



GUÍA PARA EL DISEÑO, ANÁLISIS E INSTALACIÓN DE REDES DE FIBRA ÓPTICA

CLAUDIA MILENA SERPA
NELSON DARÍO GÓMEZ CARDONA



**GUÍA PARA EL DISEÑO, ANÁLISIS E INSTALACIÓN
DE REDES DE FIBRA ÓPTICA**

**CLAUDIA MILENA SERPA
NELSON DARÍO GÓMEZ CARDONA**





Serpa, Claudia Milena
Guía para el diseño, análisis e instalación de redes de fibra óptica / Claudia Milena Serpa, Nelson Darío Gómez Cardona, editor Silvia Inés Jiménez Gómez.-- 1ª ed. – Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2011.

186 p.: il. -- (Colección Textos académicos)
ISBN 978-958-8743-09-7

1. Fibra óptica 2. Redes de fibra óptica 3. Comunicaciones ópticas I. Gómez Cardona, Nelson Darío II. Jiménez Gómez, Silvia Inés (editora) III. Tit. (Serie)
621.38275 SCDD 21 ed.

Catalogación en la publicación - Biblioteca ITM

COLECCIÓN TEXTOS ACADÉMICOS
Fondo Editorial ITM

GUÍA PARA EL DISEÑO, ANÁLISIS E INSTALACIÓN
DE REDES DE FIBRA ÓPTICA

© Claudia Milena Serpa
© Nelson Darío Gómez Cardona
© Instituto Tecnológico Metropolitano

1a. edición: diciembre de 2011
ISBN: 978-958-8743-09-7
Hechos todos los depósitos legales

Rectora
LUZ MARIELA SORZA ZAPATA

Editora
SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ

Comité Editorial
OLGA MARÍA RODRÍGUEZ BOLUFÉ, Ph. D., Buenos Aires
JOSÉ R. GALO SÁNCHEZ, Ph. D., Córdoba
LILIANA SAIDON, Ph. D., España
MONSERRAT VALLVERDÚ FERRER, Ph. D., España
GIANNI PEZZOTI, Ph. D. México
JUAN GUILLERMO RIVERA BERRÍO, Ph. D., Colombia
RAÚL DOMÍNGUEZ RENDÓN, Ph. D., Colombia
PAULA ANDREA BOTERO BERMÚDEZ, MGC, Colombia
SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ, MGC, Colombia
VIVIANA DÍAZ DÍAZ, Colombia

Corrección de textos
JUAN JOSÉ ARANGO

Secretaría Técnica
GLADYS MARINA GÓMEZ ACEVEDO

Diagramación
ALFONSO TOBÓN

Hecho en Medellín, Colombia

Publicación electrónica
Instituto Tecnológico Metropolitano
Institución Universitaria
Calle 73 No. 76A 354
Tel.: (574) 440 51 60 • Fax: 440 52 52
www.itm.edu.co
Medellín – Colombia

Las opiniones, originales y citas del texto son de la responsabilidad de los autores. El Instituto salva cualquier obligación derivada del libro que se publica. Por lo tanto, ella recaerá única y exclusivamente sobre los autores.

CONTENIDO

1	TRANSMISIÓN Y DISPOSITIVOS EN ENLACES DE FIBRA ÓPTICA	17
1.1	INTRODUCCIÓN	17
1.2	ASPECTOS BÁSICOS DE LA FIBRA ÓPTICA	18
1.3	PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN	20
1.4	TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ	27
1.5	PÉRDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA	29
1.6	ATENUACIÓN	30
1.7	DISPERSIÓN CROMÁTICA	33
1.8	DISPERSIÓN (<i>SCATTERING</i>) BRILLOUIN ESTIMULADA (SBS)	35
1.9	DISPERSIÓN (<i>SCATTERING</i>) RAMAN ESTIMULADA (SRS)	36
1.10	MODULACIÓN DE CRUCE DE FASE (<i>CROSS-PHASE MODULATION</i> , XPM) Y MODULACIÓN DE AUTOFASE (<i>SELF-PHASE MODULATION</i> , SPM)	36
1.11	AMPLIFICADORES ÓPTICOS	39
1.12	DIVISORES Y ACOPLADORES	41
1.13	CONECTORES Y EMPALMES	43
1.14	AISLADORES Y CIRCULADORES	45
1.15	FILTROS Y MULTIPLEXORES	46
2	FUENTES DE LUZ Y DETECTORES DE LUZ	49
2.1	INTRODUCCIÓN	49
2.2	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS FUENTES DE LUZ Y LOS DETECTORES DE LUZ... ..	51
2.3	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS DETECTORES DE LUZ	59
2.4	Especificaciones técnicas de los equipos de prueba para la caracterización de los elementos pasivos y los enlaces de fibra óptica	63

3	EL OTDR (<i>OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETER</i>, REFLECTÓMETRO ÓPTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO)	69
3.1	INTRODUCCIÓN	69
3.2	PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL OTDR	70
3.3	Medidas de pérdidas en empalmes, conectores y curvaturas, y medidas de reflectividad	77
3.3.1	Medidas de pérdidas en empalmes y curvaturas	77
3.3.2	Medidas de pérdidas en conectores	80
3.3.3	Medidas de reflectividad	81
3.4	PARÁMETROS TÉCNICOS DE UN OTDR	84
3.4.1	Rango dinámico	84
3.4.2	Rango de medida	86
3.4.3	Zonas muertas	87
3.4.4	Resolución espacial	89
3.4.5	Resolución de muestreo y número de puntos de muestreo	91
3.4.6	Eventos fantasmas y ecos	91
3.4.7	Identificación de ecos	92
3.4.8	Identificación de fantasmas	91
3.5	TIPOS DE OTDR	94
3.5.1	Tipos de eventos, descripción e interpretación de simbología	96
4	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA EMPALMADORA	101
4.1	INTRODUCCIÓN	101
4.2	PROCESO DE UNIÓN PERMANENTE UTILIZANDO EMPALMADORA POR FUSIÓN	103
4.3	PASOS PARA LA REALIZACIÓN DE UN BUEN EMPALME POR FUSIÓN	106
4.3.1	Preparación de la fibra	106
4.3.2	Usando la máquina del empalme	110
4.3.3	Imperfecciones en el proceso de empalme	116
5	ANEXO. PRÁCTICAS DE LABORATORIO	119
5.1	PRÁCTICA DE FUENTES Y DETECTORES DE LUZ	119

5.1.1	Medición de pérdidas ópticas por inserción en enlaces de fibra óptica.....	119
5.1.2	Medición de pérdidas ópticas por inserción en dispositivos pasivos	123
5.1.3	Medición de pérdidas ópticas por retorno en enlaces de fibra óptica y dispositivos pasivos.....	123
5.1.4	Certificación del enlace.....	125
5.1.5	Caracterización de los acopladores	126
5.2.1	Caracterización de enlaces mediante la interpretación de prueba y medidas utilizando el OTDR NOYES M-700 y un simulador de red..	130
5.2.1.1	Medición de la zona muerta por evento y por atenuación.....	132
5.2.1.2	Medición de la atenuación	134
5.2.1.3	Medición del rango dinámico.....	138
5.2.1.4	Localización y medición de pérdidas y reflectividad en empalmes mecánicos, empalmes por fusión y conectores	140
5.2.1.5	Detección de eventos fantasmas y ecos	143
5.2.1.6	Detección de eventos reflexivos combinados	145
5.2.1.7	Principales parámetros de desempeño de un OTDR	146
5.2.2	Caracterización de enlaces mediante la interpretación de pruebas y medidas utilizando un OTDR EXFO F TB-7500 y un simulador de red.....	147
5.2.2.1	Medición de la zona muerta por evento y por atenuación.....	149
5.2.2.2	Medición de la atenuación	149
5.2.2.3	Medición del rango dinámico.....	154
5.2.2.4	Localización y medición de pérdidas y reflectividad en empalmes mecánicos, empalmes por fusión y conectores	157
5.2.2.5	Detección de eventos fantasmas y ecos	158
5.2.2.6	Detección de eventos reflexivos combinados	160
5.3	PRÁCTICA DE EMPALMES POR FUSIÓN.....	161
	GLOSARIO.....	169
	BIBLIOGRAFÍA.....	177

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	ASIGNACIÓN DE BANDAS USADAS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS EN TÉRMINOS DE LA LONGITUD DE ONDA.....	19
FIGURA 1.2	GEOMETRÍA EN UNA INTERFASE PLANA	21
FIGURA 1.3	(A) GUÍA DE ONDA PLANA. (B) MODOS DE PROPAGACIÓN EN UNA GUÍA DE ONDA PLANA MULTIMODO.	22
FIGURA 1.4	ENTRADA DE RAYOS DE LUZ A UNA FIBRA ÓPTICA.....	23
FIGURA 1.5	FIBRA MONOMODO, SMF. FIBRA MULTIMODO, MMF. FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO, PCF	25
FIGURA 1.6	DIFERENTES PERFILES DE INTENSIDAD Y DE CONTORNO DE LOS MODOS DE PROPAGACIÓN EN UNA FIBRA MULTIMODO.....	26
FIGURA 1.7	ONDA ELECTROMAGNÉTICA.....	27
FIGURA 1.8	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MODO FUNDAMENTAL EN UNA FIBRA ÓPTICA.....	29
FIGURA 1.9	DIFERENTES MECANISMOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA.....	30
FIGURA 1.10	MECANISMOS FÍSICOS RESPONSABLES DE LA ATENUACIÓN DE POTENCIA EN UNA SMF ESTÁNDAR.....	31
FIGURA 1.11	EFFECTOS DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA. FORMAS DE LOS PULSOS TRANSMITIDOS Y RECIBIDOS, RESPECTIVAMENTE.....	33
FIGURA 1.12	DISPERSIÓN VERSUS LONGITUD DE ONDA PARA DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS	34
FIGURA 1.13	CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN AMPLIFICADOR ÓPTICO BASADO EN FIBRA ÓPTICA DOPADA CON ERBIO. BOMBEO BIDIRECCIONAL	41
FIGURA 1.14	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN ACOPLADOR 2:2.....	42
FIGURA 1.15	DIVISOR 1:8 CONSTRUIDO A PARTIR DE DIVISORES 1:2	43
FIGURA 1.16	DIFERENTES TIPOS DE CONECTORES DE FIBRA ÓPTICA	44

FIGURA 1.17	CIRCULADOR. (A) TRES PUERTOS. (B) CUATRO PUERTOS	46
FIGURA 1.18	(A) FILTRO. (B) MULTIPLEXOR	47
FIGURA 2.1	MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA UTILIZANDO UNA FUENTE DE LUZ UN DETECTOR, ACOMPAÑADO DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO DE AMPLIFICACIÓN Y FILTRADO	50
FIGURA 2.2	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA FUENTE DE LUZ	54
FIGURA 2.3	DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE UN LED.....	55
FIGURA 2.4	ANCHO ESPECTRAL DE UN LD	56
FIGURA 2.5	MONTAJE DE REFERENCIA SEGÚN LA NORMA ITU.....	64
FIGURA 2.6	MONTAJE PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS EN UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA.....	65
FIGURA 2.7	ESQUEMA PARA LA MEDICIÓN DE LAS PÉRDIDAS ÓPTICAS POR RETORNO	66
FIGURA 3.1	REGISTRO (TRAZA) DE UN OTDR.....	74
FIGURA 3.2	PULSO QUE VIAJA A LA VELOCIDAD DE LA LUZ c A TRAVÉS DE UN MEDIO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN n EN UNA LONGITUD DE FIBRA L	75
FIGURA 3.3	PÉRDIDAS EN EMPALMES.....	77
FIGURA 3.4	(A) ESQUEMA DE MEDICIÓN PARA LAS PÉRDIDAS EN CURVATURAS. (B) REPRESENTACIÓN DE LA CURVATURA EN UNA FIBRA ÓPTICA	80
FIGURA 3.5	PÉRDIDAS EN CONECTORES	81
FIGURA 3.6	MEDIDAS DE REFLECTIVIDAD	83
FIGURA 3.7	RANGO DINÁMICO DE UN OTDR.....	86
FIGURA 3.8	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ZONA MUERTA POR EVENTO Y ZONA MUERTA POR ATENUACIÓN	88
FIGURA 3.9	VARIACIÓN DE LA ZONA MUERTA POR ATENUACIÓN (m) SEGÚN ANCHO DE BANDA DEL RECEPTOR	89
FIGURA 3.10	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RELACIÓN DE COMPROMISO QUE EXISTE EN LA RESOLUCIÓN ESPACIAL ENTRE PULSOS DE 1 MS Y 100 NS	90
FIGURA 3.11	MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS ECOS Y FANTASMAS.....	94

FIGURA 4.1	(A) FIBRAS ALINEADAS. (B) DESCARGA ELÉCTRICA Y UNIÓN DE EXTREMOS. (C) EMPALME.....	105
FIGURA 4.2	ESTRUCTURA INTERNA DE UN HILO CONVENCIONAL DE FIBRA ÓPTICA..	107
FIGURA 4.3.	HERRAMIENTA MECÁNICA PARA REMOVER ACRILATOS DE 250 MM DE DIÁMETRO EN FIBRAS MONOMODO	108
FIGURA 4.4	ESQUEMA DEL PROCESO DE CLEAVADO	109
FIGURA 4.5.	FALLAS COMUNES EN EL CLEAVADO. (A) REBORDE (B) ASTILLAS. (C) CORTE ÁNGULO	110
FIGURA 4.6	ALINEACIÓN DE LAS FIBRAS.....	111
FIGURA 4.7	POSICIÓN DE LAS FIBRAS ALINEADAS CON RESPECTO A LOS ELECTRODOS.....	112
FIGURA 4.8	ARCO ELÉCTRICO SOBRE LAS FIBRAS.....	113
FIGURA 4.9.	VISUALIZACIÓN DE FALLAS EN LOS EMPALMES. (A) MALA FUSIÓN DE LOS EXTREMOS. (B) BURBUJAS DE AIRE.....	114
FIGURA 4.10	ENSAYO DE RESISTENCIA MECÁNICA A LA TRACCIÓN	115
FIGURA 4.11	PROTECTORES DE EMPALME CONVENCIONALES.....	116
FIGURA 5.1	MONTAJE DE REFERENCIA UTILIZANDO UN JUMPER SC-SC	120
FIGURA 5.2	MONTAJE PARA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS EN ENLACES DE FIBRA ÓPTICA	121
FIGURA 5.3	MONTAJE PARA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS ÓPTICAS POR RETORNO....	125
FIGURA 5.4	MEDIDAS EN EL ACOPLADOR.....	127
FIGURA 5.5	DETECCIÓN DE POTENCIA EN ACOPLADOR DIRECCIONAL. (A) PRIMERA TERMINAL; (B) SEGUNDA TERMINAL	128
FIGURA 5.6	EQUIPO DE MEDIDA OTDR NOYES M-700	131
FIGURA 5.7	MENÚ PRINCIPAL DEL OTDR NOYES M-700	134
FIGURA 5.8	EVENTO REFLEXIVO EN UN OTDR NOYES M-700.....	140
FIGURA 5.9	ENTORNO DE TRABAJO EN EL OTDR NOYES M-700.....	144
FIGURA 5.10	OTDR EXFO FTB-7500.....	148
FIGURA 5.11	MENÚ PRINCIPAL DEL OTDR EXFO FTB-7500.....	150
FIGURA 5.12	MODO DE ALMACENAMIENTO EN EL OTDR EXFO FTB-7500.....	151

FIGURA 5.13	EN EL CÍRCULO, REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE TRAMA SIN EVENTOS O TRAMO DE FIBRA EN EL OTDR EXFO FTB-7500.....	152
FIGURA 5.14	REPRESENTACIÓN GRAFICA DE EVENTOS ECOS Y FANTASMAS.....	159
FIGURA 5.15.	(A) COLOCANDO LA CUBIERTA DE PROTECCIÓN. (B) PELADO DE LA FIBRA. (C) LIMPIEZA DE LA FIBRA.....	163
FIGURA 5.16.	POSICIÓN CORRECTA DE LA FIBRA EN LA CLEAVADORA.....	164
FIGURA 5. 17	POSICIÓN CORRECTA DE LA FIBRA EN EL CANAL EN «V».....	165
FIGURA 5.218	DESCARGA ELÉCTRICA Y ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS.....	166
FIGURA 5.2 19	PRINCIPALES PARTES DE UNA MAQUINA EMPALMADORA	166

AGRADECIMIENTOS

Este libro es parte de los resultados de investigación del proyecto P07203 *Apropiación y adaptación de procedimientos y metodologías para la oferta de servicios tecnológicos en el sector de las comunicaciones por fibra óptica*, y su contenido hace parte del curso de extensión en Tecnología de Fibra Óptica dictado en el Instituto Tecnológico Metropolitano. Los autores agradecen la contribución de los editores y revisores en el proceso de edición.

1 TRANSMISIÓN Y DISPOSITIVOS EN ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

1.1 INTRODUCCIÓN

El mundo de las comunicaciones viene evolucionando rápidamente en los últimos años, debido a la gran demanda de ancho de banda requerida por los servicios de internet. Los desarrollos tecnológicos futuros en el área de las telecomunicaciones apuntan hacia una integración de servicios basada en el complemento que existe entre la flexibilidad de instalación de las redes de comunicaciones y el uso de las señales de inalámbricas, y el gran ancho de banda de la fibra óptica para la construcción de las redes de acceso hacia el hogar (*fiber to the x*, FTTX) basadas en los estándares *passive optical network* (PON) (Egan, 2003). En primer lugar, el desarrollo de las fuentes de luz y los medios de propagación mostró un gran avance en este reto. El láser, desarrollado en los años sesenta del siglo pasado, se constituyó en la fuente de luz apropiada para la transmisión en medios guiados, debido a sus características espectrales y direccionales. Sin embargo, sólo a partir de la aparición de la fibra óptica, desarrollada por los Laboratorios Corning en la década de 1970 (Goralski, 1998), fue posible implementar enlaces capaces de transmitir señales a varios cientos de kilómetros (Hecht, 1999). Los desarrollos y mejoras que la fibra óptica ha tenido en los últimos años, y la invención de fuentes láser basadas en semiconductores, permiten que hoy en día los enlaces en fibra óptica tengan un desempeño y eficiencia mucho mayores que los enlaces de cobre y las señales satelitales, siendo muy superiores en características como ancho de banda, velocidad y seguridad (Ramaswami y Sivarajan, 2001). Estas particularidades excepcionales de la fibra óptica la convierten el medio perfecto para enlazar las comunicaciones a nivel mundial:

bajo los océanos, sobre la tierra o atravesando montañas. Hoy en día, por un solo hilo de fibra, se pueden enviar cerca de 10 TB de información; esto equivale a 150 millones de llamadas telefónicas simultáneas (Green, 2005). La importancia de las fibras ópticas no radica únicamente en sus aplicaciones en comunicaciones: hay otras áreas como la medicina y la instrumentación, en las cuales la fibra es utilizada por sus propiedades físicas y químicas.

En este capítulo se describirán los principios de transmisión de señales luminosas a través de guías de onda ópticas, haciendo énfasis en la fibra óptica como medio de transmisión y señalando las principales causas de los problemas que se presentan en estos procesos; además, se mostrará el funcionamiento físico de los dispositivos ópticos pasivos utilizados en los enlaces de fibra óptica.

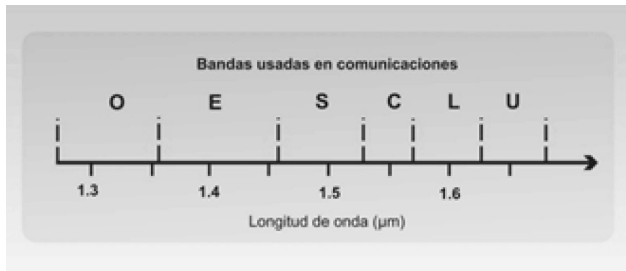
1.2 ASPECTOS BÁSICOS DE LA FIBRA ÓPTICA

La característica más importante de la fibra óptica fabricada de sílice (vidrio) es su amplia banda de frecuencias para la transmisión de señales; por ejemplo, la banda *C*, representada en la Figura 1.1 en la zona centrada en $1.550 \mu\text{m}$, con un ancho de 35 nm , y en el que la fibra presenta un mínimo de atenuación, es utilizada en aplicaciones *fiber to the home* (fibra al hogar, FTTH). Para portar la señal de video del servicio *triple-play*, solo en esta banda se disponen de 25.000 GHz para su transmisión.

En aplicaciones FTTH se incluyen, además, la banda *O*, centrada cerca de $1.310 \mu\text{m}$, y la banda *S*, con una longitud de onda de $1.490 \mu\text{m}$. Estas dos bandas, junto con la *C*, suman cerca de 100.000 GHz de ancho de banda disponible (Green, 2005; y DeCusatis, 2006).

Una representación de las bandas en comunicaciones por fibra óptica se observa en la Figura 1.1.

FIGURA 1.1 ASIGNACIÓN DE BANDAS USADAS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS EN TÉRMINOS DE LA LONGITUD DE ONDA



Fuente: elaboración de los autores.

Además del ancho de banda, la fibra óptica fabricada de sílice presenta otras ventajas que hacen de ella un medio de transmisión excepcional:

- Bajo costo (en el largo plazo); menor que el del cobre
- Baja relación atenuación/distancia (cerca de 0,2 dB/km a 1.550 nm) con respecto al cobre y los medios inalámbricos
- Tamaños y pesos reducidos
- Poco envejecimiento de las partes y elementos
- Insensibilidad a descargas eléctricas y en general a campos electromagnéticos
- Gran ancho de banda (\sim THz)
- Facilidad de multiplexación de señales ópticas
- Multifuncionalidad del cable (señales analógicas y digitales)

1.3 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

Para describir los parámetros de transmisión de una fibra óptica, se definirán los principios básicos de funcionamiento de una guía de *onda óptica*, un elemento formado por dos materiales que tienen índices de refracción diferentes, capaz de confinar y guiar una señal luminosa mediante el fenómeno de reflexión total interna. Suponiendo que se tiene un rayo de luz que incide desde un material sobre una interfaz, con un índice de refracción n_2 , con otro material, con un índice de refracción n_1 , tal que $n_2 > n_1$, como se muestra en la Figura 1.2, según la ley de Snell, la transmisión a través de esta interfaz está dada por

$$\theta_i = \theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.1)$$

De la relación anterior es claro que θ_t alcanzará el valor de 90° cuando θ_i alcance el valor de

$$\theta_i = \theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.2)$$

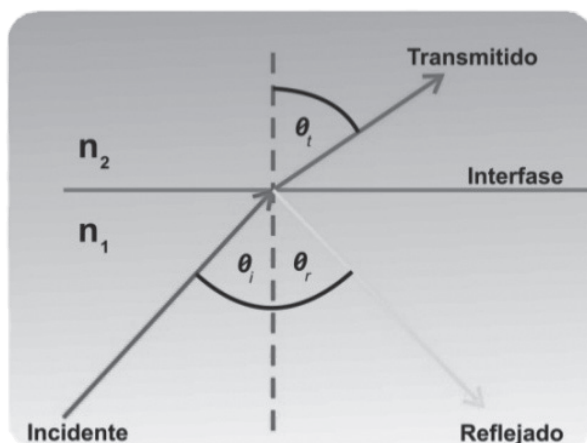
donde:

θ_c es llamado el ángulo crítico

Para ángulos mayores de θ_c , la luz será reflejada de regreso al medio de índice de refracción n_1 . A este fenómeno se lo conoce

como reflexión total interna, y permite transmitir la luz a través de la guía sin pérdidas apreciables.

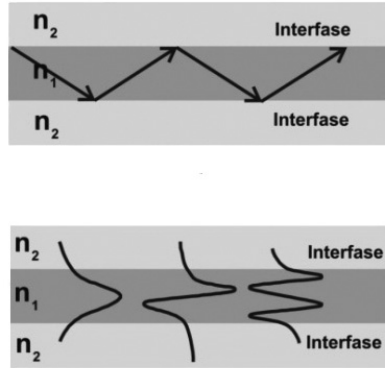
FIGURA 1.2 GEOMETRÍA EN UNA INTERFASE PLANA



Fuente: elaboración de los autores.

Las guías de ondas ópticas más frecuentemente usadas son las *planas* y las *circulares*. En una guía de onda plana, como la de la Figura 1.3(a), el material con un índice de refracción mayor está en las fronteras de otro que tiene un índice de refracción menor. La luz confinada en el núcleo de la guía de onda plana viaja en forma de *modos de propagación*. Estos modos son las formas espaciales (trayectorias de la luz) dentro de la guía de onda. El número de modos depende de varios parámetros de la guía de onda: el espesor del núcleo, la longitud de onda de la luz que viaja por la guía y el perfil de índice de refracción de la guía. En la Figura 1.3(b) se observan algunos modos de propagación de una guía de onda plana multimodo.

FIGURA 1.3 (A) GUÍA DE ONDA PLANA. (B) MODOS DE PROPAGACIÓN EN UNA GUÍA DE ONDA PLANA MULTIMODO



Fuente: elaboración de los autores.

Una *fibra óptica* es una guía de onda con geometría circular. El *núcleo* es la región central de la fibra y dentro de este, la luz es confinada por reflexión total interna en la interfaz núcleo/revestimiento, debido a que el índice de refracción n_2 es ligeramente menor que el índice del núcleo n_1 . A este tipo de fibras se las conoce como *fibras de índice de paso*. En ellas, el índice de refracción del revestimiento está relacionado con el índice del núcleo por lasiguiente expresión (Agrawal, 2002):

$$n_2 \approx n_1(1 - \Delta) \tag{1.3}$$

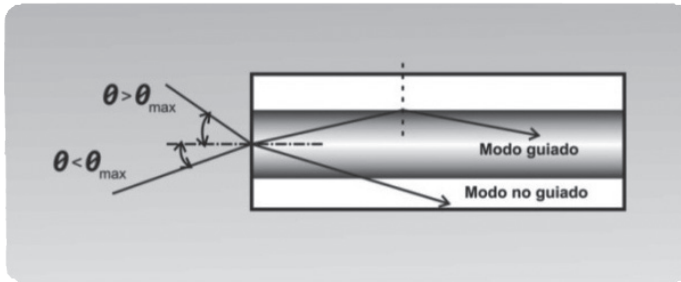
donde:

Δ es el cambio fraccional en los índices de refracción, y está dado por

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

Uno de los parámetros más importantes de la fibra óptica es la *apertura numérica (numerical aperture, NA)*, que indica la cantidad de luz que se puede acoplar en la fibra óptica. Considérense unos rayos de luz entrando a una fibra óptica, tal como se ve en la Figura 1.4.

FIGURA 1.4 ENTRADA DE RAYOS DE LUZ A UNA FIBRA ÓPTICA



Fuente: elaboración de los autores.

A partir de la ley de Snell, y haciendo uso de relaciones trigonométricas, se deduce que el valor $\theta_{m\acute{a}x}$ que puede tener un rayo de luz para que sea guiado por la fibra óptica está dado por

$$\theta_{m\acute{a}x} = \text{sen}^{-1} \left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right) \approx \text{sen}^{-1} \left(n_1 \sqrt{2\Delta} \right) \quad (1.5)$$

donde:

n_1 es el índice de refracción del núcleo

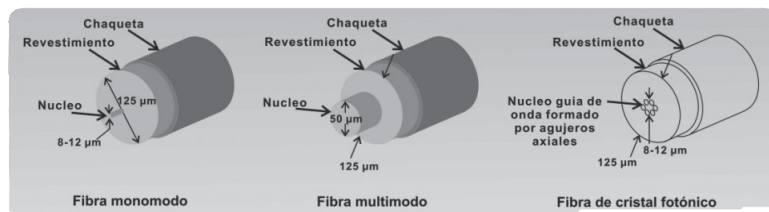
n_2 es el índice del revestimiento

La Ecuación 1.6 muestra que la apertura numérica es independiente de los diámetros exterior e interior de la fibra óptica (Agrawal, 2002). La *apertura numérica* es, entonces, el seno del ángulo máximo que puede tener un rayo de luz para poder ser guiado en la fibra.

$$NA = \text{sen}(\theta_{\text{máx.}}) = \left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \approx \left(n_1 \sqrt{2\Delta}\right) \quad (1.6)$$

Existen tres tipos de fibra óptica básicos usados en las telecomunicaciones: la *fibra monomodo* (*single-mode fibre*, SMF), la *fibra multimodo* (*multi-mode fibre*, MMF) y la *fibra de cristal fotónico* (*photonic cristal fibre*, PCF), como se observa en la Figura 1.5. Recientemente, se han venido usando fibras de polimetilmetacrilato (PMMA) plástico de índice de paso (*step index-polymer optical fiber*, SI-POF), con núcleos de hasta 1 mm, para transmisión de GB/s de corto alcance en redes de acceso a casas y edificios, al igual que una fibra óptica especial, con muy bajas pérdidas (*bend-insensitive fibre*, BIF) y alta compatibilidad con la infraestructura SMF existente, es utilizada para realizar instalaciones alrededor de las esquinas.

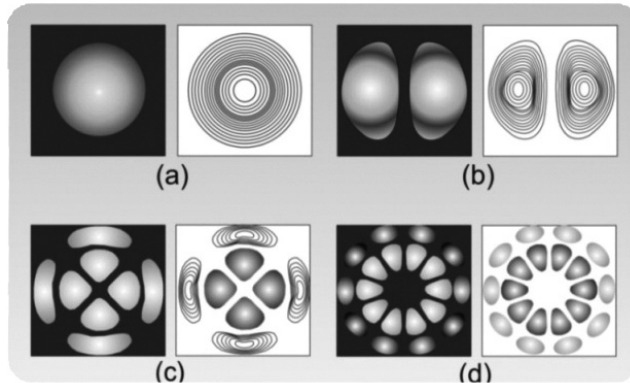
FIGURA 1.5 FIBRA MONOMODO, SMF. FIBRA MULTIMODO, MMF. FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO, PCF



Fuente: elaboración de los autores.

En una SMF el diámetro del núcleo es tal que solo un modo puede propagarse, es decir, su campo eléctrico puede tomar una única forma espacial. En una MMF, en cambio, donde el diámetro es mayor, se pueden propagar más modos, y existen varias formas espaciales del campo eléctrico que viajan, cada una, a diferente velocidad dentro de la fibra. El diámetro del núcleo es del orden de 9-10 µm en la SMF y de 50-62,5 µm en la MMF; y el diámetro del revestimiento es 125 µm en ambas fibras. En la Figura 1.6 se observan algunos perfiles de intensidad para los modos de propagación en una fibra óptica. En la SMF, solo el modo fundamental (a) se propaga en la fibra. La MMF soporta, además, otras distribuciones del campo eléctrico. Las distribuciones (b), (c) y (d) se conocen como *modos de orden superior*.

FIGURA 1.6 DIFERENTES PERFILES DE INTENSIDAD Y DE CONTORNO DE LOS MODOS DE PROPAGACIÓN EN UNA FIBRA MULTIMODO



Fuente: elaboración de los autores.

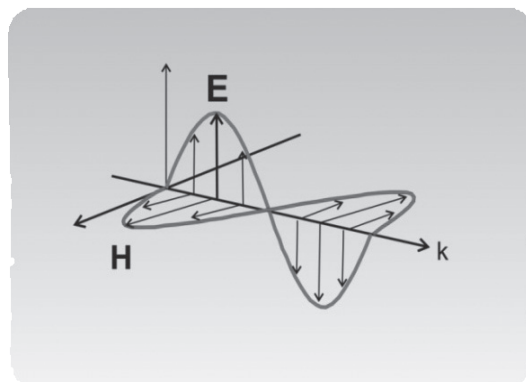
La MMF es costosa de producir, ya que el germanio (Ge), elemento con el cual se dopa el núcleo, es costoso. Actualmente, con la aparición de las fibras plásticas, se ha visto una reducción significativa en el costo (Morse, 2007). La MMF se utiliza en aplicaciones que no requieren alta velocidad de transmisión y en donde, además, las distancias son tan cortas que las dispersiones cromática y modal son despreciables (por ejemplo, en conexiones entre elementos de electrónica de consumo en los hogares—DVD, TV, equipos de sonido y placas madres de computadores—). En la SMF, la mayor parte de la energía es confinada en el núcleo; sin embargo, algunos dispositivos como los acopladores y los divisores requieren que el diámetro del núcleo sea menor a 9 μm , para así poder acoplar una mayor cantidad de energía en el revestimiento en forma de campo evanescente. Cuando dos guías de onda están muy cercanas, el campo evanescente que viaja por el revestimiento acopla energía hacia el núcleo adyacente. Este principio físico es usado para construir multiplexores y aisladores.

Por otra parte, en la actualidad se han desarrollado otros tipos de fibras como las de dispersión aplanada (*dispersion-flattened, DF*), con el fin de disminuir la aparición de fenómenos no lineales indeseados en tecnología *wavelength division multiplexing* (WDM) y transmisión de datos a largas distancias.

1.4 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La *luz* es una onda electromagnética en la que los campos eléctrico y magnético viajan acoplados en el espacio y el tiempo. Las ondas electromagnéticas describen los parámetros de propagación, reflexión, refracción y su interacción con el medio: velocidad de propagación, polarización, fase, intensidad de la luz, absorción y dispersión (Agrawal, 2002). La Figura 1.7 muestra el esquema de una onda electromagnética.

FIGURA 1.7 ONDA ELECTROMAGNÉTICA



Fuente: elaboración de los autores.

La propagación de las ondas electromagnéticas en un medio libre de corrientes y cargas está regida por la ecuación de onda

$$\nabla^2 E = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

donde:

$\mu\varepsilon$ es la velocidad de propagación

En el vacío, la onda se propaga con velocidad $c^{-2} = \mu_0 \varepsilon_0$ en un medio con velocidad $v^{-2} = n^2 / c^2$.

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética en el vacío se describen como

$$\begin{aligned} H(r,t) &= H_0(r) \cos(\kappa_0 \cdot r - \omega t + \varphi) \\ E(r,t) &= E_0(r) \cos(\kappa_0 \cdot r - \omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1.8)$$

donde:

$E_0(r)$ y $H_0(r)$ representan la polarización

$\kappa = 2\pi / \lambda$ es la constante de propagación

$\omega = 2\pi c / \lambda$ es la frecuencia de oscilación

φ es la fase

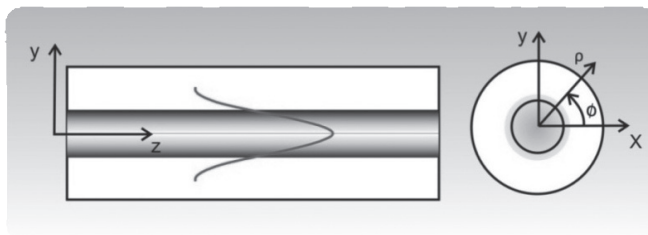
La intensidad de la onda es proporcional a $|E|^2$. La expresión para el campo $E(r,t)$ de una onda guiada depende de la geometría de la guía de onda y de las condiciones de frontera; así, en una

guía de onda circular (fibra óptica), el campo eléctrico se puede expresar como

$$E(r, t) = \begin{cases} j(\rho) = \text{Bessel} - \text{Hankel} \\ \Phi(\varphi) = \exp(im\phi) \\ Z(z) = \exp(i\beta_n z) \end{cases} \quad (1.9)$$

cuya distribución se presenta en la Figura 1.8.

FIGURA 1.8 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MODO FUNDAMENTAL EN UNA FIBRA ÓPTICA



Fuente: elaboración de los autores.

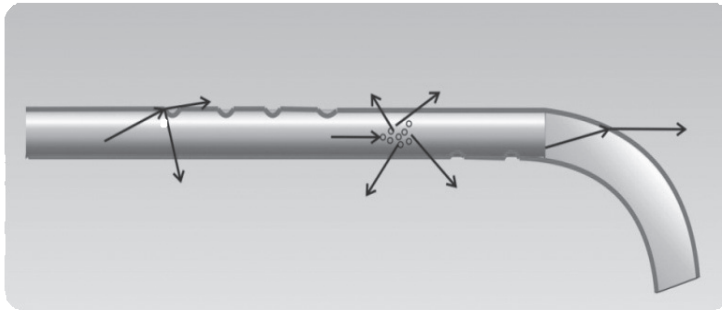
Las funciones de Bessel-Hankel dan cuenta de las distribuciones espaciales de los modos; $\hat{\alpha}_n$ es la constante de propagación en la dirección z .

1.5 PÉRDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA

La necesidad de transmitir mayores cantidades de datos a mayores cantidades de usuarios hace necesario el uso de potencias más altas; sin embargo, estas potencias pueden causar la aparición de efectos no deseados en la transmisión (Agrawal, 2002). Entre las causas intrínsecas (debidas a la composición misma de la fibra),

están las siguientes: impurezas, no homogeneidades y presencia de dopantes, que causan *scattering Rayleigh*, entre otros tipos de dispersión (Green, 2005). Entre las causas extrínsecas, por su parte, están las siguientes: microcurvaturas y macrocurvaturas y absorción de iones de OH en la matriz de vidrio. En la Figura 1.9 se observan las principales causas de las pérdidas de potencia.

FIGURA 1.9 DIFERENTES MECANISMOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA



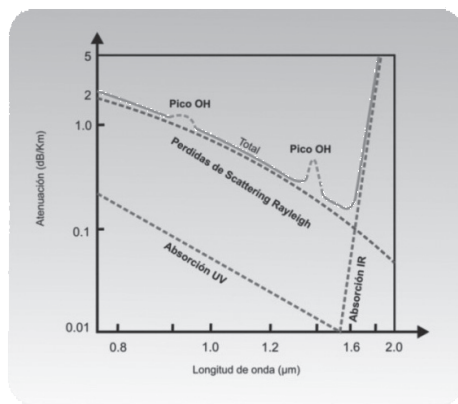
Fuente: elaboración de los autores.

1.6 ATENUACIÓN

Los principales fenómenos físicos causantes de la atenuación en una SMF estándar se muestran en la Figura 1.10, en la que se observa la dependencia de la atenuación debida a cada fenómeno físico particular como función de la longitud de onda. Los mecanismos físicos predominantes de atenuación son el *scattering Rayleigh* y la absorción infrarroja y, en menor proporción, la absorción ultravioleta (Agrawal, 2002). Adicionalmente, hay dos regiones donde la absorción de moléculas de OH⁻ es apreciable; esta absorción de iones hidroxilos se puede presentar durante o después del proceso de fabricación de la fibra óptica. Algunas

fibras ópticas fabricadas recientemente, conocidas como *fibras sin pico de agua (zero water peak, ZWP)*, no presentan estas regiones de absorción de moléculas de OH⁻.

FIGURA 1.10 MECANISMOS FÍSICOS RESPONSABLES DE LA ATENUACIÓN DE POTENCIA EN UNA SMF ESTÁNDAR



Fuente: elaboración de los autores a partir de Rajiv Ramaswami y Kumar N. Sivarajan (2001). *Optical Networks: A Practical Perspective*. 2.^a ed. San Francisco. Morgan Kaufmann Publishers.

Las pérdidas de potencia promedio en la señal que se propaga en un tramo fibra óptica de longitud L se pueden modelar según la ley de Beer (Green, 2005).

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha(\lambda) p \quad (1.10)$$

En forma de integral,

$$\int_{p_{in}}^{p_{out}} \frac{dp}{p} = -\alpha(\lambda) \int_0^l dz \quad (1.11)$$

Integrando,

$$P_{in} = P_{out} \exp(-\alpha(\lambda)L) \quad (1.12)$$

donde:

$\alpha(\lambda)$ es el *coeficiente de atenuación* y la relación entre las pérdidas de señal (en dB) y la longitud del enlace L .

Este coeficiente depende fuertemente de la longitud de onda e incluye, además, otros mecanismos causantes de pérdidas. Es usual expresar a $\alpha(\lambda)$ en dB/km.

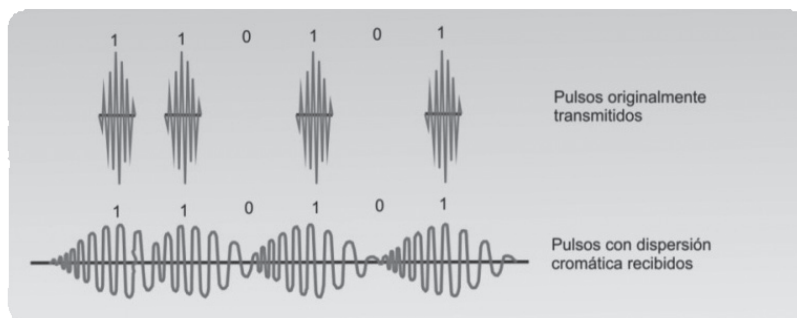
$$\alpha(\lambda)(dB / km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (1.13)$$

1.7 DISPERSIÓN CROMÁTICA

La *dispersión cromática* se origina por la dependencia de la velocidad de propagación con la longitud de onda (Bailey y Wright, 2003). Ocurre por dos causas principales: el amplio rango de emisión de la fuente y la dispersión inherente a la fibra (*dispersión modal*), propia de la MMF. Debido a la dispersión cromática, los pulsos emitidos por el emisor se ensanchan, y los pulsos adyacentes de la señal se solapan unos con otros, por lo cual la señal llega distorsionada al receptor, tal como se observa

en la Figura 1.11. Este fenómeno limita la tasa de b/s que puede ser enviada.

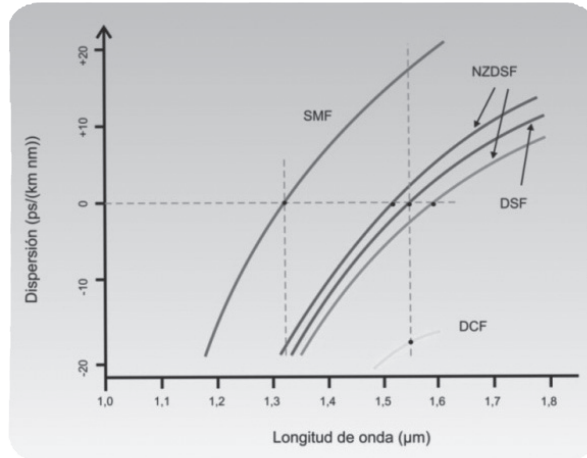
FIGURA 1.11 EFECTOS DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA. FORMAS DE LOS PULSOS TRANSMITIDOS Y RECIBIDOS, RESPECTIVAMENTE



Fuente: elaboración de los autores.

La Figura 1.12 muestra la gráfica de dispersión versus la longitud de onda para varios tipos de fibras. En ella se observa que la SMF tiene un valor de dispersión de 0 a una longitud de onda de ~ 1.310 nm; sin embargo, su valor a 1.550 nm es de $\sim +18$ ps/km nm, lo que limita significativamente la velocidad de transmisión de datos a esta longitud de onda alrededor de la banda de transmisión C (véase la Figura 1.1). La banda C, adicionalmente, presenta un mínimo de atenuación espectral.

FIGURA 1.12 DISPERSIÓN VERSUS LONGITUD DE ONDA PARA DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS



Fuente: elaboración de los autores.

Pese a esto, en la actualidad se han hecho importantes avances para corregir los efectos de la dispersión. Entre los más importantes están:

- La *fibra con compensación de dispersión (dispersion-compensating fiber, DCF)*, que se construye con una dispersión de signo opuesto (~ -18 ps/km nm) para compensar la dispersión causada por la SMF a 1.550 nm.
- La *fibra de dispersión desplazada (dispersion-shifted fiber, DSF)*, que presenta un valor de dispersión de entre 0 y 1.550 nm.
- La *fibra óptica de dispersión desplazada en un valor mayor a 0 (non-zero dispersion-shifted fiber, NZDSF)*, que tiene un

valor de dispersión diferente a 0, pero mucho menor que el de la SMF; se utiliza en aplicaciones WDM y en transmisión de solitones, donde se requiere compensar los efectos no lineales con la dispersión.

Por otro lado, existen dispositivos basados en redes de Bragg «chirpadas» (*fiber Bragg grating*, FBG), que se ubican en un lugar anterior al receptor y que recuperan la forma del pulso antes de ser detectado.

1.8 DISPERSIÓN (*SCATTERING*) BRILLOUIN ESTIMULADA (SBS)

La *scattering Brillouin estimulada* (SBS) es un fenómeno de electro-estricción, es decir, en el que el material tiende a ser comprimido por la presencia de un campo electromagnético (Powers, 2001). La luz afectada por este fenómeno es radiada mayoritariamente en dirección contrapropagante y con una frecuencia un poco menor que la original. Este pequeño corrimiento en la frecuencia (11 GHz, 0,09 nm) ocurre porque parte de la energía de los fotones se pierde en vibraciones de la estructura de la fibra (fonones). La SBS causa los siguientes efectos (que son poco deseados) en un enlace óptico:

- Es contrapropagante, es decir, genera inestabilidad en la fuente
- Produce pérdidas en la señal que llega al receptor

Típicamente, potencias entre +6 y +10 dBm para 10 km de SMF son suficientes para la aparición de este fenómeno.

BIBLIOGRAFÍA

- AFL Communications. «NOYES Test & Inspection». Sitio web: AFL. Disponible en: http://www.afltele.com/products/test_inspection/index.html. Fecha de consulta: 1 junio 2011.
- Agrawal, Govind P. (2002). *Fiber-Optic Communication Systems*. 2.^a ed. Nueva York. Wiley-Interscience.
- Anderson, Duwayne R., Larry Hohnson y Florian G. Bell (2004). *Troubleshooting Optical-fiber Network*. 2.^a ed. San Diego. Elsevier.
- Bailey, David y Edwin Wright (2003). *Practical Fiber Optics*. Londres. Newness.
- Boquera España, María Carmen (2005). *Comunicaciones Ópticas. Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid. Díaz de Santos.
- Chomycz, Bob (2000). *Fiber Optic Installer's Field Manual*. Nueva York. McGraw-Hill.
- Chu, Benjamin (1991). *Laser light scattering: basic principles and practice*. Michigan. Academic Press.
- DeCusatis, Casimer M. (2006). *Fiber Optic Essentials*. Carolyn J. Sher DeCusatis, consultora. San Diego. Academic Press.
- Derickson, Dennis (1998). *Fiber optic test and measurement*. Upper Saddle River. Prentice Hall PTR.
- Digonnet, Michel J. F. (2001). *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. 2.^a ed. Nueva York. Marcel Dekker.
- Egan, Willian F. (2003). *Practical RF system Design*. S. 1. Wiley-IEEE Press.
- Elbers, Jorg-Peter (2010). "Optical access solutions beyond 10G-EPON/XG-PON". En: *Proceedings of the National Fiber Optical Engineers Conference*. Paper OTU01. San Diego.
- EXFO. «OTDR Module Series». Sitio web: *Exfo*. Disponible en: <http://documents.exfo.com/specsheets/FTB-7000-angHR.pdf>. Fecha de consulta: 1 junio 2011.

- Ghatak, Ajoy K. y K. Thyagarajan (1998). *An introduction to Fiber Optics*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Goralski, Walter (1998). *ADSL and DSL Technologies*. Nueva York. McGraw-Hill.
- Green, Jr., Paul E. (2005). "Fiber to the Home: The New Empowerment". En: *Wiley Survival Guides in Engineering and Science*. Hoboken. Wiley-Interscience.
- Hecht, Jeff (1999). *City of Light: The Story of fiber Optics*. Nueva York. Oxford University Press.
- Hoss, Robert J. y Edward A. Lacy (1993). *Fiber Optics*. 2.^a ed. Michigan. Prentice Hall.
- Iizuka, Keigo (2008). *Engineering Optics*. Nueva York. Springer.
- ITU Ventures. «Normatización de fibra óptica». Sitio web: ITU. Disponible en: www.itu.com. Fecha de consulta: 1 junio 2011.
- Keiser, Gerd (2006). *FTTx Concepts and Applications*. S. 1. Wiley-IEEE Press.
- Liptak, Bela G., ed. (2005). "Process Control and Optimization". Vol. 2 en: *Instrument Engineers' Handbook*. 4.^a ed. Connecticut. CRC Press.
- Morse, T. F. (2007). *Speciality Optical Fibers Handbook*. Alexis Mendez, ed. San Diego. Academic Press.
- Ortega Tamarit, Beatriz (2003). *Prácticas de comunicaciones ópticas*. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia.
- Palais, Joseph C. (1998). *Fiber Optic Communications*. 4.^a ed. Michigan. Prentice Hall.
- Passauer, N. L. y L. K. Christian (1989). *Fiber Optic Component Design, Fabrication, Testing, Operation, Reliability, and Maintainability*. New Jersey. William Andrew.
- Powers, John P. (2001). *An Introduction to Fiber Optic Systems*. Nueva York. Marcel Dekker.
- Ramaswami, Rajiv y Kumar N. Sivarajan (2001). *Optical Networks: A Practical Perspective*. 2.^a ed. San Francisco. Morgan Kaufmann Publishers.
- Tomasi, Wayne (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. 4.^a ed. México. Pearson Educación.

- Universidad Autónoma de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Memoria de Comunicación 2009. Sitio web: *Universidad Autónoma de Madrid*. Disponible en: http://www.eps.uam.es/esp/investigacion/memoria_2009.pdf. Fecha de consulta: 1 junio 2011.
- Woodward, Bill y Emile B. Husson (2005). *Fiber Optics Installer and Technician Guide*. Nueva York. John Wiley & Sons.
- Yablon, Andrew D. (2005). *Optical Fiber Fusion Splicing*. Berlín. Springer.
- Yokogawa Electric Corporation (2008). «La importancia de la hoja de datos de un OTDR». **Sitio web:** *Yokogawa*. Disponible en: http://www.redeweb.com/_txt/646/98.pdf. Fecha de consulta: 1 junio 2011.

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1	FUENTES DE LUZ LD DISPONIBLES EN EL MERCADO	58
TABLA 2.2	COMPARACIÓN ENTRE LOS LED Y LOS LD.....	59
TABLA 2.3	MATERIAL DE DETECTORES SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA.....	61
TABLA 3.1.	DESCRIPCIÓN Y SIMBOLOGÍA DE EVENTOS REGISTRADOS POR EL OTDR....	96
TABLA 4.1	ERRORES COMUNES EN EL PROCESO DE EMPALME. POSIBLES CAUSAS Y SOLUCIONES.....	117
TABLA 5.1	VALORES INICIALES UTILIZANDO EL MONTAJE DE LA FIGURA 2.8....	121
TABLA 5.2	VALORES INICIALES UTILIZANDO EL MONTAJE DE LA FIGURA 5.2....	122
TABLA 5.3	DATOS DEL CERTIFICADOR DE RED.....	126
TABLA 5.4	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS SEGÚN LA NORMATIZACIÓN ITU-T [2].....	126
TABLA 5.5	VALORES INICIALES UTILIZANDO EL MONTAJE DE LA FIGURA 5.2....	126
TABLA 5.6	VALOR TERMINAL 1.....	128
TABLA 5.7	VALOR TERMINAL 2.....	128
TABLA 5.8	RAZONES DE ACOPLAMIENTO EN ACOPLADORES	129
TABLA 5.9	DATOS DE ZONA MUERTA POR EVENTO Y ATENUACIÓN.....	133
TABLA 5.10	MEDIDA DE LAS COORDENADAS AL INICIO Y AL FINAL DEL TRAMO A 1.550 NM.....	135
TABLA 5.11	MEDIDA DE LAS COORDENADAS AL INICIO Y AL FINAL DEL TRAMO A 1.310 NM.....	136
TABLA 5.12	ATENUACIÓN VERSUS LONGITUD DE ONDA DE LA SEÑAL	137
TABLA 5.13	CÁLCULO DE LA RDR Y RDB A 1.550 NM	139
TABLA 5.14	CÁLCULO DE LA RDR Y RDB A 1310 NM	139
TABLA 5.15	DATOS DE EVENTOS REFLEXIVOS REGISTRADOS EN EL OTDR	141
TABLA 5.16	DATOS DE EVENTOS NO REFLEXIVOS REGISTRADOS EN EL OTDR	142
TABLA 5.17	DESCRIPCIÓN DE EVENTOS REFLEXIVOS COMBINADOS	146

TABLA 5.18	PRINCIPALES PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN OTDR	146
TABLA 5.19	DATOS DE ZONA MUERTA POR EVENTO Y ATENUACIÓN.....	149
TABLA 5.20	MEDIDA DE LAS COORDENADAS AL INICIO Y AL FINAL DEL TRAMO A 1.550 NM.....	152
TABLA 5.21	MEDIDA DE LAS COORDENADAS AL INICIO Y AL FINAL DEL TRAMO A 1.310 NM.....	153
TABLA 5.22	ATENUACIÓN VERSUS LONGITUD DE ONDA DE LA SEÑAL	154
TABLA 5.23	CÁLCULO DE LA RDR Y RDB A 1.550 NM	155
TABLA 5.24	CÁLCULO DE LA RDR Y RDB A 1.310 NM	156
TABLA 5.25	DATOS DE EVENTOS REFLEXIVOS REGISTRADOS EN EL OTDR	157
TABLA 5.26	DATOS DE EVENTOS NO REFLEXIVOS REGISTRADOS EN EL OTDR	158
TABLA 5.27	DESCRIPCIÓN DE EVENTOS REFLEXIVOS COMBINADOS	161



*Guía para el Diseño, Análisis e Instalación
de Redes de Fibra Óptica*

Las fuentes tipográficas empleadas son Times New Roman 12 puntos,
en texto corrido, y Myriad Pro 14 puntos en títulos.