Zero Water Peak*) que presentan reducciones significantes del pico de agua en la banda E (Figura 4.70).

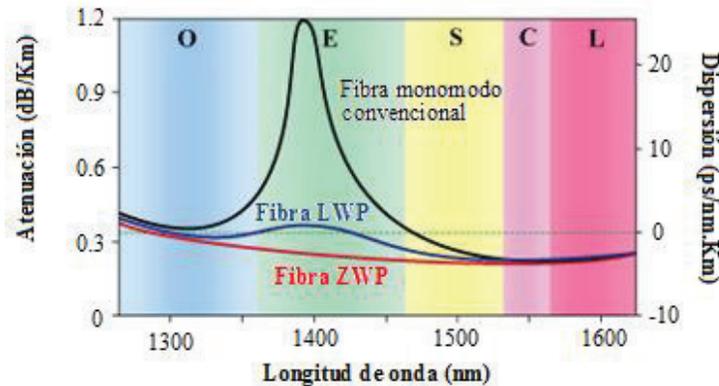


Figura 4.70 Corrección de atenuación en Banda E ^[1]

En general, las pérdidas producidas en una fibra óptica se pueden clasificar como pérdidas intrínsecas y extrínsecas.

- **Pérdidas intrínsecas:** se originan durante el proceso de fabricación de la fibra óptica, es decir que no se pueden reducir o eliminar de manera simple. Se clasifican en:
 - ❖ **Pérdidas por absorción intrínseca:** son importantes por debajo de 800 nm y por encima de 1600 nm.
 - ❖ **Pérdidas por dispersión intrínseca:** se producen cuando el rayo de luz choca contra las impurezas o irregularidades existentes en el núcleo de la fibra óptica y se dispersa. Estas pérdidas pueden ser: de Rayleigh (cuando el diámetro de las impurezas son mucho menores que la longitud de onda de la señal óptica transmitida), o de Mie (cuando las no homogeneidades sonde tamaño similar a la longitud de onda de la señal transmitida).
- **Pérdidas extrínsecas:** se originan debido a defectos de fabricación y por errores producidos durante la instalación, conectorización o ejecución de

empalmes de la fibra óptica. Este tipo de pérdidas pueden reducirse o eliminarse de forma relativamente simple y pueden ser de varios tipos:

- ❖ **Pérdidas debido a impurezas:** generalmente se originan por impurezas metálicas (hierro, cobalto, cromo y níquel); son independientes de la longitud de onda y pueden minimizarse aplicando correctivos durante la fabricación de la fibra óptica.
- ❖ **Pérdidas por curvaturas:** las curvaturas producen pérdidas debido a que algunos rayos de luz no cumplen con el principio de reflexión total interna. Se reducen utilizando procedimientos adecuados en la instalación de la fibra óptica.
- ❖ **Pérdidas por macro curvaturas:** varían de forma exponencial con el radio de la curvatura y pueden ser despreciables hasta que alcance un valor crítico, el cual se establece considerando el radio de curvatura mínimo que puede soportar el cable de fibra óptica (10 a 12 veces el diámetro exterior, depende del fabricante). Ver Figura 4.71a.
- ❖ **Pérdidas por micro curvaturas:** se producen por irregularidades geométricas entre el núcleo y el manto, por fluctuaciones del diámetro o por curvaturas del eje de la fibra. También se originan por cambios de temperatura, tensiones excesivas y por torsiones provocadas al momento del tendido del cable. Estas pérdidas pueden reducirse aumentando la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y manto, incrementando la sección de la fibra o utilizando elementos que ayuden a absorber los esfuerzos que soporta la fibra óptica.

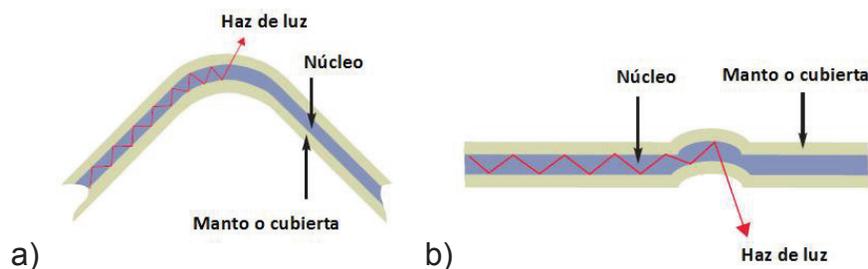


Figura 4.71 a) Macrocurvatura y b) Microcurvatura ^[9]

4.5.4.2 Equipos de medición de potencia óptica y Fuentes ópticas

Los equipos disponibles en el laboratorio para medir potencia óptica son:

➤ **OPTICAL POWER METER (OPM) – YOKOGAWA AQ2180** [95]

El medidor de potencia óptica (OPM - *Optical Power Meter*) AQ2180 (Figura 4.72) posee todas las funciones necesarias para medir las pérdidas producidas en un enlace con fibra óptica. Trabaja con un detector fotodiodo de Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs) y opera a 850/1300/1310/1490/1550/1625/1650 nm.



Figura 4.72 Medidor de potencia óptica YOKOGAWA – AQ2180 [95]

➤ **OPM (*Optical Power Meter*) y fuente óptica incluidos en el OTDR YOKOGAWA AQ7283**

El OTDR YOKOGAWA AQ7283 (Figura 4.73) incluye un módulo que permite medir la potencia óptica de una señal transmitida (potencia absoluta medida en dBm o W) o la atenuación en un segmento de una red (medida en dB), el cual opera con la ayuda de la aplicación "OPM" .

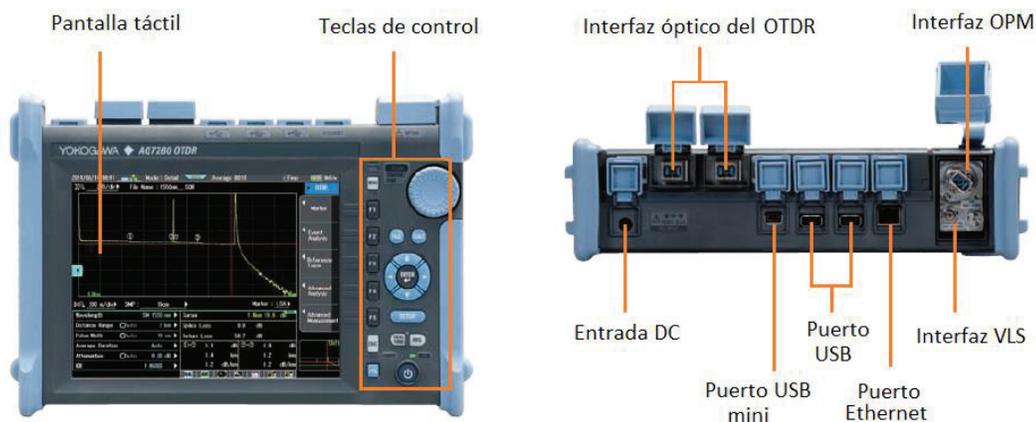


Figura 4.73 OTDR YOKOGAWA AQ7283 [90]

El OTDR YOKOGAWA AQ7283 ofrece además, la posibilidad de utilizarlo como fuente de luz que emite señales continuas y moduladas (con diferentes frecuencias) a distintas longitudes de onda a través de tres puertos diferentes: un puerto de 1625 nm, un puerto dual de 1310 nm y 1550 nm y un puerto de 650 nm. Dichos puertos se operan con la ayuda de dos aplicaciones:

 → Fuente de luz para 1310 nm, 1550 nm y 1625 nm; y

 → Fuente de luz visible para 650 nm.

➤ Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH ^[105] ^[106]

Este equipo portátil (Figura 4.74) posee una fuente de luz láser de Clase 1, opera en 3 longitudes de onda distintas a través de un solo puerto (1310 nm, 1490 nm y 1550 nm). La señal puede transmitirse con una longitud de onda individual, en modo continuo (CW) o modulado en un tono seleccionado por el usuario. Además, puede transmitir señales en modo Wave ID (transmisión de dobles o triples longitudes de onda en un orden secuencial).



Figura 4.74 Fuente de luz NOYES OLS7-FTTH

4.5.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Antes de iniciar con la práctica, es importante recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- ✓ Mantener las mesas de trabajo perfectamente limpias y ordenadas;

- ✓ Verificar que cada fuente óptica posea información acerca de la Clase o grupo de riesgo al que pertenece la luz emitida.
- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
- ✓ No se debe manipular ni alterar la configuración de los equipos a menos que el Profesor indique lo contrario.
- ✓ La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por esto, no se debe observar directamente al extremo de una fibra o de un conector, tampoco se debe apuntar al rostro de otra persona con una fuente de luz láser.
- ✓ Luego de finalizar la sesión, todos los equipos, herramientas y accesorios deben colocarse en sus lugares de almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo deben desconectarse de la red eléctrica.

1) Medición de niveles de potencia en fuentes ópticas

Realice la limpieza de férulas en los puertos del módulo OPM (*Optical Power Meter*), del OTDR, de la fuente de luz OLS7 y de los *patchcords*.

Actividad 1: Implemente las redes mostradas en las figuras 4.75 y 4.76, y complete la información solicitada en la Tabla 4.19.

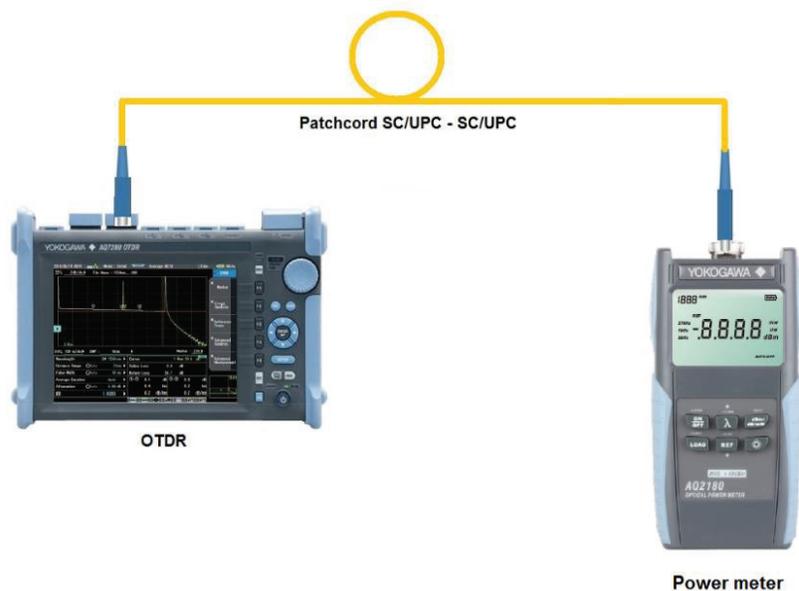


Figura 4.75 Medición de la potencia entregada por la fuente de luz incluida en el OTDR YOKOGAWA AQ7280

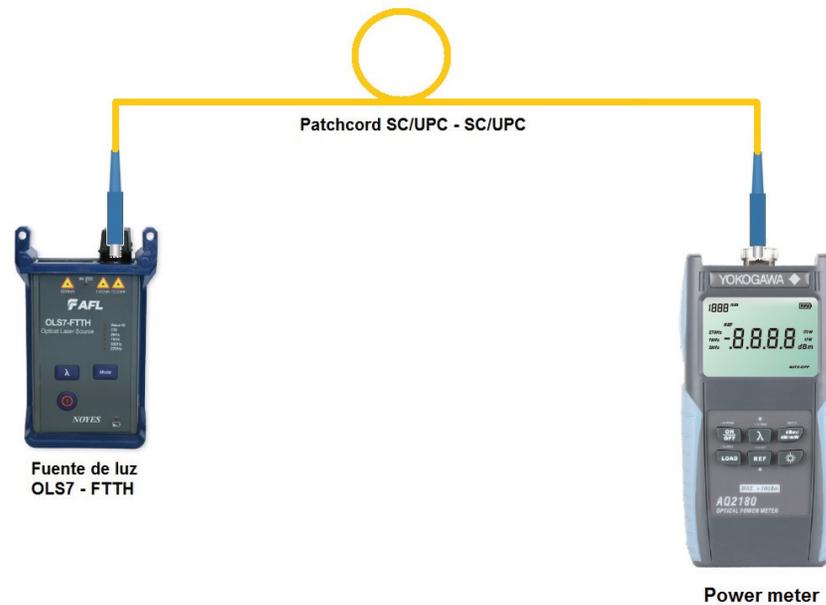


Figura 4.76 Medición de la potencia de la fuente de luz NOYES OLS7-FTTH

Equipo	Longitud de onda [nm]	Potencia medida [dBm]
Fuente incluida en el OTDR	1310	
	1550	
	1625	
Fuente de luz visible incluida en el OTDR	650	
Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH	1310	
	1490	
	1550	

Tabla 4.19 Medición de potencia en las fuentes del OTDR y OLS7

En la Figura 4.77 se muestran las interfaces que permiten operar y configurar los parámetros de las señales ópticas que emite el OTDR.

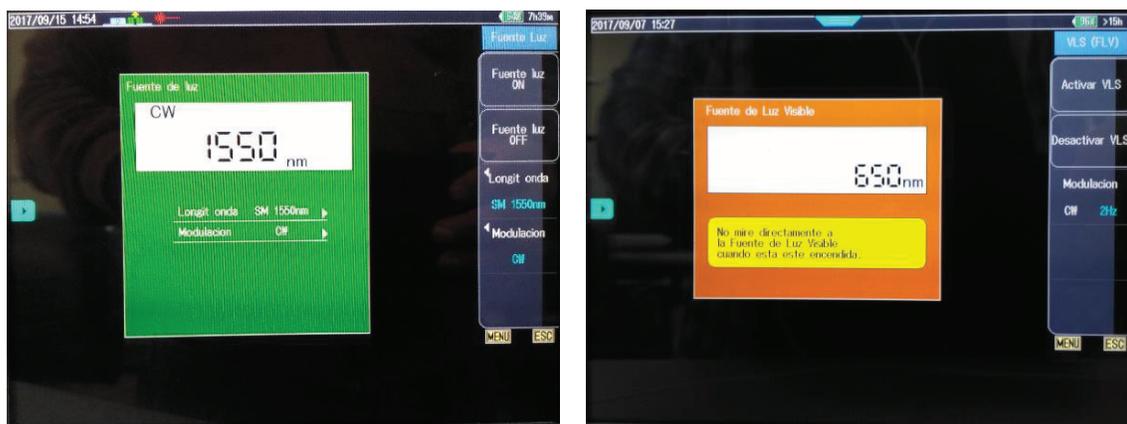


Figura 4.77 Interfaces para operar las fuentes de luz incluidas en el OTDR

2) Medición de atenuación en la fibra óptica y en los componentes de red.

En esta parte de la práctica se implementarán diferentes topologías de red utilizando el simulador PON, bobinas de fibra óptica de diferentes longitudes, atenuadores, adaptadores y *patchcords*. La atenuación de la red será la diferencia entre la potencia que entrega la fuente (medida en el numeral 1) y la potencia medida cuando están conectados los elementos de la red.

Actividad 2: implemente la red mostrada en la Figura 4.78 y complete la información solicitada en la Tabla 4.20.

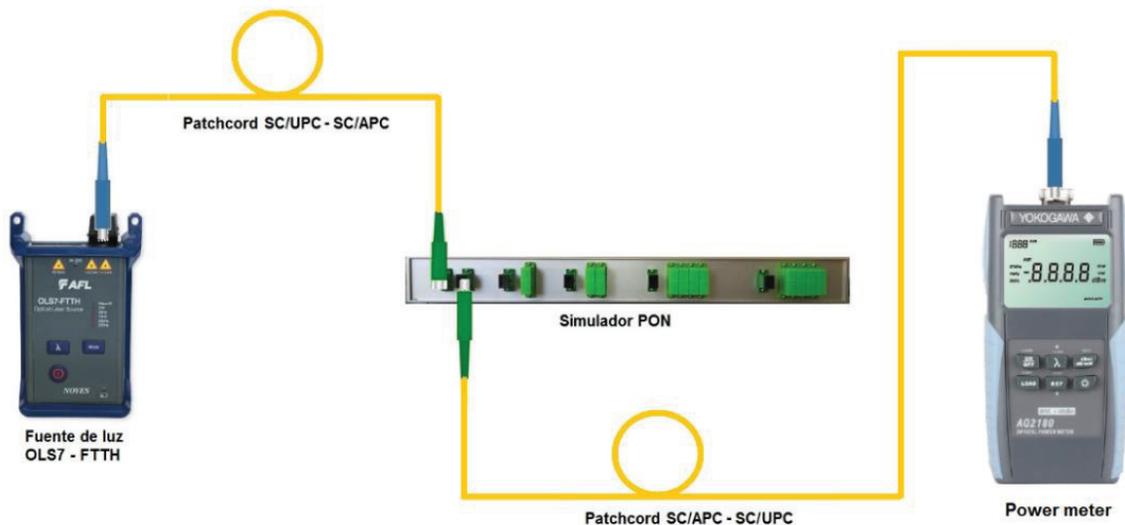


Figura 4.78 Medición de la atenuación del tramo de 4000 m incluido en el simulador PON

Longitud de onda [nm]	Potencia medida [dBm]
1310	
1550	
1625	

Tabla 4.20 Medición de la atenuación del tramo de FO de 4000 m incluido en el simulador PON

Actividad 3: Implemente la red mostrada en la Figura 4.79, varíe la conexión utilizando los splitters 1x2, 1x4 y 1x8. Complete la información solicitada en la Tabla 4.21, utilice dos longitudes de onda (1310 nm y 1550 nm).

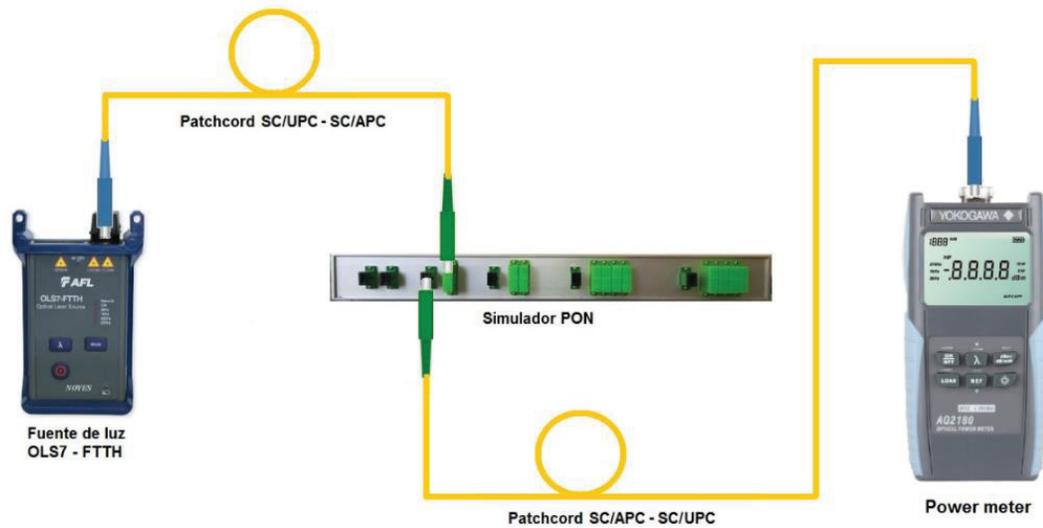


Figura 4.79 Medición de la atenuación producida en los splitters 1x2, 1x4 y 1x8

Longitud de onda [nm]	Potencia medida [dBm]		
	splitter 1x2	splitter 1x4	splitter 1x8
1310			
1550			

Tabla 4.21 Medición de la potencia de los splitters 1x2, 1x4 y 1x8 incluidos en el simulador PON

Actividad 4: implemente la red mostrada en la Figura 4.80. Utilice el módulo de medidor de potencia óptica del OTDR y la aplicación OPM para medir la potencia óptica a 1310 nm y 1550 nm. Complete la información solicitada en la Tabla 4.22.

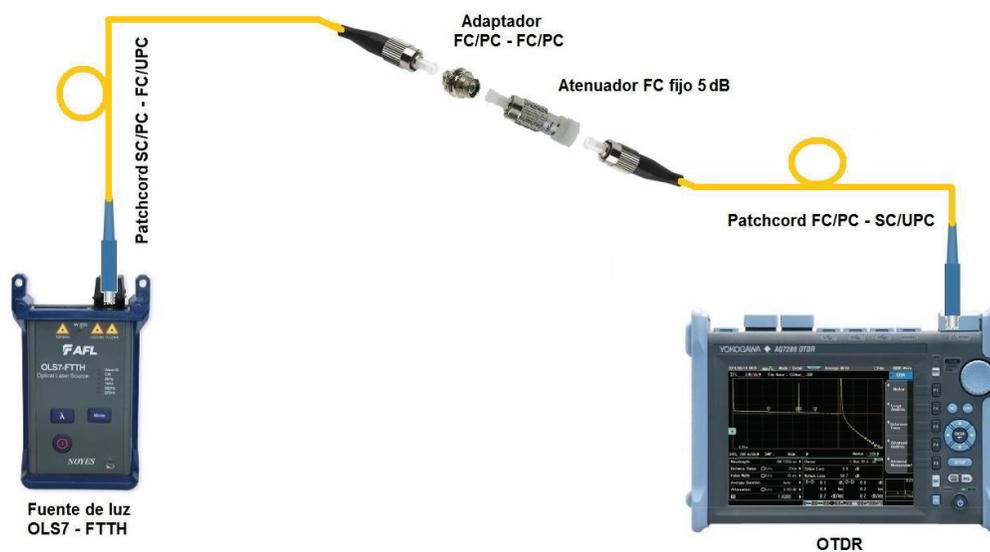


Figura 4.80 Red para verificar el valor del atenuador FC de 5 dB

Traza reflectométrica	Análisis de eventos

Tabla 4.24 Traza reflectométrica y análisis de eventos

Longitud de onda [nm]	Potencia medida [dBm]
1310	
1550	

Tabla 4.25 Medición de la pérdida de retorno en los adaptadores de la bobina de 4000 m del simulador PON

4.5.6 INFORME

- 1) Presente los resultados obtenidos en cada una de las actividades realizadas en la práctica.
- 2) Considerando la Actividad 1 realizada en el laboratorio, explique por qué difieren los valores de potencia medidos en diferentes longitudes de onda.
- 3) En base a la información obtenida y presentada en el numeral 1 de este informe, evalúe la atenuación de los componentes en las redes de las figuras 4.78, 4.79 y 4.80.
- 4) Analice los eventos encontrados en la traza de la red de la Figura 4.81 y evalúe las atenuaciones que producen cada uno de los componentes de la red. ¿Se puede apreciar un evento reflexivo provocado por el adaptador SC-UPC – SC/UPC? Explique su respuesta.
- 5) Utilizando el software Optisystem, simule la red de la Figura 4.81 utilizando una fuente óptica de 0 dBm a 1310 nm. Configure la red de acuerdo a los parámetros característicos determinados en el numeral 4 de este informe.
- 6) Conclusiones y recomendaciones.

4.6 PRÁCTICA # 6

4.6.1 TEMA: ANALIZADOR DE ESPECTROS ÓPTICOS OSA (*OPTICAL SPECTRUM ANALYZER*)

4.6.2 OBJETIVOS

- 1) Comprender el funcionamiento de un OSA;
- 2) Conocer la forma de operar el analizador de espectros óptico YOKOGAWA AQ6370D;
- 3) Analizar el espectro óptico los parámetros característicos de las fuentes de luz disponibles en el laboratorio;

4.6.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OSA YOKOGAWA AQ6370D;
- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Plataforma Multifunción OSICS, *Yenista Optics*;
- ✓ Fuente de Luz AFL NOYES OLS7-FTTH;
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ Un *patchcord* FO simplex monomodo FC/APC – FC/APC;
- ✓ Un *patchcord* FO simplex monomodo SC/UPC – FC/UPC;
- ✓ Adaptadores FC/PC – FC/PC.

4.6.4 MARCO TEÓRICO

4.6.4.1 Funcionamiento del OSA

Un OSA es un instrumento de precisión diseñado para medir y visualizar la distribución de la potencia de una fuente óptica durante un intervalo de longitud de onda específico. En la Figura 4.82 se muestra un diagrama de bloques simplificado del analizador de espectro óptico. En este se aprecia que la señal óptica ingresa a través de un filtro óptico sintonizable por longitud de onda (monocromador o interferómetro) que separa las componentes espectrales. Luego pasa al fotodetector que convierte la señal óptica en corriente eléctrica que es proporcional a la potencia de la luz incidente. Gracias a la acción del amplificador de

transimpedancia, la corriente del fotodetector se convierte en voltaje, mismo que es digitalizado en el bloque de conversión analógica - digital. Cualquier otro tipo de procesamiento de la señal, como la aplicación de factores de corrección, se realiza en el dominio digital.

En el eje vertical de la pantalla se muestra la señal como información de amplitud, mientras que un generador de señal rampa determina la ubicación horizontal haciendo un barrido de izquierda a derecha. La señal rampa también se utiliza para sintonizar en el filtro óptico la longitud de onda resonante que sea proporcional a la posición horizontal. El resultado final es una representación gráfica de la amplitud en función de la longitud de onda.

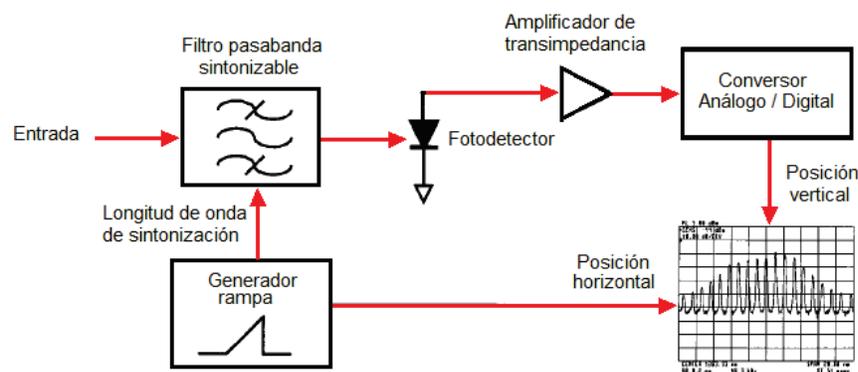


Figura 4.82 Diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectro óptico [133]

Algunas de las tareas que el OSA permite realizar son:

- ✓ Medir la relación señal/ruido óptica (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*) para conocer el rendimiento de una red WDM;
- ✓ Medición del espacio entre canales en una fibra óptica. Útil para conocer la posibilidad de incremento del número de canales y del ancho de banda total;
- ✓ Estimar los parámetros característicos de amplificadores ópticos;
- ✓ Analizar filtros ópticos (PK, BTM, WDM-PK, WDM-BTM);
- ✓ Analizar fuentes de luz láser tipo DFB y *Fabry - Perot*;

4.6.4.2 Operación del OSA [78]

El OSA YOKOGAWA AQ6370D (Figura 4.83) garantiza un buen desempeño cuando se cumplen ciertas recomendaciones en su operación, algunas de las cuales indican que el equipo debe estar encendido al menos una hora antes de

iniciar una medición, además, es necesario realizar una calibración de la longitud de onda y un ajuste de la alineación óptica.

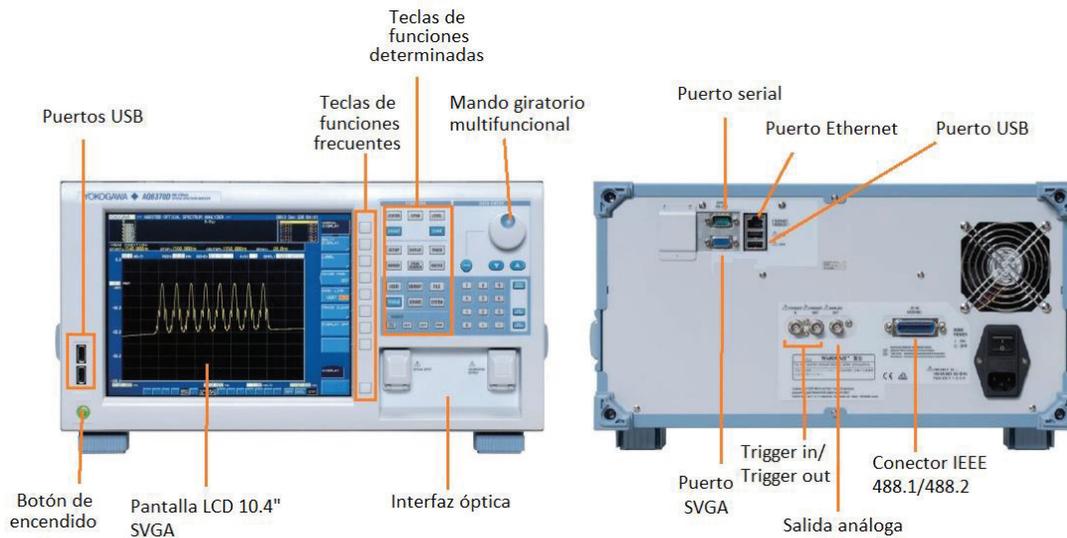


Figura 4.83 Analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6370D [78]

- ❖ **Calibración de la longitud de onda:** es necesario para garantizar precisión en la longitud de onda del instrumento. Para esto, realice la conexión de la Figura 4.84.

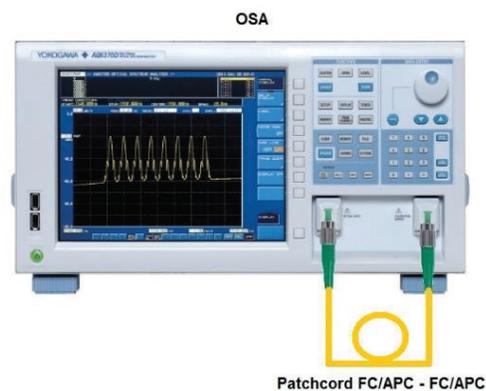


Figura 4.84 Calibración de la longitud de onda del OSA YOKOGAWA AQ6370D

La calibración de la longitud de onda se puede realizar tanto con una fuente de luz externa como con una fuente interna. En esta práctica se realizará la calibración con fuente interna. Para iniciar, presione la tecla "SYSTEM" del panel "FUNCTION", luego en el menú de funciones frecuentes escoja la opción "WL CALIBRATION" (Figura 4.84), seguidamente "BUILT IN SOURCE" y finalmente "EXECUTE". La calibración termina cuando aparece el mensaje "Wavelength Calibration is completed successfully" (Figura 4.85).

- ❖ **Alineación óptica:** siempre que el instrumento se haya movido o que la temperatura del entorno de operación haya cambiado, es necesario realizar un ajuste en la alineación óptica. Para ejecutar el proceso de alineación óptica, mantenga la conexión mostrada en la Figura 4.83 y siga el siguiente procedimiento: presione la tecla “SYSTEM” del panel “FUNCTION”, luego en el menú de funciones frecuentes (programables) escoja la opción “OPTICAL ALIGNMENT” (Figura 4.85) y finalmente “EXECUTE”. Espere a que aparezca el mensaje de finalización en pantalla.

Es importante mencionar que el OSA YOKOGAWA AQ6370D permite trabajar tanto con conectores de terminados APC como UPC, por defecto está configurado para operar con férulas APC.

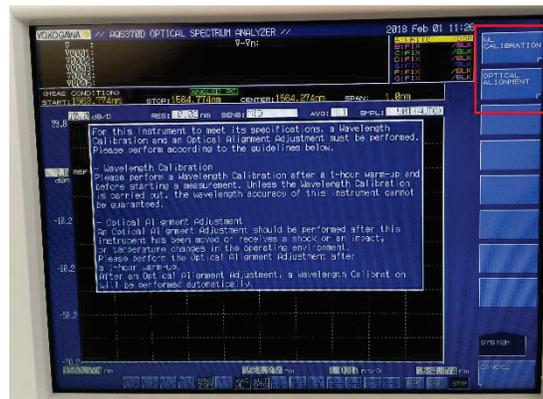


Figura 4.85 Calibración de longitud de onda y alineación óptica en el OSA

4.6.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Antes de iniciar la práctica, es necesario recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
- ✓ No modifique la configuración de los equipos sin previa autorización.
- ✓ La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por esto, evite observar directamente al extremo de una fibra o de un conector; tampoco apunte al rostro de otra persona con una fuente de luz láser.
- ✓ Verifique que las fuentes ópticas estén apagadas antes de realizar cualquier tipo de conexión.

- ✓ Al finalizar la sesión, debe colocar los equipos, herramientas y accesorios en los lugares destinados para su almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo, deben desconectarse de la red eléctrica.

1) Caracterización de la fuente óptica que se incluye en el OTDR

Configure el OSA para trabajar con conector FC/UPC. Realice lo siguiente:

- Presione la tecla “*SETUP*” del panel “*FUNCTION*”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “*MORE 1/2*” para desplegar más opciones y presione la tecla que corresponde a la opción “*FIBER CONNECTOR*” para seleccionar “*NORM*” (pulido PC).



Figura 4.86 Conexión para caracterizar la fuente óptica del OTDR

- Implemente la red mostrada en la Figura 4.86, encienda el OTDR e inicie la aplicación “Fuente de luz”. Configure la longitud de onda a 1550 nm con emisión de onda continua. Inicie la emisión utilizando “Fuente luz ON” ;
- En el OSA presione la tecla “*SWEEP*” del panel “*FUNCTION*”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “*AUTO*” para que el OSA ajuste los ejes de potencia y longitud de onda de forma automática.
- Ajuste la longitud de onda central y el intervalo de longitudes de onda para mejorar la visualización del espectro. Realice el siguiente procedimiento:
 - Para ajustar la longitud de onda central, presione la tecla “*CENTER*” del panel “*FUNCTION*”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “*PEAK CENTER*”;

- Para establecer el intervalo de longitudes de onda, presione la tecla “SPAN” del panel “FUNCTION”, luego en la ventana que se despliega en pantalla, digite 10 nm utilizando el teclado numérico (*DATA ENTRY*), finalmente presione la tecla “ μm / ENTER” para aceptar.
- Para analizar la potencia de la señal, realice lo siguiente: en el OSA presione la tecla “ANALYSIS” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “ANALYSIS 1”, seguidamente “POWER” y por último “ANALYSIS EXECUTE”. En la parte superior de la pantalla, se observará el valor de potencia medido (Figura 4.87).

Para guardar la imagen mostrada en la pantalla del OSA presione “FILE” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “ITEM SELECT”, “GRAPHICS”, “WRITE”. Seleccione el tipo de almacenamiento (interno o externo) “MEMORY EXT” y el tipo de archivo “FILE TYPE” (se sugiere BMP).

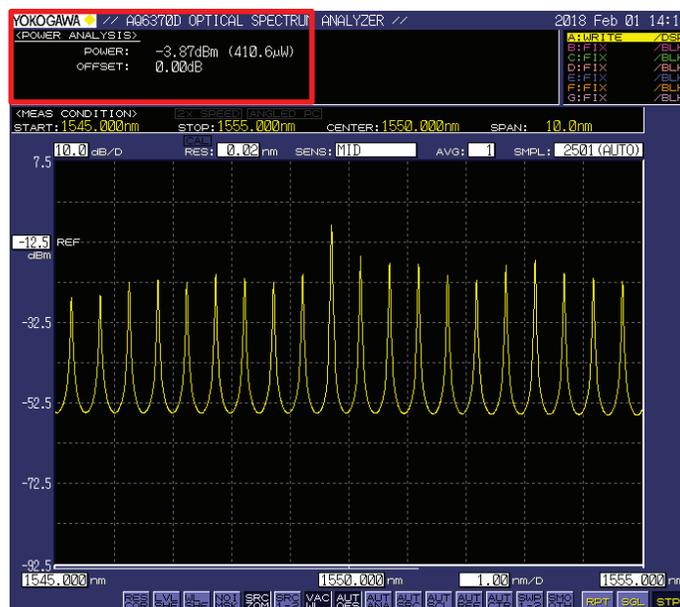


Figura 4.87 Análisis de potencia de la señal generada por el OTDR a 1550 nm

- Para conocer el ancho espectral de la señal utilice el método *THRESH* (se usa para obtener el ancho del espectro entre dos puntos que están por debajo del nivel máximo especificado por un parámetro que puede ser la longitud de onda

central, para esto realice el siguiente procedimiento: en el OSA presione la tecla “ANALYSIS” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “SPEC WIDTH”, seguidamente “THRESH” y por último “ANALYSIS EXECUTE THRESH”. En la parte superior de la pantalla (Figura 4.88), se observan los valores de ancho espectral ($\Delta\lambda$), longitud de onda central del ancho espectral (λ_c) y número de modos; además, se muestran los parámetros escogidos por defecto para el análisis (Tabla 4.26).

Parámetro	Valor por defecto	Rango de ajuste	Unidad	Descripción
<i>Thresh</i>	3.00	0.01 a 50.00	dB	Valor de umbral
<i>Thresh K</i>	1.00	1.00 a 10.00	--	Factor de multiplicación
<i>Mode FIT</i>	OFF	ON/OFF	--	Permite alinear la longitud de onda central con el pico del modo.

Tabla 4.26 Parámetros de cálculo del método *THRESH*



Figura 4.88 Análisis del ancho espectral de la señal generada por el OTDR

- El OSA YOKOGAWA AQ6370D permite realizar un análisis completo de la señal emitida por un láser de tipo *Fabry-Perot* mediante la herramienta “*FP-LD ANALYSIS*”. Para utilizar dicha función, realice el siguiente procedimiento: en el OSA presione la tecla “ANALYSIS” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “ANALYSIS 1”, seguidamente “FP - LD” y por último “ANALYSIS EXECUTE”. En la parte superior de la

pantalla (Figura 4.89), se observan: el valor de potencia óptica, el ancho espectral, la longitud de onda media y la longitud de onda del pico de la señal.

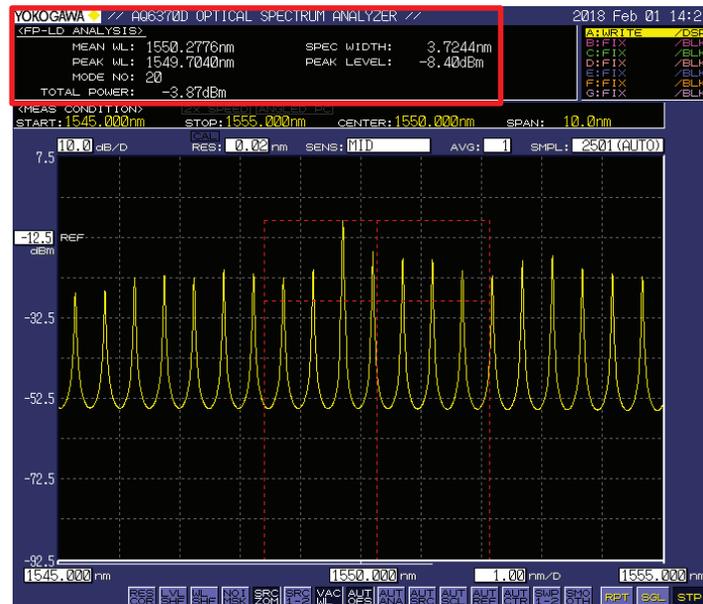


Figura 4.89 Análisis espectral de una fuente de tipo *Fabry - Perot* (OTDR)

Actividad 1: analice la señal emitida por el OTDR a 1310 nm. Con la ayuda del medidor de potencia óptica, mida la potencia de la señal y compare los resultados.

2) Caracterización de la fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH

Implemente la red mostrada en la Figura 4.90 para obtener el espectro de la fuente AFL NOYES OLS7-FTTH a 1310 nm en onda continua (CW).

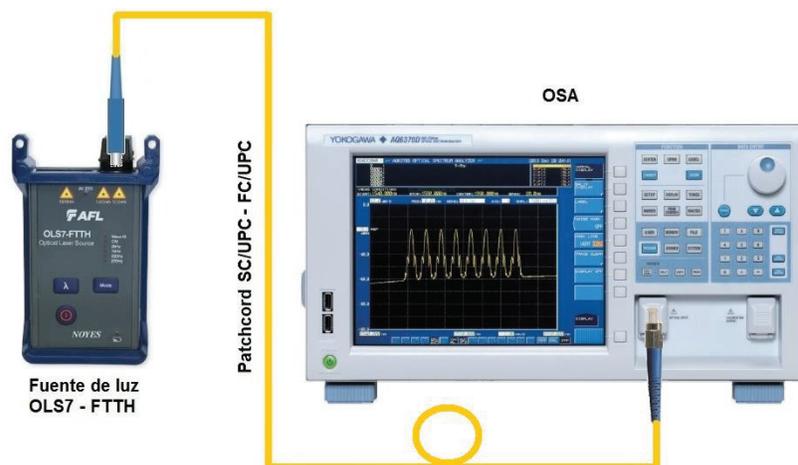


Figura 4.90 Conexión para caracterizar la fuente de luz *NOYES OLS7-FTTH*

- Encienda la fuente de luz. Para configurar el valor de longitud de onda, presione la tecla “λ” hasta que se encienda el led de la longitud de onda correspondiente (1310 nm). De la misma manera, presione la tecla “Mode” para seleccionar el modo de emisión (onda continua);
- En el OSA presione la tecla “SWEEP” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “AUTO” para que el OSA ajuste los ejes de potencia y longitud de onda de forma automática;
- Ajuste el gráfico a la longitud de onda central y el intervalo de longitudes de onda para mejorar la visualización del espectro;
- Realice el análisis completo de una fuente de tipo Fabry - Perot y guarde la imagen que se muestra en pantalla utilizando la extensión *BMP* (Figura 4.91).

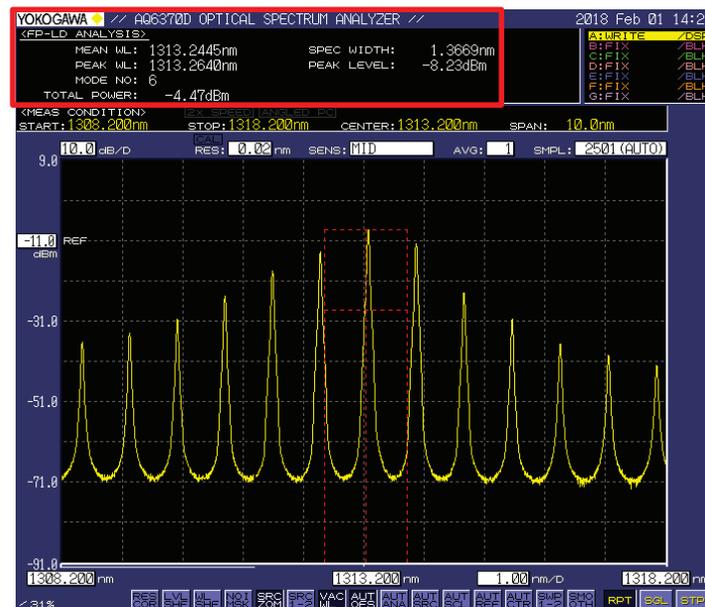


Figura 4.91 Análisis espectral de una fuente de tipo *Fabry - Perot* (AFL OLS7)

Actividad 2: Realice el análisis del espectro de la señal emitida por la fuente AFL OLS7 – FTTH a 1550 nm. Mida la potencia de la señal utilizando el medidor de potencia óptico y compare los resultados obtenidos.

3) Caracterización de la fuente de luz *TLS WDM SOURCE AG L-Band W*, que se incluye en la Plataforma Multifunción *OSICS, Yenista Optics*

Implemente la red mostrada en la Figura 4.92 para obtener el espectro de la fuente de luz *TLS WDM SOURCE AG L-Band W* que se incluye en la Plataforma

Multifunción OSICS, Yenista Optics, configurado en modo “*High Resolution*”, con 10 dBm de potencia de salida y 1600 nm de longitud de onda.

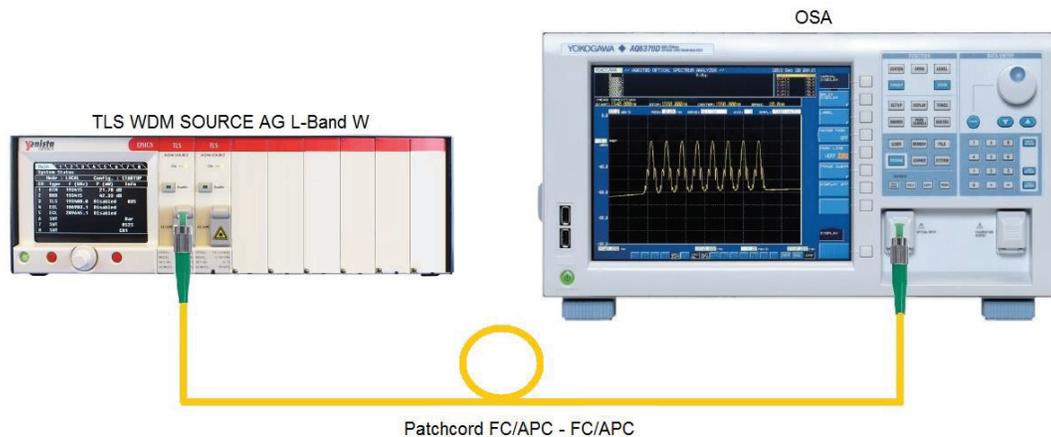


Figura 4.92 Conexión para caracterizar la fuente de luz *TLS WDM SOURCE AG L-Band W* que se incluye en la Plataforma multifunción *OSICS, Yenista Optics*

Nota: la Plataforma Multifunción *OSICS, Yenista Optics* requiere de al menos una hora de calentamiento previo para garantizar un funcionamiento adecuado.

- Para empezar, en la Plataforma Multifunción *OSICS Yenista Optics*, se requiere ingresar una contraseña de usuario (Figura 4.93), misma que se configura con el valor por defecto “0000” utilizando el mando giratorio y los botones de control.

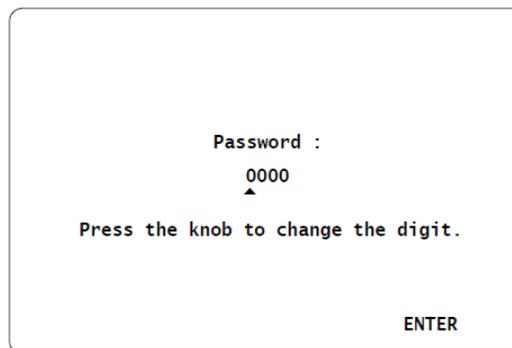


Figura 4.93 Pantalla inicial de la fuente de luz que se incluye en la Plataforma multifunción *OSICS, Yenista Optics*

- Luego de ingresar al sistema, aparece la pantalla del menú principal y el menú de cada uno de los módulos instalados (Figura 4.94). Aquí se pueden configurar los parámetros de la fuente óptica con la ayuda del mando giratorio

y los botones de control. En primera instancia es necesario revisar la configuración de los parámetros principales, lo cual se indica a continuación:

- **Unidad de potencia:** seleccione “Power”, luego en las opciones de “Set unit dBm/mW”, elija “dBm” y por último “ENTER”;
- **Potencia de referencia:** “Power”, luego en las opciones de “Set power reference”, elija “P=+00.00 dBm” y por último “ENTER”;
- **Unidad espectral:** para trabajar con unidades de longitud de onda (nm), en la opción “Set unit GHz/nm”, elija “nm” y escoja “ENTER”.

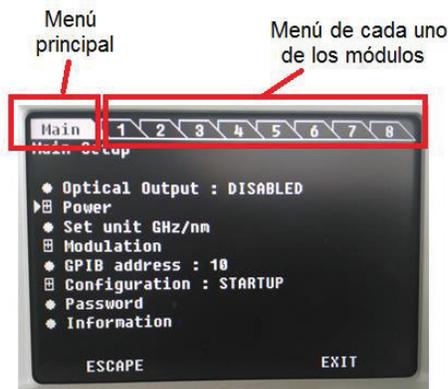


Figura 4.94 Pantalla que muestra el menú principal y el menú de los módulos.

- Utilizando el mando giratorio ingrese al menú “1” y configure los parámetros del módulo *TLS WDM SOURCE AG L-Band W* (Figura 4.95).
 - **Modo de operación:** seleccione “Mode”, luego elija “High Resolution” y por último “ENTER”;
 - **Potencia de salida:** elija “Set Power”, con la ayuda del mando giratorio introduzca el valor de “+10.00 dBm” y finalmente “ENTER”;
 - **Longitud de onda de trabajo:** seleccione la opción “ Set λ/f ”, luego configure 1600 nm y elija “ENTER”;

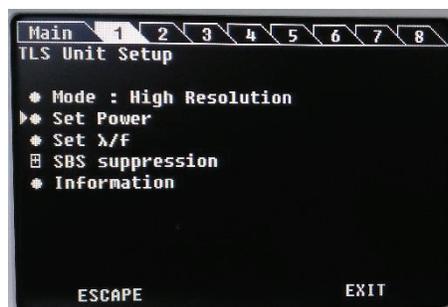


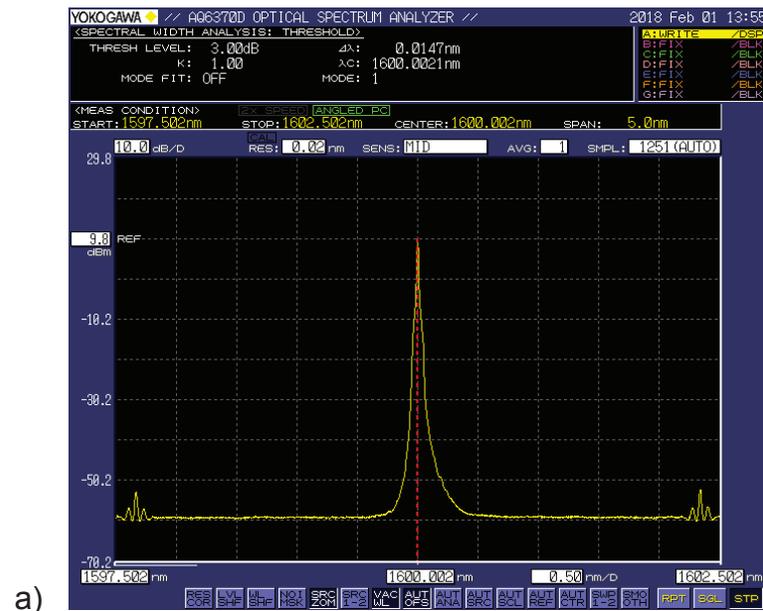
Figura 4.95 Menú del módulo *TLS WDM SOURCE AG L-Band W*.

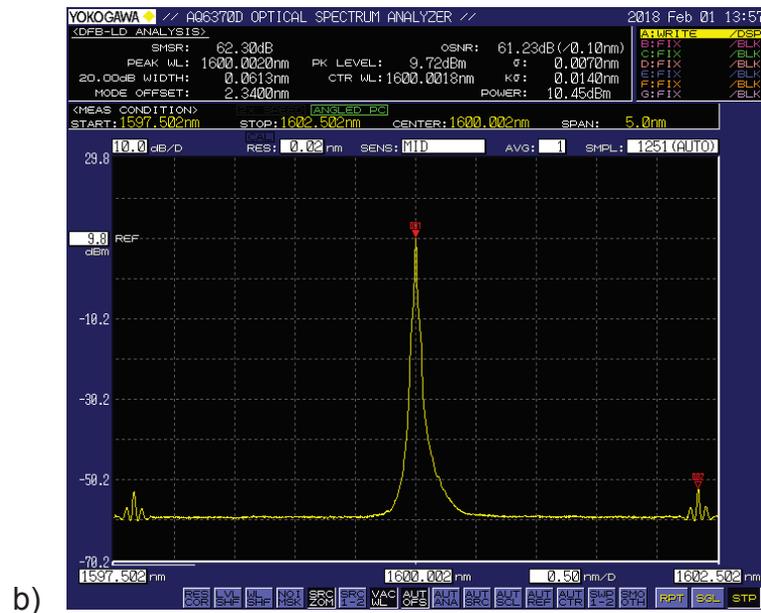
Cuando haya completado las configuraciones, regrese a la ventana principal (use la opción “EXIT”) y presione el botón “Enable” para iniciar la emisión de la señal óptica. Fíjese que en la pantalla se muestran la potencia y longitud de onda de la señal generada (Figura 4.96).



Figura 4.96 Pantalla que indica las características de la señal emitida por el módulo *TLS WDM SOURCE AG L-Band W*

- Para observar el espectro de la señal, configure el OSA para que se realice un barrido de modo automático y realice el ajuste de la longitud de onda central a 1600 nm y del SPAN a 5 nm. En la Figura 4.97 se observan las capturas de pantalla que muestran el análisis del ancho espectral de la fuente y el análisis utilizando la función “DFB – LD ANALYSIS”;





b) **Figura 4.97** Análisis a) de ancho espectral y b) de la fuente de tipo DFB *TLS WDM SOURCE AG L-Band W*

- Guarde la imagen que se muestra en pantalla en cada uno de los análisis realizados. Utilice la extensión de archivo *BMP*.

Actividad 3: utilice el medidor de potencia óptica para medir la potencia de la señal emitida por el módulo *TLS WDM SOURCE AG L-Band W* y compare los resultados.

4.6.6 INFORME

- 1) Presente los resultados obtenidos en cada una de las actividades realizadas en la práctica.
- 2) Elabore un cuadro que resuma los parámetros característicos obtenidos de las fuentes ópticas utilizadas en esta práctica.
- 3) En base a los espectros ópticos obtenidos en la práctica, indique cuales fuentes operan con diodo láser de cavidad *Fabry - Perot* y cuales utilizan láseres de tipo DFB. Explique su respuesta.
- 4) Utilizando el software Optisystem, obtenga los espectros de señales generadas por fuentes de tipo *Fabry - Perot* y DFB. Compare con los espectros obtenidos en la práctica.
- 5) Conclusiones y recomendaciones.

4.7 PRÁCTICA # 7

4.7.1 TEMA: CARACTERIZACIÓN DE REDES DE ACCESO CON TECNOLOGÍA GPON (GIGABIT – *CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORK*).

4.7.2 OBJETIVOS

- 1) Conocer y entender el modo de operación de una red de acceso basada en tecnologías de redes ópticas pasivas (PON);
- 2) Analizar diferentes topologías de redes ópticas pasivas;
- 3) Caracterizar enlaces de fibra óptica en redes de acceso;
- 4) Evaluar la atenuación en diferentes elementos que componen una red PON.

4.7.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OTDR YOKOGAWA AQ7283;
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ Kit de simulación de redes PON (FTTX);
- ✓ Fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH;
- ✓ POWER METER – YOKOGAWA AQ2180;
- ✓ Dos *patchcords* FO simplex monomodo de 1 m SC/UPC – SC/APC;
- ✓ Dos *patchcords* FO simplex monomodo de 1 m SC/APC – SC/APC;
- ✓ Adaptadores SC/APC – SC/APC.

4.7.4 MARCO TEÓRICO

4.7.4.1 Redes de acceso [10]

Se conocen también como “última milla”, comprenden el “último tramo” de la red de telecomunicaciones que conecta la central o nodo del proveedor de servicios con el usuario final. Mediante estas redes es posible proporcionar acceso de alta velocidad a diferentes tipos de usuarios (empresas, instituciones y hogares).

4.7.4.2 Redes PON (*Passive Optical Network*) ^[107] ^[108]

Es una red de acceso punto – multipunto que permite distribuir el servicio a varios clientes a partir de una sola fibra óptica sin necesidad de utilizar elementos activos

en ningún punto intermedio. La tecnología PON más utilizada se conoce como GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) y sus características se definen en las normas ITU-T G.984.1/2/3/4. Algunas de sus características son: velocidad de transmisión de 1.2 Gbps en subida y 2.4 Gbps en descarga; la distancia física máxima entre OLT y ONU no debe superar los 20 Km; utiliza tres canales para transmisión: 1310 nm (voz y datos en subida), 1490 nm (voz y datos en bajada) y 1550 nm (difusión de señales de TV) y la red debe poseer una atenuación máxima de 5 dB a 20 dB (Clase A), 10 dB a 25 dB (Clase B) o 15 dB a 30 dB (Clase C). Los componentes básicos de una red PON son:

- **OLT (*Optical Line Terminal*):** es el equipo encargado de conectar la red troncal con la red PON. Generalmente se ubica en una central o nodo.
- **Splitter:** es un dispositivo que permite replicar la señal de entrada a través de sus puertos de salida. Según sea el diseño de la red, pueden ser primarios o secundarios. La potencia de entrada se divide en un factor que depende del número de salidas (2, 4, 8, 16, 32, 64 y hasta 128); la división de la señal puede ser balanceada (relación 50:50 para un splitter 1x2) o no balanceada (relación 10:90, 20:80, 30:70, etc. para un splitter 1x2). Cuando la división es balanceada, las pérdidas esperadas en cada ramal son:

NÚMERO DE PUERTOS	PÉRDIDA POR DIVISIÓN (dB)
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18

Tabla 4.27 Pérdida en splitters (se excluyen conexiones y pérdida en exceso) ^[56]

- **ONU (*Optical Network Unit*):** representa al equipo terminal del usuario final.

4.7.4.3 Topologías de redes PON

Existen varias topologías de red, entre las más utilizadas están:

➤ Red tipo árbol con un nivel de splitteo

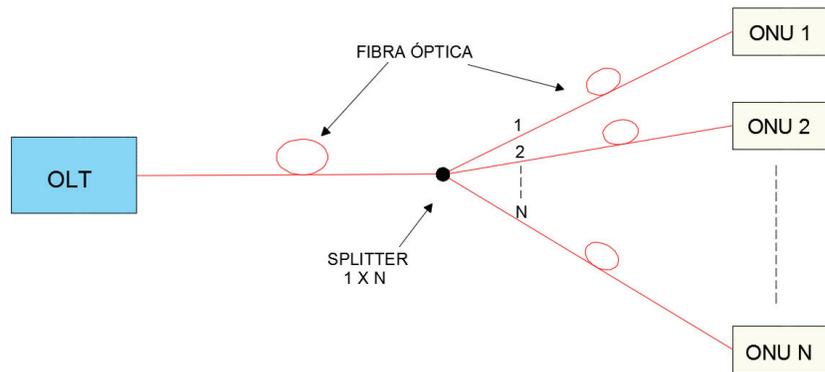


Figura 4.98 Esquema de una red PON tipo árbol con un nivel de splitteo [70]

➤ Red tipo árbol con dos niveles de splitteo

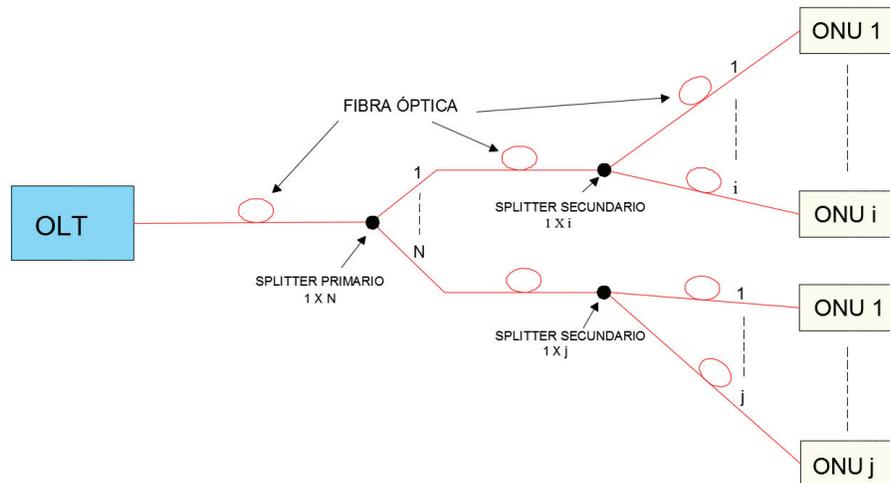


Figura 4.99 Esquema de una red PON tipo árbol con dos niveles de splitteo [70]

➤ Red tipo bus

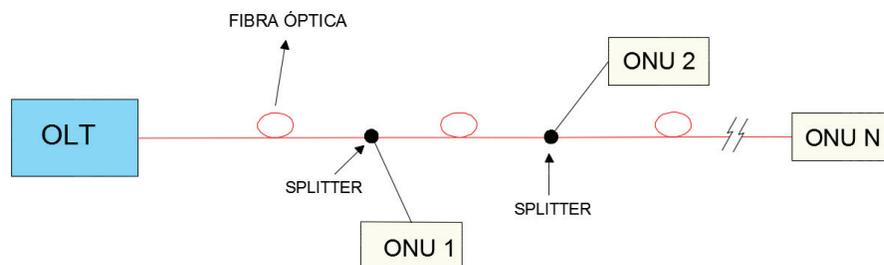


Figura 4.100 Esquema de una red PON tipo bus [70]

➤ Red tipo anillo

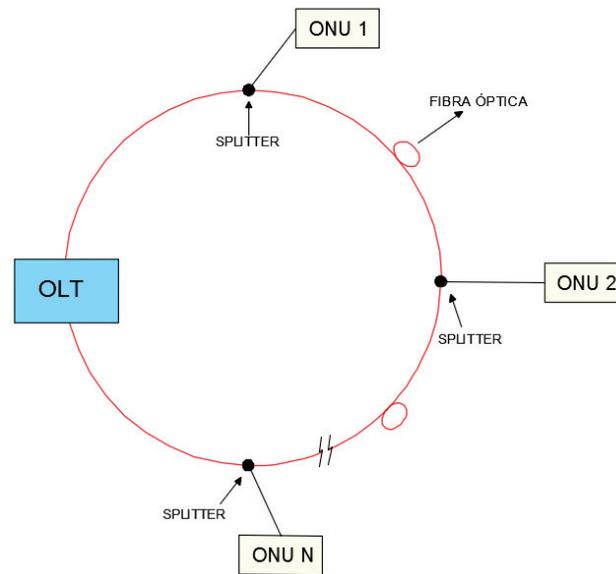


Figura 4.101 Esquema de una red PON tipo anillo ^[70]

4.7.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Antes de iniciar la práctica, es necesario recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas.
- ✓ Manipule los *patchcords* y bobinas de fibra óptica con alta precaución. Recuerde que una mala maniobra podría dañar la fibra óptica o los conectores.
- ✓ No se debe modificar la configuración de los equipos a menos que se indique lo contrario.
- ✓ La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por tanto evite observar directamente al extremo de una fibra, un conector o al terminal de un equipo que se encuentre emitiendo; tampoco apunte al rostro de otra persona con una fuente de luz láser.
- ✓ Verifique que las fuentes ópticas estén apagadas antes de realizar cualquier tipo de conexión.
- ✓ Al finalizar la sesión, debe colocar los equipos, herramientas y accesorios en los lugares destinados para su almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo, deben desconectarse de la red eléctrica.

Previo al inicio de la práctica limpie los conectores tanto de los *patchcords* como de los equipos. Además, con la ayuda del medidor de potencia óptica, mida la potencia que emite la fuente de luz AFL NOYES OLS7 - FTTH para 1310 nm, 1490 nm y 1550 nm.

1) Caracterización de una red de acceso con topología tipo árbol, con un nivel de splitteo.

La red que se muestra en la Figura 4.102 está constituida por una bobina de 4000 m, un splitter de 1x16 y una bobina de 1000 m, todos estos componentes se incluyen en el kit de simulación de redes FTTH. El splitter 1x16 se construye utilizando un splitter de 1x2 y otro de 1x8. Se asume que la OLT está antes de la bobina de 4000 m (enlace *feeder*) y la ONU se encuentra luego de la bobina de 1000 m (enlace de distribución).

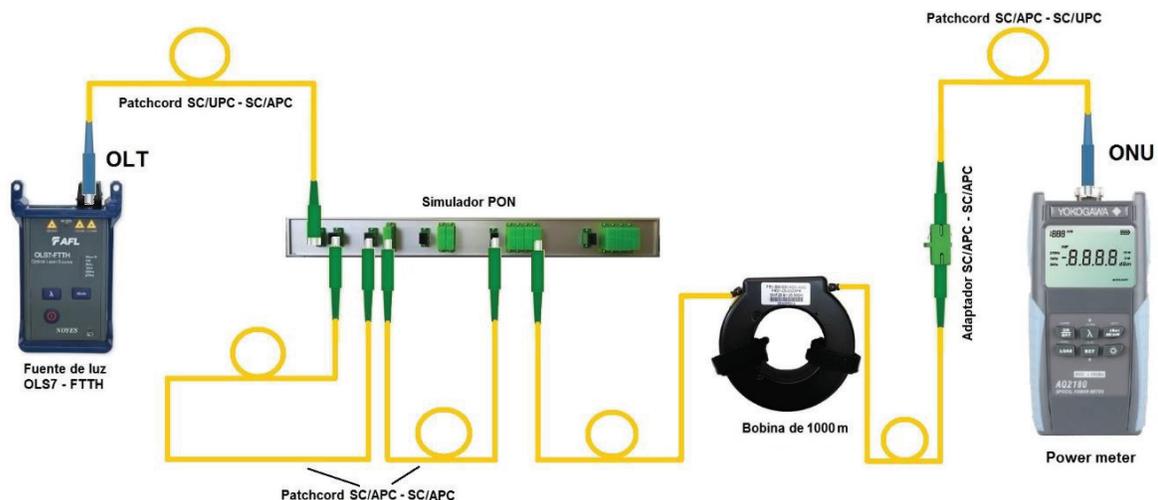


Figura 4.102 Esquema para medir la potencia en una red de acceso con topología tipo árbol con un nivel de splitteo

Actividad 1: en la red mostrada en la Figura 4.102, obtenga las medidas de potencia para 1310 nm y 1550 nm en modo de onda continua.

- Para caracterizar la red mostrada en la Figura 4.102, desconecte la fuente y el medidor de potencia óptica y conecte el OTDR en el lado de la OLT, tal como se muestra en la Figura 4.103.

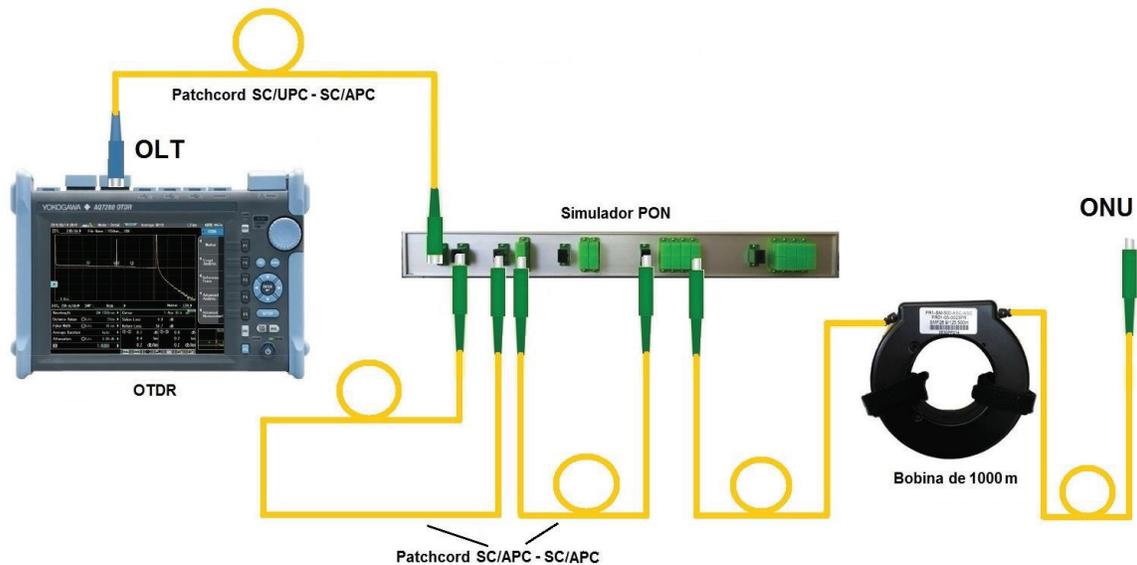


Figura 4.103 Esquema para caracterizar una red de acceso con topología tipo árbol con un nivel de splitteo

- Para iniciar, encienda el OTDR y escoja la aplicación que corresponde a OTDR. Configure en modo PON presionando la tecla **SETUP** y luego en la opción “Modo”, elija “PON”. En la pantalla que se despliega, realice la siguiente configuración:
 - a. Etapa de divisor óptico → 1;
 - b. Dirección de la prueba → OLT a ONU;
 - c. Número de puertos de salida del splitter igual a 16;
 - d. El resto de parámetros quedan en el valor por defecto.

- La prueba se ejecuta con una medición promediada, misma que inicia presionando la tecla **AVG** y finaliza automáticamente luego de que la barra de progreso indique que la medición se ha completado al 100%.
- En el modo PON, el OTDR permite obtener la traza característica del enlace de dos maneras. La primera, mostrada en la Figura 4.104 presenta una traza típica en la que se muestran los niveles de potencia en función de la longitud de la fibra óptica. Observe como el OTDR de forma automática utiliza diferentes valores de ancho de pulso (se asigna un color diferente por cada

valor de ancho de pulso) para detectar con mayor exactitud los eventos existentes a lo largo del enlace.

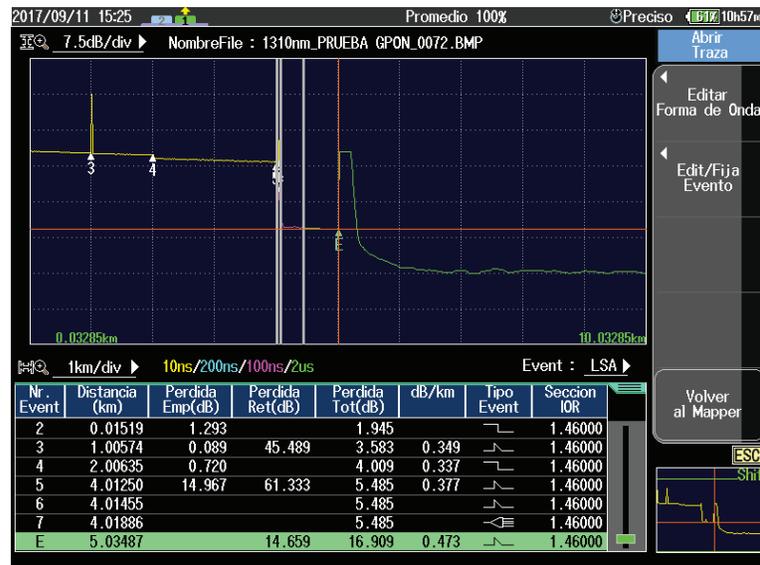


Figura 4.104 Traza característica de la red mostrada en la Figura 4.103

- Todos los eventos encontrados a lo largo de la red se muestran en una lista, misma que contiene información relacionada con la distancia de ocurrencia, el valor de la pérdida y el tipo de evento. En la Figura 4.105, se indica por ejemplo que a 4.01886 Km se detecta la presencia de un splitter, mientras que a 5.03487 Km se encuentra el fin de fibra.



Figura 4.105 Lista de eventos encontrados a lo largo de la red de la Figura 4.103

- El OTDR YOKOGAWA AQ7283 posee una herramienta eficaz para el análisis de las redes PON, la cual se denomina “*Smart Mapper*”. Esta aplicación genera un mapa de eventos y los muestra en forma de íconos (Figura 4.106), ofreciendo una mejor visualización de las características de la red.

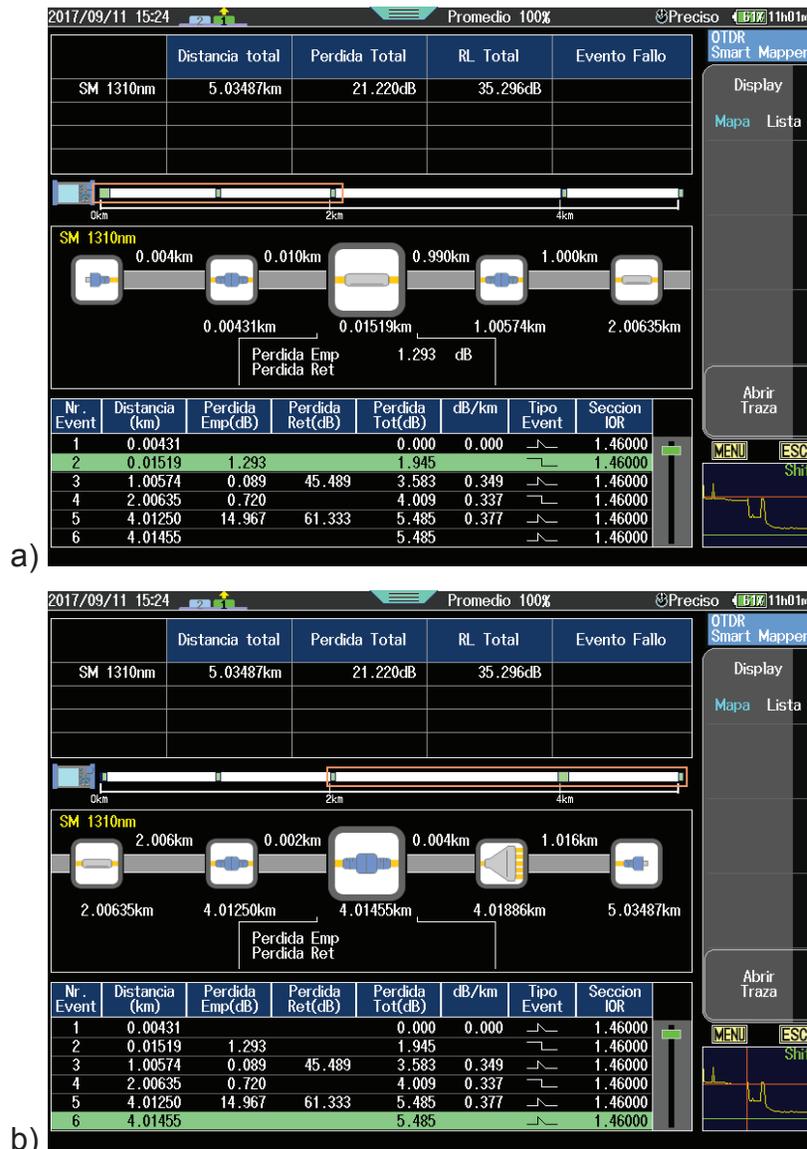


Figura 4.106 Mapa de las características de la red mostrada en la Figura 4.103

a) parte 1 y b) parte 2

- En la Figura 4.106 se observan los íconos que representan a los eventos encontrados en el enlace. Entre otros, se observa la presencia de un splitter (📐) a 4.01886 Km de distancia medida desde la OLT y el fin de fibra a 5.03487 Km.

- Otra posibilidad de caracterizar la red es por medio de un barrido en tiempo real, para esto se utiliza el OTDR en modo PON pero la prueba se inicia presionando la tecla “*REAL TIME*” y se la detiene al menos 40 segundos después. En la Figura 4.107 se presenta la traza obtenida con este método y la lista de los eventos encontrados a lo largo del enlace. Nótese que el final de fibra está a 4.01229 Km, lo cual es incorrecto, ya que a esa distancia se tiene el splitter 1x16. Por otro lado, en la traza se observa que luego de la marca “E” (fin de fibra) existe un nivel de atenuación que termina aproximadamente a los 5 Km de distancia (el eje horizontal está dividido en proporciones de 1 Km/div), en donde aparece un pico grande, el cual podría asumirse como el fin de fibra “real”. Se puede concluir entonces, que la atenuación producida por el splitter provoca errores cuando se utiliza un barrido en tiempo real.

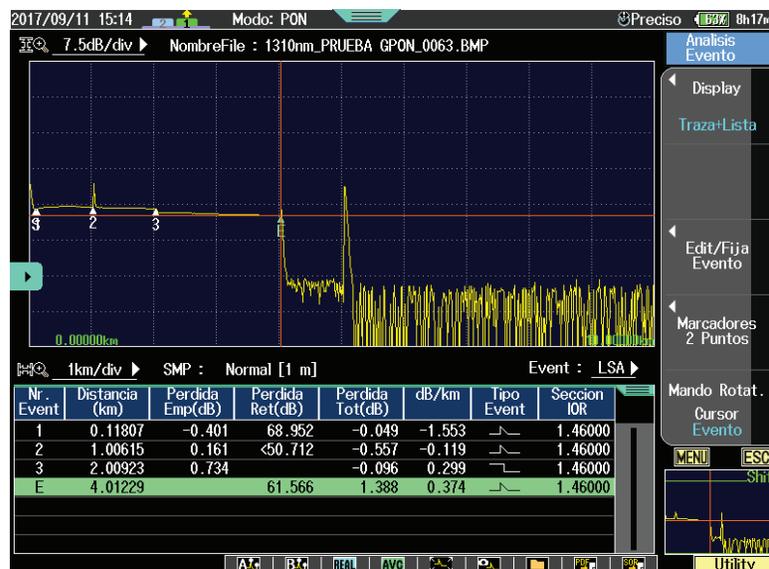


Figura 4.107 Traza generada por el OTDR utilizando un barrido en tiempo real

Actividad 2: conecte el OTDR en el lado de la ONU, configure como corresponda y obtenga las características de la red utilizando la herramienta “*Smart Mapper*”.

2) Caracterización de una red de acceso con topología tipo árbol, con dos niveles de splitteo.

En la Figura 4.108 se muestra una red con dos niveles de splitteo y está constituida por tres tramos de fibra óptica (4000 m, 300 m y 200 m), dos splitters

(1x4 y 1x8), *patchcords* y adaptadores. Todos los componentes se incluyen en el Kit de simulación de redes FTTH. Asumir que la OLT se ubica antes de la bobina de 4000 m y la ONU al final de la bobina de 200 m.

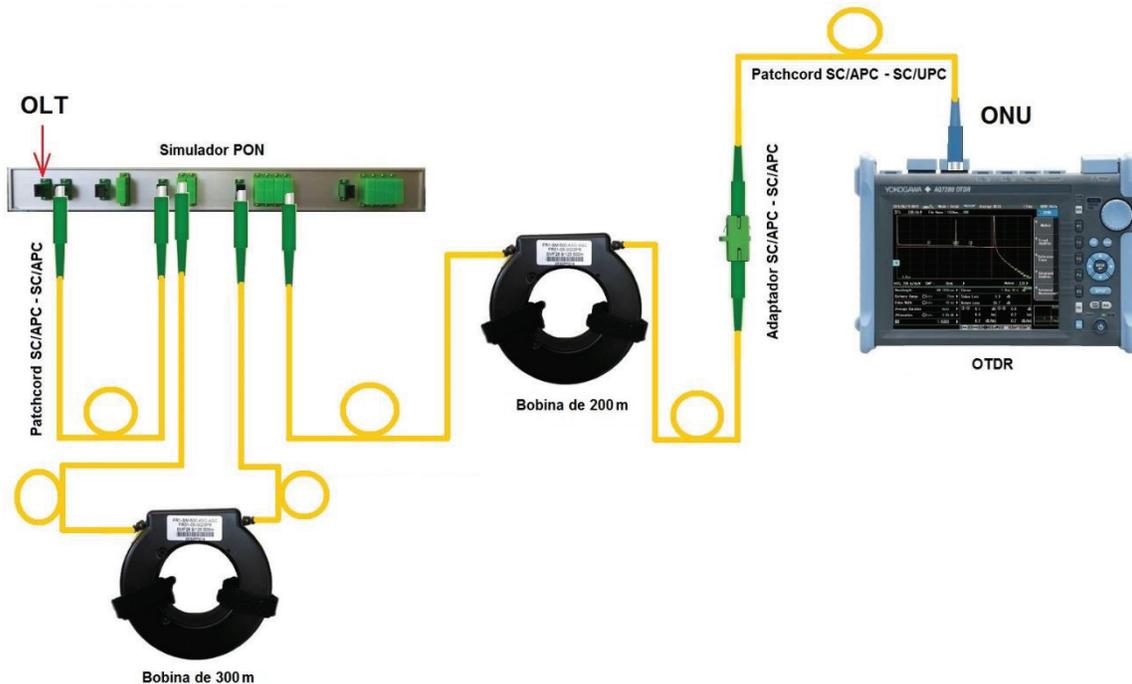


Figura 4.108 Esquema de red de acceso con topología tipo árbol con dos niveles de splitteo

Actividad 3: en la red de la figura 4.108 conecte la fuente de luz AFL NOYES OLS7-FTTH en el lado de la ONU y el medidor de potencia óptica en el lado de la OLT y mida la potencia total para 1310 m y 1550 nm.

- Para iniciar con esta prueba, realice la siguiente configuración:
 - ✓ Etapa de divisor óptico → 2;
 - ✓ Dirección de la prueba → ONU a OLT;
 - ✓ Número de puertos de salida del splitter igual a 4 y 8 respectivamente;
 - ✓ Longitud de onda de 1310 nm;
 - ✓ Los demás parámetros quedan en el valor por defecto.

- Ejecute la prueba utilizando una medición promediada, misma que se inicia presionando la tecla  y finaliza cuando la barra de progreso indique que la medición se ha completado al 100%.

- En la Figura 4.109 se observan los íconos que representan los diferentes eventos encontrados a lo largo del enlace. Entre otros, se muestra un splitter a 0.20452 Km de distancia medida desde la ONU, un segundo splitter a 0.52156 Km, un empalme a 2.51333 Km y el fin del enlace de fibra óptica se ubica a 4.53385 Km.

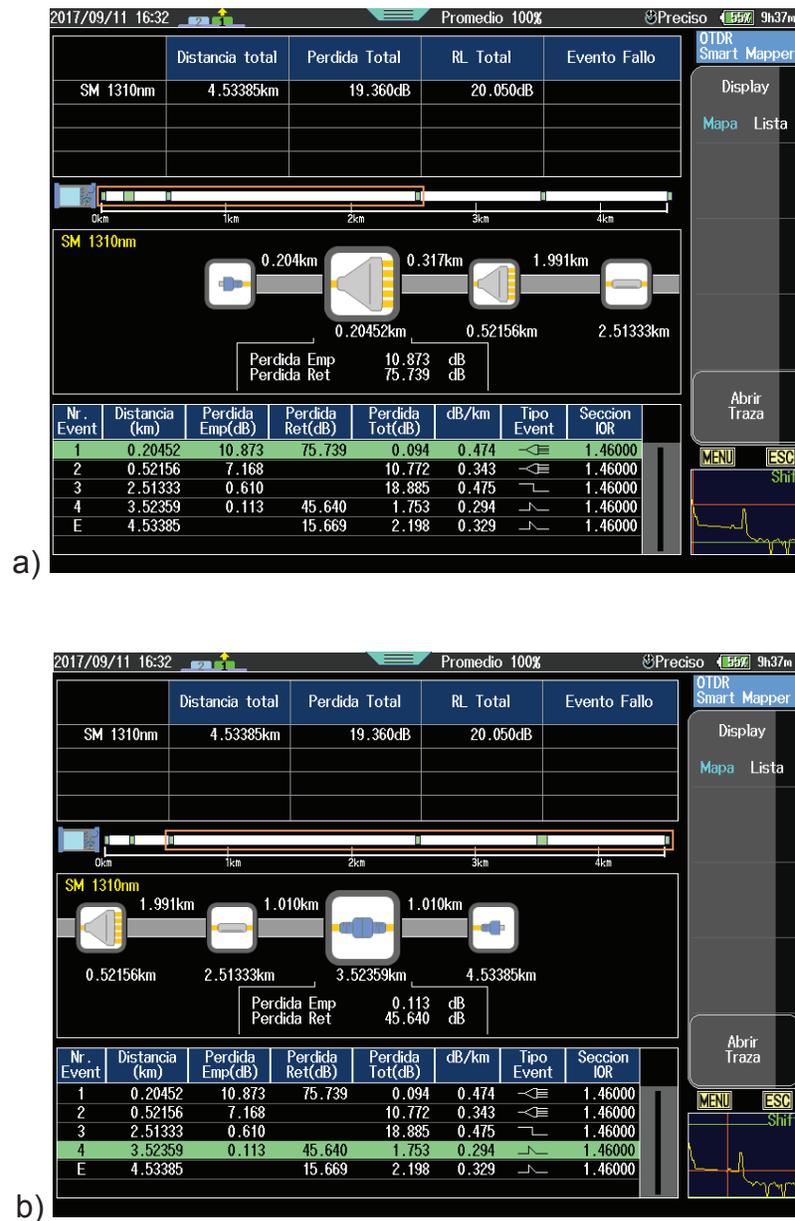


Figura 4.109 Mapa de eventos de la red de la Figura 4.108 a) parte 1 y b) parte 2

- Los parámetros de medición utilizados por el OTDR y todos los eventos encontrados a lo largo del enlace se presentan en el resumen que aparece en la Figura 4.110.

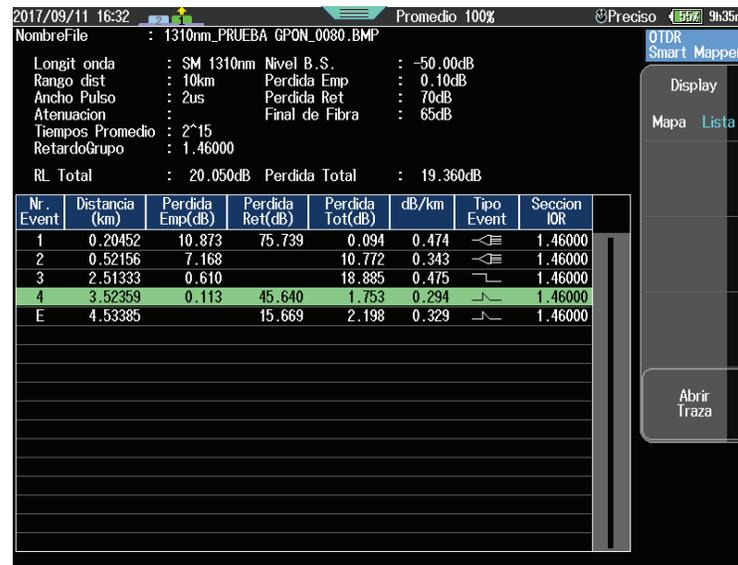


Figura 4.110 Parámetros de medición del OTDR y lista de eventos localizados

- En la Figura 4.111 se muestra la traza característica de la red presentada en la Figura 4.108. Se observa claramente que el OTDR utiliza de forma automática diferentes anchos de pulso (que se visualizan en la traza con diferentes colores) para mejorar la detección de eventos. También se muestra una lista de eventos en la que se localiza la posición de los splitters, el fin de fibra y otros eventos.



Figura 4.111 Traza característica de la red mostrada en la Figura 4.108

Actividad 4: obtenga la información característica del enlace de fibra óptica de la red mostrada en la Figura 4.108 para 1550 nm.

Actividad 5: con la ayuda del OTDR, obtenga la información característica de los enlaces de fibra óptica que correspondan a los clientes ONU 1 y ONU 2 de la red mostrada en la Figura 4.112 para 1550 nm. Además, realice la prueba de potencia en cada ONU. Utilice los adaptadores y *patchcords* que considere necesario para conectar el OTDR, la fuente de luz y el medidor de potencia óptico.

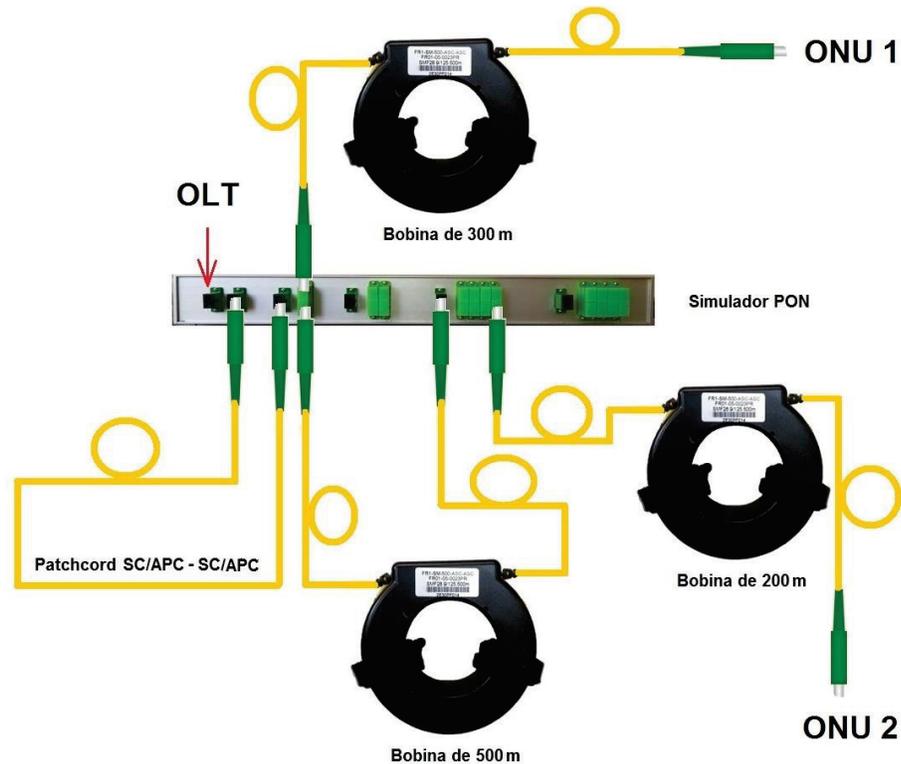


Figura 4.112 Esquema de red de acceso con topología tipo bus

4.7.6 INFORME

- 1) Presente los resultados obtenidos en cada una de las actividades realizadas en la práctica.
- 2) Utilizando los datos proporcionados por el OTDR, elabore un cuadro en el que se resuman las atenuaciones producidas por los componentes de las redes mostradas en las figuras 4.103 y 4.108. Además, calcule la atenuación total y compare con los valores proporcionados por el medidor de potencia óptica.
- 3) Utilizando el software Optisystem, simule la red presentada en la Figura 4.112 y obtenga los valores de atenuación total y de cada componente. Utilice una fuente óptica de -5,4 dBm a 1550 nm.
- 4) Conclusiones y recomendaciones.

4.8 PRÁCTICA # 8

4.8.1 TEMA: MULTIPLEXACIÓN EN REDES ÓPTICAS

4.8.2 OBJETIVOS

- 1) Conocer la forma en que se multiplexan dos señales ópticas en una sola fibra;
- 2) Analizar y determinar las características de las componentes espectrales de una señal óptica multiplexada;
- 3) Evaluar los parámetros característicos que definen el funcionamiento de una red WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).
- 4) Utilizar el OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) para caracterizar una red WDM.

4.8.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- ✓ OSA YOKOGAWA AQ6370D;
- ✓ Plataforma Multifunción OSICS, Yenista Optics con módulos de fuentes sintonizables en banda L;
- ✓ Módulo Multiplexor / Demultiplexor de 2X1/1x2;
- ✓ Kit de limpieza de conectores y adaptadores de fibra óptica;
- ✓ Un *patchcord* FO simplex monomodo de 3 m FC/PC – FC/PC;
- ✓ Un pigtail G.652 de 1m SC/UPC;
- ✓ Adaptadores FC/PC – FC/PC.
- ✓ Kit de simulación de redes PON (FTTX).

4.8.4 MARCO TEÓRICO

4.8.4.1 Multiplexor y demultiplexor óptico

Son dispositivos que procesan la señal en función de su longitud de onda y son muy utilizados en sistemas de alta velocidad, redes de acceso y enlaces troncales. En la Figura 4.113 se muestra la estructura general de un multiplexor óptico común.

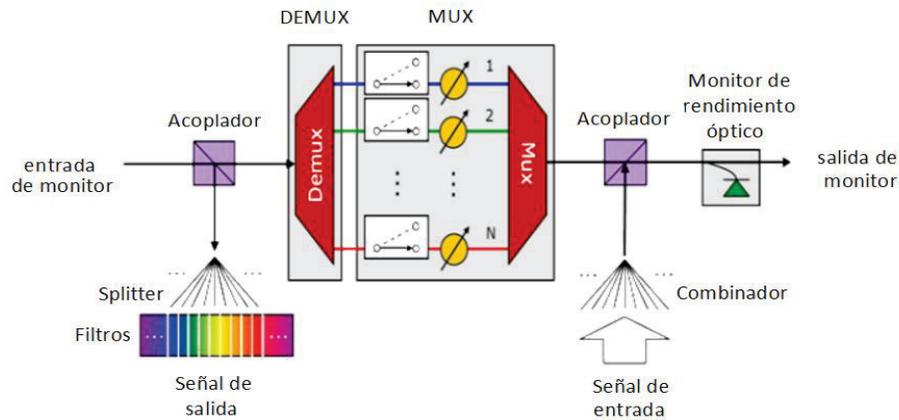


Figura 4.113 MUX/DEMUX óptico [63]

4.8.4.2 Redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [93] 94]

WDM utiliza multiplexación por división de longitud de onda para transmitir por una sola fibra óptica varios canales con la misma velocidad, dejando una separación suficiente para evitar interferencias entre canales (Figura 4.114). Existen dos variantes de WDM:

- ❖ DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*): la multiplexación por división de longitud de onda densa posee un espacio estrecho entre canales (entre 12,5GHz y 100GHz o múltiplos de 100GHz) con lo cual se obtiene mayor cantidad de canales; opera en las bandas C y L.
- ❖ CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*): la multiplexación por división aproximada de longitud de onda es menos compleja que DWDM porque posee un espaciado más ancho entre canales (alrededor de 20nm), es ideal para cortas distancias, y opera en la segunda y tercera ventana.

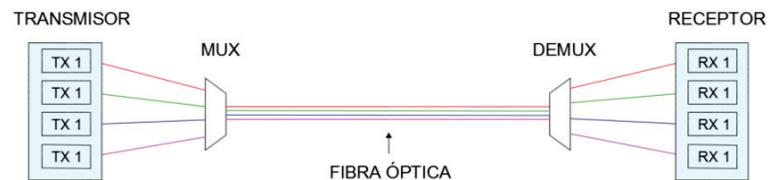


Figura 4.114 Esquema de una Red WDM [71]

4.8.4.3 Redes WDM - PON

Esta tecnología es adecuada para redes de acceso (red de conexión entre suscriptores y proveedor) y *backhaul* (red de retorno), ofrecen una solución eficaz

y económica para mejorar la escalabilidad de la red a través del uso eficiente de la fibra óptica, permitiendo llegar a más usuarios y a mayores distancias. En la Figura 4.115 se muestra un esquema de una red WDM-PON, la cual permite asignar un canal óptico diferente a cada usuario, esto quiere decir que tendrá un aumento significativo en la calidad del servicio a un costo mucho menor.

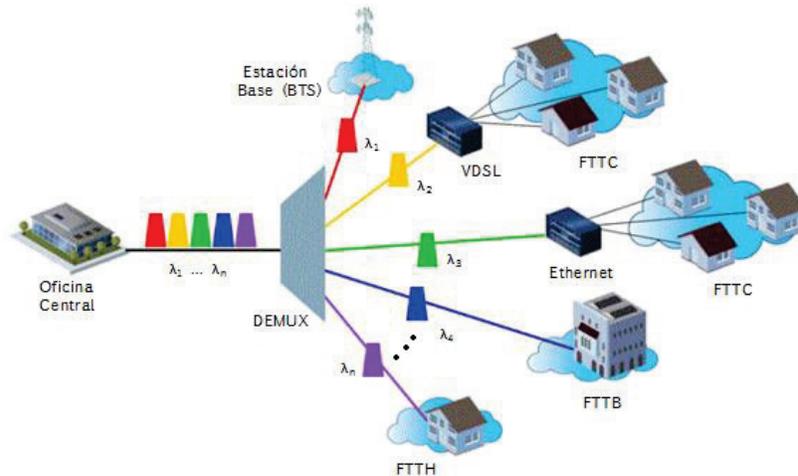


Figura 4.115 Esquema de una red WDM – PON [72]

4.8.4.4 Fuente modular OSICS-TLS-AG WDM *Tunable Laser Source Module* [103]

En la presente práctica se utilizará la plataforma Multifunción OSICS, *Yenista Optics* con el módulo OSICS-TLS (*Tunable Laser Source*) mostrado en la Figura 4.116, el cual ofrece una fuente láser sintonizable que opera en las bandas L y C. Está diseñada para probar sistemas y componentes de redes de fibra óptica, en especial para aplicaciones DWDM.



Figura 4.116 Módulos OSICS TLS, generador WDM en banda L y banda C

Las principales características que presenta la fuente TLS-AG son:

- ✓ Espacio entre canales: ITU-T (100 GHz, 50 GHz, etc.) o el valor que se asigne.
- ✓ Longitud de onda de trabajo: banda C → 196.25 THz a 191.5 THz (1527.60 nm a 1565.5 nm); banda L → 190.95 THz a 186.35 THz (1570.01 nm a 1608.76 nm);
- ✓ Potencia de salida: 20 mW (+13 dBm);
- ✓ Rango de potencia de salida (típico): + 7 dBm a +14 dBm;
- ✓ Exactitud de frecuencia (longitud de onda) relativa: ± 0.5 GHz (± 4 pm);
- ✓ Resolución de ajuste de frecuencia: 1 GHz;
- ✓ Resolución de ajuste fino de frecuencia: 1 MHz;
- ✓ Estabilidad de potencia: ± 0.03 dB;
- ✓ Ancho de línea: <100 KHz;
- ✓ Interfaz óptico: conector FC/APC.

Otra característica importante es que el módulo OSICS-TLS ofrece la posibilidad de variar el modo de operación de la siguiente manera:

- ❖ **Modo *grid*:** el usuario puede seleccionar una longitud de onda inicial y el tamaño del rango de frecuencias. Por defecto, el espacio mínimo que ocupa un rango de frecuencias es de 100 MHz. La resolución es de 1 MHz.
- ❖ **Modo *manual*:** en este caso, la longitud de onda (frecuencia) puede seleccionarse directamente como en cualquier otra fuente de láser sintonizable. La resolución es de 100 MHz / 1pm.
- ❖ **Modo de alta resolución:** permite que el usuario ingrese directamente la longitud de onda (frecuencia) requerida. La resolución es de 1 MHz/0.01 pm.

4.8.5 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Antes de iniciar la práctica, es necesario recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- ✓ Todos los conectores y/o terminales deben poseer su tapón respectivo para asegurar el buen estado y limpieza de las férulas, cuando no estén en uso.
- ✓ Manipule los *patchcords* y bobinas de fibra óptica con alta precaución. Recuerde que una mala maniobra podría dañar la fibra óptica o los conectores.

- ✓ No modifique la configuración de los equipos a menos que se indique lo contrario.
- ✓ La luz de una fuente óptica puede dañar al ojo humano, por esto, evite observar directamente al extremo de una fibra, de un conector o al terminal de un equipo. No apunte al rostro de otra persona con una luz láser.
- ✓ Verifique que las fuentes ópticas no estén transmitiendo antes de realizar cualquier tipo de conexión.
- ✓ Al finalizar la sesión, coloque los equipos, herramientas y accesorios en los lugares destinados para su almacenamiento. Los equipos ubicados sobre las mesas de trabajo, deben desconectarse de la red eléctrica.

Previo al inicio de la práctica limpie los conectores tanto de los *patchcords* como de los equipos que se van a utilizar.

1) Espectro de una señal WDM con componentes generadas a 1550 nm y 1600 nm

El esquema de conexión de esta red se muestra en la Figura 4.117, misma que está constituida por la plataforma multifunción OSICS que contiene dos módulos generadores de señal óptica (uno en banda C y otro en banda L) y un MUX/DEMUX 2x1/1x2. Tomar en cuenta que tanto el OSA como la plataforma multifunción deben estar encendidos al menos una hora antes de su utilización.

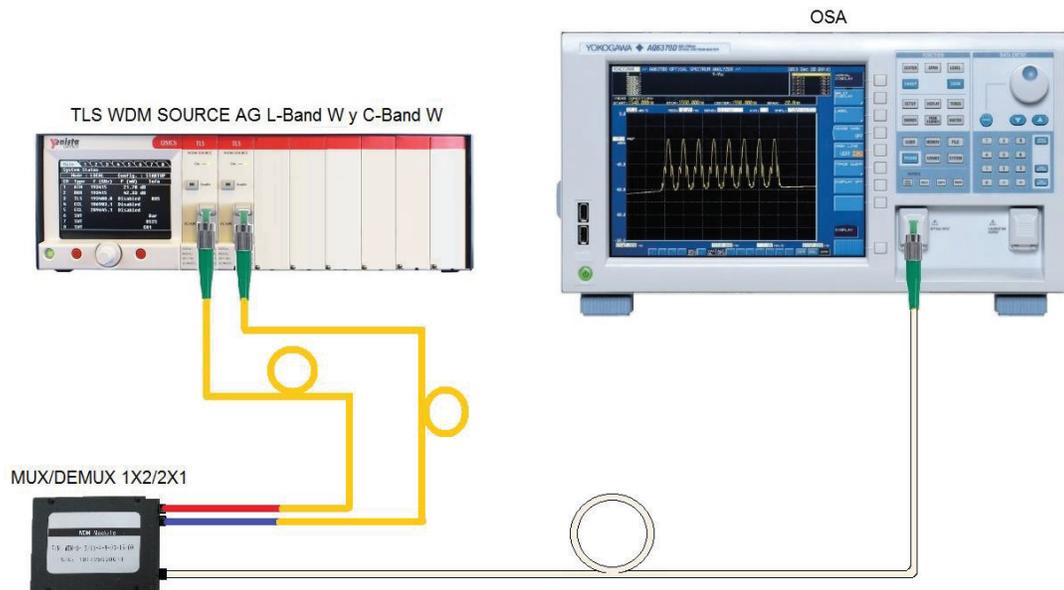


Figura 4.117 Esquema de una red WDM

Antes de iniciar es necesario verificar que el OSA esté configurado para operar con conector FC/APC, además se debe realizar la calibración de la longitud de onda y la alineación óptica (estos procedimientos fueron revisados en la práctica # 6).

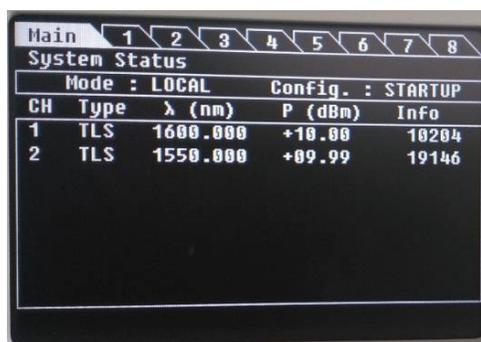
- Luego de implementada la red, es necesario configurar las fuentes ópticas modulares que se incluyen la plataforma multifunción para obtener señales emitidas a 1550 nm y 1600 nm, y con 10 dBm de potencia de salida. Para iniciar la configuración, ingrese al menú principal y configure lo siguiente:

- ✓ Unidad de potencia → dBm;
- ✓ Potencia de referencia → +00.00 dBm;
- ✓ Unidad espectral → nm.

En el menú de cada uno de los módulos, realice la siguiente configuración:

- ✓ Modo de operación → *High Resolution*;
- ✓ Potencia de salida → +10.00 dBm;
- ✓ Longitud de onda de trabajo → 1550 nm (banda C) y 1600 nm (banda L) respectivamente.

Una vez que haya terminado la configuración de los parámetros de las señales ópticas, inicie la transmisión presionando el botón “*Enable*”. En la Figura 4.118 se muestra la pantalla de la plataforma multifunción en la que se indica la potencia de salida y la longitud de onda de las señales emitidas.



CH	Type	λ (nm)	P (dBm)	Info
1	TLS	1600.000	+10.00	10204
2	TLS	1550.000	+09.99	19146

Figura 4.118 Pantalla de la plataforma multifunción en la que muestran las características de las señales generadas

- En el OSA presione la tecla “*SWEEP*” del panel “*FUNCTION*”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “*AUTO*” para que el OSA

ajuste los ejes de potencia y longitud de onda de forma automática. Para una mejor apreciación, ajuste la longitud de onda central a 1575 nm y el *SPAN* a 100 nm. En la Figura 4.119 se muestra el espectro de la señal y un análisis de potencia de las componentes espectrales (Para ejecutar estas mediciones revise los procedimientos realizados en la práctica # 6).

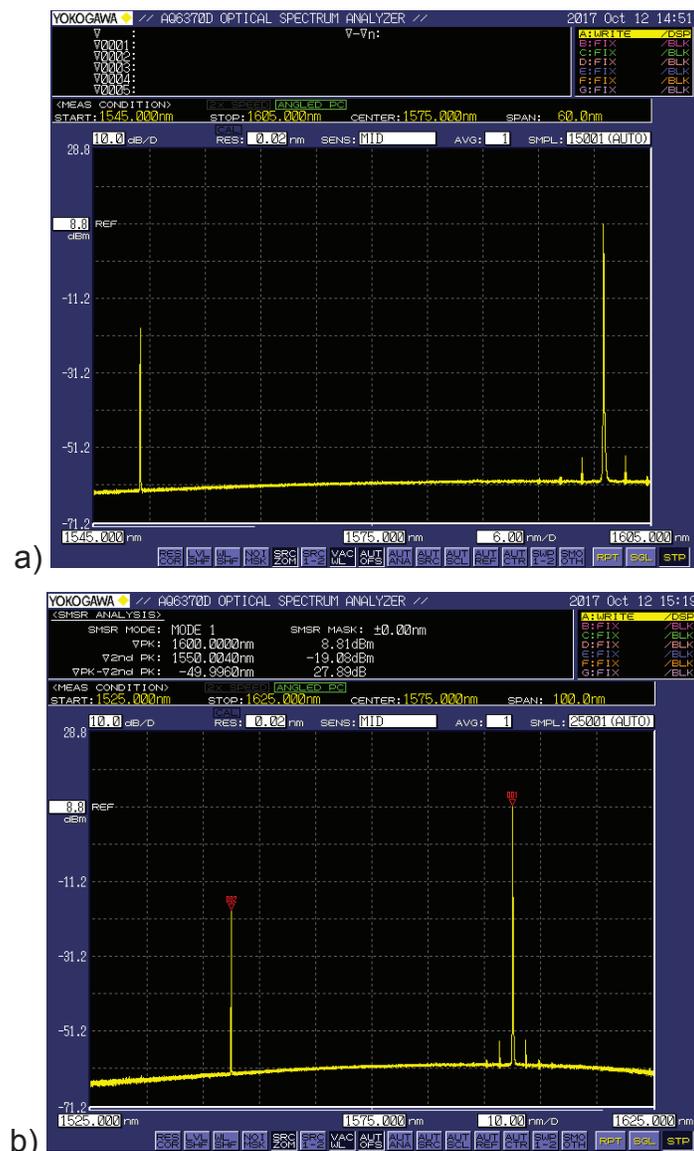


Figura 4.119 Espectro de dos señales multiplexadas en una sola fibra

En la Figura 4.119b se observan los valores de longitud de onda y potencia máxima de las componentes espectrales. Se aprecia que una de las componentes presenta un valor de potencia demasiado bajo, lo cual indica que aparentemente existe algún tipo de atenuación presente en uno de los puertos de salida del splitter.

Actividad 1: configure las fuentes de señal de tal manera que se obtenga una señal en banda C emitida con la máxima longitud de onda (que acepte el módulo) y una señal en banda L que tenga el mínimo valor de longitud de onda (que acepte el módulo). Determine la separación entre canales e indique si se trata de una señal DWDM o CWDM.

2) Espectro de una señal DWDM

Para implementar la red mostrada en la Figura 4.120, es necesario utilizar dos plataformas multifunción OSICS, ya que se requieren dos módulos de fuentes que generan en banda L. También se utiliza un MUX/DEMUX 2x1/1x2 y el OSA.

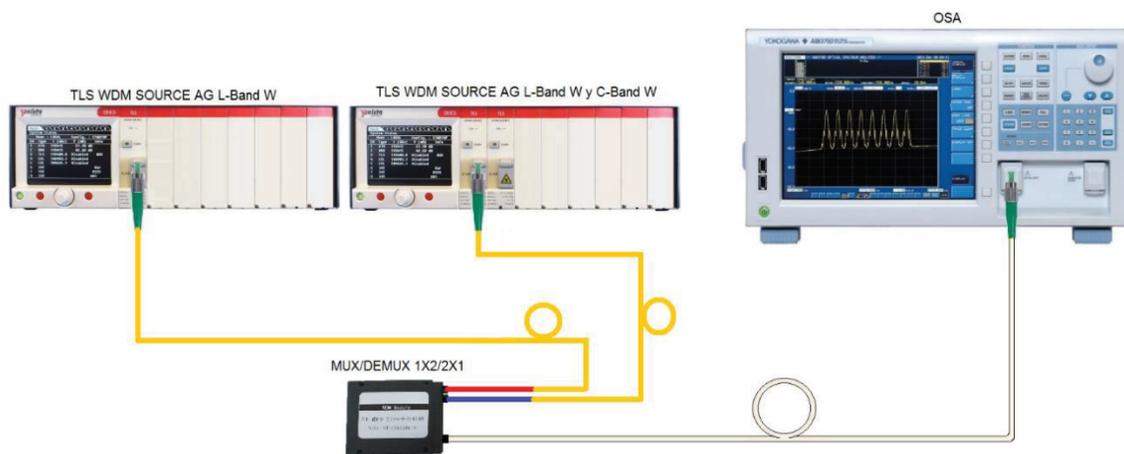


Figura 4.120 Esquema de red para obtener el espectro de una señal DWDM

La señal DWDM está formada por dos señales emitidas en banda L (191.0 THz y 191.1 THz) que tienen una separación de 100 MHz y una potencia de salida de 8 dBm cada una.

➤ Para empezar, en el menú principal de la plataforma multifunción configure lo siguiente:

- ✓ Unidad de potencia → dBm;
- ✓ Potencia de referencia → +00.00 dBm;
- ✓ Unidad espectral → Hz.

En el menú de cada uno de los módulos, realice la siguiente configuración:

- ✓ Modo de operación → *High Resolution*;

- ✓ Potencia de salida → +8.00 dBm;
- ✓ Longitud de onda de trabajo → 191.0 THz (1569.59 nm) y 191.1 THz (1568.77 nm).

Una vez que haya terminado la configuración de los parámetros de las señales ópticas, inicie la transmisión presionando el botón “Enable”.

- En el OSA presione la tecla “SWEEP” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “AUTO” para que el OSA ajuste los ejes de potencia y longitud de onda de forma automática. Para una mejor apreciación, ajuste la longitud de onda central a 1569.15 nm y el SPAN a 2 nm. En la Figura 4.120 se muestra el espectro de la señal DWDM con sus características de longitud de onda y potencia.

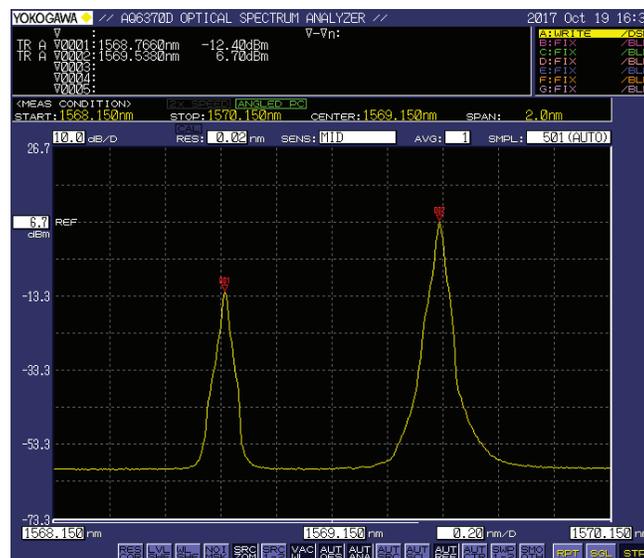


Figura 4.121 Espectro de dos señales multiplexadas en una sola fibra

- El OSA permite además realizar un análisis WDM, en el que se muestran características como: SNR (*Signal to Noise Ratio*), ruido, potencia, longitud de onda, entre otros. Para ejecutar este tipo de análisis, realice el siguiente procedimiento: en el OSA presione la tecla “ANALYSIS” del panel “FUNCTION”, luego, en el menú de funciones frecuentes escoja la opción “ANALYSIS 2”, y por último elija “WDM” en el menú que aparece. En la Figura 4.122 se muestra el espectro de la señal DWDM y una tabla con las características de las componentes espectrales.

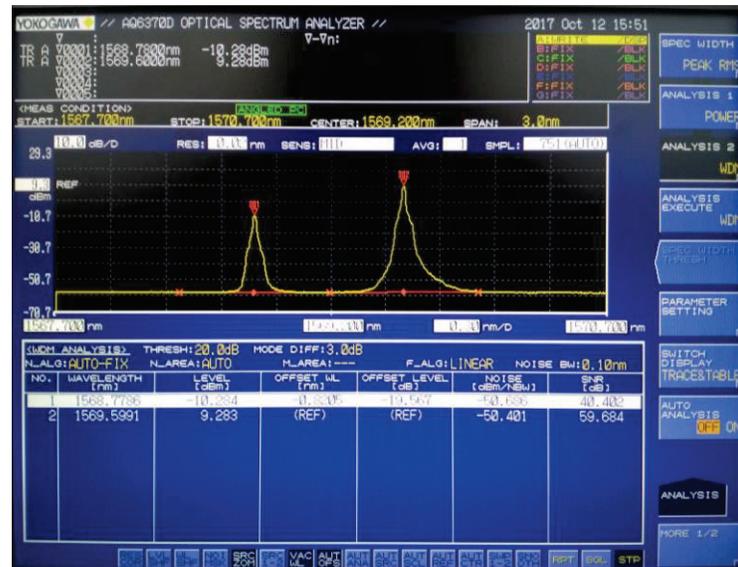


Figura 4.122 Análisis de una señal WDM en el OSA YOKOGAWA AQ6370D

Actividad 2: implemente la red mostrada en la Figura 4.123, mida la potencia a la salida de cada puerto del DEMUX con la ayuda de un medidor de potencia óptica.

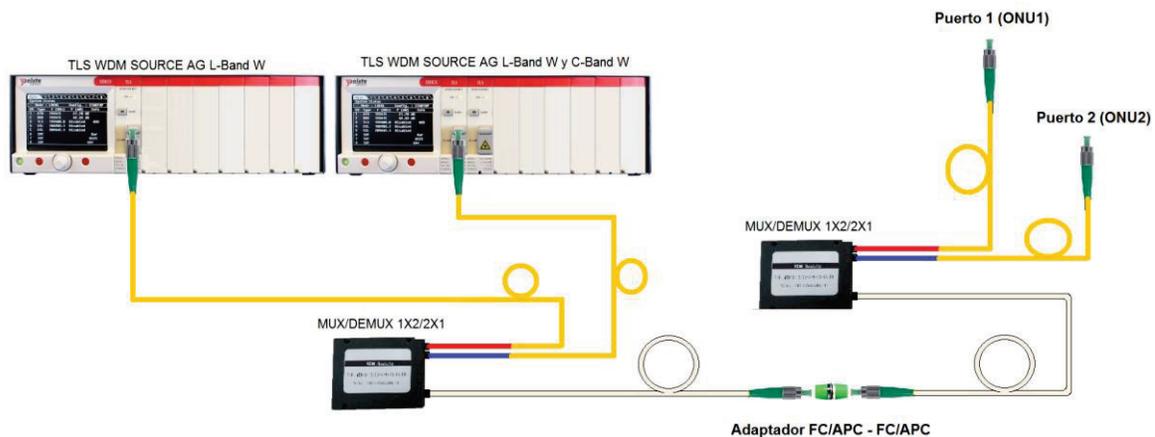


Figura 4.123 Esquema de una red WDM-PON

4.8.6 INFORME

- 1) Presente los resultados de las actividades realizadas en el laboratorio.
- 2) Indique 3 ventajas y 3 desventajas de DWDM y CWDM.
- 3) Utilizando el software Optisystem, simule las redes presentadas en las figuras 4.120 y 4.123. Utilice los parámetros de los componentes de red utilizados en el laboratorio.
- 4) Conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En la parte teórica de este trabajo se incluyen los conocimientos mínimos que un estudiante de ingeniería debe saber para entender el proceso de propagación de la luz a través de la fibra óptica y el funcionamiento de los componentes elementales de un sistema de comunicaciones óptico.
- Las prácticas de laboratorio que se proponen en este trabajo permiten que los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional complementen sus estudios analizando y comprobando experimentalmente los conocimientos teóricos, y desarrollando habilidades técnicas para diseñar, implementar, evaluar y ejecutar el mantenimiento de redes de fibra óptica.
- Los recursos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas que se detallan en este trabajo son suficientes para simular, analizar, construir y poner en funcionamiento enlaces punto a punto de corta y larga distancia, y redes de acceso (con tecnología PON) basadas en fibra óptica.
- Actualmente, las operadoras de telecomunicaciones en el país ofrecen sus servicios a través de redes de distribución óptica (ODN – *Optical Distribution Network*) con tecnología GPON, cuyas características principales son: velocidad de transmisión de 1.2 Gbps en *upstream* y de 2.4 Gbps en *downstream*; distancia física máxima entre OLT y ONU igual a 20 Km; utiliza tres canales: 1310 nm (voz y datos en *upstream*), 1490 nm (voz y datos en *downstream*) y 1550 nm (difusión de señales de TV); los rangos de atenuación máxima permitida son: 5 dB a 20 dB (Clase A), 10 dB a 25 dB (Clase B) y 15 dB a 30 dB (Clase C).

- Las prácticas de laboratorio están desarrolladas para trabajar con tramos de fibra óptica de diversas longitudes (200 m, 300 m, 500 m, 1000 m y 4000 m); *patchcords* con diferentes tipos de conectores (FC, LC y SC) y terminaciones (PC, UPC y APC); con unas fuentes de luz que trabajan a longitudes de onda fijas (650 nm, 850 nm, 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm y 1625 nm) y otras que permiten configurar la longitud de onda y la potencia según se requiera. También se utilizan equipos de medición de última tecnología (analizador de espectro óptico, medidor de potencia óptica y OTDR); y las herramientas y accesorios necesarios para representar escenarios lo suficientemente reales como para obtener resultados con altos niveles de veracidad.
- Los procedimientos que se detallan en este trabajo para la configuración y operación de los equipos de medición y fuentes de luz, están basados en las recomendaciones que el fabricante expone en los manuales de uso y/o fichas técnicas respectivas.
- Para las prácticas de laboratorio se utilizan únicamente las funcionalidades y herramientas que los equipos de medición (OTDR, medidor de potencia óptica y analizador de espectros) ofrecen para analizar enlaces o redes de fibra óptica relativamente simples o básicas. Está por demás indicar que los equipos mencionados presentan una amplia gama de utilidades cuyo estudio está fuera del alcance de este trabajo de titulación.
- Para que la evaluación y diagnóstico de una red de fibra óptica sea correcta y precisa, es muy importante que la configuración de los parámetros de medición del OTDR se realice en función del tipo de red que se pretende probar. Los parámetros de mayor relevancia son: rango del enlace (distancia en Km), ancho de pulso (nm) y longitud de onda (nm).
- El OTDR y la fuente de luz AFL OLS7-FTTH que se incluye en el simulador de redes PON, poseen fuentes de luz constituidas por un diodo láser con cavidad *Fabry – Perot*, cuyo espectro óptico analizado con el OSA, está formado por varios armónicos y presenta un espaciamiento espectral de

3.7 nm. Por lo tanto se puede indicar que este tipo de láser no es puramente monocromático, y que su amplio ancho espectral no lo hace óptimo para transmisiones a altas velocidades.

- Luego de analizar el espectro óptico de la fuente modular *TLS WDM SOURCE AG L-Band W* (incluida en la plataforma multifunción OSICS), se puede concluir que su láser es de tipo DFB (*Distributed Feedback – Bragg reflector*) ya que el espectro no presenta armónicos y su ancho espectral mide 0.061 nm (mucho menor al medido en el láser de cavidad *Fabry - Perot*), esto lo hace ideal para transmisiones a altas velocidades.
- Existe una gran variedad de cables de fibra óptica y el uso de cada uno depende del tipo de aplicación, la forma de instalación y las condiciones medio ambientales que deberá soportar durante su tiempo de vida útil.
- Los cables de fibra óptica que cumplen con las recomendaciones G.652.D y G.657.A poseen similares características de transmisión e interconexión, por lo que son compatibles y adecuados para trabajar en redes de acceso.
- El estándar G.657.A define las características de los cables de fibra óptica monomodo optimizados para reducir las pérdidas por macro curvaturas (aceptando radios mínimos de curvatura de hasta 7.5 mm), los cuales son ideales para implementar redes de acceso con acometidas en edificios.
- En una fibra óptica se presentan factores intrínsecos que atenúan la potencia de la señal en proporciones que dependen de la longitud de onda de trabajo y de la longitud física del enlace.
- En una fibra óptica, las pérdidas extrínsecas se originan debido a defectos de fabricación (en este caso, las pérdidas no dependen de la longitud de onda) o por errores producidos durante la instalación del cable, conectorización o ejecución de empalmes. Este tipo de pérdidas pueden reducirse o eliminarse de forma relativamente simple, aplicando correctivos

durante la fabricación de la fibra óptica o mejorando los procedimientos de manipulación e instalación del cable.

- La dispersión modal se origina por los retardos que sufren los rayos de luz que viajan por diferentes trayectorias a través del núcleo de la fibra óptica. Este tipo de dispersión está presente en las fibras multimodo y puede reducirse utilizando fibras multimodo con índice gradual, pero se elimina cuando se utilizan fibras monomodo.
- La simulación por computadora constituye una excelente solución para analizar la factibilidad de implementación de una red, y sirve como apoyo en la toma de decisiones y en la adquisición de habilidades que un profesional requiere. Sin embargo, existen altas probabilidades de caer en errores y obtener resultados poco exactos, cuando no se configuran de manera adecuada los parámetros característicos de los componentes de la red.
- Los presupuestos de los bienes que se recomienda adquirir en el capítulo 2 no incluyen impuestos y su última cotización se realizó en octubre del 2017. Los costos se obtuvieron a través de solicitudes directas al fabricante vía correo electrónico, por consulta en las páginas web de los fabricantes y a través de plataformas de ventas por catálogo.

5.2 RECOMENDACIONES

- El trabajo en el laboratorio presenta una serie de riesgos de origen y consecuencias muy variadas, por lo que se recomienda establecer un procedimiento (basado en la propuesta realizada en este trabajo) que ayude a conocer los riesgos asociados al trabajo con fibras ópticas, identificar las fuentes de peligro y evitar cualquier tipo de accidente.
- Para mejorar la calidad de las experiencias de laboratorio se recomienda la implementación de una red que permita operar equipos y componentes similares a los que se encuentran en un nodo de telecomunicaciones real.

- Con el fin de mantener un orden adecuado y facilitar el acceso a los equipos, se recomienda que se adquiera e instale un rack de piso para colocar ODF's, OLT's, *patchpanels* y otros componentes (pasivos o activos) de una red de telecomunicaciones.
- Con el propósito de obtener el máximo provecho e incrementar el tiempo de vida útil de los equipos, herramientas y materiales que se adquieran para el laboratorio, se recomienda que se acuerde con el proveedor respectivo al menos una capacitación en aspectos como: instalación, operación y mantenimiento de los bienes adquiridos, según corresponda.
- Luego de comparar las principales funcionalidades y atributos de los programas computacionales: *Optsim*, *VPItransmission Maker*, *Simulink de MATLAB* y *OptiSystem*, se recomienda la adquisición de la licencia respectiva para el uso del software de simulación *OptiSystem*, ya que es la herramienta computacional que ofrece mayores utilidades tanto para el adiestramiento como para la investigación de sistemas de comunicaciones ópticas.
- Considerando que la misión de la Escuela Politécnica Nacional es formar profesionales capaces de generar, difundir y transmitir el conocimiento científico y tecnológico, y que su visión contempla la orientación de sus capacidades y esfuerzos hacia el servicio comunitario, el laboratorio de comunicaciones ópticas debe conseguir la acreditación necesaria para realizar tareas como: certificación de redes de fibra óptica en general, calibración y homologación de equipos (tales como fusionadoras, OTDR's, medidores de potencia, etc.), brindar asesoría para la planificación, diseño e implementación de redes de fibra óptica, y ejecutar pruebas para evaluar los parámetros geométricos, ópticos, mecánicos y de transmisión de una fibra óptica. Por lo dicho, se recomienda que este trabajo sea utilizado como una base para la creación de protocolos de pruebas, y para el entrenamiento de técnicos y profesionales que sean capaces de evaluar y certificar redes de fibra óptica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Televes. (2013). Introducción a la fibra óptica (II). [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://www.televes.es/es/soporte/notas/0287-2013-0>
- [2] Stekolschik G. (09/2011). Luz Obediente. [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://nexciencia.exactas.uba.ar/luz-obediente>
- [3] Senior, J. M. (2009). *Optical Fiber Communications: Principles and Practice* [Comunicaciones por Fibra óptica: Principios y Práctica]. Edinburgh Gate.
- [4] Espectro Visible (2017). [Tabla]. Recuperado el 20/01/2017 de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/21_espectro_visible.html
- [5] Tabla de índices de refracción (para $\lambda=589\text{nm}$). (2017). [Documento]. Recuperado el 20/01/2017 de http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/inrefraccion.pdf
- [6] Fibra ópticas por Sergio Schnitzler (2017). [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://www.yio.com.ar/fo/indiceref.html>
- [7] Kaves F. (14/04/2012). Fibra óptica. [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://kaven-fontes.blogspot.com/>
- [8] [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://grupoorion.unex.es:8001/rid=1HWBMRC7M-1SPK0VB-1ZMF/abosrcion%20OH.bmp>
- [9] Transmisiones y aplicaciones de Fibra. [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de https://www.siemon.com/la/white_papers/08-03-03-light-it-up.asp
- [10] Ramaswami R., Sivarajan K., Sasaki G. (2010). *Optical Networks A Practical Perspective*, [Redes Ópticas, una Perspectiva Práctica]. Burlington.
- [11] Propiedades de transmisión de la Fibra óptica. (04/2006). [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <https://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>
- [12] Fibra óptica. (04/2012). [Ilustración]. Recuperado el 20/01/2017 de <http://kaven-fontes.blogspot.com/2012/04/fibra-optica.html>
- [13] Fibra óptica y las pérdidas de la fibra óptica. [Ilustración]. Recuperado el 21/01/2017 de <https://telpromadrid.eu/fibra-optica/>

- [14] La dispersión cromática en la fibra óptica. [Ilustración]. Recuperado el 21/01/2017 de <http://lafibraoptica Peru.com/la-dispersion-cromatica-en-la-fibra-optica/>
- [15] *Polarization Mode Dispersion (PMD)* (01/2004). [Ilustración]. Recuperado el 21/01/2017 de <https://www.tuhh.de/okt/Forschung/Pmd/>
- [16] ITU. [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/es/ITU-T/about/Pages/default.aspx>
- [17] G.651.1: Características de los cables de fibra óptica multimodo de índice gradual de 50/125 μm para la red de acceso óptico. (07/2007). [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651.1/es>
- [18] G.652: Características de las fibras y cables ópticos monomodo (11/2016). [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-l/es>
- [19] G.653: Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada (07/2010). [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653-201007-l/es>
- [20] G.655: Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula (11/2009). [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/es>
- [21] G.657: Características de las fibras y cables ópticos monomodo insensibles a la pérdida por flexión. (11/2016). [Documento]. Recuperado el 27/01/2017 de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/es>
- [22] Santa Cruz O. Los cables de fibra. [Documento]. Recuperado el 17/03/2017 de [http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Plantel Exterior/IntroduFO3.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlantelExterior/IntroduFO3.pdf)
- [23] Las fibras ópticas, fundamentos, uso de las fibras en la comunicación. [Ilustración]. Recuperado el 18/03/2017 de [http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Plantel Exterior/IntroduFO3.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlantelExterior/IntroduFO3.pdf)
- [24] Fibra óptica [Ilustración]. Recuperado el 18/03/2017 de <http://www.comeros.com.ar/producto/fibra-optica-hubbell-inoutdoor-om1-m-m-12-hilos/>
- [25] Redes [Ilustración]. Recuperado el 18/03/2017 de <http://miespaciodeblogsena.blogspot.com/2015/09/google-chrome-google-chrome-un.html>

- [26] Catálogo de productos [Ilustración]. Recuperado el 18/03/2017 de <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/cable-optico-219377.html>
- [27] Tipos de fibras ópticas [Ilustración]. Recuperado el 18/03/2017 de <https://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/tiposfibra>
- [28] Jiménez M. S. (2014). Comunicaciones ópticas. Quito.
- [29] TIA STANDARD. Código de colores para cables de fibra óptica. [*Optical Fiber Cable Color Coding*]. (Julio 2014). [Documento]. Recuperado el 18/04/2017 de <http://incab.co/files/tia-598-d.pdf>
- [30] Tipos de cable. (15/04/2016). [Documento]. Recuperado el 18/04/2017 de <http://m2s3christopher.blogspot.com/>
- [31] Cables de comunicaciones submarinos transoceánicos. [Documento]. Recuperado el 18/04/2017 de <http://bashny.net/t/es/276388>
- [32] *Fiber Optic Terminations*. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/term.html>
- [33] Conectorización y Empalme. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://www.oocities.org/es/marby69/Redes/Index.htm>.
- [34] Tipos de conectorización de fibra óptica. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://fibremex.com/fibraoptica/index.php?mod=contenido&id=3&t=3&st=15>
- [35] Conectores y empalmes. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <https://www.thefoa.org/ESP/Conectores.htm>
- [36] Tipos de conectores de fibra óptica. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://www.fibraopticahoy.com/tipos-conectores-fibra-optica/>
- [37] Tipos de conectores de fibra óptica. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://www.conectronica.com/fibra-optica/cables-de-fibra-optica/empalmes-por-fusion-para-cables-de-fibras-opticas>
- [38] Conector ST. [Documento]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://marismas-emtt.blogspot.com/2009/09/conector-st.html>
- [39] Tipos de pulido. [Ilustración]. Recuperado el 22/04/2017 de <http://silexfiber.com/tipos-de-pulido-conectores-de-fibra-optica/>
- [40] Tipos de fibra óptica Monomodo y Multimodo. [Documento]. Recuperado el 23/04/2017 de <http://www.radio-enlace.com/tipos-de-fibra-optica-monomodo-y-multimodo/>

- [41] Conectores fibra óptica. [Documento]. Recuperado el 24/04/2017 de <http://silexfiber.com/conectores-fibra-optica/>
- [42] Sc, fc, st, conectores lc sm/mm, sx/dx de fibra óptica adaptador óptico / adaptador de fibra óptica. [Catálogo]. Recuperado el 25/04/2017 de <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Sc-fc-st-conectores-lc-sm-mm-sx-dx-de-fibra-%C3%B3ptica-adaptador-%C3%B3ptico-adaptador-de-300003518919.html>
- [43] Procedimiento de conectorización. (06/08/2012). [Documento]. Recuperado el 26/04/2017 de <http://www.fibraoptica hoy.com/blog/procedimiento-de-conectorizacion/>
- [44] Conectorización ST/SC. [Documento]. Recuperado el 26/04/2017 de http://www.naser.cl/sitio/Down_Papers/Conectorizacion%20ST-MM%20FO.pdf
- [45] El diodo láser. [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T4.pdf
- [46] Tipos de amplificadores. [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm
- [47] *Light Emitters*. [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://npol.postech.ac.kr/Research/LED.htm>
- [48] Semiconductor Laser: An Overview of Commercial Devices. [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25099>
- [49] [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de http://global-sei.com/news/press/12/prs062_s.html
- [50] InAs Quantum-well Distributed Feedback Lasers Emitting at 2.3 μm for Gas Sensing Applications. [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200901sf2.html>
- [51] *Tunable Lasers*. [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/tunable-lasers>
- [52] VCSEL Explained [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://laserpointerforums.com/f54/vcSEL-explained-70630.html>
- [53] Fotodiodo PIN [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_5_3.htm

- [54] *Photodiode structures* [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php
- [55] EDFA and RAMAN amplifiers [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/optical-amplifiers.html>
- [56] La guía FTTH PON. Realización de pruebas de redes ópticas pasivas [tabla] [documento] [ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://www.c3comunicaciones.es/Documentacion/Guia%20FTTH%20PON%20de%20EXFO%202013.pdf>
- [57] Arévalo Germán MSc, PhD(c). (2015). Sistemas ópticos de Transmisión de datos (Curso de Actualización). Quito.
- [58] *Fiber Optic Splitters* [ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://www.satellitebyfibre.co.uk/contents/en-uk/d111.html>
- [59] Product Specification Optical PLC Splitter [Tabla]. Recuperado el 30/04/2017 de http://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/finisar/optica_plc_splitterl.pdf
- [60] Wave smart Splitters [Tabla]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://www.seclearfield.com/assets/documents/data-sheets/wavesmart-splitters.pdf>
- [61] *Tapered Fiber Power Combiner* [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://welcome.gofoton.com/product/tapered-fiber-power-combiner/>
- [62] *Optical Circulator Tutorial* [Documento] [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://www.fs.com/optical-circulator-tutorial-aid-455.html>
- [63] *Optical Multiplexing for High Speed Communication Systems* [Documento] [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://www.fiberopticshare.com/optical-multiplexing-for-high-speed-communication-systems.html>
- [64] Atenuadores ópticos [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://www.telecable.com/tienda/categoria/Tipo-Adaptador-Monomodo/65>
- [65] *Variable Fiber Optical Attenuators, single mode* [Ilustración]. Recuperado el 30/04/2017 de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=616
- [66] Uso del Atenuador de fibra óptica [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de <http://fibremex.com/fibraoptica/index.php?mod=contenido&id=3&t=3&st=18>
- [67] Cálculo de enlace de fibra óptica [Documento]. Recuperado el 30/04/2017 de <https://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/calculo-enlace>

- [68] Proyecto para la implementación de la nueva red de acceso FTTH de la CNT EP. Normas de diseño, construcción y fiscalización de la ODN. (julio 2013).
- [69] Todo lo que debes saber sobre fibra óptica [Ilustración]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.taringa.net/posts/info/14395474/Todo-lo-que-debes-saber-sobre-FIBRA-OPTICA.html>
- [70] Cedric L. (2007). Passive Optical Networks, Principles and Practice, [Redes Ópticas Pasivas, Principios y Práctica]. Burlington
- [71] IP/WDM vs IP/OTN: Which one to choose? [Ilustración]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.fiber-optic-solutions.com/ip-wdm-ip-otn-comparison.html>
- [72] How to overcome the challenges of adopting WDM-PON in FTTx? [Ilustración]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.fiber-optic-solutions.com/overcome-challenges-wdm-pon-fttx.html>
- [73] Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP. Procedimientos para el cumplimiento de seguridad industrial y salud ocupacional para los contratistas. (2012). Quito
- [74] Normas de seguridad en el Laboratorio [Documento]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.uv.es/gammmm/Subsitio%20Operaciones/7%20normas%20de%20seguridad.htm>
- [75] Medidas de protección y seguridad en la fibra óptica [Documento]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.gonzalonazareno.org/certired/p01f/p01f.pdf>
- [76] Normas de seguridad en el Laboratorio [Documento]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.quimicaorganica.net/seguridad-laboratorio-quimica.html>
- [77] Instalación de la red de fibra óptica [Documento]. Recuperado el 01/05/2017 de <http://www.thefoa.org/ESP/Instalacion.htm>
- [78] AQ6370D Optical Spectrum Analyzer User's Manual. 1st Edition
- [79] Simplex and duplex (zipcord) cable (fiber optic) [Ilustración]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://thaitechno.net/t1/productdetails.php?id=21158&uid=35764>
- [80] Tipos de cables de fibra óptica [Ilustración]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://www.fibraopticahoy.com/tipos-de-cables-de-fibra-optica-2/&num=1&strip=0&vwsrsc=0>
- [81] *Distribution VS. Breakout Fiber Optic Cable* [Artículo]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://opticalcommunication.fomsn.com/2017/01/09/distribution-vs-breakout-fiber-optic-cable/>

- [82] Breakout Fiber Optic Patch Cables [Ilustración]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://www.huihongfiber.com/breakout-fiber-optic-patch-cables.html>
- [83] Fiber optic break out cable [Ilustración]. Recuperado el 11/05/2017 de http://www.ornets.com/Products/Fiber_Optics/BREAK_OUT_CABLE_ONFR_OFN_P_LSZH_rated.html
- [84] *24 Strand LSZH Indoor Ribbon Fiber Optic Cable With High Fiber Density, Compact* [Ilustración]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://www.fiberoptics-cables.com/sale-7552567-24-strand-lszh-indoor-ribbon-fiber-optic-cable-with-high-fiber-density-compact.html>
- [85] ADSS Cable can be live working? [Documento]. Recuperado el 11/05/2017 de <http://www.opgwfitting.com/faq/ADSS-live-working.html>
- [86] Fibras ópticas y herrajes preformados [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <http://www.technowired.net/fibras-opticas/>
- [87] Cable de fibra óptica autosoportado figura 8 [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <http://govo-telecom.com/1-6-figure-8-self-supporting-cable/176350>
- [88] GYTA53 armored and double sheathed outdoor cable [Ilustración]. Recuperado el 19/09/2017 de <http://www.oppton.com/products.asp?fid=326&fid2=&fid3=&id=1635>
- [89] Fibra óptica y las Pérdidas de la Fibra Óptica [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <https://telpromadrid.eu/fibra-optica/>
- [90] AQ7280 OTDR User's Manual. 2nd Edition.
- [91] SUNRISE TELECOM Micro OTDR Module SSMTT-35, Data Sheet.
- [92] Hand-Held Optical Power Meter Model 1916-C, Data Sheet.
- [93] Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, G.694.1 (02/2012), ITU-T.
- [94] Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda, G.694.2 (12/2003), ITU-T.
- [95] AQ2189 Optical Power Meter User's Manual, 1st Edition.
- [96] OPM JDSU OLP-55 Power Meter Data Sheet.
- [97] Fusionadora de Fibra óptica de alineación por Core DVP730.
- [98] DVP-105 Fiber Cleaver Instruction Manual.
- [99] Fujikura 12S, The FTTH Splicer Data sheet.

- [100] *High Precision Fiber Cleaver CT-30 series data sheet.*
- [101] Fujikura 12S Fusion Splicer [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <https://www.fiberinstrumentsales.com/specs/FSM-12S.pdf>
- [102] OSICS Mainframe, 8-Channel Mainframe, User Manual v1.2.
- [103] OSICS-TLS-AG Tunable Laser Source Module, Instruction Manual, septiembre 2013.
- [104] OSICS-DFB Distributed Feedback Laser Diode Source Module, Instruction Manual, marzo 2014.
- [105] OLS4 Integrated Laser and LED Source, Data Sheet, diciembre 2007.
- [106] OLS Series Light Sources, OPM Series Optical Power Meters, and Related Test Kits User's Guide, Noyes Test and Inspection, junio 2011.
- [107] G.984.1, Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales, ITU-T, marzo 2008.
- [108] G.984.2, Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa dependiente de los medios físicos, ITU-T, marzo 2003.
- [109] Video microscope for fiber optic connector inspection. DI-1000 Digital Inspector, Data sheet.
- [110] FIS VARIABLE ATTENUATOR, Data sheet.
- [111] KI 7010B *Series Automated Variable Optical Attenuator, Operation & Maintenance Guide.*
- [112] Fiber optic attenuator [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <https://www.jfopt.com>
- [113] Fiber optic splitter [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <https://www.jfopt.com>
- [114] FTTx PON Demo Kit, Data Sheet.
- [115] Set de conectorización, INTELLINET, Manual de instrucciones.
- [116] Fiber optic tools JF-100A Splice Kit [Documento]. Recuperado el 19/09/2017 de <http://www.jfopt.com/jf-252.html>
- [117] TELNET GPON *Academic kit. Datasheet*
- [118] Catálogo de productos para telecomunicaciones [Catálogo]. Recuperado el 25/09/2017 de <https://wifi.tienda/97-gpon>
- [119] Optytech, equipos y accesorios para telecomunicaciones [Catálogo]. Recuperado el 25/09/2017 de <http://www.optytech.com.ec/fibra-optica/>

- [120] Rack abierto de piso encapsulado para telecomunicaciones [Catálogo]. Recuperado el 25/09/2017 de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-412908531-rack-abierto-de-piso-encapsulado-42ur-48plg-nexxt-aw220nxt72-_JM
- [121] OptiSystem Overview. Recuperado el 25/09/2017 de <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [122] OptSim Product Overview. Recuperado el 25/09/2017 de <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html>
- [123] VPIphotonics Design Automation. Recuperado el 25/09/2017 de <http://www.vpiphotonics.com/Tools/OpticalSystems/>
- [124] Simulación y diseño basado en modelos. Recuperado el 26/09/2017 de <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>
- [125] VPIphotonics *Design Automation*. Recuperado el 25/09/2017 de <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27819-optical-fibre-toolbox?>
- [126] *Optisystem overview*. Recuperado el 25/09/2017 de <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [127] *Lesson 3: Optical Systems — WDM Design*. Recuperado el 30/09/2017 de <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-lesson-3-optical-systems-wdm-design/>
- [128] *One-click cleaner*. Recuperado el 15/10/2017 de <http://www.oneclickcleaner.com/products/products.html>
- [129] AFL 8500-30-0900MZ CleanConnect 500 Connector Cleaner. Recuperado el 15/10/2017 de <http://alitest.com/fujikura-afl-cleanconnect500-reel-cleaner.html>
- [130] Procedimientos de Limpieza e Inspección para las Conexiones de Fibra Óptica. Recuperado el 15/10/2017 de https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/optical/synchronous-digital-hierarchy-sdh/51834-cleanfiber2.html
- [131] OTDR: finding the weak spots in fiber links. EDU.photonics.com. [Ilustración]. Recuperado el 15/10/2017 de <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25150>
- [132] Fusion splice, field-terminated connector for FTTX. Fujikura [Datasheet]. Recuperado el 1/11/2017 de https://www.fusionsplicer.fujikura.com/es/products/cable/connection/details/___icsFiles/afieldfile/2015/03/06/fuseconnect-e.pdf
- [133] Optical Spectrum Analysis Basics. HP-Agilent-Keysight AN-1550-
- [134] International Standard IEC 60825-1. Edition 1.2.2001-08

ANEXOS

ANEXO A: MANUAL DE USUARIO DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO OSA *YOKOGAWA* Q6370D (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO B: FICHA TÉCNICA DEL OTDR *SUNRISE TELECOM SUNSET* MTT, MÓDULO SSMTT-35 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO C: MANUAL DE USUARIO DEL OTDR *YOKOGAWA* Q7280 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO D: MANUAL DE USUARIO DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM NEWPORT 1916-C (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO E: MANUAL DE USUARIO DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM *YOKOGAWA* AQ2180 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO F: FICHA TÉCNICA DEL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA OPM JDSU OLP-55 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO G: FICHA TÉCNICA DE LA EMPALMADORA POR FUSIÓN DVP-730 Y MANUAL DE INSTRUCCIONES DE LA CORTADORA DE PRECISIÓN DVP_105 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO H: FICHA TÉCNICA DE LA EMPALMADORA POR FUSIÓN *FUJIKURA* 12S Y DE LA CORTADORA DE PRECISIÓN *FUJIKURA* CT-30E (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO I: MANUAL DE USUARIO DE LA PLATAFORMA MULTIFUNCIÓN OSICS 8-CHANNEL MAINFRAME Y DE LOS MÓDULOS OSICS-DFB, OSICS-TLS-50 Y OSICS-TLS-AG (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO J: FICHA TÉCNICA DE LA FUENTE DE LUZ AFL OLS4 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO K: GUÍA DE USUARIO DE LA FUENTE DE LUZ AFL OLS7-3 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO L: FICHA TÉCNICA DE LA SONDA MICROSCÓPICA DE VIDEO DIGITAL PARA INSPECCIÓN DE CONECTORES *LINGHTEL* DI-1000 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO M: FICHA TÉCNICA DEL KIT DE SIMULACIÓN DE REDES PON FTTX-00-2000 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO N: FICHA TÉCNICA DEL KIT PARA ENTRENAMIENTO ACADÉMICO TELNET - GPON_ ACADEMIC_ KIT, DE LA OLT GPON TELNET SMARTOLT_240 Y DE LA ONT GPON TELNET WAVEACCESS_4022 (EN FORMATO DIGITAL).

ANEXO O: PROFORMAS DE LAS LICENCIAS PARA EL USO DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN *VPI SYSTEM* Y *OPTISYSTEM* (EN FORMATO DIGITAL).