

SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS (Monografía)

PRIMERA EDICIÓN



Ricardo Alfonso Pinto García

Andrés Felipe Cabezas

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

BOGOTÁ, 2014



Sistemas de comunicaciones ópticas

Monografía

Autores:

Andrés Felipe Cabezas (Estudiante)
Ricardo Alfonso Pinto García (Director)

Universidad Militar Nueva Granada

Bogotá D.C. 2014

**CABEZAS, ANDRÉS FELIPE
PINTO, G. RICARDO ALFONSO**

Sistemas de comunicaciones ópticas
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA,
Bogotá D.C. 2014
Formato: Carta Páginas 145

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

Mayor General (R) Eduardo Antonio Herrera Berbel
Rector

Brigadier General Alberto Bravo Silva
Vicerrector General

Marta Lucía Bahamón Jara
Vicerrectora académica

Jorge Arturo Rey Cubillos
Vicerrector de Investigaciones

Mayor General (R) Jairo Alfonso Aponte Prieto
Decano facultad de ingeniería

Ingeniero Carlos Omar Ramos
Director del programa Ingeniería en Telecomunicaciones

SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

EDICIÓN EN ESPAÑOL: Es la única autorizada

ISBN: En trámite

Universidad Militar Nueva Granada
Primera edición: No especificada
Bogotá, D.C.

Andrés Felipe Cabezas
Colaborador de normas, contenidos y formato.
Estudiante del programa Ingeniería en Telecomunicaciones

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación puede reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin el permiso del autor y/o editor.

DEDICATORIA

Este primer intento por entregar un libro de texto basado en el aprendizaje, prácticas y nuevos conocimientos adquiridos en mis 20 años de docencia universitaria, los dedico a la Divina Naturaleza que me ha puesto en este lugar, donde soy feliz.

A mis padres ya fallecidos, quienes durante su larga y provechosa vida me dieron el amor, la comprensión y la constancia para entregar a mis semejantes, alguna de mis realizaciones que tuvieran esos componentes aprendidos de ellos.

A todos los estudiantes que han pasado por mi cátedra desde donde he aprendido a aprender para enseñar. A ellos porque también han sido mis maestros al ayudar a construir conocimiento, generando espacios de duda y exigencia en la comprensión de los fenómenos físicos expresados en ecuaciones y a Andrés Felipe Cabezas, por haber tomado estos apuntes de clase como fuente para realizar la monografía y hacerla su trabajo final de grado.

A la Universidad Militar Nueva Granada y a sus directivas del Programa Ingeniería en Telecomunicaciones, porque me han dado la oportunidad de practicar la docencia en un ambiente con calidad y exigencia.

Ricardo Alfonso Pinto García

Al Dios de los cielos, a mis padres y hermanos que siempre creyeron en mí y me colaboraron para que hoy pueda presentar este trabajo final de grado, a mis maestros que me enseñaron en las aulas de la universidad el conocimiento, la responsabilidad y la constancia, valores sin los cuales habría sido difícil cumplir con mis objetivos académicos.

Al ingeniero Ricardo Pinto por haberme dado su confianza y apoyo en la dirección de este trabajo, del cual aprendí mucho para beneficio propio y quizás de otros estudiantes que puedan tomar esta monografía como libro guía en el aprendizaje de las temáticas de la fibra óptica.

Andrés Felipe Cabezas

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	10
INTRODUCCIÓN	11
1. SISTEMA ÓPTICO DE COMUNICACIONES	11
2. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	11
2.1 Velocidad de transferencia de datos y ancho de banda	11
2.2 Muestreo	12
2.3 Digitalización	12
3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	12
3.1 Espectro óptico	13
3.2 Unidades aplicables en fibra óptica	14
4. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES CON FIBRA ÓPTICA	15
5. HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS	16
6. COMPARATIVO DE LA FIBRA ÓPTICA Y LOS CABLES	18
7. LAS FIBRAS DE ACUERDO CON LOS MATERIALES DE SU ESTRUCTURA	19
8. EJERCICIOS RESUELTOS	19
9. EJERCICIOS PROPUESTOS	19
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS ÓPTICOS	21
1. FÍSICA DE LA LUZ	21
1.1. Teorías de estudio	21
1.2. Energía del fotón	21
1.3. Velocidad de propagación	22
2. FENÓMENOS ÓPTICOS APLICABLES	22
2.1. Refracción	22
2.2. Índice de refracción	23
2.3. Camino óptico y camino geométrico	24
2.4. Leyes de la refracción	24
2.5. Ángulo crítico	25
3. EJERCICIOS RESUELTOS	26
4. EJERCICIOS PROPUESTOS	28
CAPÍTULO 2: LA FIBRA ÓPTICA Y PARÁMETROS QUE LA CARACTERIZAN	29
1. ESTRUCTURA FÍSICA	29
2. TIPOS Y CONFIGURACIONES DE FIBRA	29
2.1. Por el modo de propagación	30
2.2. Por el perfil de índice de la fibra	30
2.3. Configuraciones de la fibra	30
2.3.1. Fibra monomodo de índice escalonado	30
2.3.2. Fibra multimodo de índice escalonado	30
2.3.3. Fibra multimodo de índice gradual	30
3. PROPIEDADES DE LA FIBRA	31
3.1. Diferencia entre índices de refracción	31
3.2. Angulo de aceptación y cono de aceptación (TOMASI, 2003)	32
3.3. Apertura numérica (NA)	34
4. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS	35
4.1. Función de onda	35

4.2.	Ecuación de resonancia transversal	36
4.3.	Número de modos que se propagan por una fibra de índice escalonado.....	37
5.	PÉRDIDAS EN LAS FIBRAS ÓPTICAS	39
5.1	Tipo de pérdidas.....	39
5.2	Factor de atenuación de las fibras ópticas	40
5.3	Ejemplos de atenuación	41
6.	PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN.....	42
6.1.	Pérdidas intrínsecas.....	42
6.1.1.	Absorción ultravioleta	42
6.1.2.	Absorción infrarroja.....	42
6.2.	Pérdidas extrínsecas	43
7.	PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN.....	44
7.1.	Pérdidas por dispersión lineal	44
7.1.1.	Dispersión de Rayleigh.....	44
7.1.2.	Dispersión de Mie.....	45
7.2.	Pérdidas por dispersión no lineal	45
7.2.1.	Dispersión de Brillouin	45
7.2.2.	Dispersión de Raman:	46
7.3.	Otros efectos no lineales en la fibra.....	47
7.3.1.	Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	47
7.3.2.	Modulación por fase cruzada (XPM)	47
8.	PÉRDIDAS POR CURVATURAS.....	47
9.	OTRAS PÉRDIDAS DEBIDAS A PARÁMETROS INTRÍNSECOS	50
9.1.	Pérdidas intrínsecas en las fibras monomodo	51
9.2.	Pérdidas asociadas con el diámetro del núcleo en las fibras multimodo	51
9.3.	Pérdidas relacionadas con variaciones en el índice de refracción.....	52
9.4.	Pérdidas debidas a la apertura numérica en las fibras multimodo	52
10.	PÉRDIDAS DEBIDAS A PARÁMETROS EXTRÍNSECOS	52
10.1.	Desalineamiento axial en las fibras multimodo	53
10.2.	Desalineamiento axial en las fibras monomodo	53
10.3.	Desalineamiento angular en las fibras multimodo	53
10.4.	Desalineamiento angular en las fibras monomodo	54
10.5.	Pérdidas por separación entre caras en las fibras multimodo	54
10.6.	Pérdidas por separación entre caras en las fibras monomodo	54
11.	PÉRDIDAS DE FRESNEL.....	55
12.	ACOPLAMIENTOS BÁSICOS.....	55
12.1.	Acoplamiento por empalme.....	55
12.2.	Acoplamiento por conector	56
12.3.	Pérdidas en el acoplamiento fuente a fibra	56
13.	EJERCICIOS PROPUESTOS	56
CAPITULO 3: EFECTOS EN LA PROPAGACIÓN DEL PULSO DE LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS		59
1.	DISPERSIÓN INTERMODAL.....	59
2.	DISPERSIÓN INTRAMODAL	61
3.	PROPAGACIÓN EN LAS FIBRAS DE ÍNDICE ESCALONADO	64

3. 1.	Frecuencia normalizada.....	64
3. 2.	Modos de guía de onda.....	64
3. 3.	Constante de propagación longitudinal.....	65
4.	PROPAGACIÓN EN FIBRAS MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL.....	68
5.	EFFECTOS DE LA LONGITUD DE LA FIBRA SOBRE EL ANCHO DE BANDA	70
6.	PROPAGACIÓN DEL PULSO DE LUZ EN FIBRAS MONOMODO	71
6.1.	Longitud de Onda de Corte.....	71
6.2.	Dispersión de guía de onda	72
6.3.	Tipos de fibras monomodo.....	73
7.	EJERCICIOS PROPUESTOS.....	79
	CAPÍTULO CUATRO: FUENTES Y DETECTORES ÓPTICOS.....	80
1.	FUENTES DE LUZ	80
1.1.	Diodos emisores de luz LED (Light Emitting Diode).....	83
1.1.1.	LED de homounión.....	84
1.1.2.	LED de heterounión	84
1.1.3.	LED de superficie emisora y pozo grabado de Burrus	85
1.1.4.	LED emisores de borde	85
1.2.	Diodos láser de inyección (ILD: Injection laser diode)	85
1.2.1.	Emisión espontánea estimulada	85
1.2.2.	Características de la emisión láser:	85
1.2.3.	Componentes de un láser:	85
1.2.4.	Fases en el funcionamiento:	86
1.2.5.	Funcionamiento del diodo láser:.....	86
1.2.6.	Ventajas de los ILD:	87
1.2.7.	Desventajas de los ILD:	87
2.	DETECTORES ÓPTICOS	87
2.1.	Diodos PIN (P-intrinseco-N):	87
2.2.	Diodos de avalancha (APD)	88
2.3.	Características de los detectores de luz	89
2.3.1.	Responsividad.....	89
2.3.2.	Corriente oscura.....	89
2.3.3.	Tiempo de tránsito.....	90
2.3.4.	Respuesta espectral	90
2.3.5.	Sensibilidad a la luz.....	90
2.3.6.	Potencia de ruido de fondo.....	90
	CAPÍTULO 5: CABLES DE FIBRA ÓPTICA Y ELEMENTOS DE CONEXIÓN Y MONTAJE	91
1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES	91
2.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	92
3.	TIPOS DE CABLES	92
5.1	Cable de estructura holgada.....	93
5.2	Cable de estructura ajustada.....	94
5.3	Cable blindado	95
5.4	Cable aéreo autoportante	95
5.5	Cable compuesto tierra-óptico (OPGW).....	96
4.	CONECTORES.....	96

5.	DISPOSITIVOS DE MONTAJE	97
5.1	Caja de administración	97
5.2	Rabillos y latiguillos	98
5.3	Pasamuros.....	98
5.4	Máquinas.....	99
5.5	Otros elementos	100
CAPÍTULO 6: REDES, SERVICIOS Y OTRAS TECNOLOGÍAS QUE USAN FIBRAS ÓPTICAS		101
1.	SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA	101
2.	CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN	102
2.1.	Cálculo de atenuación total	102
2.2.	Cálculo del margen del enlace (Lenl).....	104
3.	ASPECTOS PRELIMINARES SOBRE LAS REDES	105
3.1.	Unidades de medida utilizadas en sistemas HFC.....	105
3.2.	Multiplexación por longitudes de onda.....	106
3.3.	DOCSIS.....	108
4.	REDES HFC.....	109
4.1.	Ancho de banda operativo.....	110
4.2.	Arquitectura y servicios que pueden cursar	111
4.3.	Headend	111
4.3.1.	<i>Señales Analógicas de Video</i>	111
4.3.2.	<i>Señales digitales de video</i>	113
4.3.3.	<i>Señales de datos (acceso a Internet y voz sobre IP)</i>	113
4.4.	Características de los equipos de la red óptica.....	113
4.5.	Red óptica troncal de transporte	117
4.6.	Red óptica de acceso	118
4.7.	Red de distribución.	118
4.8.	Áreas de servicio.....	119
4.9.	Diseño de red HFC.....	121
4.10.	Diseño del enlace óptico.....	121
4.11.	Cálculos de desempeño del enlace óptico	122
4.12.	Cálculos de desempeño de la etapa coaxial.....	125
5.	REDES PASIVAS DE FIBRA ÓPTICA (PON).....	126
5.1.	Estructura PON.....	126
5.2.	Estándares establecidos de redes PON	128
6.	SONET (Synchronous Optical Network).....	128
6.1.	Orígenes	128
6.2.	La señal básica de SONET	128
6.3.	Elementos de la Red SONET	129
6.4.	Configuración de la red SONET	130
6.5.	Beneficios de la Red SONET	131
7.	SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS HÍBRIDOS WDM-SCM.....	132
7.1.	Sistemas SCM	132
7.2.	Sistemas WDM-SCM	133
7.3.	Gestión de redes ópticas mediante tonos piloto.....	135

8. ANILLOS SONET/SDH	136
9. REDES ÓPTICAS BASADAS EN GMPLS	139
CAPÍTULO 7: NORMAS SERIE G DE LA UIT-T.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

GLOSARIO

BPON: Broadband PON. Estándar para PON establecido por la ITU (ITU-T G.983).

BROADCAST: En un sistema de cable, son aquellas señales de Radio Frecuencia comunes para todos los suscriptores, típicamente de video.

C/N: Carrier to Noise ratio. Relación Portadora /ruido. Es la relación entre la potencia de una señal y el piso de ruido expresado en decibeles.

CMTS: Cable Modem Termination System. En un sistema DOCSIS es el elemento que controla el acceso al medio de los cable-modems del sistema.

CWDM: Coarse Wave Division Multiplexing. División por multiplexación gruesa de longitud de onda.

DOCSIS: Data Over Cable Service Interface Specification. Especificación desarrollada por CableLabs que determina las características técnicas del servicio de datos sobre redes HFC.

DWDM: Dense Wave Division Multiplexing. División por multiplexación densa de longitud de onda.

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier. Amplificador óptico dopado con Erblio.

EPON: Ethernet PON. Se refiere a un estándar para Pon establecido por la IEEE (IEEE802.3ah).

FTTH: Fiber to the Home. Fibra hasta la Casa.

GPON: Gigabit-capable Passive Optical Networks. Se refiere a un estándar para PON establecido por la ITU (ITU-T G.984.1).

HFC: Hybrid Fiber Coax. Redes híbridas que combinan fibra óptica y cable coaxial.

ISP: Internet Service Provider. Proveedor de Servicios de Datos.

MSO: Multiple Systems Operator. Operador de Múltiples Sistemas. Sigla mediante la cual se conoce a los operadores de cable que ofrecen servicios de video, voz y datos sobre redes HFC.

NARROWCAST: En un sistema de cable, son aquellas señales específicas para el área de servicio que se está atendiendo.

NTSC: National Television System Committee. Sistema de televisión analógica que se estableció la Comisión Nacional de Sistema de Televisión en los Estados Unidos y que fue adoptado por Norte América, algunos países de Centro y Sur América y algunas regiones de Asia.

PON: Passive Optical Network. Red pasiva de fibra óptica.

PSTN: Public Switched Telephone Network. Red telefónica pública conmutada. Se refiere al sistema telefónico internacional basado en cables de cobre que transmiten señales analógicas de voz.

QAM: Técnica de modulación utilizada en redes de alta velocidad, que combina modulación en amplitud y fase para transmitir señales de datos.

RFoG: Radio Frequency Over Glass, Radio Frecuencia sobre Vidrio.

Ruido: En telecomunicaciones, son aquellas alteraciones no deseadas, superpuestas a una señal útil, que tienden a ocultar el contenido informativo.

TDM: Time Division Multiplexing, Multiplexación por División de Tiempo. Es un tipo de multiplexación que combina secuencias de datos mediante la asignación de franjas de tiempo para acceder al medio.

VoIP: Aquellos servicios que utilizan la red IP para transportar datos de voz.

INTRODUCCIÓN

1. SISTEMA ÓPTICO DE COMUNICACIONES

Un sistema óptico de comunicaciones es en esencia un sistema electrónico de comunicaciones que usa la luz como portadora de información. Sin embargo es impráctico y difícil propagar ondas luminosas por la atmósfera terrestre. En consecuencia, los sistemas de comunicaciones por fibra óptica usan fibras de vidrio o plástico para guiar las ondas luminosas, tal y como se transmiten ondas electromagnéticas en una guía de onda.

Entonces la opto-electrónica es la rama de la electrónica que estudia la transmisión de la luz a través de fibras de muy alta pureza y que suelen ser fabricadas de vidrio o de plástico.

La capacidad de transmisión de información de un sistema electrónico de comunicaciones, es directamente proporcional a su ancho de banda. Para fines de comparación, se acostumbra expresar el ancho de banda de un sistema analógico como un porcentaje de su frecuencia portadora. A esto se llama *relación de utilización del ancho de banda*.

Por ejemplo un sistema de comunicaciones en VHF (Very High Frequency) que trabaja a una frecuencia portadora de 100 MHz con un ancho de banda de 10 MHz, tiene una relación de utilización del ancho de banda de 10%. Un sistema de microondas que funciona con frecuencias portadoras más altas, es obvio que el ancho de banda será mayor y por ende la capacidad de conducción de la información.

Las frecuencias luminosas que se usan en sistemas de telecomunicaciones con fibra óptica están entre 1×10^{14} y 4×10^{14} Hz (100.000 a 400.000 GHz). Por tanto la relación de utilización del ancho de banda de 10% estaría en una banda entre 10.000 GHz y 40.000 GHz (TOMASI, 2003).

2. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

2.1 Velocidad de transferencia de datos y ancho de banda

Existe una relación proporcional entre el *ancho de banda analógico* (BW) ocupado por una señal y la *velocidad de transferencia de datos* (DR) requerida para transmitir una versión digitalizada de esa misma señal (POWER, 2000). Este ancho de banda depende de factores tales como la cantidad de muestras tomadas en un intervalo de tiempo de la señal analógica y el número de bits usados en el proceso de digitalización. BW difiere del ancho de banda usado por la señal digitalizada al transmitirse por el canal (B), el cual está relacionado con el tipo de modulación digital usada, que define una particular eficiencia espectral (cantidad de bits que pueden transmitirse en un ancho de banda de un Hertz) y con ello el valor final de B.

Generalmente a la señal compuesta (señal compleja) antes de ser modulada digitalmente se le denomina *señal de banda base*.

2.2 Muestreo

El *criterio de Nyquist* dice que, una señal análoga se reconstruye exactamente, si se muestrea la onda a una rata igual o mayor a dos veces la frecuencia más alta (que para el ejemplo puede ser igual o mayor a $2 \times BW$). Si se tiene un factor de muestreo de S (donde $S \geq 2$), la frecuencia de muestreo está dada por $S \times BW$. Para aplicaciones de música de alta fidelidad (HIFI) en el que se supone que el rango de frecuencias audibles está entre 200 y 20kHz, se usa un factor de muestreo de 2 (44,1kHz). Sin embargo, para sistemas con mayor calidad pueden usarse valores de S que están entre 4 a 6 (oversampling), con el consecuente aumento de ancho de banda.

2.3 Digitalización

Ya muestreada, cada muestra de la forma de onda debe ser digitalizada. El número de bits N por muestra, depende de la exactitud requerida: 8 bits muestran que el dato va a ser dividido en 256 (2^8) *niveles de cuantización*, 12 bits significan que la muestra va a estar representada desde 1 a 4096 niveles y 16 bits indican 65536 niveles diferentes. Luego, a mayor exactitud y calidad se requieren más bits.

Así, encontrar la velocidad de transferencia de datos de una señal digitalizada (en bits/s), será:

$$DR = S \times BW \times N$$

Donde:

$S \times BW$: es el número de muestras por segundo

N : es el número de bits por muestra.

Se puede estimar el ancho de banda B de un canal que transporta una velocidad de transferencia de datos DR , como:

$$B = DR/2$$

Es bueno por lo tanto, establecer la diferencia del ancho de banda de la señal de información (BW), del ancho de banda de la portadora requerida para la versión digitalizada de la señal.

Así mismo, se puede ver que DR será algún múltiplo del ancho de banda de la señal de información. El tamaño del multiplicador es $S \times N$, con valores típicos de $2 \times 8 = 16$ y $10 \times 16 = 160$. Por este factor multiplicador, entendemos que el incremento en la exactitud de los datos, requiere un significativo incremento en la velocidad transmisión, la justificación perfecta para el uso de la fibra óptica.

3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Lo que llamamos luz solo es una pequeña parte del espectro de la radiación electromagnética. La radiación electromagnética puede ordenarse en un espectro que va desde

las ondas de frecuencia muy alta y longitud de onda corta a frecuencia sumamente baja y longitud de onda larga.

La diferencia de las radiaciones en las diferentes partes del espectro electromagnético es una cantidad que puede ser medida de varias maneras:

- Como una longitud de onda (como la energía de un fotón) o
- Como la frecuencia de oscilación de un campo electromagnético.

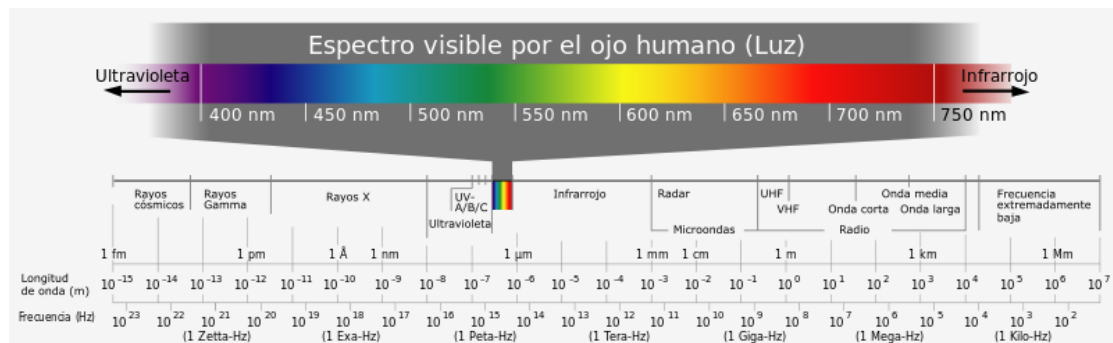


Figura 0.1. Espectro electromagnético

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnetico. Descargado en marzo de 2012

3.1 Espectro óptico

La luz es una onda electromagnética, y por ende dicha onda puede oscilar en diferentes frecuencias, las cuales definen el "**color**". La luz blanca está compuesta por todas las longitudes de onda, la cual al pasar por un prisma (medio óptico) se difracta en diferentes ángulos según su longitud de onda descomponiéndose así en colores.

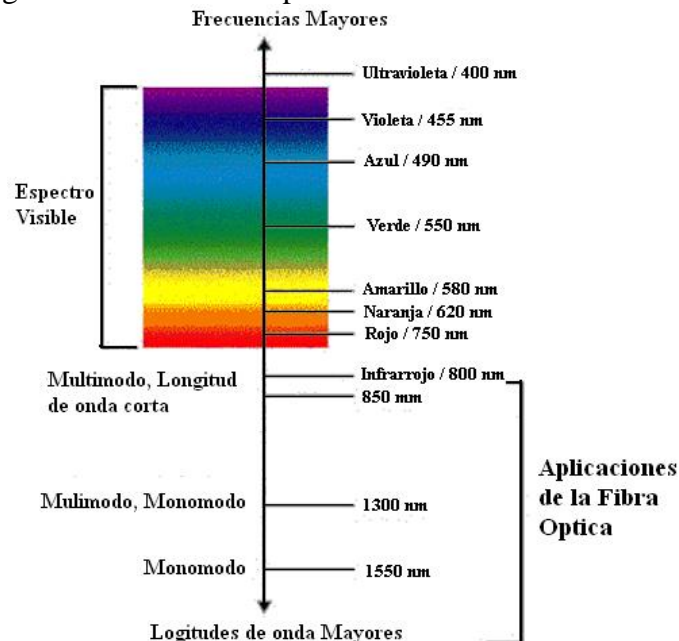


Figura 0.2. Espectro electromagnético usado en comunicaciones ópticas

Fuente: <http://www.yio.com.ar/fibras-opticas/splitters-fibras-opticas.php>. Descargado marzo de 2012

El espectro electromagnético para frecuencias luminosas se puede dividir en tres bandas (TOMASI, 2003):

1. Infrarrojo: Banda de longitudes de onda de luz demasiado grandes para que puedan ser vistas por el ojo humano.
2. Visible: Banda de longitudes de onda de luz a las que responde el ojo humano.
3. Ultravioleta: Banda de longitudes de onda de luz que son demasiado cortas para que las vea el ojo humano.

3.2 Unidades aplicables en fibra óptica

Es costumbre que en el rango del espectro óptico se hable de longitudes de onda (λ en metros), en lugar de frecuencias (en Hz). Entonces:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

En esta ecuación La frecuencia se representa por la letra ν en lugar de la letra f como se acostumbra, esto se hace para diferenciar la frecuencia de la portadora óptica (ν) con la frecuencia de la señal de información o señal moduladora (f).

Las unidades mas usadas para la longitud de onda de la portadora óptica son:

$$1 \text{ micra} = 1 \times 10^{-6} \text{ metros}$$

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ metros}$$

$$1 \text{ Å}^\circ (\text{angstrom}) = 10^{-10} \text{ metros}$$

Los colores según la frecuencia están dados por:

Tabla 1. Colores y características

Fuente: Tomado y modificado por los autores de <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/15769949/La-Luz.html> Descargada en mayo de 2011

COLOR	λ (nm)	f (THz)	Energía (x.10 ⁻¹⁹ J)
Violeta	400 a 460	750 a 650	5,0 a 4,3
Índigo	460 a 470	650 a 630	4,3 a 4,2
Azul	470 a 490	630 a 610	4,2 a 4,1
Verde	490 a 565	610 a 530	4,1 a 3,5
Amarillo	565 a 575	530 a 520	3,5 a 3,45
Naranja	575 a 600	520 a 500	3,45 a 3,3
Rojo	600 a 800	500 a 370	3,3 a 2,5

La región donde la fibra óptica y los elementos ópticos trabajan, incluye la luz visible al ojo humano que va desde las longitudes de ondas de los 400 a 700 nm. Sin embargo, para las fibras usadas en telecomunicaciones se usan longitudes de onda mayores (menores frecuencias), o las que se encuentran en la zona infrarroja.

Las longitudes de onda normalmente usadas en comunicaciones con fibras de silicio, están entre los 700 a 1600 nm en el infrarrojo cercano donde la fibra es más transparente. Las fibras de silicio y vidrio pueden transmitir la luz visible sobre distancias cortas, y ciertas clases de fibra (llamadas de cuarzo fundido) pueden transmitir luz cercana al ultravioleta sobre distancias cortas.

4. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES CON FIBRA ÓPTICA

Los tres bloques principales que forman un sistema de comunicaciones por fibra óptica son: *Transmisor*, *receptor* y *fibra óptica*.

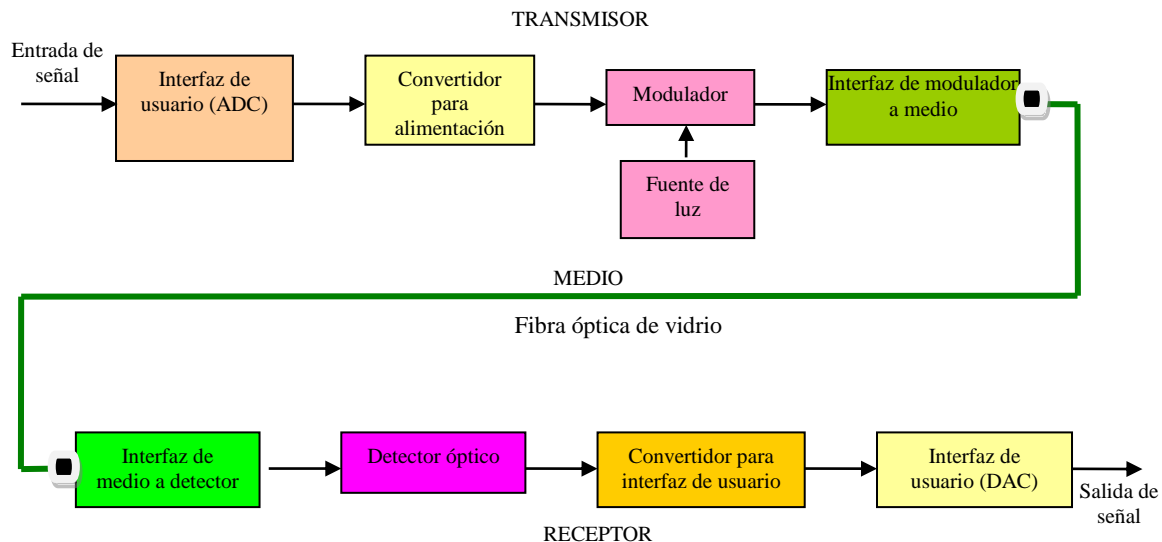


Figura 0.3. Sistema de comunicación óptico

Fuente: Tomado y modificado por los autores del libro de Wayne Tomasi julio 2011

1. *El transmisor* consiste de la interconexión de cuatro bloques básicos:
 - La interfaz de usuario (analógica o digital): Es un adaptador eléctrico entre los circuitos de entrada y la fuente de luz. La interfaz compensa y adapta las impedancias y limita la amplitud de entrada de la señal.
 - El convertidor para alimentación de la fuente óptica (convertidor de voltaje a corriente).
 - La fuente óptica que puede ser un LED o un diodo de inyección láser (ILD). La cantidad de luz emitida depende de la corriente de excitación. En este bloque se realiza la modulación óptica. Estos componentes se caracterizan por la región espectral en la que trabajan en forma eficiente, determinado por el diseño y por sus propiedades físicas. Generalmente esta región se encuentra entre los 1300 nm y los 1550 nm. Existen muy buenos resultados con fuentes ópticas elaboradas por compuestos como *InGaAsP* (Arseniuro Fosfuro de Indio y Galio: buena respuesta en 1300 nm y 1500 nm).
 - Un acoplador de luz al medio o fibra óptica. Este elemento es físico y puede ser una lente. Su función es acoplar la luz emitida por la fuente e introducirla a la fibra óptica.
2. *El receptor* comprende los siguientes bloques:
 - *Un dispositivo acoplador* de la fibra al detector óptico.
 - *Un detector fotoeléctrico*. El detector de luz puede ser un diodo PIN (tipo P-N Intrínseco) o un fotodiodo de avalancha (APD: Avalanche Photodiode), dependiendo de las velocidades de información que se procesen. Cualquiera de los

dos convierte la energía lumínica en corriente eléctrica. Existen foto detectores de *Si* y de *Ge* con buenas respuestas buena en 850 y 1150 nm.

- *Un convertidor de corriente a voltaje* (señal de salida) y amplificador para alimentar la interfaz de usuario.
 - *Una interfaz de usuario destino* (analógica o digital).
3. *La fibra óptica* o canal de transmisión. Por efectos atenuaciones que produce la fibra y demás elementos de acople, producidos durante el recorrido de la luz entre el transmisor y el receptor, también se ubican amplificadores de la energía luminosa. Los más usuales son los EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), que son segmentos de fibras ópticas dopadas con materiales de tierras raras, tales como el erbio (metal del grupo lantánido con N° atómico 68), o los de efecto Raman (efecto producido por la interacción de un haz monocromático de alta intensidad sobre un material especial, que hace que genere nuevos haces con longitudes de onda mayores) llamados RA. La respuesta de los amplificadores EDFA y RA está en 1550 nm.

Las características de los elementos del sistema, se definen y diseñan para obtener una buena calidad del enlace de comunicaciones teniendo en cuenta la relación capacidad-distancia.

5. HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

Los sistemas ópticos de comunicación, existen desde hace 2 siglos, el "Telégrafo Óptico" fue inventado por el ingeniero francés Claude Chappe en 1790. Su sistema consistía de una serie de semáforos montados en torres en los que un operador transmitía mensajes de una torre a otra.

A mediados del siglo XIX, el físico suizo Daniel Collodon y el físico francés Jacques Babinet, demostraron que la luz podía guiarse a lo largo de chorros de agua. Pero fue el físico británico, John Tyndall, quien popularizó la guía de luz en base a chorros de agua, en una demostración realizada por primera vez en 1854.

Por los años 60, ya se habían desarrollado las fibras con cubiertas de vidrio, las que tenían atenuación de aproximadamente 1 dB/m, adecuadas para medicina, pero no para telecomunicaciones. En 1960 fue inventado el láser y Theodore Maiman hizo la primera demostración.

Antoni E. Karbowiak y el joven ingeniero chino Charles K. Kao de los laboratorios de ITT en USA, se dedicaron a estudiar las guías de onda ópticas para las comunicaciones. En 1964 Kao investigó sobre la atenuación de la fibra y dedujo que las altas pérdidas de las primeras fibras se debían a las impurezas y no a la sílice del vidrio mismo y que las fibras ópticas podrían reducir sus pérdidas por debajo de los 20 dB/Km.

Tomó cuatro años para alcanzar la meta fijada por Kao. Industrias Corning Inc., empezó a trabajar con sílice fundido, un material que puede fabricarse extremadamente puro, pero tiene un punto de fusión alto y un bajo índice de refracción. En Septiembre de 1970, se realizó el

anuncio que se habían obtenido fibras monomodo, con atenuación por debajo de los 20 dB/km a los 633 nm. Las fibras eran frágiles, pero las pruebas confirmaban la baja pérdida.

El gran avance de Corning estaba entre los más brillantes desarrollos que abrieron la puerta a las comunicaciones por fibra óptica. En 1970 el laboratorio Bell y un equipo de un instituto físico de Leningrado, fabricaron los primeros diodos láser de ondas continuas a temperatura ambiente.

Las primeras fibras monomodo tenían núcleos de varios micrómetros de diámetro y este hecho preocupaba a los científicos. Trabajaron con fibras multimodo de índice refractivo gradual entre el centro y el revestimiento y con diámetros del núcleo de 50 o 62.5 micrómetros. En 1974 los Laboratorios de Bell consiguieron la fabricación masiva de fibra óptica de alta calidad.

La primera generación probada en el campo de la telefonía fue en 1977, se usaron fibras para transmitir luz a 850 nm de los diodos láser de Galio-aluminio-arseniuro.

Estas primeras generaciones de sistemas podían transmitir luz a varios kilómetros sin repetidor, pero estaban limitados por pérdidas de aproximadamente 2 dB/km. Una segunda generación pronto apareció, usando el nuevo láser de InGaAsP que emitió a 1.3 micrómetros, donde la atenuación de la fibra era tan baja como 0.5 dB/km, y la dispersión del pulso reducida a 850 nm.

En 1983 MCI, en los Estados Unidos fue la primera en tender una Red Nacional de Fibra óptica en ese país. A fines de los 80s, los sistemas comenzaban a operar a mayores longitudes de onda. La Fibra de dispersión desplazada se introdujo en 1985, comenzando así una nueva era en las comunicaciones ópticas al unir la baja atenuación a 1550 nm, con la nula dispersión en la misma longitud de onda, haciendo que mayores velocidades de datos pudieran transportarse a distancias mayores.

A comienzo de los 90s se produce otro salto tecnológico, al aparecer la fibra dopada con erbio (EDFA). Esta tecnología no sólo superó la limitación de la velocidad para la regeneración electrónica, sino que permitió tramos más largos.

Pero ocurrió que el mismo atributo que había hecho tan atractivo la fibra de dispersión desplazada, causaba inconveniente para las demandas de WDM (multiplexado por división de longitud de onda). La potencia extra que tenía que transportar la fibra de vidrio por el uso de varios amplificadores por cada longitud de onda dio como resultado, los efectos de transmisión no lineales.

Uno de los primeros y más perjudiciales efectos que aparece es el efecto de la mezcla de cuatro ondas (FWM). En FWM, las longitudes de onda múltiples se combinan para crear nuevas longitudes de onda que pueden interferir potencialmente con la transmisión. El efecto es más pronunciado cuando la dispersión es cercana a cero.

Los primeros cables NZDSF (fibra de dispersión no nula) disponibles comercialmente con una gran área eficaz aparecen en 1998. Los beneficios técnicos son inmediatos: la capacidad del manejo de la potencia es más alta, la relación señal/ruido es mayor y el espacio entre amplificadores es mayor.

Así como los amplificadores de erbio significaron un gran salto hacia adelante en las comunicaciones ópticas basadas en fibra, se espera que el interruptor óptico y los enrutadores sean la chispa para una nueva revolución de la fibra óptica.

6. COMPARATIVO DE LA FIBRA ÓPTICA Y LOS CABLES

Las comunicaciones a través de fibra óptica tienen grandes ventajas sobre las comunicaciones que usan cables metálicos (TOMASI, 2003).

Ventajas:

1. Mayor capacidad de información debido a su gran ancho de banda (hasta 10 GHz)
2. Inmunidad a la diafonía: No existen campos magnéticos asociados con ellas.
3. Inmunidad a interferencia estática: La interferencia electromagnética (EMI) no afecta la fibra óptica. La energía eléctrica y el ruido eléctrico no afectan las frecuencias luminosas. Los cables de fibra no irradian energía de RF y por tanto no interfieren otros sistemas.
4. Inmunidad al ambiente: Los fenómenos ambientales no afectan la fibra. Pueden funcionar en niveles extremos de temperatura, humedad, presión.
5. Seguridad: Por su fácil instalación presentan menores índices de accidentalidad. No se afectan por ambientes corrosivos, explosivos o inflamables, ni son conductores eléctricos. No pueden ser afectadas fácilmente para robar información.
6. Compatibles con la miniaturización de los componentes electrónicos modernos
7. Mayor duración: Por su mayor tolerancia a los cambios ambientales, duran más.
8. Economía: El costo de los cables y la fibra óptica son parecidos, sin embargo por su gran ancho de banda, menor atenuación, la fibra reduce los costos de instalación y de sistemas complementarios.
9. No necesita de licencias para operación porque no radían energía en el espacio.

Desventajas:

1. Costos de interconexión: Las fibras necesitan de equipos terminales complejos y de tecnología de punta que incrementa los costos.
2. Resistencia mecánica: Son fácilmente rompibles por tensión mecánica.
3. Potencia eléctrica remota: Para hacer alimentación remota de equipos terminales, deben colocarse cables adicionales.
4. Equipos y herramientas: para su instalación, ajustes, pruebas y mantenimiento, son necesarios equipos y herramientas altamente especializadas y costosas.

7. LAS FIBRAS DE ACUERDO CON LOS MATERIALES DE SU ESTRUCTURA

Dependiendo de uso de materiales en su estructura, se puede decir que existen tres tipos de fibra:

1. Las de núcleo (core) y revestimiento (cladding) de plástico.
2. Las de núcleo de vidrio y revestimiento plástico (PCS: plastic clad silica)
3. Las de núcleo de vidrio y revestimiento de vidrio (SCS: silica clad silica)

Se encuentra en pruebas una cuarta variedad que usa una sustancia no silícea, el seleniuro de zinc, que podría ser hasta 1000 veces más eficiente que las anteriores (SCIENCE Daily, 2007)

Existen algunas ventajas y desventajas en cada una de ellas:

- ❖ Las de plástico son más flexibles, más fáciles de instalar, más resistentes a la tracción, menos costosas y más livianas (60% menos que las de vidrio). Sus desventajas son la alta atenuación, es decir son menos eficientes. Por tanto se usan más en tramos pequeños (cableado horizontal, vertical y campus)
- ❖ Las fibras con núcleo de vidrio tienen bajas atenuaciones. Las PCS se afectan menos con la radiación (aplicaciones militares)

8. EJERCICIOS RESUELTOS

1. ¿Cuál será la frecuencia de un haz de luz que tiene una longitud de onda de 1,45 micras?
¿qué color podrá tener?

Frecuencia del Haz de luz:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,45 \times 10^{-6} \text{ m}} = 206,8 \text{ THz}$$

No está dentro del espectro visible

2. ¿Cuál será la frecuencia de un haz de luz que tiene una longitud de onda de $0,482 \times 10^{-6}$ metros? ¿qué color podrá tener?

$$\lambda = 0,482 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0,482 \times 10^{-6} \text{ m}} = 6,224 \times 10^{14} \text{ Hz} = 622 \text{ THz}$$

De acuerdo con la tabla 0.1, el color es azul

9. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. ¿Cuántos canales de voz estándar ITU, podrían caber en 10 Gbps?

2. Calcule la DR requerida para transmitir una señal de audio de 20000 Hz a un factor de muestreo de 4 veces la consideración de Nyquist, con una digitalización de 8 bits por muestra. Calcule el ancho de banda del canal.
3. Calcule la DR requerida para transmitir televisión de alta definición (HDTV), si la señal de la imagen es de 1000 x 1000 pixeles, cada pixeles es tricolor con 12 bits de definición por color y una rata de tramas de 70 tramas por segundo.

CAPITULO 1: FUNDAMENTOS ÓPTICOS

1. FÍSICA DE LA LUZ

1.1. Teorías de estudio

El estudio de la transmisión de señales ópticas a través de medios guiados, puede ser explicado por dos métodos con enfoques distintos pero complementarios, dependiendo del sentido como visión de la luz. Estos dos métodos son el de la *Óptica geométrica o de rayos* y la *Óptica física o de ondas*.

La primera considera a la luz como partículas que se propagan en línea recta y por lo tanto se puede representar como un rayo, pero que no es posible explicar fenómenos como la difracción e interferencia y la segunda, considera a la luz como un frente de ondas esféricas, sustentada en la teoría de Fresnel, el cual sí explica los fenómenos anteriormente comentados.

La teoría cuántica recoge los dos enfoques anteriores en un mismo concepto: el *corpuscular y el ondulatorio*.

1.2. Energía del fotón

Un átomo tiene varios estados o niveles de energía. El mínimo nivel es el *estado fundamental*, el máximo nivel es el *estado excitado*. Si un átomo que tiene un nivel de energía decae a un nivel inferior, la pérdida de energía (dado en electrón voltios) se emite en forma de *fotón*. Por tanto, la energía del fotón es igual a la diferencia entre las energías de los dos niveles. Este proceso de decaer de un nivel a otro se llama *emisión espontánea*.

Los átomos pueden ser *irradiados* mediante una fuente luminosa que tenga una energía igual a la diferencia entre el estado fundamental y otro nivel de energía. Esto hace que un electrón cambie de uno a otro nivel de energía, *absorbiendo energía luminosa*. Este proceso de pasar de un nivel a otro se llama *absorción* y el átomo absorbe un paquete de energía llamado *fotón*.

La energía absorbida o emitida (fotón) es igual a la diferencia entre los dos niveles de energía:

$$E_2 - E_1 = E_p$$

Donde: E_p es la energía del fotón.

También: $E_p = h \times f$ (1.1)

Donde: h = Constante de Plank = $6,625 \times 10^{-34} J.s$

f = Frecuencia de la luz emitida (Hz)

Igual, la energía de *los fotones* se puede expresar en términos de la longitud de onda:

$$E_p = h \times f \Rightarrow E_p = \frac{h \times C}{\lambda} \quad (1.2)$$

Las partículas cargadas como el fotón, tienen una unidad de energía que es el electronvoltio (eV) y es igual a la carga del electrón por un voltio.

$$1eV = 1,6 \times 10^{-19} J$$

1.3. Velocidad de propagación

La luz puede viajar en el vacío, diferente a las demás ondas electromagnéticas que necesitan de un medio material para hacerlo.

La velocidad de propagación de la luz en el medio vacío o en el espacio libre (se equiparan por las pequeñas diferencias en sus densidades), es igual para todas las frecuencias y corresponde con bastante exactitud a los 3×10^8 m/s (denotada esta velocidad con la letra c minúscula). Sin embargo, en materiales más densos que el espacio libre, la velocidad se reduce y todas las frecuencias de la luz no se propagan con la misma velocidad.

2. FENÓMENOS ÓPTICOS APLICABLES

2.1. Refracción

Cuando un haz de luz al incidir con cierto ángulo, sobre la superficie que separa dos medios de diferente densidad, homogéneos, isótropos (materiales cuyas propiedades no dependen de su posición) y sin pérdidas, el rayo incidente se bifurca generando dos rayos: uno reflejado y el otro refractado, propagándose cada uno por los dos medios existentes. El rayo reflejado seguirá una trayectoria que forma un ángulo con la normal al plano de separación de los medios igual al de incidencia, mientras que el refractado cambia de dirección con velocidad distinta, es decir, lo hará de acuerdo con la ley de Snell.

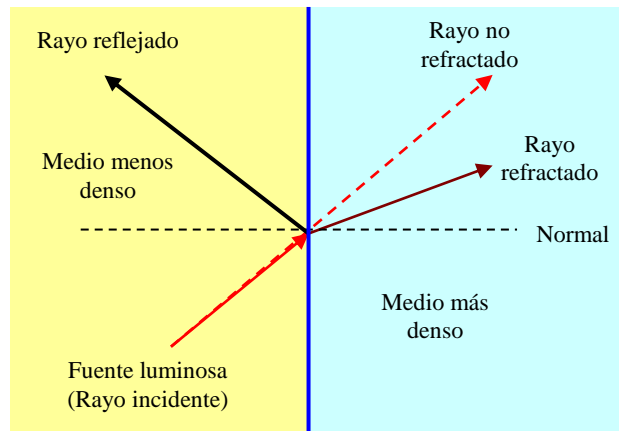


Figura 1.1. Refracción de la luz
Fuente: Los autores (modificada del libro de Wayne Tomasi)

De acuerdo con la figura 1.1, supóngase que un rayo de luz incide en una superficie plana que separa dos medios, en donde la recta vertical representa dicha superficie. Al cambiar del medio menos denso, el rayo disminuye su velocidad y cambia de dirección: *se refracta* en el medio más denso acercándose a la normal.

Así mismo en la figura 1.2, un haz de rayos luminosos que incide sobre la superficie de un cuerpo transparente, parte de ellos se reflejan mientras que otra parte se refracta, es decir penetran en el cuerpo transparente experimentando un cambio en su dirección de movimiento.

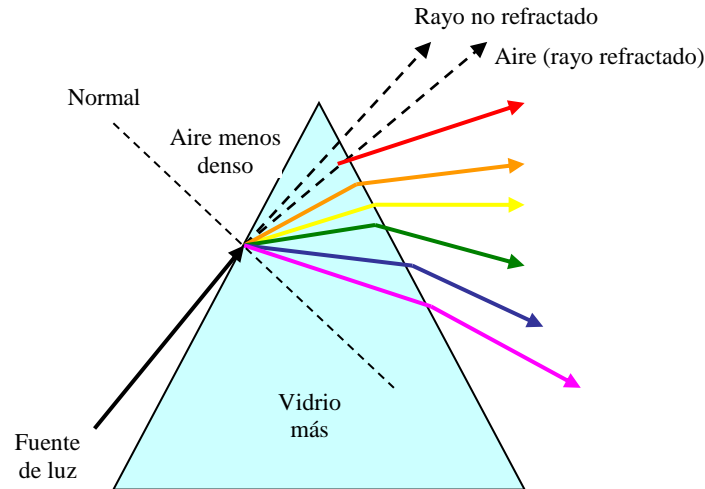


Fig. 1.2. La refracción prismática
Fuente: Los autores (modificada del libro de Wayne Tomasi)

Como la luz solar contiene todas las frecuencias de luz (luz blanca), esta se puede "dividir" en todas sus componentes frecuenciales, cuando se hace incidir o pasar a través de un material más denso que el espacio libre (por ejemplo un cristal en forma de prisma), haciendo que las longitudes de onda más pequeñas (el violeta) se refracten más (ángulo más pequeño respecto de la normal) y las longitudes de onda más grandes (las del rojo) se refracten menos, formando un mosaico de colores, fenómeno que se le da el nombre de *refracción prismática*.

2.2. Índice de refracción

Los diferentes medios en que se puede propagar la luz están caracterizados por su *índice de refracción* (denotado con la letra minúscula n), y es la cantidad de desviación que se produce cuando la luz incide en la superficie de separación entre dos materiales o medios transparentes de distintas densidades, es decir define el ángulo diferencia entre la dirección de su recorrido normal y la dirección que toma el rayo refractado. También, el índice de refracción es la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en espacio libre respecto de la velocidad de propagación del mismo rayo en determinado material. Su ecuación es:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

Donde: c = Velocidad de la luz en el espacio libre (m/s)
 v = Velocidad de la luz en determinado material (m/s)

Este valor es adimensional y para medios distintos al vacío, será siempre mayor que la unidad.

La tabla 1.1 muestra los índices de refracción de algunos materiales.

2.3. Camino óptico y camino geométrico

Existe una relación entre el índice de refracción n y las longitudes de los caminos (trayectorias) recorridos por una onda. Una radiación que se desplace por un medio material, ve un camino de valor diferente al geométrico por el que se desplaza. Este camino diferente del real, se denomina *camino óptico* y su valor está dado por:

$$(\text{Camino óptico}) = n \times (\text{Camino geométrico})$$

Tabla 1.1. Índices de refracción de algunos materiales

Agua	1,33
Alcohol etílico	1,36
Cuarzo fundido	1,46
Fibra de vidrio	1,5 – 1,9
Diamante	2,0 – 2,42
Silicio	3,4
Arseniuro de Galio	3,6
*Basado en una λ emitida por una luz de sodio (5890 Å)	

Esta trayectoria será la distancia que recorrerá la luz en el vacío, en un tiempo igual al que necesita el mismo rayo para recorrer el del medio. De igual manera, la longitud de onda de una radiación en el vacío no tendrá el mismo valor que en un material dieléctrico. La relación entre ambas longitudes de onda será:

$$\lambda_{\text{vacío}} = n \cdot \lambda_{\text{medio}}$$

2.4. Leyes de la refracción

La trayectoria del rayo refractado sigue dos sencillas leyes:

- 1ª. El rayo refractado se encuentra en el plano del rayo incidente y la normal que pasa por el punto de incidencia. En otras palabras, si el rayo incidente y la normal están en el plano de la hoja, también el rayo refractado debe estar en este plano.
- 2ª. La segunda ley, es la denominada Ley de Snell explica cómo un rayo de luz se curva cuando atraviesa una discontinuidad de índice de refracción y viene representada por la siguiente ecuación:

$$n_1 * \text{sen} \theta_1 = n_2 * \text{sen} \theta_2 \quad (1.4)$$

Donde: n_1 = índice de refracción del material 1 (adimensional)

n_2 = índice de refracción del material 2 (adimensional)

θ_1 = ángulo de incidencia

θ_2 = ángulo de refracción

En la interfaz entre los dos medios, el rayo incidente se puede refractar hacia la normal o alejarse de ella, dependiendo de si n_1 es menor o mayor que n_2 .

La figura 1.3, se muestra cómo se refracta un rayo de luz al pasar de un material a otro dependiendo de su índice de refracción:

- Si el rayo pasa de un material menos denso (menor índice de refracción) a un material más denso (mayor índice de refracción), se ve que el rayo de luz cambia de dirección en la interfaz y que el ángulo de refracción es menor que el de incidencia, es decir, se dobla acercándose a la normal.

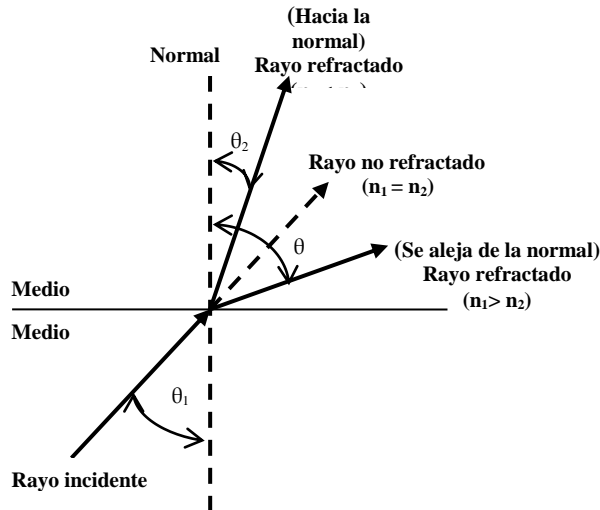


Fig. 1.3. Modelo para la Ley de Snell de refracción
Fuente: Los autores

- Por el contrario, si el rayo pasa de un material más denso a uno menos denso, el rayo cambia de dirección y el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia, es decir, se dobla alejándose de la normal.

2.5. Ángulo crítico

En la figura 1.5 analicemos la situación cuando un rayo de luz va de un medio de mayor índice de refracción a un medio con menor índice, en el que el rayo incidente tiene un ángulo tal que el ángulo de refracción es de 90° , y el rayo refractado coincide con la interfaz.

De nuevo tomando la Ley de Snell: $\text{sen} \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \text{sen} \theta_2$

Con $\theta_2 = 90^\circ$, se tiene:

$$\text{sen} \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \times (1) \quad \text{o} \quad \text{sen} \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \theta_1$$

Si se hace $\theta_1 = \theta_c \Rightarrow$

$$\boxed{\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1}} \quad (1.5)$$

Donde θ_c es el *ángulo crítico*.

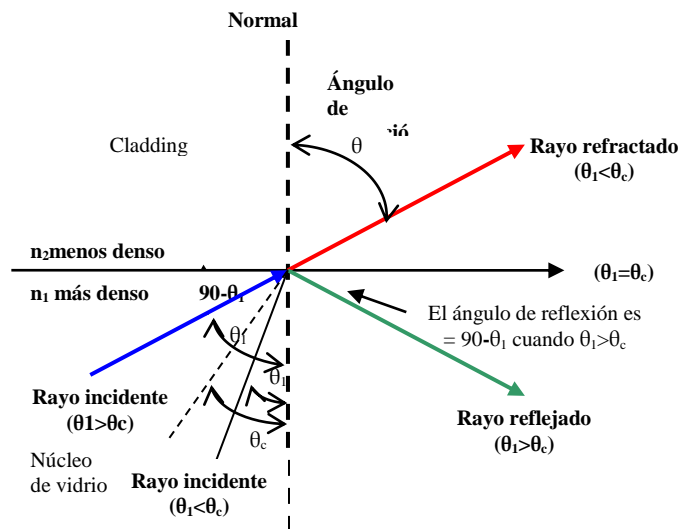


Fig. 1.5. Ángulos de refracción y de reflexión.
Fuente: Los autores (modificada del libro de Wayne Tomasi)

El *ángulo crítico* es el ángulo de *incidencia mínimo* en el cual un rayo de luz puede llegar a la interfaz entre dos medios y tener un ángulo de refracción de 90°.

Si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, produce un rayo refractado. Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, se produce el efecto denominado *reflexión total*, es decir, no existe haz refractado.

3. EJERCICIOS RESUELTOS

- Determinar el ángulo de refracción para un ángulo de incidencia de 35°, cuando un rayo de luz que pasa del vidrio ($n = 1,5$) al agua ($n = 1,33$).

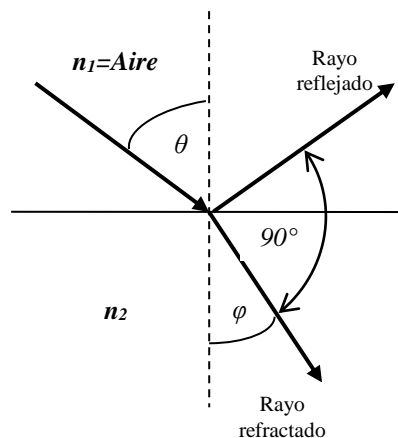


Figura del ejercicio resuelto 2.

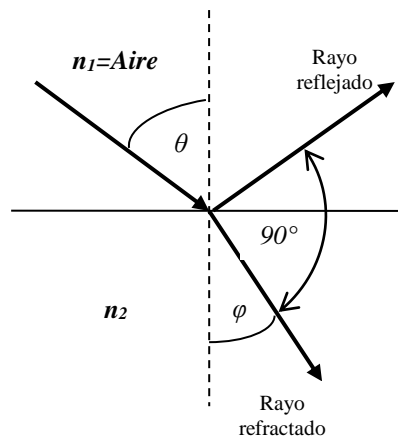
$$\theta = 35^\circ; \quad n_1 = 1,5; \quad n_2 = 1,33 \quad \varphi = ?$$

Por la Ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \varphi$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{n_1 \sin \theta}{n_2} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{1,5 \sin 35}{1,33} \right] = 40,30^\circ$$

2. La luz viajando en el aire golpea una placa de vidrio con un ángulo de incidencia de 57° . Si los rayos reflejado y refractado hacen un ángulo de 90° entre ellos: Calcule el índice de refracción del vidrio. ¿Cuál es el ángulo crítico para este material si la luz pasa del vidrio al aire?



$$n_1 = 1; \quad \theta = 57^\circ$$

$$\varphi = 180^\circ - (57^\circ + 90^\circ) = 33^\circ$$

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \varphi$$

$$\frac{n_1 \sin \theta}{\sin \varphi} = n_2$$

$$n_2 = \frac{\sin 57^\circ}{\sin 33^\circ} = 1,539$$

Ahora, para el valor del ángulo crítico: $n_1 = 1,539$ y $n_2 = 1$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1,539} \right) = 40,52^\circ$$

3. El revestimiento de una fibra óptica es de cuarzo fundido ($n = 1,43$) y presenta una NA de 0,368. Calcule el ángulo de aceptación, el ángulo crítico y el índice de refracción del material del núcleo.

Índice de refracción del núcleo:

$$NA^2 = n_1^2 - n_2^2$$

$$n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = 1,47$$

Angulo Crítico:

$$\theta_{crit} = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \frac{1.43}{1.47} = 76.6^\circ$$

Angulo de Aceptación:

$$\theta_{ent} = \sin^{-1} NA = \sin^{-1} 0.368 = 21.59^\circ$$

4. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Si el índice de refracción del vidrio es 1,5; calcule la velocidad de la luz en este material.
2. Para una gama de color rojo intermedio cuya $\lambda = 6500\text{\AA}$, indique la energía del fotón.
Respuesta: $3,05 \times 10^{-19} \text{ J}$
3. ¿Qué color podría dar un haz de fotones cuya energía es de $3,47 \times 10^{-19} \text{ J}$? Respuesta: $572,76 \text{ nm}$, es decir una gama del amarillo.
4. Calcule la frecuencia luminosa que puede detectar un fotodiodo cuya banda prohibida está entre $1,75 \text{ eV}$ y $1,25 \text{ eV}$.
5. Asumiendo que n_2 es 1% más pequeño que n_1 ; encuentre el valor de n_2 , $\sin i = 1,45$. Indique el valor del ángulo crítico y el tipo de material. Respuesta: $n_2 = 1,435$; $\theta_c = 81,9^\circ$
6. ¿Cuál será la frecuencia de un haz de luz que tiene una longitud de onda de $1,45 \times 10^{-7}$ micras? ¿qué color podrá tener?
7. Del anterior ejercicio indique la energía del fotón. Donde la Constante de Plank = $6,625 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
8. Indique la velocidad de propagación de la luz de dos medios diferentes cuyos índices de refracción son 1,33 y 1,75 respectivamente. ¿Qué tipo de materiales podrían ser?
9. Para el ejercicio anterior, indique los ángulos de refracción que habría si un rayo de luz pasa del medio 1 al medio 2 con ángulos de incidencia de 15° y 75° ? ¿Qué ángulos de refracción habrían si ahora el rayo de incide primero en el medio 2 y pasa al medio 1?
10. Un rayo de luz entra en un medio que tiene índice de refracción 1,25. ¿Cuál es la velocidad del rayo en ese medio y en qué porcentaje decrece la velocidad de propagación? ¿El rayo podrá ser visto por el hombre?
11. Mediante la aplicación de la ley de Snell y la aplicación de un triángulo de Pitágoras en el que los índices de refracción sean las componentes de mismo, compruebe que la ecuación del ángulo de aceptación de un arreglo óptico es:

$$\theta_{ent(max)} = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

CAPITULO 2: LA FIBRA ÓPTICA Y PARÁMETROS QUE LA CARACTERIZAN

1. ESTRUCTURA FÍSICA

La fibra óptica básica, estructuralmente se compone de tres capas concéntricas que difieren en propiedades, tal y como se muestra en la figura 2.1.

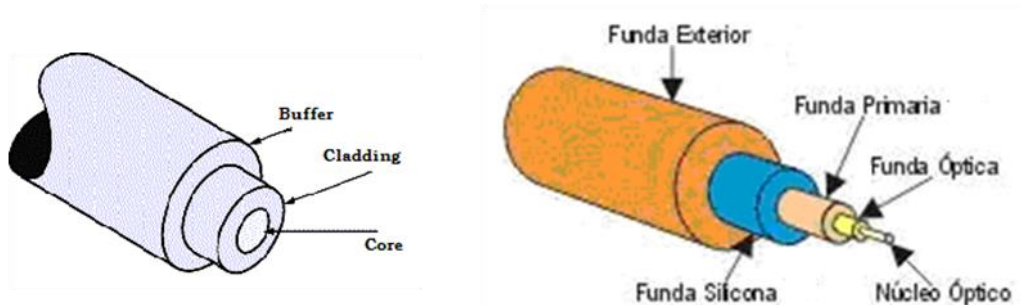


Fig. 2.1. Las capas de una fibra óptica: núcleo, revestimiento (cladding) y cubierta (buffer)

Fuente: Disponible en <http://www.hiru.com/tecnologias-para-la-informacion-y-la-comunicacion/fibra-optica>.

Descargado marzo de 2012

- Núcleo (Core): La parte interna por la cual se propagan las ondas ópticas. En sílice, cuarzo fundido o plástico. Diámetro de 50 o 62,5 μm para la fibra multimodo y 8 a 11 μm para la fibra monomodo.
- Revestimiento (Cladding): La capa media que sirve para confinar la luz en el centro. Generalmente de los mismos materiales que el núcleo pero con aditivos especiales. Diámetro 125 μm .
- Cubierta (buffer) ó recubrimiento: La capa exterior por lo general fabricada en plástico y sirve como un amortiguador o protección mecánica de la fibra. Generalmente viene en tres capas: La funda primaria de 250 μm ; la funda de sílica o de material kevlar, de 400 μm y la funda exterior de polietileno con 900 μm de diámetro.

La transmisión por fibra óptica involucra el cambio de las señales eléctricas en pulsos de luz, usando un transmisor opto electrónico y enviando los pulsos hacia el núcleo de una fibra óptica. Ya que el núcleo y el revestimiento (cladding) circundante tienen composiciones diferentes, la luz es atrapada dentro del núcleo. Al extremo opuesto, un receptor cambia los pulsos regresándolos a señales eléctricas.

2. TIPOS Y CONFIGURACIONES DE FIBRA

La luz se puede propagar por un cable de fibra óptica por reflexión o por refracción. La forma en que se propague depende del modo de propagación y del perfil de índice de la fibra y la combinación de estas dos características da lugar a varios tipos de fibras.

2.1. Por el modo de propagación

Un *modo* es simplemente una trayectoria o camino. Si solo hay una trayectoria que pueda tener la luz por el cable, se llama modo *único* o *monomodo*. Si hay más de una trayectoria, se llama modo *múltiple* o *multimodo*.

2.2. Por el perfil de índice de la fibra

El perfil de índice de una fibra óptica es una representación gráfica del índice de refracción en la sección transversal de la fibra. El índice de refracción se grafica en el eje horizontal y la distancia radial al centro es el eje vertical.

Hay dos tipos básicos de perfiles de índice: *escalonados* y *graduado* (ver la figura 2.2)

Una fibra de índice *escalonado* tiene un núcleo rodeado por un revestimiento externo con índice de refracción uniforme pero menor que el del núcleo. En este tipo de fibra hay un cambio abrupto de índice de refracción en la interfaz entre núcleo y revestimiento.

En una fibra de *índice graduado* no hay revestimiento y el índice de refracción del núcleo no es uniforme: es máximo en el centro y disminuye en forma gradual de acuerdo con la distancia hacia la periferia.

2.3. Configuraciones de la fibra

Por lo anterior, existen tres tipos de fibra:

- *Monomodo de índice escalonado*;
- *Multimodo de índice escalonado* y
- *Multimodo de índice gradual*.

A continuación una descripción de cada uno de ellos.

2.3.1. Fibra monomodo de índice escalonado

Tiene un núcleo con diámetro pequeño suficiente para que en teoría haya una sola trayectoria que siga la luz al propagarse por el cable. El diámetro del núcleo está entre $8\mu\text{m}$ y $11\mu\text{m}$. El índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor que el del revestimiento (1,5 a 1,49). El ángulo crítico está entre 70° y 77° , haciendo que el ángulo de aceptación sea pequeño, dificultando acoplar la luz en la interfaz aire-fibra.

2.3.2. Fibra multimodo de índice escalonado

Se parece a la configuración monomodo, pero tiene un núcleo de mayor diámetro ($50\mu\text{m}$ o $62,5\mu\text{m}$). Por esta razón, tiene mayor ángulo de aceptación permitiendo la entrada de más luz a la fibra. Existen múltiples trayectorias que sigue la luz, es decir, no todos los rayos siguen la misma trayectoria, por lo tanto cada rayo tendrá tiempos diferentes para propagarse a lo largo del cable.

2.3.3. Fibra multimodo de índice gradual

Se caracterizan porque el índice de refracción del núcleo no es uniforme, variando desde uno mayor en el centro y disminuyendo gradualmente hasta la periferia. La luz en este tipo de fibras se propaga por refracción. Debido a que la velocidad de la luz decrece con el

crecimiento del índice de refracción, la velocidad de la luz para modos cerca del centro del núcleo es menor que en la zona cerca al límite con la corteza, con lo cual los rayos de la periferia que recorren mayor distancia tienen mayor velocidad y los que en el centro recorren menor distancia tienen menor velocidad, tardando aproximadamente lo mismo en recorrer la longitud de la fibra.

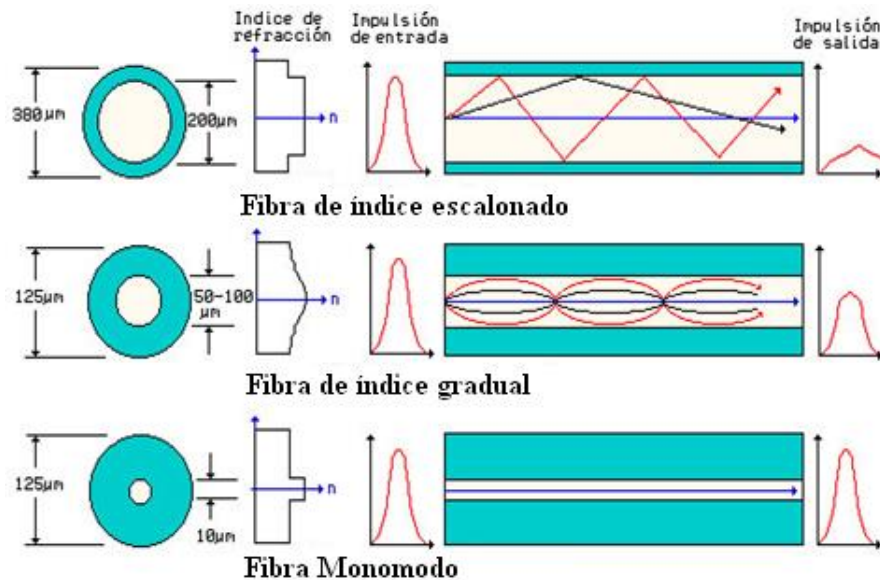


Fig. 2.2. a) Perfil de índice escalonado multimodo. b) Perfil de índice gradual multimodo. c) Perfil de índice escalonado monomodo

Fuente: Disponible en <http://foros.monografias.com/showthread.php/63861-La-Aventura-de-la-Energía>.
Descargado en junio de 2013.

3. PROPIEDADES DE LA FIBRA

3.1. Diferencia entre índices de refracción

Por lo general las fibras de *índice escalonado* tienen un núcleo con índice n_1 aproximadamente igual a 1,48. Dicho núcleo está rodeado por un revestimiento con índice n_2 menor que el del núcleo, y está relacionado con el índice del núcleo de acuerdo con:

$$n_2 = n_1 - \Delta n_1 = n_1(1 - \Delta)$$

Donde Δ es el cambio fraccional en el índice de refracción o diferencia entre índices, dado por:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

Esta última expresión es válida para el caso en el que $n_1 \cong n_2$, lo que suele suceder casi siempre en la mayor parte de las fibras.

Los valores utilizados en la práctica en las fibras multimodo de índice escalonado, para n_2 hacen que Δ adopte valores entre 0,01 a 0,03, es decir de 1% a 3%. En las fibras monomodo de índice escalonado Δ es menor y generalmente está entre 0,001 y 0,02.

Tabla 2.1. Tipos de fibra y su diferencia de índices

Fuente: Tomada y modificada por los autores de

http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-66912010000500004

TIPO	Diámetro Núcleo (μm)	Diámetro Revestimiento (μm)	Δ	Aplicación
Monomodo 8/125	8	125	0,1% - 0,2%	Largas distancias. Alta tasa de datos
Multimodo 50/125	50	125	1% - 2%	Distancias cortas. Mediana tasa
Multimodo 60/125	60	125	1% - 2%	LAN
Multimodo 100/140	100	140	1% - 2%	LAN. Cortas distancias

3. 2. Angulo de aceptación y cono de aceptación

Ya se sabe que la fibra óptica de *índice escalonado* está compuesta por dos capas de vidrio, cada una con distinto índice de refracción. El índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento, razón por la cual, y debido a la diferencia de índices de refracción, la luz introducida al interior de la fibra se mantiene y propaga a través del núcleo. (TOMASI, 2003)

La luz inyectada en el núcleo choca en las interfaces núcleo-revestimiento con un ángulo mayor que el ángulo crítico reflejándose hacia el núcleo. Como los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, el rayo de luz continúa en zigzag sobre toda la longitud de la fibra. La luz es atrapada en el núcleo. La luz que golpea las interfaces núcleo-revestimiento con un grado menor al ángulo crítico se pierde en el revestimiento.

En la figura 2.3, cuando los rayos de luz inciden en la fibra, llegan a la interfaz aire-vidrio en el eje de la fibra (normal A). El índice de refracción del aire es 1 y el del núcleo de vidrio es 1,5. Por tanto, la luz que entra a la interfaz aire-vidrio se propaga desde un medio menos denso a uno más denso.

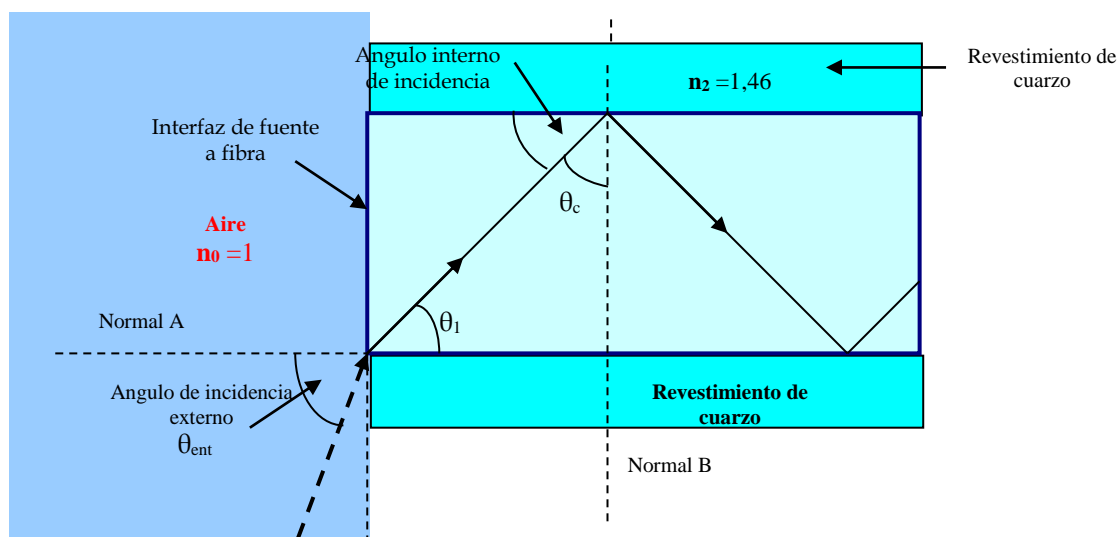


Fig. 2.3. Propagación de un rayo al entrar y transmitirse por una fibra óptica

Fuente: Tomada del libro de Wayne Tomasi, página 439

Por lo anterior y de acuerdo con la ley de Snell, los rayos de luz se refractan acercándose a la normal A (al eje). Eso hace que los rayos cambien de dirección y se propaguen diagonalmente por el núcleo con un ángulo θ_c , distinto del ángulo externo de incidencia θ_{ent} en la interfaz aire-vidrio. Para que un rayo de luz se propague por el cable, debe llegar a la interfaz entre el núcleo y el revestimiento formando un ángulo que sea mayor que θ_c , que es el ángulo crítico.

Si se aplica la ley de Snell al ángulo externo de incidencia se obtiene la siguiente ecuación:

$$n_0 \times \text{sen}\theta_{ent} = n_1 \times \text{sen}\theta_1 \quad (2.2)$$

$$\theta_1 = 90^\circ - \theta_c$$

Luego se puede escribir que:

$$\text{sen}\theta_1 = \text{sen}(90^\circ - \theta_c) = \cos\theta_c \quad (2.3)$$

Porque:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\theta + 90^\circ) \text{ y } \cos(-\theta) = \cos(\theta)$$

Ahora se sustituye la ecuación (2.3) en la (2.2), y se obtiene lo siguiente:

$$n_0 \times \text{sen}\theta_{ent} = n_1 \times \cos\theta_c$$

Despejando de esta ecuación θ_{ent} , se obtiene:

$$\text{sen}\theta_{ent} = \frac{n_1}{n_0} \cos\theta_c \quad (2.4)$$

Llevando los índices de refracción de cada uno de los materiales que intervienen en la transmisión, como componentes de un triángulo de Pitágoras de acuerdo con la figura 2.4, se tiene que:

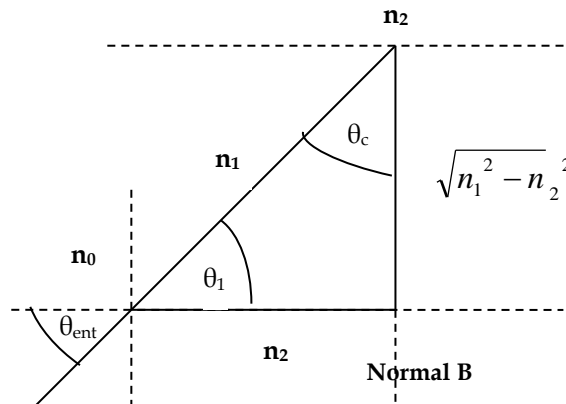


Fig. 2.4. Relaciones geométricas en la ecuación (2.4)

Fuente: Tomada y modificada del libro de Wayne Tomasi, página 440

$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} \quad (2.5)$$

Si se sustituye la ecuación (2.5) en la ecuación (2.4) se obtiene:

$$\text{sen}\theta_{ent} = \frac{n_1 \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_0 n_1} \quad (2.6)$$

Simplificando esta ecuación, se tiene:

$$\text{sen}\theta_{ent} = \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_0} \quad (2.6)$$

$$\theta_{ent} = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_0} \quad (2.7)$$

Como generalmente los rayos de luz entran a la fibra desde el aire y este tiene un índice de refracción igual a 1, la ecuación (2.7) se simplifica a:

$$\theta_{ent(Max)} = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_0} \quad (2.8)$$

A este ángulo se le llama *ángulo de aceptación*, o *medio ángulo del cono de aceptación*. Es decir, es el ángulo máximo que pueden formar los rayos luminosos externos al llegar a la interfaz aire-fibra para poder propagarse por ella, con una atenuación no mayor de 10 dB respecto del valor máximo. Al hacer girar el ángulo de aceptación sobre el eje de la fibra, se obtiene el *cono de aceptación*.

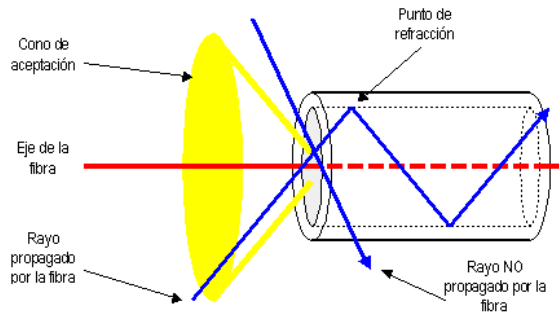


Fig. 2.5. Cono de aceptación

Fuente: <http://www.google.com.co/imgres?imgurl=http://kathy.galeon.com/fotospag5/image005.gif>. Descargada en marzo de 2012

Un rayo de luz puede perfectamente no ser transportado por la fibra óptica si no cumple con el requisito del cono de aceptación. El cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida.

3.3. Apertura numérica (NA)

La apertura numérica (NA: Numerical Aperture) se relaciona con el ángulo de aceptación y es la figura de mérito que se suele usar para medir la magnitud del ángulo de aceptación. Describe la capacidad de enfocar la luz en una fibra óptica. Mientras mayor sea la apertura numérica, la fibra acepta mayor cantidad de luz externa.

Para la luz que entra a la fibra óptica desde el aire, la apertura numérica está dada por:

$$NA = \text{sen}\theta_{ent}$$

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.9)$$

Retomando la ecuación 2.1 correspondiente a la diferencia de índices Δ , y aplicándola en la ecuación 2.9, se tiene:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$$\Rightarrow \Delta \times 2n_1^2 = n_1^2 - n_2^2$$

$$n_1 \sqrt{2\Delta} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

Por lo tanto:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.10)$$

En las fibras monomodo la NA no es tan importante como en las multimodo, porque la luz que sale de una fibra de modo único no se abre en la misma forma que en las multimodo.

4. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS

4.1. Función de onda

Para analizar de alguna manera lo que sucede a un haz de luz cuando se propaga por una fibra óptica, es necesario recordar que la luz, como todo el resto de las ondas del espectro electromagnético, es en el caso más sencillo, un tren de ondas polarizadas linealmente (sin componente de campo eléctrico sobre la dirección de propagación), propagándose en un medio confinado y en una determinada dirección z . La descripción más completa viene del conocimiento de su *función de onda*, que en general puede tener la forma (POWER, 2000):

$$A(z, t) = A_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.11)$$

Donde:

$A(z, t)$: Es una función en el dominio de las variables distancia y tiempo.

A_0 : Es el máximo valor de la función, tomada en el vacío.

k : Es el *vector de onda* del frente que se propaga o también número de onda, que representa la velocidad angular de la onda, o la cantidad que indica la periodicidad en una onda periódica. De modo que:

$$k \cdot \lambda = 2\pi$$

Entonces para una onda que se propaga en el vacío:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.12)$$

Mientras que en otro medio con índice de refracción n_1 su valor pasa a ser:

$$k = n_1 k_0 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad (2.13)$$

Esta ecuación permite expresar a k_0 en función de otras variables, así:

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$$

Y por lo tanto:

$$k = n_1 \frac{\omega}{c} \quad (2.14)$$

Si el rayo de luz confinado viene definido en su avance por un ángulo θ_1 respecto del eje de la guía (figura 2.6), este ángulo será el mismo que forme el vector de onda k , con el mismo

eje. Entonces, el vector de onda puede descomponerse en sus dos vectores k_z y k_x , según la dirección de propagación y la ortogonal a ella, respectivamente, de acuerdo con:

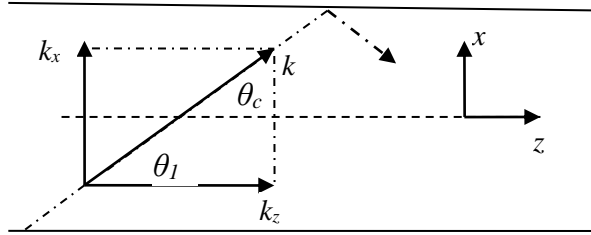


Fig. 2.6. Descomposición del vector de onda en sus dos componentes ortogonales

$$\begin{aligned} k_z &= k \cos \theta_1 = k_0 n_1 \cos \theta_1 \\ k_x &= k \sin \theta_1 = k_0 n_1 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

El significado de las dos componentes se considera así: k_z define las propiedades del avance longitudinal de la radiación óptica y k_x constituye el vector de onda de un campo que se propaga en zigzag entre las dos superficies, superior e inferior, que confinan el medio.

Dado que k_z se usa extensamente, también se denota por β y es el vector de onda según la dirección de propagación. A β se la conoce como *constante de propagación longitudinal*.

4.2. Ecuación de resonancia transversal

Como se dijo, k_x es el equivalente al vector de onda de un campo que se propaga ortogonalmente al eje de la guía rebotando entre las dos superficies que la confinan. Si la situación es estable o normal, el desfase que tendría el campo en un recorrido completo debería ser un múltiplo de 2π (no habría desfase). Este desfase lo denotaremos por δ , y provendrá de dos factores diferentes (POWER, 2000):

El desfase δ_1 es el del espacio físico que recorre la onda y su valor será:

$$\delta_1 = 2k_x d = 2dk_0 n_1 \sin \theta_1 \quad (2.16)$$

Donde d es el ancho de la guía (o $2a$, siendo a , el radio del núcleo de la fibra). El factor 2 porque es de ida y vuelta

El segundo desfase δ_2 que se produce, es el que ocurre cuando la onda choca contra la superficie de la interfaz de separación de los medios (en propagación de ondas, este desfase está asociado con el coeficiente de reflexión, que en general es un número complejo y que depende del ángulo con que incide la luz, así como de la polarización que esta lleve). Este desfase presenta valores desde 0° para ángulos de incidencia iguales al ángulo crítico (para reflexión total) y $\pi/2(90^\circ)$ para ángulos de incidencia paralelos o coincidentes con el eje de propagación.

En síntesis:

$$\delta_2 = -4\phi \quad (2.17)$$

Donde ϕ es el desfase producido por el ángulo de incidencia y el valor 4, corresponde al desfase producido por las dos superficies de la guía.

Por lo tanto:

$$\delta_1 + \delta_2 = 2dk_0n_1\sin\theta_1 - 4\phi \quad (2.18)$$

Y el desfase total, de acuerdo con lo anterior, deberá ser igual o un múltiplo de 2π , con lo que finalmente se obtiene:

$$dk_0n_1\sin\theta_1 - 2\phi = \pi M \quad (2.19)$$

Esta ecuación se denomina *de dispersión de la guía* o *ecuación de resonancia transversal*. Donde M es el *número de modo* y puede tener valores de 0, 1, 2, 3...

La solución de esta ecuación, para los valores que se den a M , determinará el ángulo θ_1 con el que se propaga el modo correspondiente. M adquiere el valor 0 cuando corresponde al modo fundamental.

4.3. Número de modos que se propagan por una fibra de índice escalonado

Tomando la ecuación (2.19) para despejar el ángulo de incidencia que formará el M -simo modo, se tiene (POWER, 2000):

$$\sin\theta_{1M} = \frac{2\phi + M\pi}{dk_0n_1} \quad (2.20)$$

Si θ_1 presenta valores pequeños, ϕ podrá aproximarse a $\pi/2$ y entonces $\sin\theta_1$ se hace igual a θ_1 .

Entonces:

$$\theta_{1M} \approx \frac{\pi + M\pi}{dk_0n_1} = \frac{\pi}{dk_0n_1}(M + 1) \text{ radianes}$$

Pero:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Entonces,

$$\theta_{1M} \cong \frac{\lambda}{2dn_1}(M + 1) \text{ radianes} \quad (2.21)$$

Ejemplo 1: Halle el valor del ángulo de incidencia con que se propaga una onda de luz a través de una fibra, si $d = 62,5\mu\text{m}$ (diámetro); $n_1 = 1,5$ y $\lambda = 850 \text{ nm}$, para $M = 0$ (el modo fundamental).

Aplicando la ecuación 2.21 y reemplazando los datos en ella se obtiene:

$$\theta_{1M} \cong \frac{0,85\mu\text{m}}{2(62,5\mu\text{m}) \times 1,5} (0 + 1) = 0,0045 \text{ rads} \approx 0,259^\circ$$

Los modos de orden superior irán incrementando el valor de θ_l , hasta que se hagan mayores que el ángulo crítico y por lo tanto sean radiados al exterior (porque θ_l es el complemento a 90° de θ_c , entonces se haría mayor que θ_c).

El número de modos que habría antes de que se produzca radiación de luz al exterior, debe cumplir que $\theta_l < \theta_c$. Pero una situación simplificada puede ser cuando $\theta_l \approx \theta_c$ y con ello $\phi \cong 0$. Retomando la ecuación 2.20, aplicando lo anterior:

$$\text{sen}\theta_{1M} = \frac{M\pi}{dk_0n_1}$$

y despejando M , dará lugar a la ecuación del número de modos máximos:

$$M_m \cong \frac{dk_0n_1\text{sen}\theta_1}{\pi} \quad (2.22)$$

Teniendo en cuenta las figuras 2.7 y 2.5, y aplicando que en ellas el $\text{sen } \theta_l = \cos \theta_c$, y además sabiendo que:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Entonces:

$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1}$$

Con lo cual la ecuación 2.22, quedaría:

$$M_m = \frac{dk_0n_1 \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1}}{\pi} \quad (2.23)$$

Pero:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Entonces:

$$M_m = d\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{\pi}$$

Ahora:

$$n_1\sqrt{2\Delta} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

Por lo tanto:

$$M_m = \left(\frac{2d}{\lambda}\right) n_1\sqrt{2\Delta} = \left(\frac{4a}{\lambda}\right) n_1\sqrt{2\Delta} \quad (2.24)$$

Y si se hace:

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right) n_1\sqrt{2\Delta} \quad (2.25)$$

Entonces:

$$M_m = \left(\frac{V}{\pi/2}\right) \quad (2.26)$$

El parámetro V en la ecuación 2.25, recibe el nombre de *anchura normalizada de la guía* o *frecuencia normalizada*, que se verá más adelante.

Ejemplo.

Se sabe que por una fibra 9,5/125 se logran transmitir 2 modos antes de que los demás modos se refracten por el revestimiento. Si dicha fibra tiene una diferencia de índices del 1,3% y un índice del revestimiento igual a 1,469, indique en grados cual es el ángulo de incidencia máximo con que deben viajar los modos por el núcleo de la fibra cuando la longitud de onda de las radiaciones de $0,91\mu\text{m}$

$$M_{\max} = 2 \quad \Delta = 0,013 \quad n_2 = 1,469 \quad \lambda = 0,91\mu\text{m}$$

$$n_1 = \sqrt{\left(\frac{n_2^2}{(1 - 2\Delta)}\right)} = \sqrt{\left(\frac{(1,469)^2}{(1 - 2(0,013))}\right)} = 1,488$$

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda}{2dn_1}(M + 1) = \frac{0,91\mu\text{m}}{2(9,5\mu\text{m}) \times 1,488}(2 + 1) = 0,096 \text{ rad} = 5,53^\circ$$

5. PÉRDIDAS EN LAS FIBRAS ÓPTICAS

La transmisión de luz por la fibra óptica implica tener en cuenta el comportamiento que presentan los materiales con los que está construida la fibra (sílice) al paso de la luz. Este comportamiento en general se ve reflejado en pérdidas de potencia de la radiación transmitida a lo largo de ella y por lo tanto, deben considerarse esas propiedades de los materiales para adecuarlos a las necesidades de la fibra óptica y en síntesis definir el tipo de pérdidas presentadas.

5.1 Tipo de pérdidas

De acuerdo con lo anterior, las pérdidas en la fibra están relacionadas con esas propiedades las cuales se pueden clasificar en tres grandes bloques:

1. **El primer bloque** se refiere a las pérdidas que los materiales pueden originar sobre la radiación que se transmite. Estas pérdidas provienen de fuentes distintas: Una de ellas es la que se deriva del propio material de la fibra -el sílice- tomado en estado idealmente puro (intrínseco) y del que surgen propiedades físicas intrínsecas que derivarán en *pérdidas intrínsecas*. Las pérdidas por absorción infrarroja y ultravioleta se encuentran dentro de este tipo. Las pérdidas producidas por esta fuente son inherentes al material y por lo tanto son difíciles de eliminar.

Otra fuente es la que proviene de todo aquello ajeno al propio material, pero que aparece unido a cualquier fibra que se estudie. Estas propiedades son las extrínsecas que producen *pérdidas extrínsecas*. Dentro de este tipo de pérdidas se clasifican la absorción por iones como impurezas del material. Estas pérdidas podrían reducirse mediante procesos cuidadosos de fabricación.

2. **El segundo bloque**, analiza cómo el material altera las características de un pulso que se propaga por ella. En este bloque se encuentra un conjunto de comportamientos en los

que la mayor parte son de respuesta no lineal y que son función de la longitud de onda de la radiación y de su intensidad.

3. **El tercer bloque** corresponde a las pérdidas debidas a la instalación de la fibra y a irregularidades intrínsecas, pero también otras causadas por el acople de las fibras tanto en empalmes como en conectores. Algunas de ellas son de carácter intrínseco a las propias fibras que se usan y otras son extrínsecas relacionadas con la forma en que se coloca una fibra respecto de la otra que se pretende acoplar.

Otro tipo de pérdidas no contempladas en los bloques anteriores son las causadas por imperfecciones de la fibra causadas en el proceso de fabricación y que producen pérdidas por radiación de luz hacia el exterior de la fibra.

5.2 Factor de atenuación de las fibras ópticas

La atenuación es entonces la consecuencia de los valores que toman algunos parámetros físicos por la composición atómica del material de la fibra y que hacen que la propagación de la luz sufra algunos cambios. Estas pérdidas producen efectos adversos tales como reducción del ancho de banda, velocidad de transmisión, eficiencia y capacidad del sistema (MARTIN Pereda, 2002).

En forma general, se puede decir que la potencia eléctrica en la fibra óptica decrece exponencialmente con la distancia y a este parámetro se le denomina *factor de atenuación* dado en unidades normalizadas de dB/km .

En cualquier caso las pérdidas de potencia debidas a ese factor y en función de la distancia están dadas por la ecuación general:

$$P_z = P_0 e^{-\alpha_p z} \quad (2.27)$$

Donde: P_z : es la potencia en vatios medida en una posición z desde el origen

P_0 : es la potencia en vatios de la luz en el origen de la fibra

α_p : Coeficiente de atenuación que es función de muchas variables. Está dado en dB/km

El coeficiente de atenuación α está dado por:

$$\alpha = -\frac{10}{Z(km)} \log \left(\frac{P_z}{P_0} \right) \quad (2.28)$$

Y en forma general:

$$P_z = P_0 \times 10^{-\alpha z/10} \text{ (watts)}$$

Es decir,

$$P_z(dBm) = P_0(dBm) - \alpha \left(\frac{dB}{km} \right) \times Z(km)$$

Donde:

α_z = Atenuación total de la fibra en una distancia z en Km. (dB/km)

En la tabla 2.1 se muestran algunos valores típicos de atenuación para los cables de fibra.

Tabla 2.1. Tipos de fibra y sus valores de atenuación respecto de su longitud de onda
Fuente los autores

Tipo de cable	Diámetro del núcleo (μm)	Diámetro del revestimiento (μm)	NA	Atenuación (dB/Km)
Monomodo	8	125	0,18	0,4 a 1300 nm
Índice gradual	50	125	0,2	2,7 a 850 nm
	100	140	0,3	4 a 850 nm
Índice escalonado	200	380	0,27	6 a 850 nm
	300	440	0,27	6 a 850 nm
PCS	200	350	0,3	10 a 790 nm
	400	550	0,3	10 a 790 nm
Plástico	-	750	0,5	400 a 650 nm
	-	1000	0,5	400 a 650 nm

Para un tipo de fibra dada, las pérdidas son dependientes de la longitud de onda (distribución espectral). La gráfica 2.7 describe la distribución espectral de las pérdidas de una fibra óptica multimodo típica de sílice.

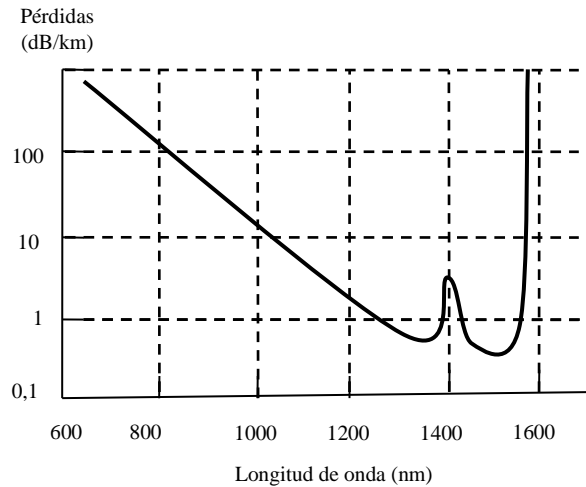


Figura 2.7. Distribución espectral de una fibra multimodo de sílice

Fuente: Sistemas y redes ópticas de comunicaciones. MARTÍN, José A. Pag. 40 consultado marzo 2012

5.3 Ejemplos de atenuación

1. Calcular la potencia óptica en dBm que se mediría a 75 km de una fuente óptica de 250μw, si se usa fibra monomodo 8/125 en la ventana de 1300 nm.

$$P = 0,25mw \times 10^{-(0,4)(75)/10} = 2,5 \times 10^{-7}w$$

$$P(dBm) = 10 \log \frac{2,5 \times 10^{-7}w}{1 \times 10^{-3}w} = -36dBm$$

2. Una fibra óptica monomodo 8,5/125 fue probada en laboratorio y se encontró que en una distancia de 1500 metros la potencia de la fuente de prueba se disminuyó en un 63%. Halle el valor del factor de atenuación.

6. PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN

Son dos las fuentes principales para que haya absorción de una radiación óptica al paso por la fibra: *El material* base de la fibra y *las impurezas* que pueda contener. Aunque son de distinto origen, ambas pueden ser derivadas de una misma causa y es la estructura atómica y molecular de los componentes. Las impurezas en el material absorben la luz y la convierten en calor.

Los factores que contribuyen a las pérdidas por absorción son: *pérdidas intrínsecas* y *pérdidas extrínsecas*.

6.1. Pérdidas intrínsecas

La absorción ultravioleta e infrarroja constituyen las *pérdidas intrínsecas* y son las mínimas que podrían presentarse en una fibra óptica de vidrio (MARTIN Pereda, 2002).

6.1.1. Absorción ultravioleta

Todo átomo absorbe energía electromagnética cuando un electrón pasa desde un cierto nivel a otro superior. Cada uno de estos saltos da lugar a absorción de energía y a pérdidas. Si en lugar de átomos aislados se toma un material constituido por un conjunto de ellos en una estructura no cristalina, ahora el equivalente de los niveles atómicos serán bandas de energía entre las que se produce el fenómeno de saltos. La mayor parte de estos saltos tienen lugar a frecuencias dentro del margen ultravioleta y su borde inferior (el que linda con el visible).

La ecuación empírica de Urbach, define estas pérdidas, así:

$$\alpha_{UV} \left(\frac{dB}{km} \right) = C \times e^{E_p/E_0} = C \times e^{h.c/\lambda.E_0} \quad (2.29)$$

Donde:

α_{UV} : son las pérdidas debidas a la radiación ultravioleta,

C : una constante de magnitud arbitraria,

E_0 : valor de la energía de la posición inicial del electrón,

h : la constante de Plank (6.625×10^{-34} J.seg)

c : la velocidad de la luz en el vacío

λ : la longitud de onda de la luz ultravioleta,

Se puede ver que la pérdida disminuirá apreciablemente según se incremente λ . Por lo tanto a longitudes por encima de 1000 nm su influencia es casi nula.

6.1.2. Absorción infrarroja

Un nuevo fenómeno ocurre cuando se pasa a la región infrarroja. Los fotones de luz son absorbidos por los átomos de las moléculas del núcleo de vidrio (SiO_2), produciendo vibraciones mecánicas aleatorias en los enlaces atómicos del material, lo cual conduce a la producción de calor y las consiguientes pérdidas. Su importancia se hace significativa cuando se alcanza la región del infrarrojo.

Una fórmula aproximada para calcular estas pérdidas en el caso del vidrio hecho con GeO_2 SiO_2 , es:

$$\alpha_{IR}(\text{dB}/\text{km}) = 7,81 \times 10^{11} \times e^{\left(-\frac{48,48}{\lambda}\right)} \quad (2.30)$$

6.2. Pérdidas extrínsecas

La *absorción por resonancia de iones* corresponde a las pérdidas por impurezas en el material, debido a las técnicas de fabricación de las fibras. La fuente primaria de las impurezas en el material en fibras de vidrio son los iones de metales de transición en la fabricación (principalmente de hierro, cobalto, cobre y cromo) y los iones OH^- de agua.

Las pérdidas debidas a iones metálicos pueden ser reducidas hasta 1dB/km cuando la mezcla de vidrio se refina por debajo de 0,001ppm.

En el caso de los iones OH, la situación es peor. Concentraciones equivalentes a 0,003 ppm conducen a pérdidas del orden de 20dB/km. Este tipo de absorción no es uniforme en todo el espectro. El principal pico de absorción de OH está cerca de los 2700nm y en los armónicos 2, 3 y 4 (1400nm, 950nm y 725nm), también denominados sobretonos. Las zonas situadas entre ellas se denominaban primera, segunda y tercera ventanas. Ver figura 2.8.

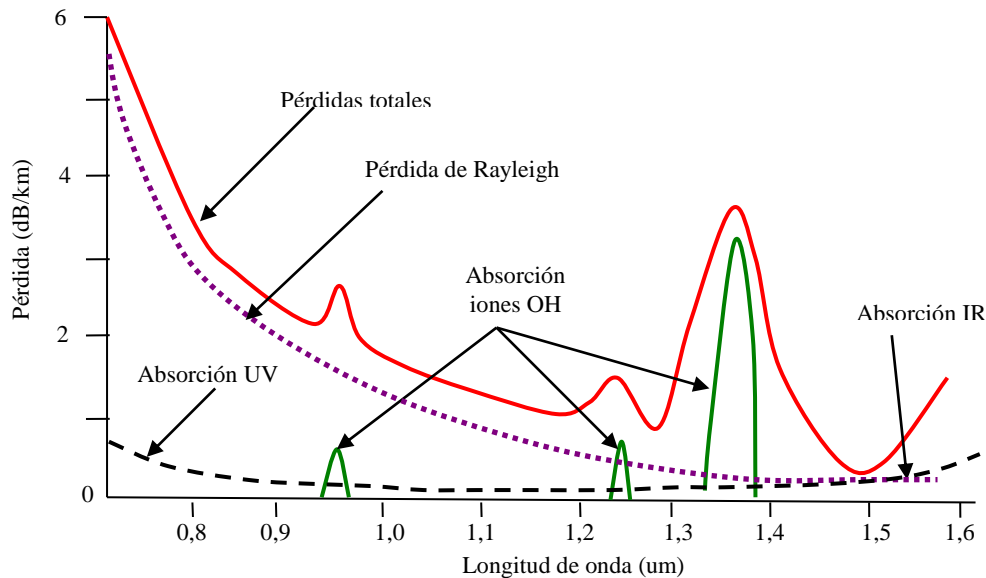


Fig. 2.8. Curva de pérdidas de una fibra óptica debida a absorción y dispersión)

Fuente: Libro de José Pereda. Pag. 48 consultado marzo 2012

Los modernos procesos de fabricación han reducido considerablemente el contenido de OH, llegando a ser menos de 0,001 ppm. Las ventanas definidas actualmente han ido desapareciendo, quedando ventanas de baja atenuación en 1310 y 1550 nm. Adicionalmente las fibras fabricadas con SiO_2 , son muy pocas, pasando a ser construidas en materiales tales como GeO_2 , P_2O_5 (Pentóxido de Fósforo) y B_2O_3 (trióxido de Boro).

7. PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN

(MARTIN Pereda, 2002) El material de la fibra en sí no es el único que da pérdidas, también toda irregularidad estructural de carácter microscópico, determina que la onda de luz al chocar con las irregularidades presentes (espacios huecos, diferencias de densidad o de composición en el material y en general variaciones en la configuración estructural de la fibra), le quita energía en la dirección de propagación y la dispersa en otras direcciones.

Este tipo de interacción variará de acuerdo con la relación existente entre la longitud de onda de la radiación y el tamaño de la irregularidad.

Las pérdidas por dispersión se pueden dividir en dos tipos:

- Pérdidas en las cuales la atenuación *no depende de la magnitud* de la señal radiada, tal y como las que se presentan por efectos del material de la fibra y de las irregularidades en su fabricación, y se denominan *pérdidas por dispersión lineal*.
- Pérdidas en donde la atenuación sí depende de la magnitud de la señal radiada y en consecuencia se denominan pérdidas por *dispersión no lineal*.

7.1. Pérdidas por dispersión lineal

Para este tipo, se pueden presentar dos casos:

- Cuando la λ de la radiación es mucho mayor que las irregularidades, denominada *dispersión de Rayleigh*.
- Cuando las no homogeneidades son comparables con la λ de la luz y en este caso se conoce como dispersión de *Mie*.

7.1.1. Dispersión de Rayleigh

Este tipo de dispersión se debe a que las no uniformidades del material (que pueden ser de *densidad*, de *constante dieléctrica* o de *índice de refracción*) tienen dimensiones menores a $0,1\mu\text{m}$.

Las variaciones respecto de la uniformidad, se pueden agrupar en dos términos independientes: El que *depende de las fluctuaciones de la densidad* del material y el que *depende de la composición del mismo*. Ambos factores proceden del proceso de fabricación y son difíciles de eliminar, especialmente las de variaciones de densidad.

Para el caso en que las *fluctuaciones de densidad* son las que mayormente se dan en la fibra, la siguiente expresión aproxima el valor de la atenuación:

$$\alpha_R \left(\text{dB}/\text{km} \right) = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \times K T_f \beta_T \quad (2.31)$$

Donde:

K = Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J}/^\circ\text{K}$)

T_f = Temperatura de la fibra (muy pequeña en $^\circ\text{K}$)

β_T = Compresibilidad isotérmica del material (mm^2/N a una temperatura dada en $^\circ\text{K}$).

α = índice de atenuación del material debida a las fluctuaciones

n = índice de refracción del material

Se puede notar la alta dependencia de la atenuación al factor $1/\lambda^4$, lo que lleva a que sea conveniente trabajar a longitudes de onda lo mayor posibles. Se puede inferir que su importancia es fuerte para λ por debajo de una micra y que por encima de esta se hace menos significativa.

Como la dispersión produce *difracción* (los rayos resultantes se dispersan en todas las direcciones), resulta altamente inconveniente para fibras en las que se emplea la *transmisión bidireccional*. También, algunos rayos continúan a través de la fibra pero otros escapan de ella a través del revestimiento.

7.1.2. Dispersión de Mie

Ocurre para inhomogeneidades que son de longitud equivalente que la longitud de onda de la radiación que se propaga y tiene algún significado, especialmente cuando el tamaño del dispersor es mucho mayor que $\lambda/10$. Puede provenir de pequeñas alteraciones de la geometría a lo largo de la fibra, o en la diferencia de los índices entre el núcleo y el revestimiento. Todas estas imperfecciones son corregibles en el proceso de fabricación. Por esto este tipo de dispersión no es muy tenida en cuenta.

7.2. Pérdidas por dispersión no lineal

Existe cuando la magnitud del efecto resultante sí depende de la intensidad de la radiación. Hay dos tipos de dispersión no lineal:

- a. La dispersión de *Brillouin* y
- b. La dispersión de *Raman*.

Para efectos de comunicaciones ópticas donde la cantidad de información transportada no es muy alta, es decir que las potencias a transmitir no son elevadas, los efectos de dispersión son casi nulos. Sin embargo, cuando se trata de sistemas de comunicaciones más sofisticados donde por la fibra se transportan gran número de canales y por lo tanto hay que elevar más la potencia óptica, sí pueden llegar a afectar de manera importante la transmisión.

7.2.1. Dispersión de Brillouin

(POWER, 2000) Se puede definir como un tipo de modulación de la luz por la energía térmica en el material. El fotón de luz incidente experimenta una interacción no lineal que produce energía vibratoria en el cristal (o fonones), así como dispersión de luz (en forma de fotones).

La luz dispersada es modulada en frecuencia por la energía térmica (por los fonones) y se observará un corrimiento de frecuencia hacia arriba y hacia abajo. La cantidad de corrimiento de frecuencia y la fuerza de la dispersión, varía en función del ángulo de dispersión, con un máximo ocurriendo en dirección hacia atrás y un mínimo de cero en dirección hacia delante. Por lo tanto, la dispersión de Brillouin se da principalmente en dirección hacia atrás haciendo que la energía se devuelva hacia la fuente (transmisor), reduciendo así la potencia a la entrada del receptor.

El nivel de potencia óptica por dispersión de Brillouin llega a ser significativa en fibras monomodo y está dada por la ecuación empírica:

$$P_B(w) = (17,6 \times 10^{-3}) a^2 \lambda^2 \alpha \Delta v \quad (2.32)$$

Donde:

P_B es el nivel de potencia en vatios requerido para que haya dispersión.

a es el radio de la fibra en μm

λ es la longitud de onda del rayo de luz de la fuente (μm)

α es el factor de atenuación de la fibra (en dB/km)

Δv es el ancho (linewidth) de la frecuencia del rayo de luz en la fuente (GHz).

Existe una relación entre Δv y $\Delta \lambda$ (anchura espectral) con la siguiente ecuación:

$$\Delta v \text{ (Hz)} = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (2.33)$$

Donde $\Delta \lambda$ es la anchura espectral del pulso de luz y se da en metros.

Niveles de potencia por encima de este umbral (P_B) perderán cantidades significativas de la señal por efectos de la dispersión.

7.2.2. *Dispersión de Raman:*

(POWER, 2000) En este tipo de dispersión, la interacción no lineal produce un fonón de alta frecuencia y un fotón dispersado, en vez del fonón de baja frecuencia en la dispersión de Brillouin. La dispersión es predominantemente hacia delante, por lo tanto la potencia en el receptor se ve menos afectada. El nivel de potencia umbral para que ocurra una dispersión significativa de Raman, está dada por:

$$P_R(w) = (23,6 \times 10^{-2}) a^2 \lambda \alpha \quad (2.34)$$

Los factores deben tener las mismas unidades de la ecuación 2.32.

Ejemplo: Considere una fibra monomodo de 8/125, operando a 1300 nm y con pérdidas de 0,8dB/km. La anchura espectral de la fuente es de 0,013nm. Calcule el nivel umbral de potencia para dispersión de Brillouin y de Raman.

$$\Delta v = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda = \frac{3 \times 10^8}{(1300 \times 10^{-9})^2} (0,013 \times 10^{-9})$$

$$\Delta v = 2,31 \times 10^9 \text{ Hz} = 2,31 \text{ GHz}$$

La potencia umbral para dispersión de Brillouin, será:

$$P_B = (17,6 \times 10^{-3}) a^2 \lambda^2 \alpha \Delta v$$

$$P_B = (17,6 \times 10^{-3}) (4)^2 (1,3)^2 (0,8) (2,31) = 0,879 \text{ watts}$$

La potencia umbral para dispersión de Raman, será:

$$P_R = (23,6 \times 10^{-2}) a^2 \lambda \alpha$$

$$P_R = (23,6 \times 10^{-2}) (4)^2 (1,3) (0,8) = 3,93 \text{ watts}$$

La relación del umbral para dispersión de Brillouin respecto del umbral para dispersión de Raman, se da por:

$$\frac{P_B}{P_R} = \frac{(17,6 \times 10^{-3}) a^2 \lambda^2 \alpha \Delta \nu}{(23,6 \times 10^{-2}) a^2 \lambda \alpha} = 0,0746 \lambda \Delta \nu = 0,0746(1,3)(2,31) = 0,224$$

$$\frac{P_B}{P_R} = 22,4\%$$

Esta relación en porcentaje quiere decir, que el umbral para dispersión de Brillouin está por encima del umbral para dispersión de Raman en un 22,4%, indicando que la dispersión de Brillouin es el factor limitante en la dispersión no lineal.

7.3. Otros efectos no lineales en la fibra

7.3.1. *Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)*

(POWER, 2000) Cuando se tiene más de una señal viajando a través de la fibra, como en multiplexiación WDM, situaciones más complicadas pueden ocurrir por interacción no lineal entre las diferentes señales.

La mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM) ocurre cuando dos longitudes de onda, operando en frecuencias f_1 y f_2 respectivamente, se mezclan para producir señales en las frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$.

De igual manera, la mezcla puede ocurrir por combinación de tres o más longitudes de onda. El decrecimiento en el espaciamiento entre canales y el decrecimiento de la dispersión en la fibra hace que se incremente el efecto FWM.

7.3.2. *Modulación por fase cruzada (XPM)*

(MARTIN Pereda, 2002) La XPM es un desplazamiento en la fase de la señal transmitida en una determinada longitud de onda, causado por el cambio en la intensidad de una señal que se propaga en una longitud de onda diferente.

XPM puede generar asimetrías en el pulso óptico y, combinada con la dispersión del material, puede afectar la forma del pulso en el dominio del tiempo.

El fenómeno XPM puede limitar el desempeño de los sistemas ópticos, pero puede también aprovecharse como ventaja para modular señales a una longitud de onda dada, a partir de una señal modulada en una longitud de onda diferente, esta técnica se utiliza para implementar dispositivos de conversión de longitud de onda.

8. PÉRDIDAS POR CURVATURAS

Hasta ahora se ha tratado la fibra como un elemento totalmente recto, pero como esto es improbable, habrá curvas en la fibra que dependerán de un radio determinado, y por lo tanto, el comportamiento hasta ahora estudiado cambiará, ejerciendo un efecto sobre la intensidad de la radiación que se propaga. Estas curvas se denominan *macrocurvaturas* y dan lugar a *pérdidas por macrocurvaturas*.

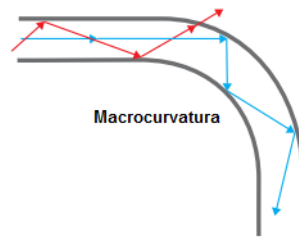


Figura 2.9. En una macrocurvatura los modos de mayor orden se escapan del núcleo.

Fuente: <http://fibraoptica.blog.tartanga.net/fundamentos-de-las-fibras-opticas/> descargada febrero 2012

También aparecen otras curvas que se derivan de la propia fibra, porque cada hilo de fibra no está aislado, sino que va con otros hilos en formas determinadas, donde cada una de ellas afecta la disposición de las otras produciendo pequeñas curvaturas o deformaciones de los hilos, con radios menores. A estas curvas se les da el nombre de *microcurvaturas* y producen *pérdidas por microcurvaturas*.

Para el caso de las microcurvaturas, en las que las irregularidades de la fibra aparecen en el momento de cableado de la fibra, por lo que a veces se les llama *pérdidas por cableado o empaquetado*, la atenuación se deberá al acoplo repetido entre modos que se propagan y modos que se radian. Si los rayos al chocar con las irregularidades cambian de ángulo, se podría decir que los rayos ahora no se propagarán dentro de la fibra sino que se radiarán. Para unos casos habrá interferencia destructiva y para otros constructiva.

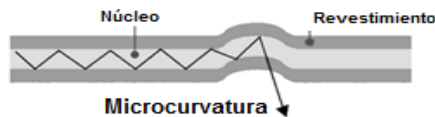


Figura 2.10. En una microcurvatura algo de luz se escapa del núcleo.

Fuente: <http://www.yio.com.ar/fibras-opticas/atenuacion-fibras-opticas-potencia-otdr.php> descargada marzo 2012

Se sabe que los modos de propagación en una fibra tienen una distribución de la energía que para el caso del modo principal, es de alta intensidad en el centro y con una reducción de tipo exponencial hacia el revestimiento.

Si el haz de radiación considerado de un solo modo se propaga dentro de una fibra curvada con radio r , la distribución de la intensidad de radiación tendrá diferentes velocidades, sobretodo la intensidad de la energía atenuada cerca al revestimiento, por cuanto, por la parte superior de la curva los rayos deberán ir a una velocidad mayor que los del radio interior, ya que aquellos recorrerán mayor distancia. Por lo tanto, es posible que la energía del modo tienda a radiar al exterior parte de su energía y la radiación que se transmite por la fibra pierde parte de su intensidad.

Este tipo de pérdidas también se llaman *pérdidas por radiación* en las curvas. Los valores típicos de pérdidas por micro curvaturas que aparecen cuando se hace el cableado de los hilos, pueden llegar a ser de 1 a 2dB/km (POWER, 2000).

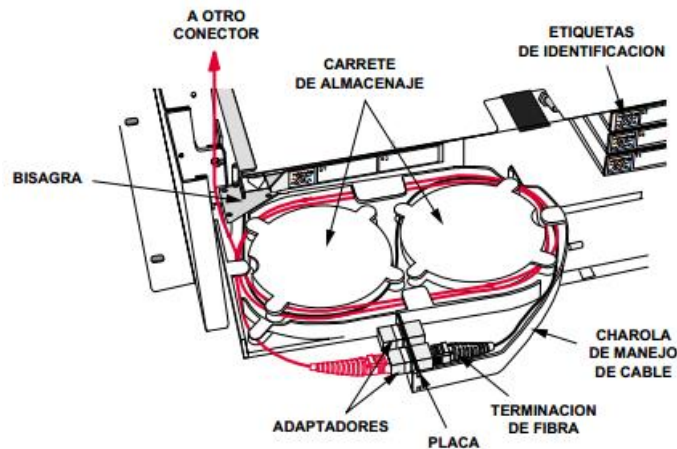


Figura 2.11. Bandeja de conexiones de hilos de fibra, apropiado para evitar pérdidas

Fuente: <http://www.adc.com/us/en/Library/Techpub/90201.pdf> descargada marzo 2012

A mayor número de modos, habrá mayores pérdidas y en cuanto mayor sea el orden del modo, menor será la *concentración* del mismo en torno al eje de la fibra, por lo que de manera intuitiva, tendrán más *tendencia* a perder energía hacia el exterior en las curvas.

El coeficiente de pérdidas asociado con una fibra curvada, está dado por:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{-\alpha_R Z}$$

Donde α_R es el factor de atenuación por doblaje y que está dado por:

$$\alpha_R = C_1 e^{-C_2 r}$$

C_1 y C_2 son dos constantes arbitrarias independientes del radio r de la curva. Estas pérdidas adquieren su mayor valor para un valor del radio, llamado *radio crítico* (r_c) y cuya expresión puede darse por (MARTIN Pereda, 2002):

$$r_c(m) = \frac{3n_2\lambda}{4\pi(NA)^3} \quad (2.35)$$

Donde puede verse la dependencia inversa con la NA (menor r_c a mayor NA) y la dependencia directa de la longitud de onda de la radiación transmitida. Por eso es conveniente el diseño de fibras con NA mayores y trabajar con menores valores de longitud de onda compatibles con el resto de condicionantes que se tengan.

El diámetro máximo que puede tener una fibra óptica monomodo es proporcional a la longitud de onda del rayo de luz que entra al cable y a la apertura numérica de la fibra. El radio máximo del núcleo de una fibra de modo único es:

$$r_{max}(m) = \frac{0,383 \lambda}{NA} \quad (2.36)$$

Donde: λ = Longitud de onda del rayo de luz (m)
 r_{max} = radio máximo del núcleo (m)

Ejemplo 1: (POWER, 2000) Calcule el radio crítico de la curvatura de una fibra multimodo 50/125, con un NA de 0,2 y n_1 igual a 1,48, operando a 850nm.

Entonces:

$$r_c = \frac{3n_2\lambda}{4\pi(NA)^3} = \frac{3(1,48)(850 \times 10^{-9})}{4\pi(0,2)^3} \approx 37,5 \mu m$$

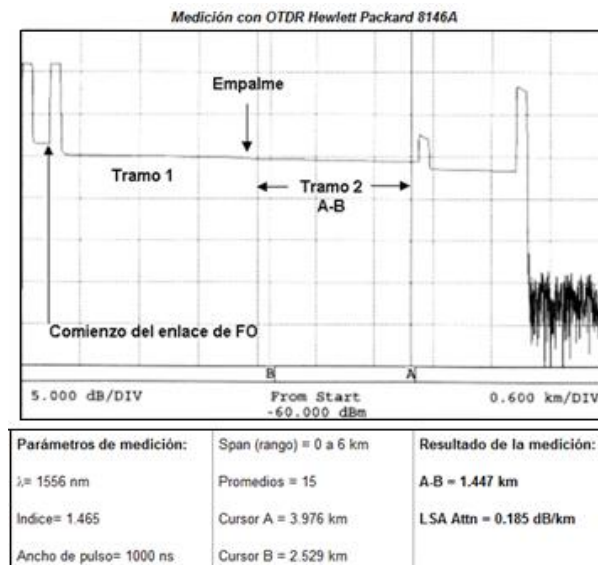
Ejemplo 2: Para una fibra monomodo de 9/125 con $n_1 = 1,49$ y $\Delta = 0,0033$, operando a 1300 nm, halle el radio crítico.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 = n_1 - \Delta n_1 = 1,49 - (0,0033)(1,49) \approx 1,485$$

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{(1,49^2 - 1,485^2)} = 0,122$$

$$r_c = \frac{3n_2\lambda}{4\pi(NA)^3} = \frac{3(1,485)(1300 \times 10^{-9})}{4\pi(0,122)^3} \approx 253 \mu m$$

En la figura 2.12 puede verse la pantalla de un OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) que es un instrumento óptico-electrónico usado para caracterizar las fibras ópticas. Este instrumento puede ser utilizado para estimar la longitud de la fibra y la atenuación producida por la misma fibra y por los empalmes y conectores. También puede ser utilizado para detectar fallas en una trayectoria, tales como roturas de la fibra. Para realizar su función, el OTDR inyecta en la fibra bajo análisis una serie de pulsos ópticos que al no encontrar las condiciones de borde adecuadas, se reflejan y ese efecto es registrado en una pantalla.



2.12 Diagrama de pérdidas medida con OTDR

Fuente: <http://www.yio.com.ar/fibras-opticas/atenuacion-fibras-opticas-potencia-otdr.php> descargada marzo 2012

9. OTRAS PÉRDIDAS DEBIDAS A PARÁMETROS INTRÍNSECOS

(Empalmes de fibras ópticas. Cap 6) Aunque dos segmentos de fibra hayan sido fabricados por el mismo fabricante, existe la posibilidad que cada segmento tenga pérdidas

debidas a factores intrínsecos a la naturaleza de las fibras, como lo son los parámetros geométricos u ópticos de las mismas. En una unión de fibras ópticas, cualquier diferencia existente entre los mismos dará lugar a este tipo de pérdidas.

Hay que hacer una diferenciación entre las uniones de fibras monomodo y las de fibras multimodo. En las primeras, estas pérdidas se engloban en las pérdidas por desajuste del radio de campo modal (*MFR* o ω_0), directamente relacionado con el diámetro del campo modal (*MFD*). En las segundas, se puede hablar de pérdidas por desajuste del diámetro del núcleo, por desajuste del perfil del índice de refracción del núcleo y pérdidas por desajuste de la apertura numérica.

9.1. Pérdidas intrínsecas en las fibras monomodo

Como se dijo en estas fibras, las pérdidas intrínsecas vienen determinadas por el desajuste del radio de campo modal (*MFR*: concepto que tiene que ver con la distribución geométrica de la luz en el modo propagado):

$$\omega_0 = a \left(0,65 + \frac{1,619}{\sqrt{V^3}} + \frac{2,879}{V^6} \right)$$

Donde:

ω_0 = Radio del campo modal en las fibras monomodo (*MFR*)

a = Radio del núcleo de la fibra

V = Frecuencia normalizada de la fibra en cuestión

Este parámetro en las fibras monomodo está alrededor de $10\mu\text{m}$.

Así, las diferencias entre los *MFR* de las fibras implicadas en la unión se traduce en pérdidas en la señal y que están dadas de acuerdo con la ecuación:

$$L_{MFR}(dB) = -10 \log \left[\frac{4}{\left(\frac{\omega_T}{\omega_R} + \frac{\omega_R}{\omega_T} \right)^2} \right]$$

Donde: ω_T es el *MFR* de la fibra transmisora y ω_R el *MFR* de la receptora.

9.2. Pérdidas asociadas con el diámetro del núcleo en las fibras multimodo

Si la fibra transmisora posee un diámetro menor que el de la fibra receptora, no habrá lugar a pérdidas porque toda la luz que emita la primera será recibida enteramente por la segunda.

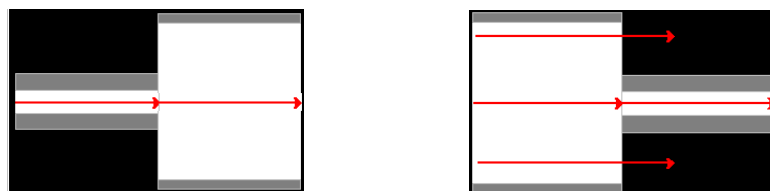


Figura 2.13 Pérdidas por diferencia de diámetros

Fuente: Los autores

Si ocurre lo contrario, las pérdidas debidas a esto serán:

$$L_{diam}(dB) = 10 \log \frac{A_T}{A_R} = 20 \log \frac{R_T}{R_R} = 20 \log \frac{D_T}{D_R}$$

Donde A_T , R_T , D_T son el área, el radio y el diámetro de la fibra transmisora. Tolerancias en la fabricación del orden del 5% generan una pérdida de unos 0,4dB.

9.3. Pérdidas relacionadas con variaciones en el índice de refracción

En las fibras multimodo no aparecerán pérdidas cuando el índice de la fibra receptora sea mayor que el de la transmisora, en caso contrario cumplirá con:

$$L_n(dB) = 10 \log \left[\frac{1 + \frac{2}{\alpha_R}}{1 + \frac{2}{\alpha_T}} \right]$$

Donde $\alpha_T < \alpha_R$; siendo α_T el parámetro del perfil de índice de la fibra emisora.

Para fibras ópticas usadas en telecomunicaciones, existirían pérdidas apreciables siempre y cuando la diferencia entre índices de los núcleos de las fibras que se acoplan sea grande.

9.4. Pérdidas debidas a la apertura numérica en las fibras multimodo

Únicamente aparecerán pérdidas si la apertura numérica de la fibra receptora es menor que el de la transmisora. Y en este caso las pérdidas serán:

$$L_{NA}(dB) = 20 \log \frac{NA_T}{NA_R}$$

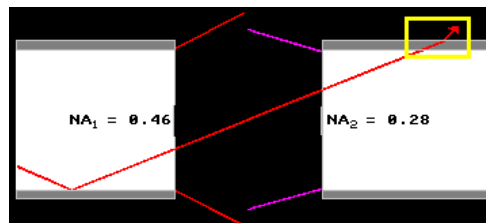


Figura 2.14 Pérdidas por diferencia de apertura numérica
Fuente: Los autores

10. PÉRDIDAS DEBIDAS A PARÁMETROS EXTRÍNSECOS

(MARTIN Pereda, 2002) En estos casos las pérdidas se pueden asociar con las imperfecciones debidas al posicionado relativo de una fibra con respecto a la otra. Las más usuales son:

- Desalineamiento axial
- Desalineamiento angular.
- Separación entre extremos o entre caras
- Falta de paralelismo
- Variaciones en el acabado superficial

10.1. Desalineamiento axial en las fibras multimodo

Es el desplazamiento lateral d de una fibra respecto de la otra cuando se pretenden empalmar. Si se supone que el otro tipo de pérdidas no está presente, se puede calcular las pérdidas debidas a este efecto de desalineación mediante la expresión:

$$L_{ax}(dB) = 10 \log(M)$$

Donde M es la relación entre superficies enfrentadas de las fibras y que se da mediante la ecuación:

$$M = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) - \frac{d}{D} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right)^{1/2} \right]$$

Siendo D el diámetro supuesto que deberían tener ambas fibras y como se dijo d la cantidad de desplazamiento de las mismas.

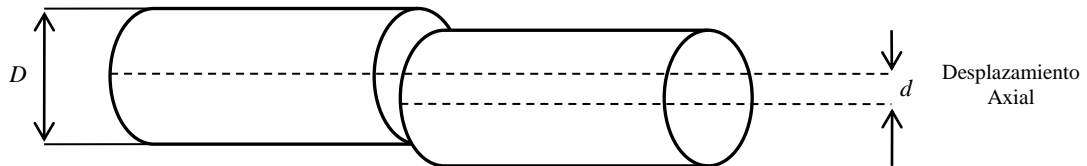


Figura 2.15 Pérdidas por desalineamiento axial
Fuente: Los autores

Si el coeficiente d/D se hace igual a 1, es decir el desplazamiento es exagerado, entonces el valor de M aumenta y con ello la atenuación. En ningún caso se permiten pérdidas por encima de 0,5dB, con lo cual la relación d/D debe ser menor que 0,1.

10.2. Desalineamiento axial en las fibras monomodo

Está dado por la siguiente ecuación:

$$L_{sep}(dB) = -10 \log \left[e^{-\left(\frac{d^2}{\omega_0^2} \right)} \right]$$

Donde d es la desviación lateral entre las fibras y ω_0 el radio de campo modal.

10.3. Desalineamiento angular en las fibras multimodo

Aparece cuando las caras de los extremos de las fibras no se sitúan en una configuración paralela sino formando un ángulo dado ϕ . Debido a esto, parte de la radiación que sale de la fibra emisora incide sobre la receptora con un ángulo que es mayor al ángulo crítico haciendo que finalmente se pierda en el revestimiento (MARTIN Pereda, 2002).

Una característica importante para este tipo de pérdidas es la incidencia que tiene la apertura numérica de las dos fibras. La siguiente expresión da un valor numérico a estas pérdidas:

$$L_{Ang}(dB) = -10 \log \left(1 - \frac{n_{medio} \phi}{180 NA} \right)$$

Donde: n_{medio} es el índice de refracción del medio que separa las fibras y ϕ el ángulo que forma el desalineamiento.

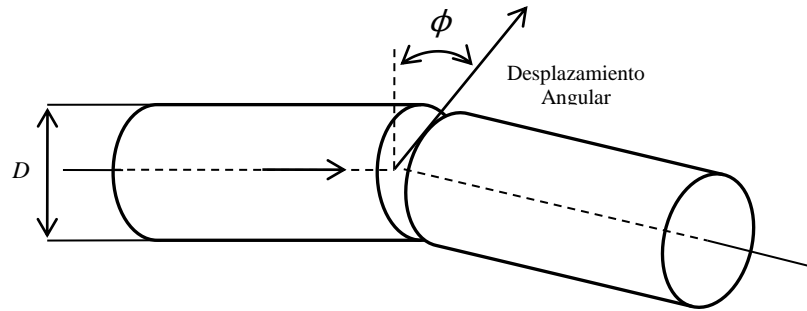


Figura 2.16 Pérdidas por desalineamiento angular
Fuente: Los autores

La ecuación aplica si las NA de las dos fibras a empalmar son iguales. Así mismo, las pérdidas son directamente proporcionales al aumento del valor de NA .

10.4. Desalineamiento angular en las fibras monomodo

$$L_{Ang}(dB) = -10 \log \left[e^{-\left(\frac{\pi n_{medio} \omega_0 \sin \phi}{\lambda} \right)^2} \right]$$

Donde λ es la longitud de onda, ϕ es la desviación angular entre las fibras, n_{medio} el índice del medio entre ellas y MFR el radio de campo modal.

10.5. Pérdidas por separación entre caras en las fibras multimodo

Cuando se hacen los empalmes si las caras de las fibras quedan separadas, parte de la radiación que sale de la fibra emisora no entra en el núcleo de la receptora perdiéndose directamente o penetrando en el recubrimiento. Cuanto mayor sea la NA de las fibras, mayores son las pérdidas (MARTIN Pereda, 2002).

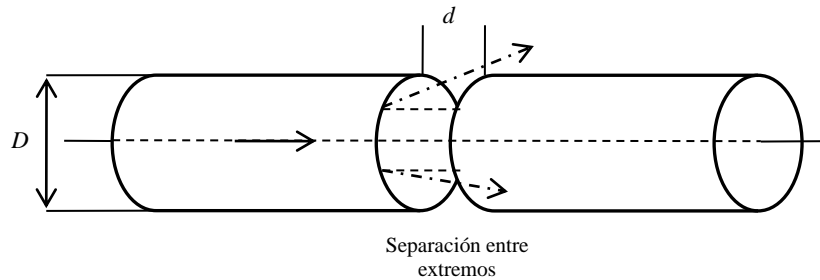


Figura 2.17 Pérdidas por separación entre extremos
Fuente: Los autores

De acuerdo con la figura 2.17, si D es el diámetro de las fibras, d la distancia de separación de las caras y β el ángulo de aceptación, y suponiendo que la distribución de la luz es uniforme en la salida de la fibra emisora, las pérdidas estarán dadas por:

$$L_{sep}(dB) = 20 \log \left[1 + 2 \frac{d}{D} \tan \beta \right]$$

10.6. Pérdidas por separación entre caras en las fibras monomodo

Dada mediante la siguiente ecuación:

$$L_{Ax}(dB) = -10 \log \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda d}{2\pi n_{medio} \omega_0^2} \right)^2} \right]$$

Donde λ es la longitud de onda, d la separación entre las fibras, n_{medio} el índice del medio entre ellas y ω_0 el radio de campo modal.

11. PÉRDIDAS DE FRESNEL

Este tipo de pérdidas se dan cuando la radiación óptica pasa de un medio a otro con diferentes índices de refracción lo que conlleva a que una pequeña porción de luz se refleje hacia la fibra transmisora (cuando las fibras no se unen físicamente y existe un espacio de aire entre ellas).

Si el coeficiente de reflectividad (es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie) está dado por:

$$r = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

Entonces las pérdidas por Fresnel tiene un valor de acuerdo con:

$$L_F (dB) = -10 \log(1 - r)$$

O también:

$$L_F (dB) = -10 \log \left[\frac{4}{2 + \frac{n_0}{n_1} + \frac{n_1}{n_0}} \right]$$

Siendo n_0 el índice de refracción del aire y n_1 el índice de refracción del núcleo de la fibra receptora. Para el caso de un núcleo de la fibra con índice de 1,5 y el del aire de 1, las pérdidas serían de 0,177dB, lo cual equivale a la pérdida dada por un conector. Regularmente se disminuye un poco dicha pérdida si se realiza un acabado superficial en ángulo sobre la cara de la fibra receptora.

12. ACOPLAMIENTOS BÁSICOS

Son dos: acoplamiento por empalme y acoplamiento por conector.

12.1. Acoplamiento por empalme

Es una técnica que se utiliza para unir permanentemente dos fibras ópticas en una conexión de bajas pérdidas. Esta conexión se puede realizar usando uno de estos dos métodos: empalmes por fusión o empalme mecánico.

- Un *empalme por fusión* proporciona la conexión de pérdidas más bajas. Para realizar este tipo de empalme se utiliza un dispositivo denominado empalmadora de fusión. La empalmadora de fusión alinea con precisión las dos fibras, generando un pequeño arco eléctrico para soldar las dos fibras.

- Un *empalme mecánico* es un conector de fibra pequeño que alinea dos fibras desnudas de manera precisa y que las asegura mecánicamente. Para fijar permanentemente la unión se utilizan cubiertas de epoxi o resina sintética directamente sobre las fibras desnudas.

Normalmente luego de realizar un empalme, éste debe ser protegido, por lo que se coloca en una bandeja de empalmes la cual se cierra a presión, que luego es instalada en una caja cerrada con el fin de proteger las fibras contra daños causados por roedores o por condiciones ambientales extremas.

12.2. Acoplamiento por conector

No es más que un empalme, pero en vez de ser fibra a fibra, es de fibra a conector. Para acoplar un conector a una fibra se debe tener en cuenta el tipo de conector que se va a usar y el lugar en que se encuentra, de tal manera que si se instala un panel de conexiones deberán usarse también cordones de conexión o latiguillos (patch cord).

12.3. Pérdidas en el acoplamiento fuente a fibra

Dado que el ángulo del patrón de radiación o haz de luz de la fuente generalmente es mayor que el ángulo de aceptación de la fibra el cual está relacionado con la apertura numérica (NA) y con el radio del núcleo de la fibra, se dan pérdidas en este acoplamiento y depende del tipo de fibra que se use. Las siguientes dos ecuaciones se usan para calcular las pérdidas en dos tipos de fibras:

- Pérdidas de acople entre la fuente y la fibra de índice escalonado:

$$L_{coupl}(dB) = 10 \log \left[NA^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \right] \quad (r_s > a)$$

Donde a es el radio de la fibra y r_s el radio de la fuente óptica.

- Pérdidas de acople entre la fuente y la fibra de índice gradual:

$$L_{coupl}(dB) = 10 \log \left[NA^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \right] \quad (r_s > a)$$

Donde a es el radio de la fibra, r_s el radio de la fuente óptica y α es el factor de gradualidad de la fibra. Cabe anotar que el diámetro de una fuente LED está entre 20 a 65µm y el de un LASER está entre 5 y 20µm.

El cálculo de las pérdidas se presenta como un valor negativo en dB, que bien puede tomarse como una atenuación positiva para efectos de sumar pérdidas.

13. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. El revestimiento de una fibra óptica es de cuarzo fundido ($n = 1,43$) y presenta una NA de 0,368. Calcule el ángulo de aceptación, el ángulo crítico y el índice de refracción del material del núcleo.

2. Una fuente óptica de $250\mu\text{W}$ se conecta a una fibra monomodo de índice escalonado 8,5/125 cuya mejor respuesta está en la ventana de 1310 nm (0,34dB/km). Calcular la potencia óptica en dBm que se mediría a 95 Km. ¿En qué porcentaje se reduce la potencia de luz?
3. ¿De acuerdo con el criterio de Rayleigh, podría reflejar en forma especular una superficie semiáspere, si se hace incidir con un ángulo de 55° , un rayo de luz cuya longitud de onda es de 805 nm? Tema para consulta.
4. Un fabricante quiere hacer una fibra multimodo de índice escalonado con una frecuencia normalizada máxima igual a 60, que tenga una apertura numérica de 0,35. Si en el revestimiento desea usar un índice de refracción igual a 1,44, ¿Cuánto debe valer el radio y el índice de refracción del núcleo a una frecuencia de transmisión de 350 THz?
5. El radio del núcleo de una fibra de índice escalonado es de $50\mu\text{m}$ y los índices de refracción son 1,41 y 1,4. Aproximadamente cuantos modos se propagan para un rayo de luz con una longitud de onda de 1300 nm?
6. El radio de una fibra de índice escalonado es de $8\mu\text{m}$ y tiene índices de refracción en el núcleo de $n_1 = 1,47$ y en el revestimiento de $n_2 = 1,46$. Encuentre la apertura numérica de la fibra, la frecuencia de corte normalizada y la frecuencia de corte de trabajo para los primeros 8 modos que se propagan en ella.
7. En un sistema de transmisión óptica, la potencia tomada a la entrada de un detector es de $145\mu\text{W}$, luego de recorrer 89 Km a través de una fibra 9,5/125, cuyo factor de atenuación es de 0,43 dB/km, en la ventana de 1300 nm. a) Indique la potencia óptica de la fuente. b) El valor del parámetro V y el número de modos que se transmiten. ¿Qué tipo de fibra será?
8. Se ha calculado que un rayo de luz refractado en el revestimiento de una fibra óptica multimodo de índice escalonado es de $68,5^\circ$. Si la fibra presenta una NA de 0,298 y una diferencia de índices del 1,55%, indique lo siguiente: a) ¿Porqué el rayo de luz se refracta? b) ¿Cuál sería entonces el ángulo de incidencia que generó la fuente de luz para que ocurriera esto? c) Si la fibra es 55/125 y trabaja con una radiación de 1300 nm, ¿cuántos modos máximos se podrían propagar por ella?
9. Se sabe que por una fibra 9,5/125 se logran transmitir 2 modos antes de que los demás modos se refracten por el revestimiento. Si dicha fibra tiene una diferencia de índices del 1,3% y un índice del revestimiento igual a 1,469, indique en grados cual es ángulo de incidencia máximo con que deben viajar los modos por el núcleo de la fibra cuando la longitud de onda de la radiación es de $0,91\mu\text{m}$.
10. Una fibra óptica monomodo 8,5/125 fue probada en laboratorio y se encontró que en una distancia de 1500 metros la potencia de la fuente de prueba se disminuyó al 63%. Luego se probó que para evitar dispersión de Brillouin, la fuente óptica debió ajustarse en máximo 720mw, para un $\Delta\nu$ de 2,05Ghz del pulso de luz generado. Indique cual debió ser la longitud de onda del rayo de luz que tuvo que colocarse en la fuente óptica.
11. Un rayo de luz que viaja en zigzag a través de una fibra óptica multimodo 50/125 de índice escalonado con índices de refracción 1,505 y 1,478, lo hace con un ángulo de $19,5^\circ$ respecto de la interfaz de separación de los dos medios que lo confinan, indique en dos formas diferentes si el rayo no se refracta sobre el revestimiento.

12. Se pretenden acoplar dos fibras ópticas multimodo 62,5/125 (Tx) y 50/125 (Rx). Si el factor de atenuación dado por el fabricante para las dos es de 0,56dB/km, indique cual sería la potencia que llegaría a un detector óptico separado de la fuente óptica 187km, si ésta emite 125mw.
13. Se empalman por conector dos fibras ópticas monomodo, si el diámetro del campo modal de las fibras es de $7,5\mu m$, indique cual sería la pérdida en el empalme si por cada conector la atenuación es de 0,18dB.
14. Una fibra óptica de índice escalonado tiene índices de refracción de 1,485 y 1,475 en el núcleo y revestimiento respectivamente. El radio del núcleo es de 8,5 μm . Encuentre la apertura numérica de la fibra, la frecuencia de corte normalizada V_c y la frecuencia de corte real (Hz) para los primeros doce modos que se propagan en ella. Analícelo con las tablas dadas y las gráficas.

CAPITULO 3: EFECTOS EN LA PROPAGACIÓN DEL PULSO DE LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS

Un pulso de luz que se propaga a través de la fibra tendrá unas características que le imprime la fuente que lo generó. Entre las más importante se encuentran:

- a. La duración del pulso que viene determinada normalmente por el intervalo transcurrido entre los puntos de los flancos de subida y de bajada.
- b. La separación entre pulsos.
- c. La longitud de onda, que aunque nominalmente se dé un valor, se corresponderá con el máximo de su anchura espectral.
- d. La anchura que dependerá del tipo de fuente de luz empleada y que tendrá una intensidad que es el promedio de la intensidad máxima.

Además, el uso de los diferentes tipos de fibra implica algunas diferencias en la propagación de la luz en el interior de la misma. Es decir, dependiendo de si la fibra es monomodo o multimodo, aparecerá o no una primera distorsión en la señal que se transmite.

Por ejemplo, si se usa una fibra multimodo, la potencia introducida se repartirá entre los diferentes modos que pueden propagarse por la guía y cada uno de ellos necesitará un tiempo diferente para recorrer cierta distancia de la fibra. Por lo tanto, aunque hayan iniciado su recorrido en un mismo instante temporal, su aparición en el extremo final de la fibra, donde se detectan, será en momentos distintos. Así, el pulso inicial que tenía una duración completa, habrá pasado a tener otra. Es decir, se habrá ensanchado repercutiendo en la máxima velocidad con la que pueda transmitirse un tren de pulsos. Si el ensanchamiento del pulso es alto, podría traslaparse con el siguiente, causando interferencia entre símbolos.

1. DISPERSIÓN INTERMODAL

Por lo anterior, el primer tipo de dispersión de la señal, es la *dispersión intermodal*, derivada de los distintos tiempos que necesitan los diferentes modos que se propagan por la fibra, para recorrer cierta distancia sobre la misma y que están contenidos en un mismo pulso de luz. La *dispersión intermodal* solo se presenta en fibras multimodo, aunque se puede reducir en forma considerable en fibras de índice graduado. Se puede eliminar casi por completo con el uso de fibras monomodo de índice escalonado.

Tomando la luz como un rayo, se puede hacer un análisis sencillo de la diferencia de tiempos entre el rayo que recorre la mayor distancia (zigzag o cercano al ángulo crítico de 90°) y el que recorre menor distancia (paralelo al eje de la fibra). La diferencia de tiempos invertidos por los rayos será:

$$\Delta t = T_{MAX} - T_{MIN} \approx \frac{L\Delta}{c} \times \frac{n_1^2}{n_2}$$

Siendo: L la distancia de la fibra
 Δ la diferencia de índices.

$\frac{c}{n_1}$ es la velocidad mínima en el medio de índice n_1

También la anterior ecuación puede reducirse para un $\Delta \ll 1$, entonces:

$$\Delta t = \frac{L\Delta \cdot n_1}{c} = \frac{L(NA)^2}{2n_1 c}$$

Dado que las características de la fibra se suponen constantes a lo largo de toda su longitud, de la anterior expresión puede obtenerse otra que nos da información sobre el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud:

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{(NA)^2}{2n_1 c} = \frac{n_1 \Delta}{c}$$

Como la velocidad de información (B) se ve afectada por este tipo de dispersión (por interferencia entre símbolos en función de la distancia L), se puede escribir una expresión que indica la máxima velocidad aproximada de bits que puede propagarse por la fibra:

$$B_L \approx \frac{L}{\Delta t} \cong \frac{c}{n_1 \Delta}$$

En la figura 3.1, los tres rayos de luz se propagan a través del mismo material a la misma velocidad, pero el rayo 2 y 3 deben recorrer mayores distancias que el rayo 1, en consecuencia tardan más tiempo en propagarse por la fibra.

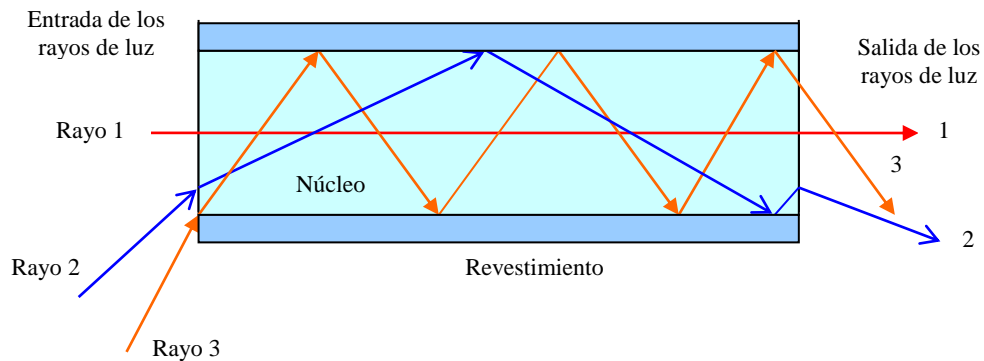


Figura 3.1. Propagación intermodal en una fibra de índice escalonado.

Fuente: Sistemas de comunicaciones electrónicas Wayne. Tomasi. Pag. 446 consultado junio 2011

En una fibra monomodo de índice escalonado, los rayos de luz siguen una sola trayectoria por la pequeña dimensión radial de la fibra. En consecuencia, cada rayo viaja la misma distancia en determinado tiempo y los rayos tienen exactamente la misma relación en el otro extremo que la que tenían al entrar al cable. Aquí no hay dispersión intermodal o ensanchamiento del pulso.

En la figura 3.2, se representa una fibra multimodo de índice graduado. Hay dos rayos que viajan en dos modos distintos. Cada uno va por trayectoria diferente, pero los dos tardan el mismo tiempo en recorrer la longitud de la fibra, porque el índice de refracción disminuye en la medida en que se va alejando del centro del núcleo. Así los rayos que más se aparten del centro de la fibra viajarán a mayor velocidad.

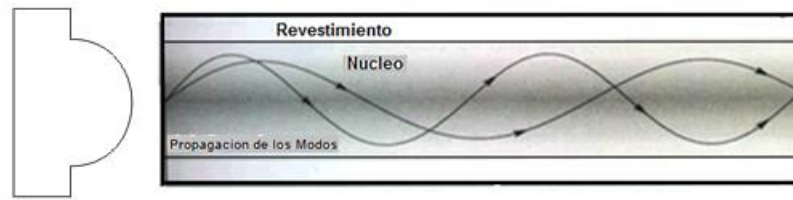


Figura 3.2. Propagación de dos rayos en una fibra multimodo de índice gradual.

Fuente: www.textoscientificos.com. Descargada: Noviembre de 2012.

2. DISPERSIÓN INTRAMODAL

Ahora, si se analiza el efecto que puede crearse sobre los modos que se propagan a través de la fibra, habrá un tipo de dispersión que deriva sus características, de los materiales y de las formas geométricas de la fibra y por ello siempre estarán presentes en las mismas. Este tipo de dispersión es la *dispersión intramodal*.

Como los materiales con que está hecha la fibra presentan índices de refracción que dependen de la longitud de onda de la radiación, entonces un pulso de luz introducido que tiene cierta anchura espectral, dará lugar a distintos valores de n y cada componente espectral se desplazará por la fibra a una velocidad distinta y en consecuencia llegará al extremo de la misma en un tiempo distinto. De nuevo, se producirá un ensanchamiento del pulso inicial. Este tipo de *dispersión intramodal* se conoce con el nombre de *dispersión por material* o *dispersión cromática*.

En la gráfica 3.3, se puede ver la relación que existe entre la longitud de onda y el índice de refracción del material.

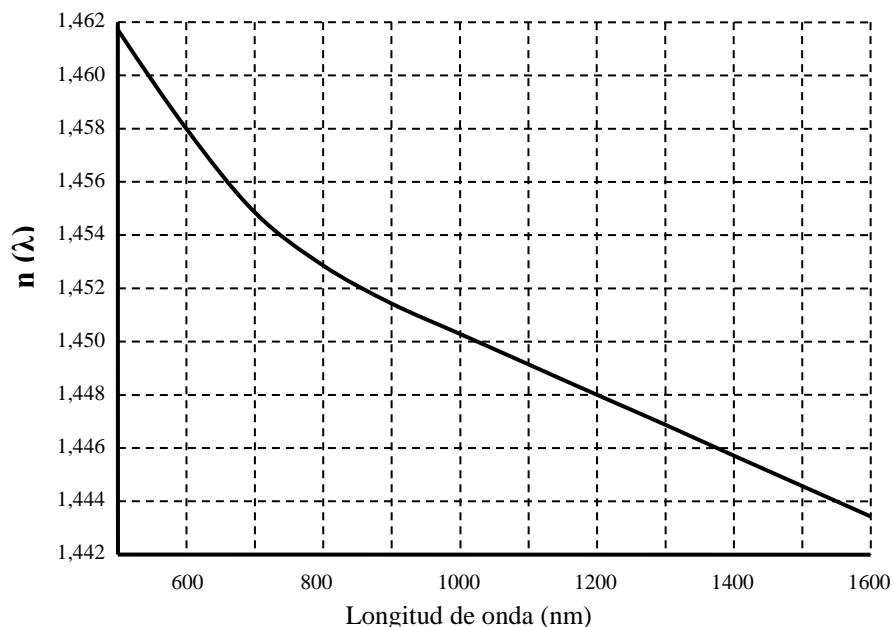


Fig. 3.3. Índice de refracción vs. Longitud de onda para cristal típico.

Fuente: An introduction to fiber optic systems. John Power. Pag47

La siguiente ecuación da el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión cromática o por material:

$$\Delta\tau_{mat} = -\frac{L}{C} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

$\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente óptica

λ es la longitud de onda nominal de la fuente

L es la longitud de la fibra

C es la velocidad de la luz

$\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$: Es la segunda derivada del índice de refracción del núcleo respecto de λ .

El producto de λ^2 y la segunda derivada caracteriza la dispersión por material de la fibra y se toma así en esta ecuación.

El *retardo normalizado* o *dispersión por material normalizado*, se toma de la ecuación (3.1) y es la relación:

$$\frac{\Delta\tau_{mat}}{L \cdot \Delta\lambda} = -\frac{1}{C\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right) \quad (3.2)$$

Cuyas unidades están dadas en *ps/nm.km*

Adicionalmente en la ecuación 3.1, τ es el tiempo de llegada de la luz luego de recorrer una distancia L (km) de la fibra y está dado por:

$$\tau = \frac{L}{v_g}$$

Donde v_g , es la velocidad de grupo de la fibra, o la velocidad de fase de una envolvente que se da por una variación lenta de frecuencia que se superpone a la señal portadora. Esta variación ($\Delta\omega$) es mucho menor que la frecuencia ω de la portadora. La velocidad de grupo está dada por la relación:

$$v_g = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\beta}$$

Donde: $d\beta$ la variación de la constante de propagación longitudinal o constante de fase de la portadora.

En la figura 3.14, se representa el ploteo de $\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$ para los datos de la ecuación 3.1.

Se puede notar en esta gráfica, que la dispersión del material del silicio cambia de signo para longitudes de onda por debajo de 1270 nm y por lo tanto, tiene un valor cero en esa longitud de onda, ofreciendo la posibilidad de una fibra de cero dispersión.

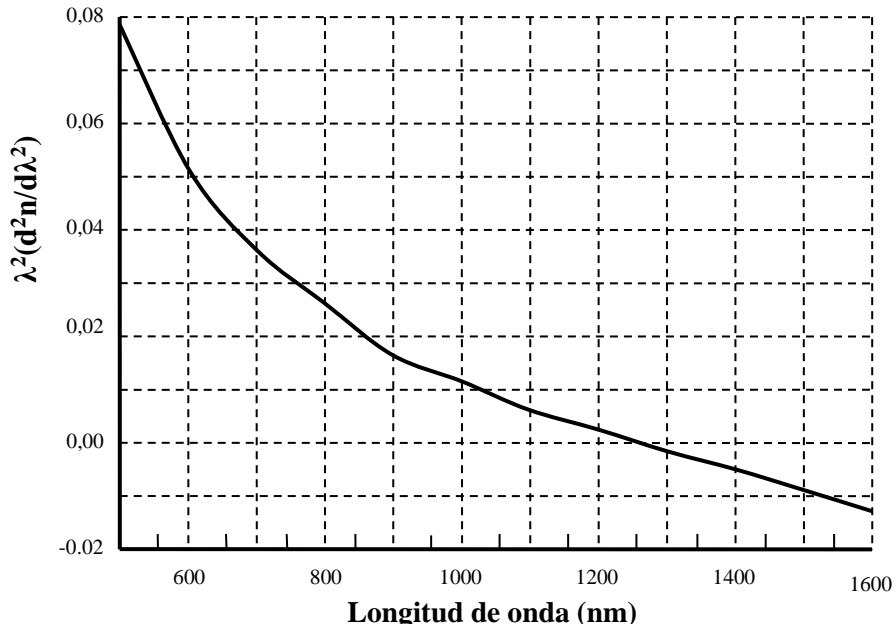


Fig. 3.4. Ploteo de $\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$ vs. Longitud de onda para fibra de vidrio.

Fuente: An introduction to fiber optic systems. John Power. Pag. 47 consultado: julio 2012

Ejemplo (POWER, 2000): Halle la dispersión por material en una fibra 62,5/125 con $n_1 = 1,48$ y $\Delta = 1,5\%$. a) Calcule la dispersión por material en unidades normalizadas de ps/nm.km a 850 nm y b) Hállela 1500 nm.

El retardo normalizado está dado por:

$$\frac{\Delta \tau_{mat}}{L \cdot \Delta \lambda} = -\frac{1}{c\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)$$

a) Viendo la figura 3.14, se puede ver que para $\lambda = 850$ nm hay una $\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$ de aproximadamente 0,022, entonces:

$$\frac{\Delta \tau_{mat}}{L \cdot \Delta \lambda} = -\frac{1}{c\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right) = \frac{0,022}{(3 \times 10^8)(850 \times 10^{-9})}$$

$$\frac{\Delta \tau_{mat}}{L \cdot \Delta \lambda} = -8,63 \times 10^{-5} s \cdot m^{-1} \cdot m^{-1} = -86,3 \times 10^{-12} s / (10^{-9} m \cdot 10^3 m)$$

$$\frac{\Delta \tau_{mat}}{L \cdot \Delta \lambda} = -86,3 ps / nm \cdot km$$

b) Para $\lambda = 1500$, viendo en la figura 9.10, se puede ver una $\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = -0,007$, entonces:

$$\frac{\Delta \tau_{mat}}{L \cdot \Delta \lambda} = -\frac{1}{c\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right) = \frac{0,007}{(3 \times 10^8)(1500 \times 10^{-9})}$$

$$\frac{\Delta\tau_{mat}}{L \cdot \Delta\lambda} = +1,55 \times 10^{-5} s \cdot m^{-1} m^{-1} = + \frac{15,5ps}{nm \cdot km}$$

3. PROPAGACIÓN EN LAS FIBRAS DE ÍNDICE ESCALONADO

3.1. Frecuencia normalizada

Retomando la ecuación 2.25, la frecuencia normalizada o parámetro V , es un parámetro que se relaciona con la *condición de corte de la fibra*. Esta cantidad adimensional ayuda a definir el número de diferentes modos que pueden ser transmitidos simultáneamente en la fibra a una frecuencia determinada. (NERY, 1998)

En una fibra óptica la *condición de corte* de un modo cualquiera se define como el punto en que ese modo ya no puede propagarse dentro del núcleo y la zona cercana de su revestimiento, sino que los campos se refractan más allá del revestimiento y entonces esa energía se radía, como si fuese una antena cilíndrica en lugar de una guía de onda que lleva señales a lo largo de la fibra.

La ecuación 3.23 definida anteriormente define la frecuencia normalizada V :

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) n_1 \sqrt{2\Delta} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) [n_1^2 - n_2^2]^{1/2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) NA$$

Donde: a = Radio del núcleo de la fibra (m)

λ_0 = Longitud de onda de la frecuencia de trabajo.

Δ = Diferencia de índices

3.2. Modos de guía de onda

De acuerdo con lo indicado anteriormente, las guías de onda presentan ciertas *condiciones de límite* a los campos electromagnéticos, que deben ser resueltos en las interfaces entre las regiones de la guía de onda. Como resultado de estas condiciones de límite, solamente algunas combinaciones de las ondas (llamadas los *modos*) cumplirán esas condiciones y por lo tanto son posibles de propagar. El resto de combinaciones que no pueden resolver esas condiciones de límite no serán soportadas y por lo tanto esas ondas no podrán propagarse, a menos que lo hagan con altas pérdidas.

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica de cristal con modos electromagnéticos que poseen características para poderse propagar. Los modos más simples son los TE (campo eléctrico transversal a la dirección de propagación de la onda y con simetría radial) y los TM (campo magnético transversal a la dirección de la propagación). Además existen los modos híbridos (combinaciones de modos TE y TM), tales como los HE_{mn} y EH_{mn} , los cuales tienen campos eléctricos y magnéticos con componentes sobre la dirección de la propagación. Algunos modos son linealmente polarizados y son los llamados modos LP.

El desarrollo de las funciones de primer orden de Bessel $-J_m(h\rho)-$, permiten explicar la nomenclatura de cada uno de los modos simples de propagación en la fibra.

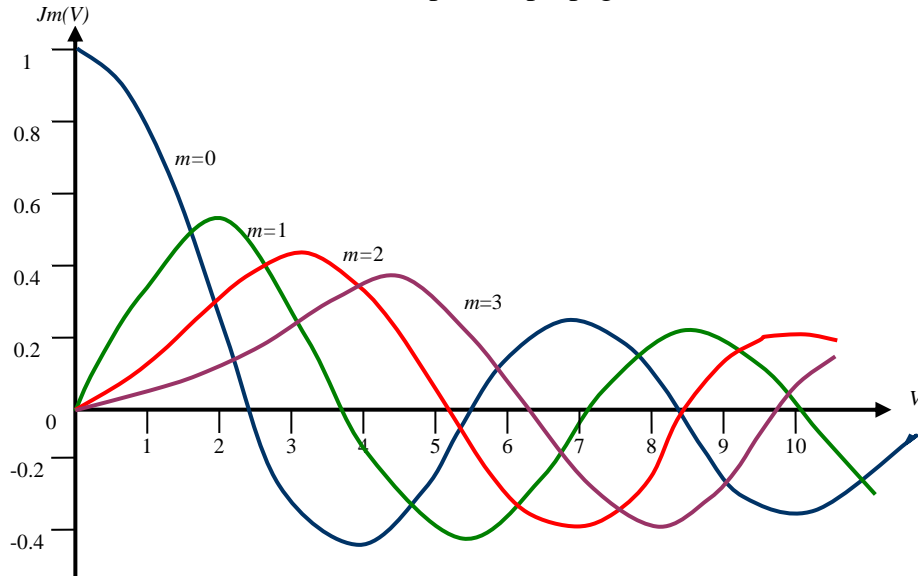


Fig. 3.5. Funciones de Bessel de primer orden

Fuente: Líneas de transmisión. Neri Vela. Página 378. Consultada: mayo 2012

La nomenclatura de los modos indican lo siguiente: El subíndice m es el número de la función de Bessel de primer orden (número de la oscilación o modo) y n corresponde al número de raíces de esa función (valores para los cuales cada $J_m(\rho)$ pasa por cero) de cada una de las funciones J_m de Bessel. Así por ejemplo, viendo la figura 3.5, la función $J_0(h\rho)$ tiene el valor cero cuando $h\rho = 2,405; 5,520; 8,654; \dots$, es decir son los valores de las raíces $n = 1, 2, 3, \dots$ (NERY, 1998)

3.3. Constante de propagación longitudinal

Como en cualquier línea de transmisión o línea guiada, las señales transmitidas, presentan un factor de fase, el cual está relacionado con la velocidad con que un punto de fase constante se desplaza a lo largo de la línea en un tiempo dado (kz), y que para el caso de las fibras ópticas de índice escalonado, se denomina *constante o coeficiente de propagación longitudinal* (β :dado en rad/seg):

$$k_z = k \cos \theta_1 = k_0 n_1 \cos \theta_1$$

En el que para cada modo de propagación toma valores exclusivamente dentro del rango:

$$\beta_0 n_2 < \beta < \beta_0 n_1$$

Donde:

β = Constante de *propagación longitudinal* del modo a una frecuencia de operación dada.

β_0 = Constante de propagación en el espacio libre a la misma frecuencia de operación.

La relación β/β_0 se denomina *constante de propagación normalizada* y se puede graficar en función de la frecuencia normalizada V , en donde los cocientes estarán entre n_1 y n_2 , tal como se muestra en la figura 3.16 para los primeros modos de propagación. Los subíndices de

cada modo mn , están asociados con la condición de corte, tal y como se muestra en la tabla más adelante.

La frecuencia normalizada V contiene información sobre cuántos modos pueden coexistir simultáneamente en la fibra de índice escalonado, a una frecuencia dada. Mirando la figura 3.6, por ejemplo, si $V = 3$, habrá cuatro modos en la fibra (HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} y HE_{21})

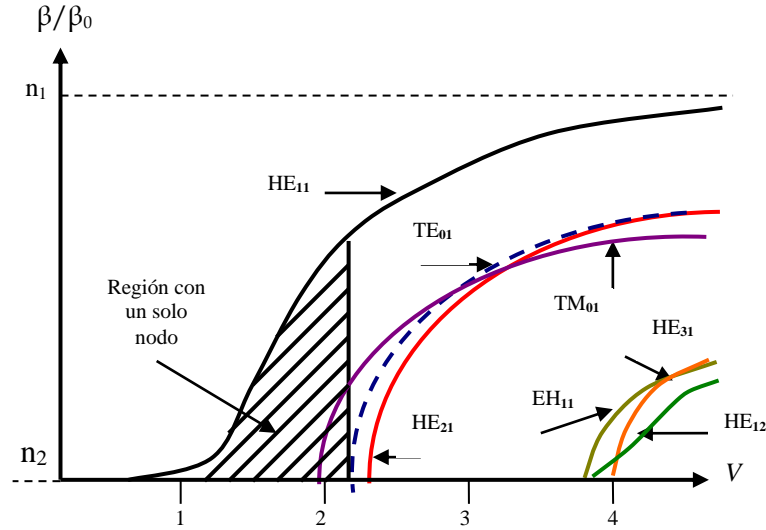


Fig. 3.6. Constante de propagación normalizada en función de la frecuencia normalizada en una fibra de índice escalonado.

Fuente: Líneas de transmisión. Neri Vela. Página 380. Consultado: mayo 2012

Cuando el número de modos es muy grande y el valor de V es mucho mayor que 2.405, se puede estimar rápidamente por medio de la relación aproximada:

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2}$$

Donde:

M = Número de modos de propagación en la fibra

Nótese en la figura 3.6 que el modo HE_{11} no tiene frecuencia de corte, ya que existe desde la frecuencia cero. De manera que este modo es el *modo dominante* y será el único modo de la fibra *siempre y cuando se cumpla que $V < 2,405$* .

De acuerdo con la ecuación de la frecuencia de corte normalizado (V_c) y la frecuencia de corte real de trabajo (f_c) están relacionadas por la expresión:

$$V_c = f_c \left[\left(\frac{2\pi a}{c} \right) NA \right]$$

$$f_c = \frac{c \times V_c}{(2\pi a)(NA)}$$

Donde: a = Radio del núcleo de la fibra (m)

c = Velocidad de la luz (m/s)

V_c = Debe encontrarse para cada modo de propagación

En la tabla 4 se muestra el valor de la frecuencia normalizada de corte (V_c) para los diferentes modos que pueden propagarse en las fibras multimodo. Cada número de modo (m) ya sea simple híbrido, acorde con su número de raíz (n) da el correspondiente valor de V_c :

Tabla 3.1. Modos mixtos que se pueden propagar en una fibra óptica
Fuente: VELA, Nery. Líneas de transmisión. Pag. 400. Consultado mayo 2012

m	modos	Condición	Primeras raíces (V_c)			
			$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	
0	TE _{0n} TM _{0n}	$J_0(V_c) = 0$	2,405	5,520	8,654	
1	HE _{1n}	$J_1(V_c) = 0$	0	3,832	7,016	
1	EH _{1n}	$J_1(V_c) = 0$	3,832	7,016	10,173	
≥ 2	HE _{mn}	$J_m(V_c) = 0$	2,405	5,520	8,654	(m = 2)
			3,832	7,016	10,173	(m = 3)
			5,136	8,417	11,620	(m = 4)
≥ 2	EH _{mn}	$J_m(V_c) = 0$	5,136	8,417	11,620	(m = 2)

Ejemplo 1: Calcule la longitud de onda de corte para una fibra monomodo 9/125, con índice de refracción del núcleo de 1,47 y $\Delta = 0,15\%$.

$$\text{Tomando la ecuación } V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Y despejando la longitud de onda para la frecuencia de corte normalizado (V_c) de una fibra monomodo:

$$\lambda_0 = \left(\frac{2\pi a}{V_c} \right) n_1 \sqrt{2\Delta} = \left(\frac{2\pi 4,5 \times 10^{-6} \text{ m}}{2,405} \right) 1,47 \sqrt{2(0,0015)} = 946,57 \text{ nm}$$

Ejemplo 2: El radio de una fibra de índice escalonado es de 25 μm y tiene índices de refracción en el núcleo de $n_1 = 1,47$ y en el revestimiento de $n_2 = 1,46$. Encuentre la apertura numérica de la fibra, la frecuencia de corte normalizada y la frecuencia de corte de trabajo para los primeros 8 modos que se propagan en ella.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$NA = \sqrt{1,47^2 - 1,46^2} = 0,1712$$

Debe encontrarse para cada modo de propagación la frecuencia normalizada V_c de acuerdo con la tabla anterior, teniendo en cuenta los primeros modos a partir del modo dominante HE₁₁. Por lo tanto los datos serán los siguientes:

Modo	Valor de V_c
HE ₁₁	0
TE ₀₁ , TM ₀₁	2,045
HE ₂₁	2,045
HE ₁₂	3,832
EH ₁₁	3,832
HE ₃₁	3,832
EH ₂₁	5,136

Ahora se sustituyen los valores de V_c para cada modo en la ecuación f_c . Por ejemplo para HE_{11} , $f_c = 0$, porque $V_c = 0$ y para los modos TE_{01} , TM_{01} y HE_{21} es:

$$f_c = \frac{(3 \times 10^8)(2,405)}{2\pi(8 \times 10^{-6})(0,1712)} = 83,84 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

Para los modos HE_{12} , EH_{11} y HE_{31} es:

$$f_c = (83,84 \times 10^{12}) \frac{(3,832)}{(2,405)} = 133,58 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

Para el modo EH_{21} es:

$$f_c = (133,58 \times 10^{12}) \frac{(5,136)}{(3,832)} = 179,04 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

4. PROPAGACIÓN EN FIBRAS MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL

Como ya se dijo, la dispersión modal y el *ensanchamiento de pulso* (los rayos de luz que forman el pulso se distribuyen en modos diferentes que recorren diferentes distancias, haciendo que el pulso en cada modo tenga un ancho diferente y por ende haya una reducción en su amplitud. También al retrasarse en el tiempo el pulso, interfiere con el siguiente pulso y causa la interferencia entre símbolos o intersimbólica), elevan la tasa de error en la transmisión digital y se puede reducir si se utiliza un núcleo con índice de refracción gradual. (NERY, 1998)

Si se considera que sobre el radio a de una fibra multimodo de índice gradual, puede medirse en cualquier lugar ρ , su *índice de refracción*, teniendo en cuenta que este varía desde un mayor valor en su centro y va disminuyendo gradualmente (con distribución lineal o exponencial) hacia la interfaz núcleo-revestimiento, entonces ese valor n_1 con relación al radio medido desde el centro de la fibra, puede estar representado matemáticamente por una función $n_1(\rho)$, cuya ecuación es:

$$n_1(\rho) = n_1 \sqrt{\left[1 - 2\Delta \left(\frac{\rho}{a}\right)^\alpha\right]}$$

Para $0 \leq \rho \leq a$

Donde: n_1 = Es el valor de n en el centro del núcleo

Δ = Está dado por la ecuación (8.7)

a = Radio del núcleo

α = Un exponente arbitrario. Cuando $\alpha = 2$, se obtiene una relación parabólica.

El índice n_2 del revestimiento se mantiene constante. Así mismo la NA pasa a ser función de ρ y su determinación es más compleja que para una fibra de índice escalonado. El ángulo de aceptación se reduce y esto dificulta el acoplamiento con la fuente de luz.

El núcleo no homogéneo de este tipo de fibra, produce un efecto acumulativo de refracción similar al que ocurre con las ondas electromagnéticas a ciertas frecuencias en los

enlaces ionosféricos. La disminución gradual del índice de refracción en la atmósfera, desde el suelo hacia arriba, produce muchas refracciones sucesivas, conforme las ondas inciden en las interfaces donde el índice cambia, dando origen a una trayectoria curva.

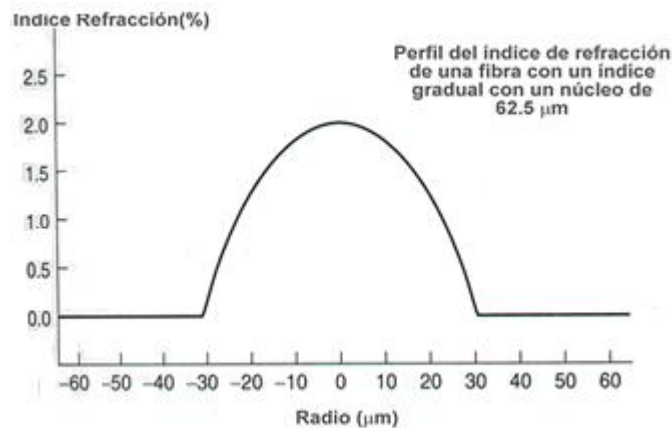


Figura 3.7. Perfil de índice de una fibra multimodo de índice gradual

Fuente: <http://lafibraoptica peru.com/tipos-de-fibra-optica-las-fibras-multimodos/> Descargada: junio 2012

El ángulo de incidencia va aumentando, hasta que se obtiene una condición de reflexión interna y la señal vuelve a bajar dirigiéndose hacia los receptores. En las fibras ocurre lo mismo (como se ve en la figura 3.7). Sin embargo, la distancia radial ρ en donde se obtiene la reflexión interna total (la distancia sobre la interface donde finalmente el rayo vuelve a bajar), es diferente para cada modo de propagación en la fibra, puesto que el ángulo de incidencia para cada modo también es diferente, en consecuencia las trayectorias de los modos son curvas distintas.

Al reducirse la dispersión modal, también se reduce la interferencia entre símbolos y con ello se mejora el ancho de banda (para bajar un poco esta interferencia en la fibras de índice escalonado, se aumenta el ancho del pulso, disminuyendo así la capacidad de información en la fibra).

El valor de la frecuencia normalizada para las fibras de índice gradual, cuando la diferencia entre índices (Δ) es pequeño, está dado por:

$$V = \frac{2\pi a \times n_1 \sqrt{2\Delta}}{\lambda_0} = \frac{\pi D}{\lambda_0} NA$$

Y el número de modos de propagación se puede dar de acuerdo con:

$$M = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \left(\frac{V^2}{2} \right)$$

Pero como regularmente $\alpha = 2$ (para una distribución parabólica), entonces:

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{V^2}{2} \right)$$

Que es la mitad del número de modos que habría en una fibra de índice escalonado.

Las fibras de índice gradual fueron diseñadas especialmente para telecomunicaciones. Por largo tiempo los diámetros estándares han sido de 50 y 62.5 μm con un revestimiento de 125 μm , algunas son fabricadas con un núcleo de 82.5 μm .

Estos tipos de fibras han permanecido en uso, principalmente en las redes de datos para transporte de información a distancias moderadas, típicamente menores a 2 kilómetros.

Ejemplo: Una fibra de índice gradual con distribución parabólica, presenta una velocidad de la luz en el material del revestimiento igual al 68,493% y en el núcleo de 67,567%. Si la fibra es 62,5/125 y la longitud de onda de operación es de 850nm, ¿Cuál es el valor de la frecuencia normalizada; ¿qué valor tiene el índice de refracción del núcleo a 2/3 del valor del radio? y ¿aproximadamente cuántos modos se propagan?

5. EFECTOS DE LA LONGITUD DE LA FIBRA SOBRE EL ANCHO DE BANDA

Se ha dicho que la principal limitante para transmitir datos a alta velocidad es la distorsión de los pulsos debido al fenómeno de la dispersión modal, puesto que la atenuación por absorción se ha reducido a niveles por debajo de 0,5dB/km con las nuevas técnicas de fabricación de las fibras.

Adicionalmente, no es suficiente aumentar la potencia de la fuente óptica para lograr mayor alcance de la señal, debido a que a mayor distancia los pulsos de luz se ensancharán más, incrementando la interferencia *intersímbolo*, entonces para reducir la probabilidad de error, será necesario ampliar la distancia entre pulsos, lo que equivale a reducir la tasa de transmisión y esta no es la mejor solución. Es decir, que la distancia tiene un efecto negativo sobre la velocidad de transmisión de los datos, y con ello sobre el ancho de banda disponible.

Las fibras de índice escalonado logran captar más potencia de luz de la fuente, por el ángulo de apertura grande y diámetro más ancho. Sin embargo, esto hace que también se incremente el número de modos y con ellos la reducción del producto *ancho de banda x distancia* usado para medir la capacidad de información de la fibra.

La dispersión cromática y la dispersión modal, son los primeros causantes de que la capacidad de las fibras multimodo de índice escalonado tengan un límite de alrededor de 50 MHz por kilómetro (significa que en un enlace de 2 Km., solo tendría un ancho de banda de 25 MHz)

Si ahora se emplea una de índice gradual, en la que el número de modos se reduce a la mitad, la capacidad de información se incrementa hasta en 50 veces respecto de la de índice escalonado, por lo tanto, es común obtener 1 GHz por km o más.

En las fibras monomodo aunque el diámetro del núcleo es muy pequeño comparado con las otras, ofrece el mayor producto ancho de banda por distancia, con 100 GHz por km para una longitud de onda de 1310 nm.

Diámetro (μm) Núcleo/Revestimiento	λ= 850 nm		λ= 1300 nm	
	α (dB/Km)	Mhz . Km	α (dB/Km)	Mhz . Km
50/125	3,0	600	1,0	800
62,5/125	3,0	200	1,0	600
100/140	4,0	160	2,0	500

Tabla 5: Características típicas de operación de las fibras multimodo

Fuente: <http://alexys1996.blogspot.com/2012/10/estandares-tia-eia-mediados-de-la.html>

Este parámetro debe ser tenido en cuenta para la transmisión de información, toda vez que aunque se usen técnicas de modulación digital en la fuente óptica, estas no darán una eficiencia espectral suficiente para obtener grandes velocidades de línea.

6. PROPAGACIÓN DEL PULSO DE LUZ EN FIBRAS MONOMODO

Las fibras monomodo se caracterizan por tener un núcleo de diámetro muy pequeño, baja NA, baja atenuación y gran ancho de banda. El requerimiento básico para que una fibra monomodo funcione es que el núcleo sea lo suficientemente pequeño para restringir la comunicación a un solo modo, así este modo de orden menor puede propagarse en toda la fibra.

Como la transmisión en modo único evita la dispersión modal, el ruido modal, y otros efectos típicos de una transmisión multimodo, esta fibra puede transmitir señales a mayor velocidad y es la que se ha adoptado como estándar en las telecomunicaciones.

6.1. Longitud de Onda de Corte

El diámetro máximo del núcleo de una fibra monomodo depende de la longitud de onda del rayo de luz transmitido, si se resuelve la ecuación para la longitud de onda, encontraremos que para un diámetro específico del núcleo, en una fibra monomodo, la luz se transmitirá en un solo modo solamente para *longitudes de onda mayores* que un valor denominado *longitud de onda de corte*, que está dado por:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\pi D}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde: D = diámetro del núcleo

Así como el diámetro del núcleo de la fibra es una consideración importante en el diseño de la fibra, la longitud de onda de corte es importante para las aplicaciones de la fibra. Si deseamos que *un solo modo sea transmitido* en un sistema de comunicación, debemos estar

seguros que *la longitud de la onda del rayo de luz, sea mayor que la longitud de onda de corte*. Si la longitud de onda decrece, empezarán a transmitir 2 modos y así sucesivamente.

En la práctica las fibras son diseñadas con una longitud de onda de corte significativamente menor que la longitud de onda en la cual la fibra va a funcionar. Por ejemplo, una fibra de modo simple para ser usada en 1300 nm probablemente tendrá una longitud de onda de corte inferior a los 1250 nm.

Las fibras monomodo siempre permanecerán siendo monomodo *para longitudes de onda de operación mayores a la longitud de onda de corte*. Así una fibra cuya especificación es para trabajar a 1300 nm también será monomodo para 1500 nm. Sin embargo una fibra de 1550 nm no será del tipo monomodo para 1300 nm y ni las de 1300 nm y 1550 nm serán del tipo monomodo para una longitud de onda de 850 nm.

6.2. Dispersión de guía de onda

En las fibras monomodo la dispersión cromática es el fenómeno que más incide en las pérdidas. La dispersión cromática o dispersión intramodal, está formada por la suma de dos componentes: la *dispersión inherente al material* y la *dispersión originada por la estructura de la guía de onda*. Estas componentes pueden tener signos diferentes dependiendo del incremento o disminución de la velocidad de la luz con la longitud de onda.

La *dispersión de guía de onda* se origina porque la propagación de la luz en una guía de onda depende de la longitud de onda así como de las dimensiones de la guía. *La distribución de la luz* entre el núcleo y el revestimiento cambia con la longitud de onda.

El cambio de la distribución de la luz afecta la velocidad de transmisión de la luz a través de la fibra. El núcleo y el revestimiento tienen diferentes índices de refracción que determina la velocidad de la luz en ellos. Ya que la luz permanece un tiempo, tanto en el núcleo como en el revestimiento, su velocidad efectiva a través de toda la fibra es un promedio que depende de la distribución de la luz entre ambos. Un cambio en la longitud de onda cambiará la distribución de la luz, y asimismo la velocidad promedio, causando una dispersión de guía de onda.

Al igual que en dispersión por material, aquí también se puede determinar el retardo causado por la dispersión de guía de onda, como una diferencia en el tiempo de propagación $\Delta\tau_{og}$, el cual está dado en unidades normalizadas como:

$$\frac{\Delta\tau_{og}}{L\Delta\lambda} = -\left(\frac{n_2\Delta}{C}\right)\left(\frac{1}{\lambda}\right)\left(V\frac{d^2(Vb)}{dV^2}\right) \quad (ps \cdot km^{-1} \cdot nm^{-1})$$

Donde: b : es la constante normalizada de propagación ($b = \frac{\beta}{\beta_0} \cong \frac{(\beta/k_0) - n_2}{n_1 - n_2}$)

$\left(V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right)$ Es el producto de la frecuencia normalizada por la segunda derivada de Vb en función de V , el cual también puede ser graficado (figura 3.8), para modo único, cuyos valores de interés se dan para $V=2,0$ a $2,4$.

Ejemplo: Calcule la dispersión de guía de onda en unidades normalizadas para una fibra monomodo 9/125 con $n_1=1,48$ y $\Delta=0,22\%$ operando en 1300 nm.

Primero hay que hallar el parámetro V mediante:

$$V = \frac{2\pi a \times n_1 \sqrt{2\Delta}}{\lambda_0} = 2,14$$

Note que el valor de V cae dentro del rango de 2 a $2,405$ para fibra monomodo.

Luego se lleva este valor de V a la figura 3.19 para hallar el producto de V por la segunda derivada. Este valor es de aproximadamente $0,480$

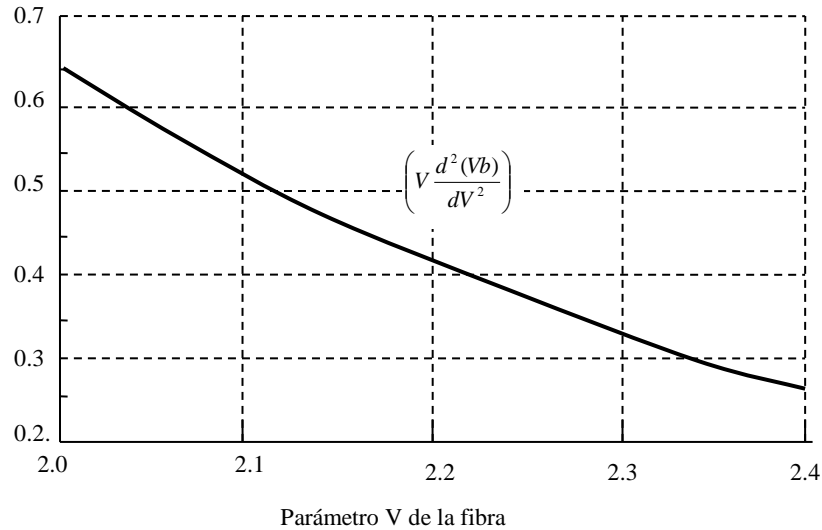


Figura 3.8. Segunda derivada del retardo en función de la frecuencia normalizada
Fuente: POWER, John. An introduction to fiber optic systems. Pag. 51 consultado: mayo 2012

Con esto se obtiene:

$$\frac{\Delta\tau_{og}}{L\Delta\lambda} = -\left(\frac{n_2\Delta}{C}\right)\left(\frac{1}{\lambda}\right)\left(V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}\right) = -4,0 \quad ps \cdot km^{-1} \cdot nm^{-1}$$

6.3. Tipos de fibras monomodo

Si bien desde mediados de los 60 cuando Charles Kao dio a conocer las ventajas de las fibras monomodo, los investigadores se percataron de ciertos inconvenientes para su aplicación. Se dieron cuenta de que las propiedades de la fibra monomodo del tipo índice escalonado no eran ideales: Su dispersión es mínima a 1310 nm, pero su atenuación tiene un mínimo en 1550 nm.

Esto y otras limitaciones han permitido a los investigadores desarrollar otros tipos de fibra monomodo con diferentes estructuras para alterar la dispersión. A continuación se muestran algunas.

- a. **Según el índice del revestimiento:** La figura 3.9 nos muestra una vista de los dos tipos principales de fibras monomodo del tipo índice escalonado fabricados con sílice: La figura 3.9.a, muestra el diseño de una fibra con un *revestimiento único* en donde el revestimiento es de sílice puro y el de núcleo es de óxido de germanio para incrementar su índice.

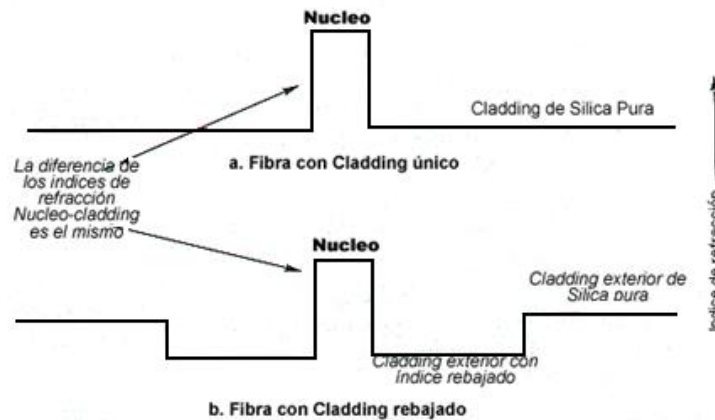


Figura 3.9. Fibras monomodo según el índice del revestimiento.

Fuente: lafibraoptica peru.com/la-fibras-de-modo-unico-o-monomodos/. Descargada en junio de 2011

La figura 3.9.b, muestra la fibra de *revestimiento rebajado*, logrado mediante el recorte del revestimiento. En este caso, el núcleo es fusionado con sílice dopado con menos óxido de germanio que el primer caso. La parte interna del revestimiento que rodea al núcleo es dopado con flúor, lo que reduce su índice de refracción por debajo del de sílice puro.

Ambos diseños son típicos de fibras con un núcleo de $9,3\mu\text{m}$ usadas en transmisiones de 1310 nm , y con núcleo de $10,5\mu\text{m}$ para una longitud de onda de 1550nm .

- b. **Fibra monomodo estándar (Standard Single Mode Fiber, SSMF) ITU-T G.652:** En una fibra monomodo de índice escalonado, las dos componentes de dispersión cromática (por material y por guía de onda), se cancelan en un punto a 1310 nm , donde la atenuación se incrementa ligeramente (comparada con la atenuación de $0,2\text{dB/km}$ y dispersión cercana a los 16 ps/nm-Km que tiene en la ventana de 1550nm), pero se trabajan en la ventana de 1550nm . Ver figura 3.10.

El diferencial de los índices refractivos (Δ) está generalmente por debajo del 1% y el diámetro del núcleo es alrededor de cinco o seis veces la longitud de onda. Está normalizada en la recomendación ITU G.652. Algunos ejemplos de este tipo de fibra serían: SMF-28 (Corning) y AllWave (Lucent). En el segundo caso, además, la fibra se caracteriza por eliminar el pico de absorción de OH, por lo que dispone de una mayor anchura espectral para la transmisión en sistemas multicanal CWDM.

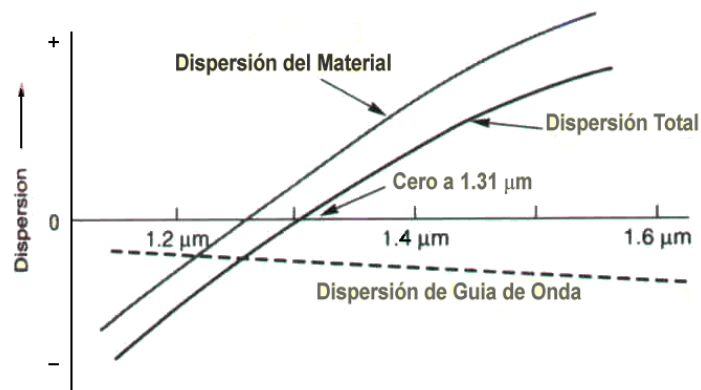


Figura 3.10. Distribución de la dispersión de guía de onda y de la dispersión por material, con valor cero en 1310nm en una fibra monomodo de índice escalonado.

Fuente: <http://fortiz.8k.com/ConceptosBasicos/Tema07-DispersionDesplazada.htm> Descargada: junio 2011

- c. **Fibra óptica monomodo de dispersión desplazada:** Ambas dispersiones cromáticas (por material y por guía de onda), dependen del rango de longitud de onda de la señal y puede tener diferentes símbolos, dependiendo de si la velocidad de la luz en la fibra se incrementa o disminuye con la longitud de onda. Pero la *dispersión por material* es una característica inherente del material, que no puede ser fácilmente cambiada sin alterar la composición del vidrio y aumentar la atenuación.

Como en una fibra estándar las dos dispersiones se cancelan a 1310nm, tal como se muestra en la figura 3.10, entonces, se puede cambiar el diseño de la interface núcleo-revestimiento y alterar así la dispersión de guía de onda, para lograr cancelar la dispersión cromática en otra longitud de onda donde haya menor atenuación. De esta manera se obtiene la *fibra por dispersión desplazada*.

- **Fibra de Dispersión desplazada nula (ZDSF) ITU-T G.653:** La primera fibra con dispersión desplazada fue diseñada para una dispersión cero a una longitud de onda de 1550 nm. Esto se hizo incrementando la magnitud de la dispersión de guía de onda, como se muestra en la figura 3.11.

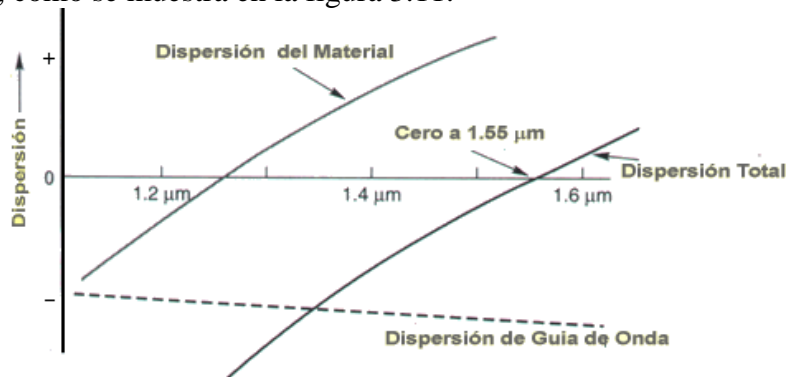


Fig. 3.11. Fibra de dispersión desplazada nula

Fuente: <http://fortiz.8k.com/ConceptosBasicos/Tema07-DispersionDesplazada.htm> Descargada: junio 2011

Esta fibra fue introducida en el mercado a mediados de los 80 y permanece en uso, sin embargo nunca ha llegado a ser tan común como la fibra monomodo estándar.

La figura 3.12, muestra el corte transversal de una fibra de dispersión desplazada cero, en el que el núcleo de sílice puro, tiene un pico del índice de refracción en el centro y cae gradualmente al mismo valor que el del revestimiento exterior.

Un pequeño revestimiento interior de sílice puro rodea al núcleo interno, y este a su vez es rodeado por un núcleo exterior. El índice de refracción del núcleo exterior se incrementa con la distancia del núcleo hasta que alcanza un pico a la mitad de camino entre el índice de sílice puro y el pico interior. Luego cae suavemente hasta alcanzar el nivel del revestimiento exterior de sílice puro.

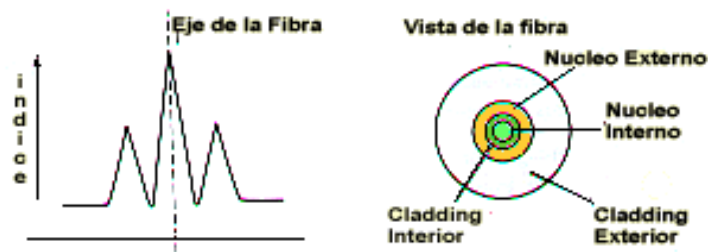


Figura 3.12. Corte transversal para el perfil de índice de una fibra desplazada nula.

Fuente: <http://lafibraoptica Peru.com/fibra-monomodo-de-dispersion-desplazada/> Descargada: junio 2011

Este diseño incrementa la dispersión de guía de onda. Así mismo, también afecta el diámetro del núcleo, reduciéndolo a aproximadamente $8,1\mu\text{m}$ en los 1550nm , comparado con los $10,5\mu\text{m}$ típicos para las fibras monomodo escalonadas operando en 1550nm .

Este diseño trabaja muy bien para los sistemas de transmisión de señales en la región de la longitud de onda de dispersión cero. Sus pérdidas son ligeramente superiores ($0,25\text{ dB/km}$ a 1550 nm), pero su principal inconveniente proviene de los efectos no lineales, ya que su área efectiva es bastante más pequeña que en el caso de la fibra monomodo estándar. Luego este tipo de fibras no son en principio adecuadas para sistemas DWDM, ya que el fenómeno no lineal de mezclado de cuatro ondas (FWM: Four Wave Mixin) en el que las señales con diferentes longitudes de onda se mezclan, generando ruido y degradaciones significativas que disminuyen el desempeño de los sistemas. Este tipo de fibras esta descrita en la recomendación ITU G.653.

- **La fibra de Dispersión desplazada casi nula (NZDSF: Non Zero Dispersión Shifted Fiber) ITU-T G.655:** El diseño de una fibra de dispersión desplazada nula, puede ser modificada para desplazar la dispersión cero a una longitud de onda fuera del rango usado para transmitir la señal y más allá del punto de operación de los amplificadores dopados con erbio (1550 nm).

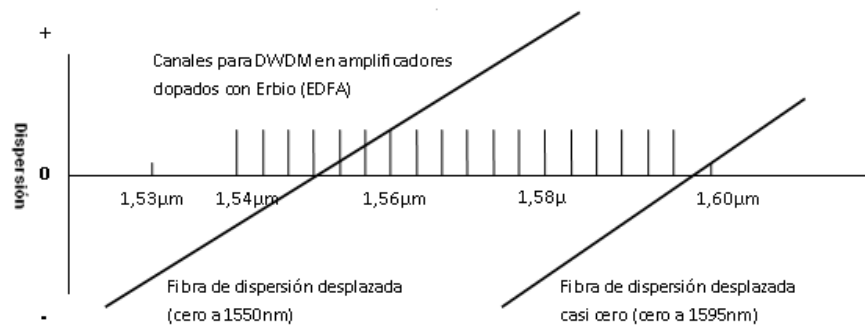


Figura.3.13. Corrimiento de la dispersión a un punto más allá de 1550nm

Fuente: <http://lafibraoptica peru.com/fibra-monomodo-de-dispersion-desplazada/> Descargada: enero 2012

Esto se hace con el fin de resolver los problemas de no linealidades, es decir, evitar las mezclas de ondas que causan problemas en los sistemas que usan multiplexación de longitudes de onda (WDM). Estas fibras presentan valores de dispersión cromática reducidos pero no nulos. En el mercado se pueden encontrar fibras con valores de dispersión tanto positivos (NZDSF+) como negativos (NZDSF-). En la recomendación ITU G.655 se puede encontrar información sobre este tipo de fibras. Algunos ejemplos de este tipo de fibras serían; LEAF (Corning), True-Wave (Lucent) y Teralight (Alcatel).

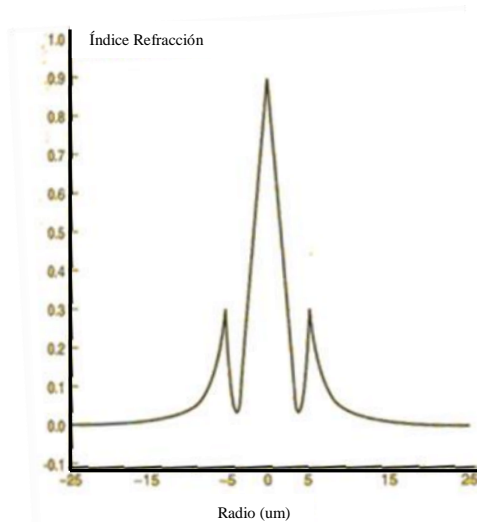


Figura 3.14. Perfil de índice de una fibra NZDSF

Fuente: <http://lafibraoptica peru.com/fibra-monomodo-de-dispersion-desplazada/> descargada junio 2011

La diferencia en el diseño es sutil. El perfil del índice de refracción se muestra en la figura 3.14, que es muy semejante al perfil de las fibras de dispersión cero, pero existe una diferencia marcada en la magnitud de los picos en la curva.

- **Fibra óptica compensadora de dispersión (DCF: Dispersión Compensating Fiber):** Este tipo de fibra se caracteriza por un valor de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de la fibra estándar. Se utiliza en sistemas de compensación de dispersión, colocando en pequeño tramo de fibra óptica Compensadora de Dispersión

para compensar la dispersión cromática acumulada en el enlace óptico. Como aspecto negativo se tiene una mayor atenuación que la fibra estándar (0,5 db/Km aprox.) y una menor área efectiva (entre 0.9 y 2.4 μm^2 dependiendo del tipo de fibra) (htt).

- **Fibra óptica mantenedora de polarización (PMF: Polarization Maintaining Fiber):** Es otro tipo de fibra monomodo que se diseña para permitir la propagación de una única polarización de la señal óptica de entrada. Se utiliza en el caso de dispositivos sensibles a la polarización, como por ejemplo moduladores externos de tipo Mach-Zehnder. Su principio de funcionamiento se basa en introducir deformaciones geométricas en el núcleo de la fibra durante el proceso de fabricación para conseguir un comportamiento birrefringente (tener dos índices de refracción diferentes).
- **Fibra óptica de plástico (Plastic Optical Fiber, POF):** Las fibras ópticas de plástico constituyen una solución de bajo coste para realizar conexiones ópticas en distancias cortas, como por ejemplo en el interior de dispositivos, automóviles, redes en el hogar, etc. Se caracterizan por unas pérdidas de 0,15-0,2 dB/m a 650 nm (se suele emplear como transmisor un LED rojo) y por un ancho de banda reducido como consecuencia de su gran apertura numérica (diámetros del núcleo del orden de 1 mm), pero por otra parte ofrecen como ventajas un manejo e instalación sencillos y una mayor robustez. Como ejemplo, las pérdidas que se producen son muy bajas con radios de curvatura de hasta 25 mm, lo que facilita su instalación en paredes y lugares estrechos. Además, avances recientes están propiciando mayores anchos de banda y distancias.
- **Fibra óptica de cristal fotónico:** Recientemente han surgido un nuevo tipo de fibras de sílice caracterizadas por una micro estructura de agujeros de aire que se extiende a lo largo de la misma. Su inusual mecanismo de guiado, basado en el denominado guiado intrabanda, hace que presenten toda una serie de propiedades únicas que las diferencian de las fibras ordinarias. Entre estas propiedades, destaca la posibilidad de construirlas con núcleos de tamaño muy pequeño para acrecentar los efectos no lineales, así como con bandas de propagación monomodo muy extensas. Además, la dispersión cromática de estas fibras puede ajustarse mediante el diseño adecuado de su geometría, o sea de su micro estructura, pudiendo obtenerse valores inalcanzables con la tecnología de fibra óptica convencional.

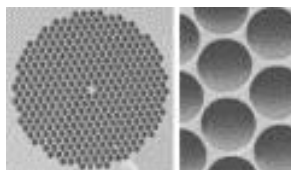


Figura 3.15. Fibra óptica de cristal fotónico

Fuente: <http://proyredes.blogspot.com/2008/07/tipos-de-fibra-ptica.html>. Descargada mayo 2012

7. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Una fibra de índice gradual con distribución parabólica tiene un índice de refracción en el revestimiento igual a 1,46. En el núcleo, el valor máximo de n 1,48. Si el radio del núcleo es de 20 μm y la longitud de onda de operación igual a 850 nm, ¿Cuántos modos se propagan aproximadamente?
2. Una fibra de índice gradual 62,5/125 con distribución parabólica tiene un índice de refracción en el revestimiento igual a 1,46 y Δ de 2,08%. Si la longitud de onda nominal es de 850 nm, ¿Cuántos modos se propagan aproximadamente?
3. La velocidad de propagación de la luz en el revestimiento y en el núcleo respectivamente en una fibra de índice gradual con distribución parabólica, es de 68,505% y 67,572%. Si el radio del núcleo es de 28,5 μm y la longitud de onda de operación es de 910nm, ¿Cuál es el valor de la frecuencia normalizada. La velocidad de propagación de la luz en el revestimiento y en el núcleo respectivamente en una fibra de índice gradual con distribución parabólica, es de 68,505% y 67,572%. Si el radio del núcleo es de 28,5 μm y la longitud de onda de operación es de 910nm, ¿Cuál es el valor de la frecuencia normalizada y aproximadamente cuántos modos se propagan?
4. Verifique si se produce un solo modo de propagación en una fibra 9,5/125, con índice de refracción en el revestimiento de 1,462, $\Delta = 0,18\%$, cuando por ella se intenta transmitir un rayo de luz cuya longitud de onda es de 1550nm. Así mismo indique la longitud de onda de corte que debería tener para que fuera monomodo. Una fibra monomodo con índice de refracción en el núcleo de 1,487 y diferencia de índice del 0,21% que debe trabajar en 1550 nm, se usa para intercomunicar dos sitios separados 56km, en el que desde uno de sus extremos se transmite una señal digital de 11,5Gbps. Analice el valor que tendría el retardo por kilómetro y si al cabo de dicha distancia se presenta interferencia intersímbolo.
5. a) Calcule la dispersión por material y por guía de onda en unidades normalizadas de una fibra monomodo 9,5/125 para tres longitudes de onda: 1 μm , 1,31 μm y 1550nm, si tiene índice del revestimiento 1,488 y $\Delta = 0,0023$. b) ¿Qué valor de frecuencia normalizada presenta para cada λ ?
6. De acuerdo con las normas ITU y en clase, grafique sobre un eje de coordenadas los valores de dispersión normalizada hallados en el ejercicio anterior y explique si la fibra es de dispersión nula o de dispersión desplazada y porqué.
7. Las recomendaciones G.65X de ITU, se refieren a los tipos y características de las fibras ópticas: Indique brevemente en qué consiste cada una describiendo para qué aplica y lo más relevante.
8. Qué características presenta una fibra de dispersión desplazada casi nula (NZDSF). Explique mediante una gráfica.

CAPÍTULO CUATRO: FUENTES Y DETECTORES ÓPTICOS

1. FUENTES DE LUZ

El ojo humano solo puede detectar longitudes de onda de frecuencias luminosas entre 400 nm y 780 nm, es decir frecuencias del color rojo al índigo, siendo en su orden, el amarillo, el naranja, el verde y el rojo, los colores que más percibe el ojo humano.

Una fuente óptica debe tener como mínimo las siguientes características, cuyo fin es optimizar la potencia lumínica que se entrega a la fibra óptica y permitir que la energía se propague a través de ella sin distorsiones en el receptor:

- Mínima anchura espectral ($\Delta\lambda$)
- Máxima coherencia espacial
- Potencia óptica suficiente

a. La anchura espectral: Está relacionada directamente con la dispersión cromática, ya que la potencia entregada por la fuente luminosa no es emitida en una sola longitud de onda, sino que está distribuida en distintas longitudes alrededor de la longitud de onda central. La anchura espectral ($\Delta\lambda$), se define como la diferencia relativa en manómetros (nm) entre los puntos donde la potencia emitida se reduce en el 50% con relación a la máxima. (NERY, 1998)

Los LED y los LD (Diodos laser) que son las fuentes ópticas usadas, tienen anchura espectral diferente, tal y como se muestran en la figura.

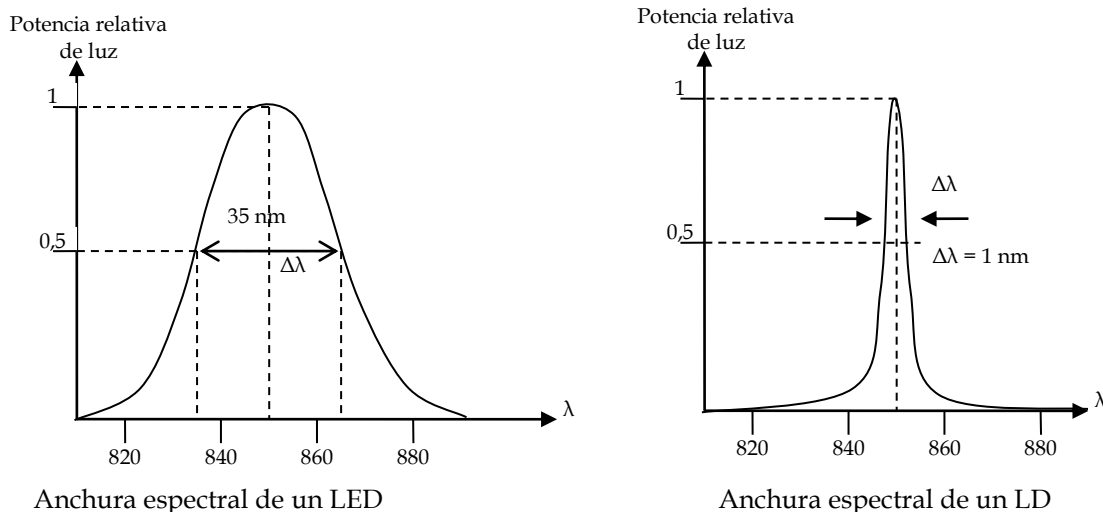


Figura 4.1.

Fuente: Tomado y modificado del libro de Wayne Tomasi por los autores

- b. La alta coherencia espacial de la fuente luminosa:** Está determinada por su patrón de radiación (configuración de la forma de propagación de la onda luminosa en el espacio libre). Mientras más direccional sea el patrón, más fácil será que la potencia emitida quede dentro del cono de aceptación de la fibra, y por tanto habrá una alta eficiencia de acoplamiento entre la fuente luminosa y el núcleo de la fibra.

El patrón de radiación está relacionado con el ángulo sólido del haz que forma el rayo de luz al propagarse (Ω_A) y que está subtendido por los dos ángulos de los patrones planos principales a media potencia (HPBW), denominados para este caso α y β , y que está representado por:

$$\Omega_A = \alpha_{HP} \times \beta_{HP} \text{ (Gr}^2\text{)}$$

También, la directividad está asociada con el ángulo sólido del haz, la cual indica la concentración de potencia de luz dentro del ángulo sólido. Está dada por:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \text{ (Adimensional)}$$

$$4\pi \text{ Sr} = 41253 \text{ gr}^2$$

En la figura 4.2 se comparan las respuestas típicas del patrón de radiación de un LED y un LD que definen la coherencia espacial.

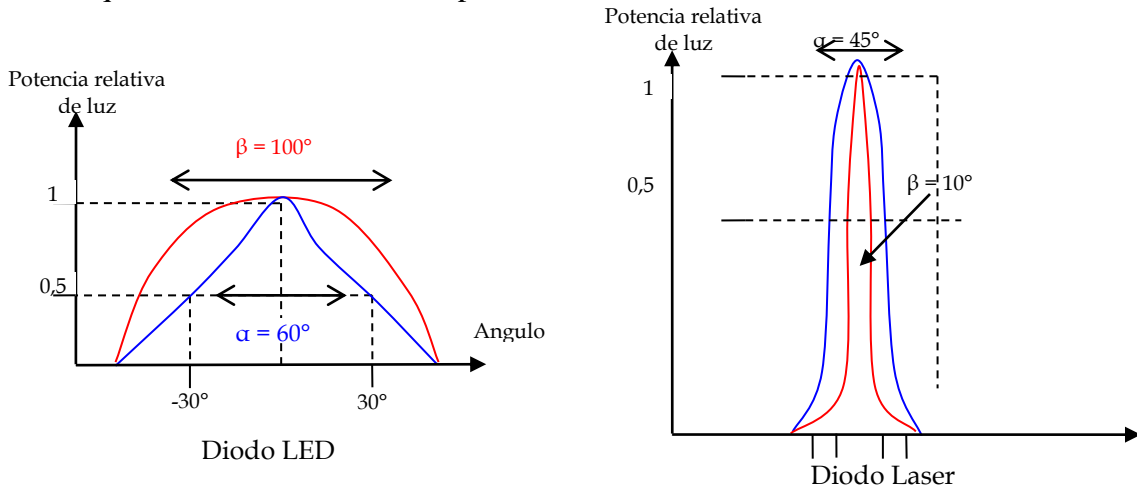


Figura 4.2. Coherencia espacial de las fuentes ópticas
Fuente: Tomado y modificado del libro de Wayne Tomasi por los autores

Dado que la región que emite la superficie de emisión LED es circular simétrica, la distribución de la luz emitida también será simétrica con una divergencia angular del haz de 60° . Aquí, la *divergencia del haz* se define como la dispersión angular del haz emitido, medido en el campo lejano del rayo. La dispersión angular se mide en los puntos donde se disminuye la potencia a la mitad referida a la máxima potencia sobre el eje de radiación. Tanto el ángulo total y el ángulo a media potencia se pueden utilizar para describir la divergencia del haz.

Ejemplo: Un haz óptico se encuentra a -10dBm de su valor en el eje de potencia, con un ángulo medio de 75° .

- a) Si la potencia angular es $P(\theta) = P_0 \cos^n \theta$ donde θ es el ángulo medido desde la posición respecto del eje y P_0 es la potencia en el eje, encontrar el valor de n .

$$\begin{aligned}\frac{P(0)}{P_0} &= \cos^n \theta \\ 10^{-10/10} &= 0,1 = \cos^n 75^\circ \\ \log(0,1) &= n \log(\cos 75^\circ) \\ n &= \frac{-1}{-0,587} = 1,703\end{aligned}$$

- b) Calcule el ángulo completo del rayo divergente de esta fuente.

Se necesita el ángulo donde $\frac{P}{P_0}$ está reducido al valor de $\frac{1}{2}$.

$$\begin{aligned}\frac{P}{P_0} &= \cos^{1,703} \theta \\ \frac{1}{2} &= (\cos \theta)^{1,703} \\ \cos \theta &= (0,5)^{1/1,703} = 0,665 \\ \theta &= 48,3^\circ \quad (\text{medio ángulo de divergencia})\end{aligned}$$

- c. **La potencia o intensidad luminosa:** (TOMASI, 2003) Este parámetro se puede expresar en términos fotométricos o radiométricos.

La fotometría mide las ondas luminosas visibles al ojo humano y entonces la potencia de la luz se describe como la densidad de flujo luminoso, cuya unidad es lúmenes por metro cuadrado.

La radiometría mide la luz en todo el espectro electromagnético y por lo tanto la potencia óptica mide la tasa con la que las ondas electromagnéticas transfieren energía luminosa, es decir, es el flujo de energía luminosa que atraviesa determinado punto en un tiempo dado.

De acuerdo con lo anterior, la potencia óptica se define mediante:

$$\begin{aligned}P &= \frac{dE}{dt} \\ P &= \frac{dQ}{dt} (w)\end{aligned}$$

Donde:
 P = Potencia óptica (vatios)
 dQ = Carga instantánea (julios)
 dt = Cambio instantáneo de tiempo (seg)

A veces a la potencia óptica se le denomina flujo radiante (Φ), que equivale a julios/segundo y es la misma potencia que se mide eléctrica o térmicamente en vatios.

En términos radiométricos la potencia óptica de las fuentes luminosas está en el orden de decenas de microvatios hasta cientos de milivatios o en unidades logarítmicas como el dBm y el dBμ.

1.1. Diodos emisores de luz LED (Light Emitting Diode)

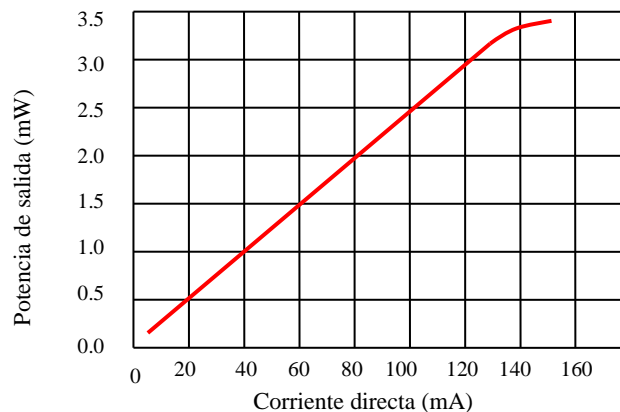
(TOMASI, 2003) Es un diodo de unión PN, fabricado casi siempre con arseniuro de aluminio y galio (AlGaAs) o de arseniuro fosfuro de galio (GaAsP). Estos diodos emiten por emisión espontánea (la luz se emite como resultado de la recombinación de electrones y huecos).

Cuando tienen polarización directa, los portadores minoritarios se transfieren a través de la unión PN. Una vez atravesada la unión, esos portadores minoritarios se recombinan con portadores mayoritarios y desprenden energía en forma de luz. Este proceso es esencialmente el mismo que en un diodo semiconductor convencional, pero en los LED se eligen ciertos materiales semiconductores y dopantes tales que el proceso es radiactivo, es decir produce un fotón o un quantum de energía electromagnética. Los fotones son partículas de energía que viajan a la velocidad de la luz, pero que en reposo no tienen masa.

La banda prohibida del material que se usa para fabricar un LED determina el color de la luz que emite y si la luz emitida es visible al ojo humano.

Para producir los LED, se forman semiconductores con materiales cuyos átomos tienen tres o cinco electrones de valencia, conocidos como átomos del grupo III o grupo V respectivamente en la tabla periódica de elementos.

Para que la luz emitida esté en la ventana de 800 nm, los LED son de átomos del grupo III (Al y Ga) y un átomo del grupo V (As). Esta unión corresponde al GaAlAs. Para longitudes de onda mayores se combinan átomos del grupo III (galio e indio) con un átomo del grupo V (Fósforo y arsénico), para conformar el arseniuro fósforo de galio e indio (GaInAsP).



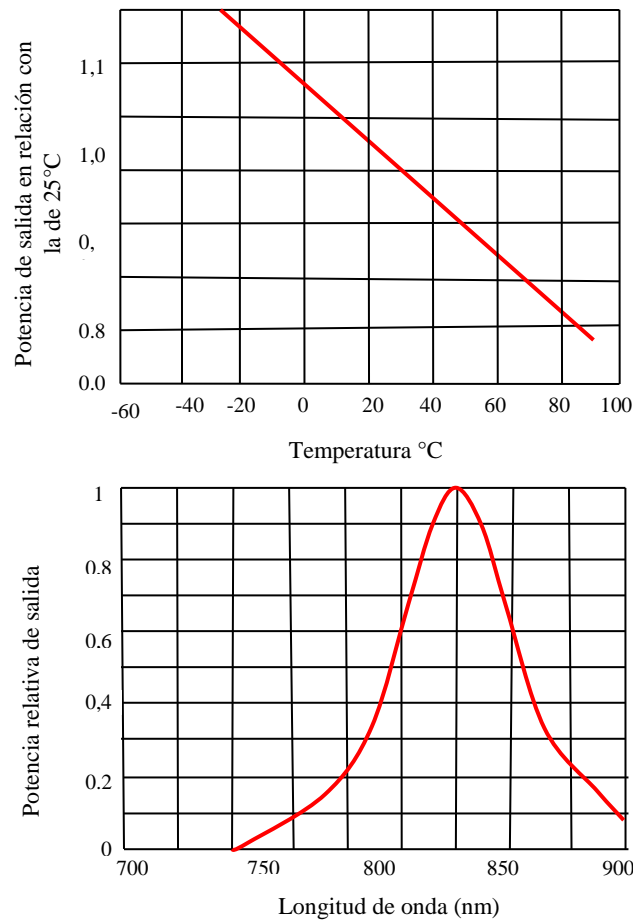


Fig. 4.3. Curvas características de los LED

Fuente: Tomado y modificado del libro de Wayne Tomasi por los autores

1.1.1. LED de homounión

Es la unión PN formada con dos mezclas distintas de igual tipo de átomos. Las estructuras más sencillas de LED son las de homounión y de crecimiento epitaxial o dispositivos semiconductores de un solo semiconductor difundido. Los diodos fabricados con arseniuro de galio dopado con silicio tienen una emisión en la ventana de 940 nm y la potencia normal de salida es cercana a los 2mw cuando se alimenta con una corriente de 100 mA.

La desventaja de los diodos homounión, es que las ondas luminosas se emiten en todas las direcciones (no direccional) por igual y solo una pequeña fracción del total de la luz producida se acopla a la fibra. Adicionalmente su eficiencia en la transducción eléctrica es baja. Estos diodos también se les llaman *emisores superficiales*.

1.1.2. LED de heterounión

Estos diodos se fabrican con material semiconductor tipo P de un conjunto de átomos y material tipo N de otro conjunto. Se fabrican montando capas en forma de emparedado, acentuando así el efecto de concentración de los electrones, los huecos y la luz producida en un área mucho menor. Estos LED tienen algunas ventajas respecto a los homounión:

- El aumento de la densidad de corriente genera un haz de luz más brillante.

- La menor área emisora facilita el acoplamiento con la fibra
- La pequeña área efectiva tiene menor capacitancia, permitiendo su uso a mayores velocidades.

1.1.3. LED de superficie emisora y pozo grabado de Burrus

Usado en aplicaciones para telecomunicaciones, donde se requieren velocidades de datos mayores a 100 Mbps y desarrollado por Burrus y Dawson de laboratorios Bell. Es un LED homounión pero con dirección de la luz en un área menor.

1.1.4. LED emisores de borde

Estos LED emiten una distribución más direccional de luz que los LED de superficie emisora (homounión). La luz se emite desde una banda activa (ventana) y forma un haz elíptico o cono. La potencia de luz de estos emisores es menor que los de superficie, pero da una mayor concentración. La corriente aplicada al LED y la temperatura inciden directamente en la potencia de luz emitida por el LED.

1.2. Diodos láser de inyección (ILD: Injection laser diode)

Este diodo se parece al LED. De hecho un láser por debajo de cierta corriente umbral, funciona como un LED. Al aplicar corriente superior, el ILD oscila emitiendo luz láser.

1.2.1. Emisión espontánea estimulada

La emisión estimulada es la base de funcionamiento del láser. Con una fuente externa se irradia el núcleo activo del láser con una longitud de onda igual (igual fase e igual frecuencia) a la que tiene la emisión espontánea. El resultado es una onda coherente.

1.2.2. Características de la emisión láser:

- La **intensidad** de la emisión láser es inusualmente elevada.
- El rango de potencia (magnitud relacionada directamente con la intensidad) es amplísimo, empezando desde las fracciones de vatio que se emplean en algunas tecnologías (lectores de CD), hasta el orden los Gw que se alcanzan en el láser NOVA, del laboratorio Lawrence Livermore, que es el más potente que existe en el mundo.
- Emisión de luz altamente monocromática (es decir, se emite luz con una longitud de onda única, o en su caso dos valores siempre bien definidos, lo que equivale a que la anchura de banda es prácticamente despreciable), lo que resulta beneficioso en algunas aplicaciones, pero también impone serias limitaciones a su uso. Actualmente existen láser que son capaces de barrer todo el rango de longitud de onda del visible (láseres de colorante), aunque su precio es elevadísimo.
- Elevada coherencia (la fase de la radiación permanece constante con el tiempo).
- Elevada directividad de la radiación láser, lo que permite su uso a largas distancias (control remoto) y con enorme precisión.

1.2.3. Componentes de un láser:

El láser construido por Maiman (Figura 4.4), en su estructura básica tenía los siguientes componentes:

- Medio láser, que es el material capaz de producir la radiación.
- Fuente externa de energía, que puede ser eléctrica u óptica.

- Caja o cavidad de resonancia, que contiene el medio láser y los espejos para reflejar la luz, uno de los cuales la transmite parcialmente. La luz se amplifica sucesivamente al reflejarse en los espejos y atraviesa repetidamente el material láser. Una fracción de la intensidad del haz resultante se atraviesa el espejo que transmite parcialmente. Esta fracción constituye el haz láser operante.

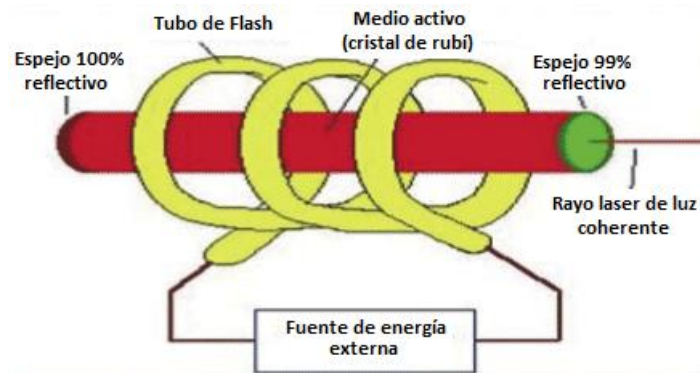


Figura 4.4. Estructura del láser de rubí construido por Maiman en 1969

Fuente: http://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0004-06142008000900004&script=sci_arttext. Descargado en mayo de 2010

1.2.4. Fases en el funcionamiento:

- **Bombeo:** En primer lugar, se produce un proceso de **bombeo**, en el cual las partículas (átomos, moléculas o iones) del medio láser se excitan, llevando a sus electrones a niveles de energía superiores y con tiempos de vida más cortos. Este proceso se produce por radiación de **energía**.
- **Relajación:** Es el proceso de relajación parcial de las partículas excitadas mediante emisión de calor.
- **Emisión espontánea:** Como paso previo a la emisión láser, los electrones de algunas de estas partículas excitadas vuelven al estado fundamental mediante un fenómeno de emisión espontánea. Este fenómeno se traduce en la emisión ordinaria de fotones cuya energía equivale a la diferencia de energía entre los niveles implicados en el fenómeno láser.

1.2.5. Funcionamiento del diodo láser:

- Al pasar corriente con polarización directa a través de la unión PN, se emiten fotones por emisión espontánea a una frecuencia determinada. Si se aumenta la corriente, la generación de fotones y de portadores minoritarios en ambos lados de la unión es tan grande, que comienzan a chocar entre ellos y contra portadores minoritarios ya excitados.
- Esto causa un aumento en el nivel de energía de ionización y hace que los portadores se vuelvan inestables. Entonces, un portador cualquiera se recombina con su portador contrario a un valor de energía mayor que el nivel de energía normal que tenía antes del choque. En este proceso se crean más fotones, que a su vez estimulan a otros, creando alta ganancia en la cantidad de fotones.

- Los ILD tienen paredes muy lisas (tipo espejo) con lo cual los fotones se reflejan estimulando a más electrones libres a recombinarse con huecos a un valor de energía mayor que el normal. Este es el proceso láser o estimulación de emisión.
- Luego de entrar en este proceso de estimulación, la potencia luminosa de salida aumenta dramáticamente con pequeños aumentos de corriente de activación.

1.2.6. Ventajas de los ILD:

- Mejor acople con la fibra óptica por su alta directividad.
- La potencia de salida de un ILD es de aproximadamente 5 mw (7 dBm), es decir mucho mayor que la de un LED que es de 0,5 mw (-3dBm), por tanto se usan para mayores distancias.
- La tasa de transmisión digital (bits/seg) es más alta que en los LED
- Se reduce la dispersión cromática o de longitudes de onda porque generan luz monocromática.

1.2.7. Desventajas de los ILD:

- El costo es mayor que los LED (alrededor de 10 veces)
- El tiempo de vida es menor, pues trabajan a mayores potencias
- Los ILD dependen más de la temperatura que los LED

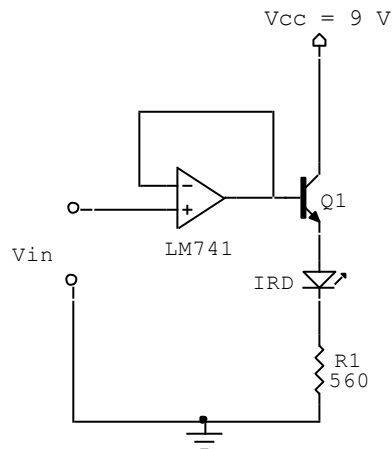


Fig.4.5. Circuito sencillo de un transmisor óptico
Fuente: Los autores

2. DETECTORES ÓPTICOS

Existen dos dispositivos que se usan como detectores ópticos: Los diodos PIN (*tipo p tipo n intrínseco*) y los APD o *fotodiodos de avalancha*.

2.1. Diodos PIN (P-intrinseco-N):

Este diodo es de capa de agotamiento y es el dispositivo más usado como detector de luz en sistemas de comunicaciones con fibras ópticas. Consiste de una capa tipo N elaborada de material de bajo dopado (casi puro o intrínseco), rodeada de material P y N muy dopadas. La luz penetra al dispositivo por una pequeñísima ventana y cae sobre el material intrínseco

carente de portadores. Este material se hace lo suficientemente grueso para que los fotones que entren queden atrapados en la capa y sean absorbidos.

Básicamente un diodo PIN funciona en forma contraria a un LED. Los fotones absorbidos por los electrones de la banda de valencia del material intrínseco, hacen que agreguen energía suficiente para generar portadores en la región de agotamiento y así permitir el paso de corriente por el dispositivo, es decir que puedan tener la energía suficiente para saltar de la banda de valencia a la banda de conducción.

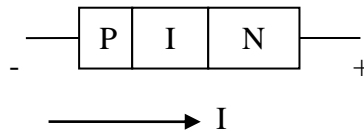


Figura 4.6
Fuente: Los autores

Si la energía necesaria para saltar la banda prohibida en el silicio es de $1,12 \text{ eV}$ y la equivalencia en unidades de energía de un electrón voltio es de:

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Entonces la banda prohibida para el silicio será:

$$E_g = 1,12\text{eV} (1,6 \times 10^{-19} \text{ J} / \text{eV}) = 1,792 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Y la energía está dada por la ecuación:

$$E = h \times f$$

Donde:

$$h = \text{Constante de Plank} = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J} / \text{Hz}$$

$$f = \text{Frecuencia en Hz.}$$

Entonces:

$$f = \frac{E}{h}$$

Que para un diodo de silicio será:

$$f = \frac{1,792 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,6256 \times 10^{-34} \text{ J} / \text{Hz}} = 2,705 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,705 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 1109 \text{ nm}$$

Lo que quiere decir que las longitudes de onda de 1109 nm o menores, son las requeridas para que haya electrones suficientes que salten la banda prohibida de un fotodiodo de silicio.

2.2. Diodos de avalancha (APD)

Es una estructura PIN. La luz entra al diodo y se absorbe en la capa N delgada y muy dopada. Entre la unión IPN se desarrolla una gran intensidad de campo eléctrico, por polarización inversa, que causa ionización por impacto.

Durante la ionización por impacto, un portador puede adquirir la energía suficiente para ionizar otros electrones enlazados y estos portadores ionizados a su vez provocan más ionizaciones. El proceso continúa como en una avalancha y es de hecho una ganancia o multiplicación interna de portadores.

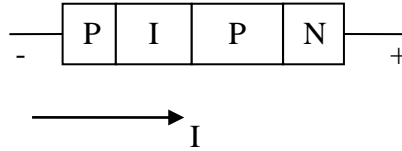


Figura 4.7

Fuente: Los autores

En consecuencia los diodos APD son más sensibles que los diodos PIN y requieren menos amplificación adicional. La desventaja de estos diodos son los tiempos de tránsito relativamente grandes y ruido generado internamente por la avalancha.

2.3. Características de los detectores de luz

Las más importantes son:

2.3.1. Responsividad

Es una medida de la eficiencia de conversión de un foto detector y es la relación de corriente de salida de un fotodiodo contra la potencia óptica que le entra. Las unidades están dadas en amperios/vatio. Generalmente la responsividad está asociada a una determinada longitud de onda. Está dado por la ecuación:

$$R_p = \frac{I_{out}}{P_{in}}$$

Ejemplo: Un detector que opera a 850 nm, produce 80μA de corriente de salida para una entrada del rayo de luz de 500μW. Halle la responsividad.

$$R_p = \frac{I_{out}}{P_{in}} = \frac{80 \times 10^{-6}}{500 \times 10^{-6}} = 0,16 A/W = 160 mA/W$$

La responsividad también puede darse como la relación de:

$$R_p = \frac{\Delta V}{\Delta \phi_e} = \frac{V_{FOR}(Disc) - V_{FOR}(Con)}{P_{LUZ}(Disc - Connec)} \quad (mV_{RMS} / mW)$$

Donde:

V_{FOR} = Voltaje de CD a la salida del detector óptico, con alimentación de luz (*Conn*) y sin alimentación de luz (*Disc*). Regularmente, la salida DC sin luz es mayor.

$\Delta \Phi_e$ = Cambio de potencia a la salida del detector óptico, que puede estar entre un mínimo de 5 μW a 20 μW.

2.3.2. Corriente oscura

Es la corriente de reposo que pasa por un fotodiodo cuando no hay entrada luminosa. Se debe a portadores generados térmicamente en el diodo. Típicas densidades de corriente oscura

en dispositivos de silicio son de 10^{-6} a 10^{-7} A/cm²; en InGaAs son de 10^{-4} a 10^{-6} A/cm² y en Germanio de 10^{-3} A/cm².

2.3.3. *Tiempo de tránsito*

Es el tiempo que tarda un portador inducido por la luz, en cruzar la región de agotamiento. Este parámetro determina la máxima frecuencia posible de bits a recibir. En un diodo de silicio la velocidad de huecos y electrones es de $8,4 \times 10^4$ y $4,4 \times 10^4$ m/s, respectivamente. Para un ancho de la zona de agotamiento de $10 \mu\text{m}$, el tiempo de respuesta causado por este efecto será de aproximadamente 0,1 ns.

La distorsión del ancho de pulso que sufre una señal en un receptor óptico por las diferencias en los tiempos de propagación, se da por la ecuación:

$$t_{pw} = \Delta t_p = t_{phL} - t_{pLh}$$

Donde:

t_{pw} = Tiempo del ancho del pulso

t_{phL} = Tiempo de tránsito de alto a bajo

t_{pLh} = Tiempo de tránsito de bajo a alto

2.3.4. *Respuesta espectral*

Es el intervalo de longitudes de onda que se puede usar con determinado fotodiodo. En general la respuesta espectral relativa se grafica en función de la longitud de onda.

2.3.5. *Sensibilidad a la luz*

Esta sensibilidad es la potencia óptica mínima que puede recibir un detector para producir una señal eléctrica útil de salida a una determinada longitud de onda y está dada en dBm o dBμ.

2.3.6. *Potencia de ruido de fondo*

El receptor genera ruido terminal en la conexión entre la fibra y el detector óptico llamado ruido de fondo. El ruido también puede especificarse como una potencia y corresponde a la relación entre el voltaje de ruido típico máximo y la responsividad, dada como:

$$P_N = \frac{V_{No}}{R_p}$$

P_N es la potencia radiante que produce un voltaje de ruido equivalente (V_{No}) como si no fuera generado por el receptor. El fabricante especifica un valor típico máximo de voltaje de ruido para señal nula (V_{No}) dado en mV_{RMS} equivalente a 0,36 mV.

CAPÍTULO 5: CABLES DE FIBRA ÓPTICA Y ELEMENTOS DE CONEXIÓN Y MONTAJE

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Cubierta exterior: La envoltura externa del cable es fabricada en forma extruida a alta presión, con polietilenos de buena resistencia, resultando en que la superficie interna de la cubierta del cable tenga aristas helicoidales que se aseguran con los hilos internos de la fibra.



Figura 5.1. Tipos de cubierta del cable de fibra

Fuente: <http://www.progame.galeon.com/robotb.html>. Descargada: mayo 2012

Cubierta interna: es un material epóxico resistente al agua, hongos y emisiones ultra violeta, y generalmente tiene un diámetro de 900 μm . Los hilos de fibra así tratados han sido probados con hasta 100 kilo libras de presión por pulgada cuadrada, lo cual contribuye a una mayor confiabilidad durante el tiempo de vida.

Protección a la humedad: (MEAVE, 2009) En los cables de tubo holgado (loose tube) rellenos de gel, la protección es escasa porque el gel se asienta dentro de la cubierta dejando vacíos que permiten que el agua penetre y se acumule o migre hacia los extremos de la fibra, disminuyendo así la vida útil. Este problema se combate mediante múltiples capas de protección alrededor de la fibra óptica.

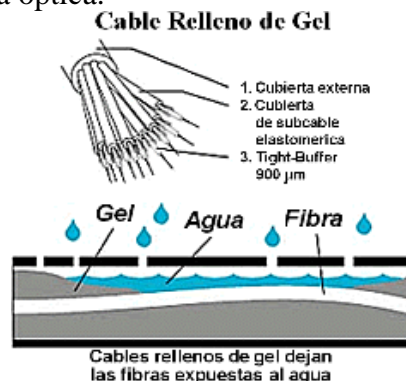


Figura 5.2. Características de los cables con gel

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>. Descargada: febrero 2012

Empaquetado de alta densidad: (COMMONS, Atribución Creative, 2013) Con el máximo número de fibras en el menor diámetro posible se consigue una más rápida y fácil instalación,

donde el cable debe enfrentar dobleces agudos y espacios estrechos. Se ha llegado a conseguir un cable con 72 fibras de construcción súper densa cuyo diámetro es un 50% menor al de los cables convencionales.

2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

(CHALACÁN & Orosco, 2011) La fibra óptica en su estructura primaria no es un elemento resistente a la tracción o estirado, además los cables se instalan a la intemperie o en ambientes agresivos que pueden afectar al núcleo. Por lo anterior, los componentes opto electrónicos como las fibras ópticas, últimamente han tenido un sensible aumento de la calidad de funcionamiento para los sistemas de telecomunicaciones, al mejorar las cubiertas y protecciones. Para alcanzar tal objetivo hay que tener en cuenta su sensibilidad a la curvatura y micro curvatura, la resistencia mecánica y las características de envejecimiento.

Las microcurvaturas y tensiones se determinan por medio de los ensayos de:

- **Tensión:** cuando se estira o contrae el cable se pueden causar fuerzas que rebasen el porcentaje de elasticidad de la fibra óptica y se rompa o formen micro curvaturas.
- **Compresión:** es el esfuerzo transversal.
- **Impacto:** se debe principalmente a las protecciones del cable óptico.
- **Enrollamiento:** existe siempre un límite para el ángulo de curvatura pero, la existencia del forro impide que se sobrepase.
- **Torsión:** es el esfuerzo lateral y de tracción.
- **Limitaciones Térmicas:** estas limitaciones difieren en alto grado según se trate de fibras realizadas a partir del vidrio o a partir de materiales sintéticos.

Otro objetivo es minimizar las pérdidas adicionales por cableado y las variaciones de la atenuación con la temperatura. Tales diferencias se deben a diseños calculados a veces para mejorar otras propiedades, como la resistencia mecánica, la calidad de empalme, el coeficiente de relleno (número de fibras por mm²) o el costo de producción.

3. TIPOS DE CABLES

Los cables de fibra óptica deben cumplir las siguientes propiedades:

- Minimizar las pérdidas en las fibras
- Permitir alta tensión sin ruptura
- Inmunidad a la humedad y al agua
- Estabilidad de las características de la fibra a rangos de temperatura
- Fácil manejo e instalación, especialmente con los equipos e instalaciones
- Bajos costos de adquisición, instalación y mantenimiento.

Los cables de fibra pueden ser desde una forma simple o altamente sofisticados, dependiendo de los requerimientos y aplicaciones. Típicamente un cable consiste de los siguientes elementos:

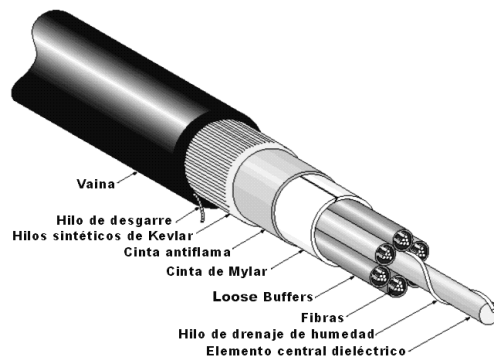


Figura 5.4. Cable para instalación en tierra

Fuente: <http://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/> Descargada: febrero 2012

- *Las fibras ópticas*, la cuales pueden ser desde una a múltiples fibras
- *Un material de separación* (buffering material), el cual es una sustancia suave colocada alrededor de las fibras, aislándolas de otras que están colocadas dentro del cable. Si la fibra puede moverse dentro del material del buffering cuando hay tensión en el cable, entonces la fibra se denomina de *separador holgado* (losse buffered). Si la fibra está rígidamente colocada dentro del tubo del cable, entonces a esta fibra se le llama de *separador apretado* (tight buffered).
- *Hilos de llenado* para ocupar el espacio entre fibras y dar una mayor consistencia y protección (kevlar)
- *Una chaqueta* que provee protección a la abrasión, protección al agua, a los roedores, peces y otros animales, resistencia a químicos.
- *Una cinta o hilo central* que da resistencia mecánica a la tracción y estirado.

3.1. Cable de estructura holgada

(CONVERSI, 2012) Consta de varios tubos de fibra rodeando un elemento central de refuerzo y protegido con una cubierta. El rasgo distintivo de este tipo de cable son los tubos de fibra. Cada tubo, de dos a tres milímetros de diámetro, lleva varias fibras ópticas que descansan holgadamente en él. Los tubos pueden ser huecos o estar llenos de un gel resistente al agua que impide que ésta entre en la fibra. El tubo holgado aísla la fibra de las fuerzas mecánicas exteriores que se ejerzan sobre el cable.

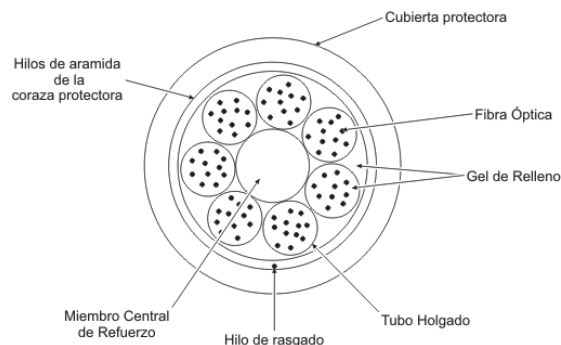


Figura 5.5. Cable de tubo Holgado

Fuente: http://nemesi s.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_5.htm Descargada: febrero 2012

El elemento de refuerzo puede ser acero, kevlar o un material similar. Este elemento proporciona al cable resistencia mecánica en operaciones de instalación y tendido. Debería amarrarse siempre con seguridad a la polea de halado durante las operaciones de tendido del cable y a los anclajes apropiados que hay en cajas de empalmes o paneles de conexión.

La cubierta o protección exterior del cable puede ser de polietileno, de armadura de acero, goma o hilo de aramida y para aplicaciones tanto exteriores como interiores. Con objeto de localizar los fallos con el OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) de una manera más fácil y precisa, la cubierta está secuencialmente numerada cada metro.

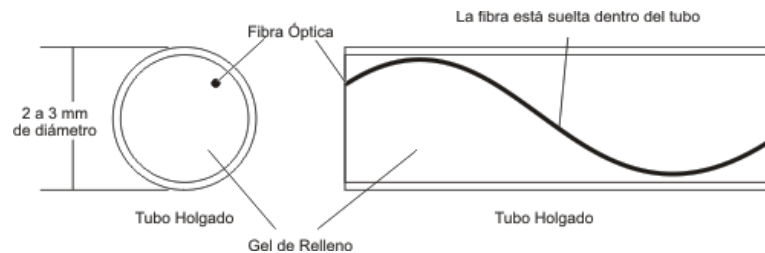


Figura 5.6. Tubo holgado de cable de fibra óptica

Fuente: <http://conversi.blogspot.com/> Descargada febrero 2012

Los cables de estructura holgada se usan en la mayoría de las instalaciones exteriores, incluyendo aplicaciones aéreas, en tubos o conductos y en instalaciones enterradas. Este tipo de cable no es muy adecuado para instalaciones en recorridos verticales, porque existe la posibilidad de que el gel interno fluya o que las fibras se muevan.

3.2. Cable de estructura ajustada

(CONVERSI, 2012) Contiene varias fibras con protección secundaria que rodean un miembro central de tracción y todo ello cubierto con una protección exterior. La protección o funda secundaria de la fibra consiste en una cubierta plástica de $900\mu\text{m}$ de diámetro que rodea al recubrimiento de $250\mu\text{m}$ de la fibra óptica.

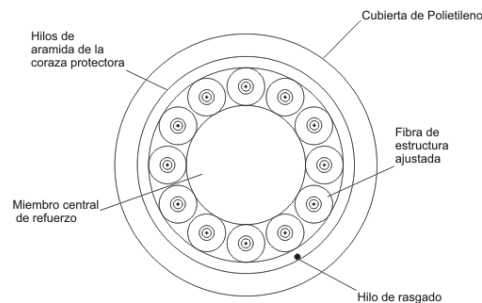


Figura 5.7. Cable de estructura ajustada

Fuente: <http://conversi.blogspot.com/> Descargada: febrero 2012

La funda secundaria proporciona a cada fibra individual una protección adicional frente al entorno así como un soporte físico. Esto permite a la fibra ser conectada directamente (conector instalado directamente en el cable de la fibra) sin la protección que ofrece una bandeja de empalmes. Para algunas instalaciones esto puede reducir el costo de la instalación

y disminuir el número de empalmes en un tendido de fibra. Debido al diseño ajustado del cable, es más sensible a las cargas de estiramiento o tracción y puede ver incrementadas las pérdidas por microcurvaturas.

Por una parte, un cable de estructura ajustada es más flexible y tiene un radio de curvatura más pequeño que el que tienen los cables de estructura holgada. Es un cable que se ha diseñado para instalaciones en el interior de los edificios. También se puede instalar en tendidos verticales más elevados que los cables de estructura holgada, debido al soporte individual de que dispone cada fibra.

3.3. Cable blindado

(CONVERSI, 2012) Tienen una coraza protectora o armadura de acero debajo de la cubierta de polietileno. Esto proporciona al cable una resistencia excelente al aplastamiento y propiedades de protección frente a roedores. Se usa frecuentemente en aplicaciones de enterramiento directo o para instalaciones en entornos de industrias pesadas. El cable se encuentra disponible generalmente en estructura holgada aunque también hay cables de estructura ajustada.

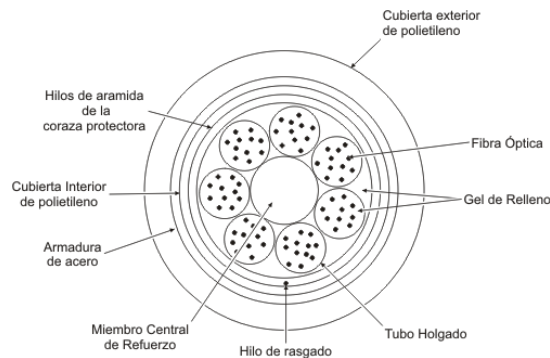


Figura 5.8. Cable de fibra óptica con armadura

Fuente: <http://conversi.blogspot.com/> Descargada: febrero 2012

Existen también otros cables de fibra óptica para las siguientes aplicaciones especiales:

3.4. Cable aéreo autoportante

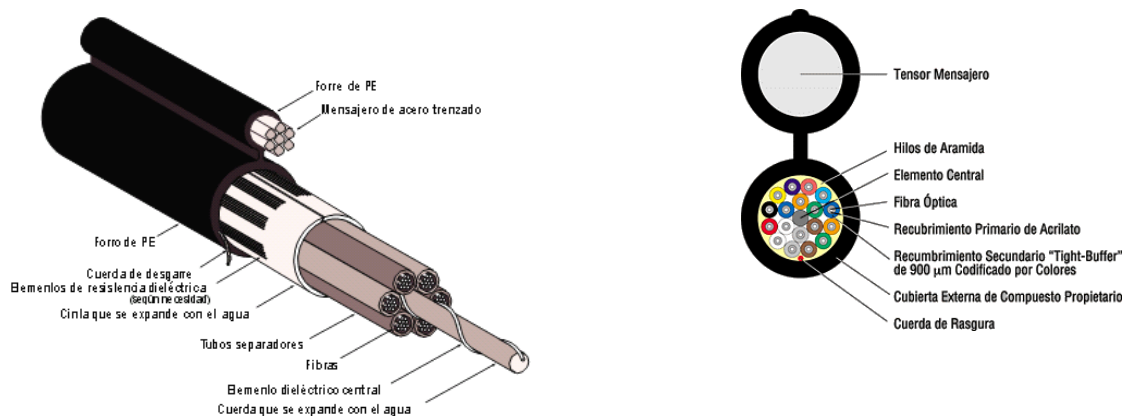


Figura 5.9. Cable para instalación aérea autoportante

Fuente: <http://www.clarkwire.com/catFOMSeries.htm> Descargada: febrero 2012

O cable autoportado, es un cable de estructura holgada diseñado para ser utilizado en estructuras aéreas. No requiere un fijador como soporte. Para asegurar el cable directamente a la estructura del poste se utilizan abrazaderas especiales. El cable se sitúa bajo tensión mecánica a lo largo del tendido

3.5. Cable compuesto tierra-óptico (OPGW)

Es un cable de tierra que tiene fibras ópticas insertadas dentro de un tubo en el núcleo central del cable. Las fibras ópticas están completamente protegidas y rodeadas por pesados cables a tierra. Es utilizado por las compañías eléctricas para suministrar comunicaciones a lo largo de las rutas de las líneas de alta tensión.

4. CONECTORES

(FIBRA óptica hoy, 2011) En cualquier tipo de conexión participan 3 componentes:

1. El conector que inyecta la potencia óptica a transmitir.
2. El adaptador que guía (deslizamiento con fricción) y que mantiene estable el contacto alineado entre extremos sometidos a esfuerzo permanente (muelle).
3. El conector que extrae la potencia transmitida.

Dos de tales componentes, los conectores, son productos transformados, es decir son componentes en los que la calidad de la marca del conector, por buena que sea, puede no verse debidamente reflejada por la calidad del conector montado. El adaptador es un componente no transformado.

La operación simultánea de éstos 3 elementos exige compatibilidad mecánica y óptica. Cuando todos ellos son de una misma marca de fabricación, se la entiende como *Compatibilidad Horizontal (CH)*, y si son de distintas marcas *Compatibilidad Vertical (CV)*.

Para la terminación de una fibra óptica es necesario utilizar conectores o empalmar Pigtails (cables terminados en conector) por medio de fusión. Para el caso de conectorización se encuentran distintos tipos de conectores de acuerdo con el uso, de la norma mundial y de sus características (ST, SC, SCD, FC, LC, LCD, etc. tanto en versión monomodo como multimodo). (monografias.com, 2009)

ST (Straight Tip): Conector para Fibra Monomodo o Multimodo de uso habitual en redes de datos y equipos de Networking locales.



Figura 5.10. Conectores ST

Fuente: <http://marismas-emtt.blogspot.com/2009/09/conector-st.html>

FC (Ferrule Connector): Conector para Fibra Óptica Monomodo o Multimodo de uso habitual en telefonía y CATV en formato Monomodo.



Figura 5.11. Conector FC

Fuente: <http://www.google.com.co/search?q=conectores+fc&hl> Descargada :abril 2012

SC (Standard Connector): Conector para Fibra óptica Monomodo y Multimodo con uso habitual en telefonía en formato monomodo.



Figura 5.12. Conector SC

Fuente: <http://www.google.com.co/search?q=conectores+fc&hl> Descargada: abril 2012

Todos los conectores, tanto monomodo como multimodo, se garantizan con pérdidas máximas de inserción de 0,4 dB, con un valor típico inferior a 0,2 dB.

5. DISPOSITIVOS DE MONTAJE

5.1 Caja de administración

Es el envoltorio destinado a alojar la terminación de los cables de fibra óptica, permitiendo la administración de los servicios que se transportan por la fibra óptica. Si dicha terminación se realiza por medio de empalmes a rabillos, la caja se complementa con *casetes* de 24 empalmes. En tal caso se denomina *caja de empalmes y administración*.



Figura 5.13. Caja de empalmes

Fuente: <http://www.fibrefab.com/es/termination-boxes/> Descargada: marzo 2012

Existen cajas para su emplazamiento en Rack. Las Cajas Rack, que pueden ser de 1 y 2 Unidades de Altura (UA), están diseñadas para su fácil instalación y manipulación ya que van dotadas de sistemas de cierre con clip y se pueden regular en profundidad. Las Cajas Rack de 1 UA están pensadas para alojar hasta 24 fibras ópticas (48 en el caso de conectores de alta densidad, p. ej. LCD) y en su interior se pueden colocar 1 ó 2 casetes de hasta 24 empalmes cada uno.

Las Cajas Rack de 2 UA disponen del doble de capacidad que las anteriores. También se dispone de un Sistema Modular de Cajas Rack que permite la terminación de cables de hasta 188 fibras ópticas. Además de las Cajas Rack, que disponen de un accesorio para su colocación en pared, se fabrican Cajas Murales específicas con capacidad hasta para 16 fibras ópticas. La *roseta* es un tipo especial de Caja de Pared, especialmente indicada para dar servicio a un punto de trabajo, con capacidad para un máximo de 4 fibras ópticas. Todas las Cajas se realizan en lámina metálica de 1,5 mm de espesor.

5.2 Rabillos y latiguillos

(NETPOINT, 2011) Los *rabillos* (Pig tail) se emplean habitualmente para la terminación de los extremos de las líneas de fibra óptica. Generalmente se alojan en cajas de empalmes dotadas de hembras-adaptadoras.

Los *latiguillos* (Patch cord o jumper) se utilizan para la unión de equipos ópticos entre sí o de éstos con las líneas de fibra óptica a través de las cajas de empalme, por medio de las hembras-adaptadoras.

También se denominan *cordones* a los segmentos de cable de fibra óptica con conectores en uno o ambos de sus extremos: Pueden ser el *rabillo* y el *latiguillo*.

Aunque lo habitual es trabajar con cables de 1 ó 2 fibras, se pueden confeccionar rabillos y latiguillos con cualquier número de fibras (4, 6, 8...).

El cable de fibra puede ser cualquiera en el que las fibras ópticas estén dotadas de protección ajustada. Los cables siempre son de interior (libres de halógenos, no propagantes de llama ni emisores de humos) y pueden ser simples, duplex-zipcor, round, break-out con cualquier tipo de fibra monomodo o multimodo.

5.3 Pasamuros

También conocidos como *adaptadores*, son los componentes que permiten el enfrentamiento entre sí de dos conectores ópticos. Suelen colocarse en las cajas de empalmes para la administración de latiguillos en la asignación de servicios de los equipos electrónicos.

Para el correcto alineamiento de las fibras, las hembras disponen de una anilla de presión (sleeve) que puede ser de material cerámico (circonia) o metálico (bronce fosforado). Se recomienda el empleo de hembras con anilla cerámica para su utilización con fibras monomodo y hembras de anilla metálica para fibras multimodo.

Existen hembras tanto para versión simple como dúplex, con uno o dos conectores por cada lado respectivamente.

El material del cuerpo de las hembras puede ser metálico (ST, FC...) o plástico (SC, SCD, LCD...). En este último caso, las recomendaciones internacionales indican la siguiente codificación:

- Hembras multimodo: color gris o crema.
- Hembras monomodo (No APC): color azul.
- Hembras monomodo (APC): color verde.

Las hembras dúplex siguen la codificación A-B para garantizar la correcta polaridad en las comunicaciones bidireccionales.

5.4 Máquinas

(FIBERCOM, 2011) La **empalmadora** es la máquina necesaria para la realización de empalmes de fusión en fibras ópticas, tanto monomodo como multimodo. Consta de una máquina de empalmes que alinea automáticamente, en los tres ejes y fusiona la fibra óptica con pérdidas inferiores a 0,03 dB. Emplea técnicas de alineamiento para optimizar los empalmes por L-PAS (video) y por LID (inyección de luz). Se complementa con **cortadora** de precisión de fibras ópticas y **horno** para contracción de protectores termo- retráctiles. Todo ello integrado en una maleta de transporte que dispone de baterías y cargador/fuente de alimentación.

El **OTDR** o **reflectómetro** se emplea en la certificación de líneas y detección de problemas. Es un equipo de medida de alta precisión lo que le permite una gran funcionalidad para su empleo en instalaciones. Es resistente al polvo y la humedad para su uso en las más duras condiciones de instalación o auditoría. Dispone de memoria interna para almacenamiento de trazas, conexión a PC y disquetera. Dispone de batería integrada y de cargador/transformador externo.

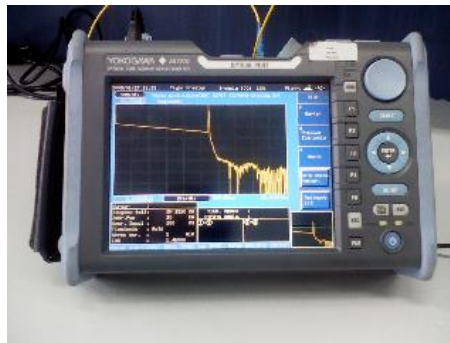


Figura 5.14. OTDR

Fuente: <http://www.google.com.co/search?q=otdr&hl> Descargada abril 2012

El **kit de medidas** se utiliza para garantizar la funcionalidad de los enlaces ópticos. Está formado por un **emisor óptico** y un **detector**. Ambos se entregan en una maleta de transporte con los accesorios (latiguillos, hembras, etc.) necesarios para su empleo en campo.

5.5 Otros elementos

Los *atenuadores* se utilizan para bajar el nivel de señal óptica y evitar problemas de saturación en los detectores. Se suministran con valores estándar de 1, 3, 5, 10 y 15 dB. Sus pérdidas de retorno son superiores a normas para cada tipo de pulido.

Los *splitters* permiten obtener una misma señal óptica en varias salidas para su tratamiento en paralelo. Estos dispositivos también se pueden emplear como *multiplexores*. Tienen configuraciones 1x2, 1x3, 1x4, 1x8, 1x16 así como cualquier combinación de estos, tanto en versión compacta como encapsulada.

Los **WDM** se emplean para la discriminación de distintas señales ópticas procedentes de una misma fibra óptica. Son dispositivos basados en tecnología de fusión o de óptica integrada optimizados para la separación selectiva de distintas señales introducidas en una fibra óptica. La versión más corriente es la DWDM que separa señales en 2ª y 3ª ventana monomodo.

Los *torpedos* son envoltorios destinados a dar protección a los cables de fibra óptica en sus puntos de unión, en continuidad o en segregación, permitiendo el alojamiento en su interior de los empalmes. Están espacialmente concebidos para su utilización en infraestructuras de intemperie y soportan bien la humedad y las temperaturas extremas.

CAPÍTULO 6: REDES, SERVICIOS Y OTRAS TECNOLOGÍAS QUE USAN FIBRAS ÓPTICAS

1. SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA

(SICARD, 2010) Los sistemas de fibra óptica como cualquier otro sistema de comunicaciones, consiste de una fuente y un destino, que están separados por dispositivos y componentes que introducen ganancia o pérdida de señal al propagarse a través del sistema.

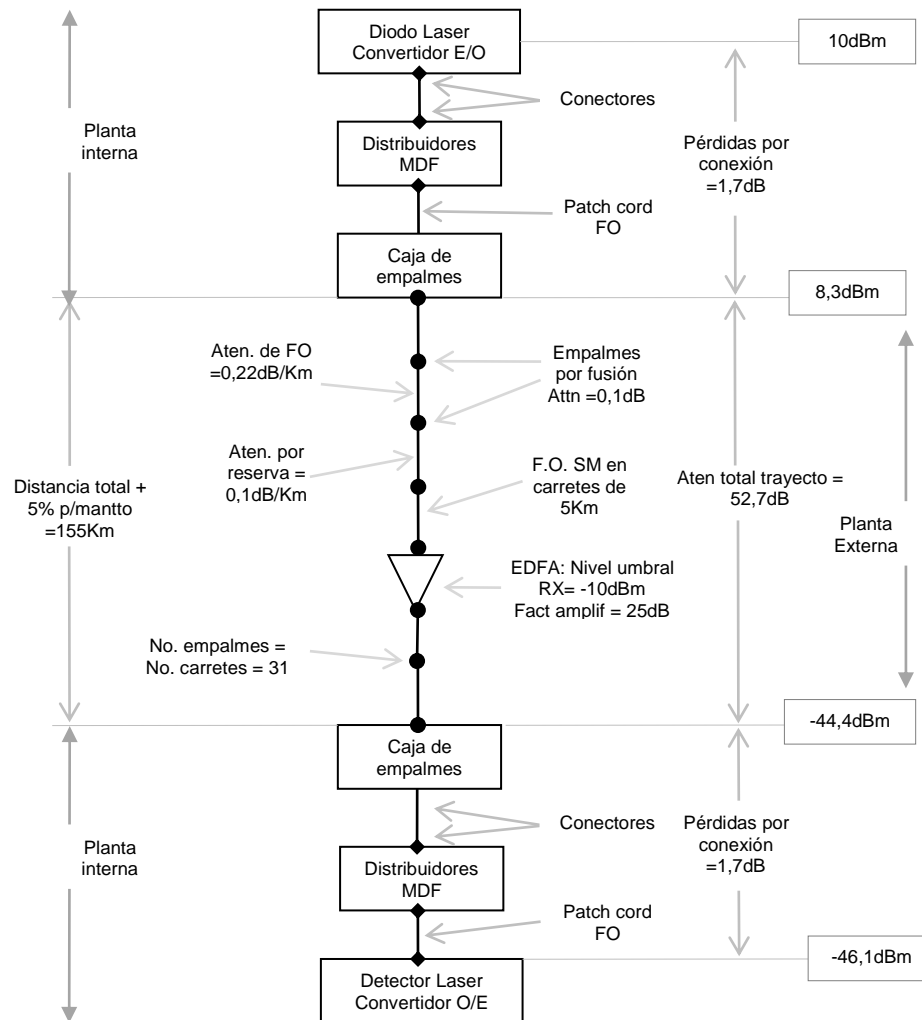


Figura 6.1. Diagrama general como ejemplo de un sistema troncal punto a punto usando fibra óptica
Fuente: Los autores

Este sistema de fibra será alimentado con información digital a una fuente óptica como transmisor óptico (LED o ILD), que será modulada para enviar esa información a varios kilómetros de distancia, en el que en ocasiones podrá tener un dispositivo repetidor para

regenerar o amplificar la señal, acoplado también al cable de fibra y posteriormente será detectada por un receptor óptico (diodo APD) que entregará la señal a un destino.

En consecuencia, el enlace deberá tener en cuenta la potencia de la fuente luminosa, la pérdida en los conectores y empalmes, la atenuación de la fibra y la ganancia en el detector si la tiene.

En cuanto a pérdidas, en estas se incluyen las siguientes:

- Pérdidas en el cable: dependen de la longitud, del material y de la pureza del material. Se especifican en dB/Km.
- Pérdidas en los conectores y acopladores: estas pérdidas de luz debidas a las uniones, pérdidas de Fresnel y otras, pueden estar entre los 0,1 hasta 1dB por conector.
- Pérdidas en la interfaz fuente-cable: casi nunca la unión entre la interfaz mecánica de la fuente y el cable es perfecta, es decir hay pérdidas de luz. Estas pueden ser de algunas décimas de dB.
- Pérdida en la interfaz cable-detector: igual que la anterior, la unión no es perfecta y puede llegar a representar algunas décimas de dB.
- Pérdida en los empalmes: dependiendo de si los empalmes son por fusión o mecánicos cuando se necesita extender la longitud de la fibra y del número de ellos. Para el caso de empalmes por fusión generalmente están entre 0,05dB a 0,15dB.
- Pérdidas por dobleces del cable: las características internas de un cable de fibra óptica cambian radicalmente si es doblado en un ángulo agudo. Existirá refracción dentro de la fibra y no reflexiones si esto ocurre, dando como resultado pérdidas de luz. Para el caso si se hace una adecuada instalación estas pérdidas se pueden eliminar de los cálculos.
- En cualquier caso, la potencia útil disponible en el receptor depende de la potencia de transmisión y de las pérdidas en el enlace. La ecuación correspondiente es:

$$P_r = P_t - \text{Pérdidas} \quad (\text{dBm})$$

2. CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN

Para una correcta planificación de las instalaciones de cables con fibras ópticas es necesario considerar la atenuación total del enlace y el ancho de banda del cable utilizado.

Para el cálculo de atenuación de enlace se consideran 2 métodos:

- Cálculo de atenuación que presentaría el cable de fibra óptica
- Cálculo del margen de enlace con un cable de fibra óptica ya seleccionado

2.1. Cálculo de atenuación total

La atenuación total del cable en dB considerando la reserva de atenuación (atenuación adicional explicada adelante) será:

$$L_{Cab}(\text{dB}) = \alpha d + N^{\circ}_{emp} \cdot L_{emp} + N^{\circ}_{con} \cdot L_{con} + L_{res} \cdot d$$

Donde:

d = longitud del cable en Km.

α = coeficiente de atenuación en dB/km

N°_{emp} = número de empalmes
 L_{emp} = atenuación por empalme
 N°_{con} = número de conectores
 L_{con} = atenuación por conector
 L_{res} = reserva de atenuación en dB/km

La reserva de atenuación (margen de enlace), permite considerar una reserva de atenuación para empalmes futuros (reparaciones) y la degradación de la fibra en su vida útil. La magnitud de la reserva depende de la importancia del enlace y particularidades de la instalación, se adopta valores entre 0.1 dB/km y 0.6 dB/km. Típicamente se puede usar 0,2dB/km.

Las pérdidas en los empalmes por fusión se encuentran por debajo de 0.05 dB no deben superar 0.15 dB. El número de empalmes depende de la distancia del trayecto y de la longitud de los carretes en que viene el cable de fibra. Esta longitud depende el criterio del fabricante, pero en términos generales viene en carretes desde los 2km hasta los 14km.

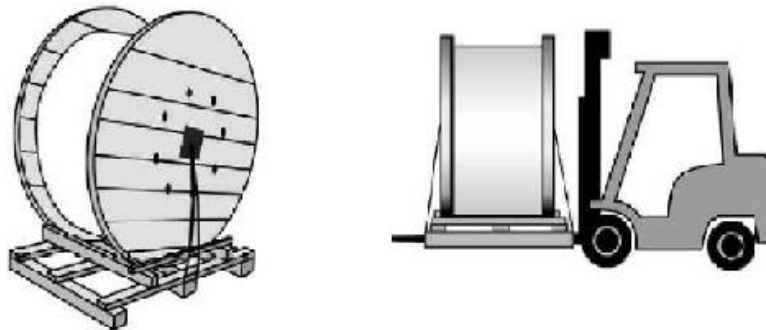


Figura 6.2. Carrete de fibra y operación de montaje

Fuente:

[http://www.google.com.co/imgres?imgurl=http://share.pdfonline.com/3853c3911ee1406f85e49f412203bcbc/Nor](http://www.google.com.co/imgres?imgurl=http://share.pdfonline.com/3853c3911ee1406f85e49f412203bcbc/Nor%20masfibra_images/)
 masfibra_images/ Descargada: abril 2012

El enlace será proyectado para un margen de potencia en dBm igual a la máxima atenuación en dB antes de ser necesario un repetidor. La siguiente expresión define el margen de potencia en dB o máxima atenuación permitida en el enlace:

$$L_{max}(dB) = P_{Tx} - P_{R(umbral)}$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia de la fuente óptica (transmisor óptico) en dBm

$P_{R(umbral)}$ = Potencia de umbral del detector óptico en dBm (sensibilidad del receptor)

La potencia de salida de la fuente óptica (P_{Tx}) es el promedio de la potencia óptica de salida del equipo generador de luz empleando un patrón estándar de datos de prueba. Esta potencia depende del número de longitudes de onda que se usen en WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) ecuación que se muestra más adelante)

El umbral de sensibilidad del detector óptico ($P_{R(umbral)}$) para una tasa de error de bit (BER) es la mínima cantidad de potencia óptica necesaria para que el equipo óptico receptor

obtenga el BER deseado dentro del sistema digital. En los sistemas analógicos es la mínima cantidad de potencia de luz necesaria para que el equipo óptico obtenga el nivel de señal a ruido (S/N) deseado.

Así, de la anterior ecuación se puede determinar el valor máximo del factor de atenuación de la fibra (α_{max}) que puede ser usado:

$$\alpha_{max}(dB/km) = \frac{L_{max} - (N^{\circ}_{emp} \cdot L_{emp} + N^{\circ}_{con} \cdot L_{con} + L_{res} \cdot d)}{d}$$

2.2. Cálculo del margen del enlace (Lenl)

La atenuación total en dB sin considerar reserva del cable será:

$$A_{tt}(dB) = \alpha_{max} \cdot d + N^{\circ}_{emp} \cdot L_{emp} + N^{\circ}_{con} \cdot L_{con}$$

Ahora, el margen de pérdidas del enlace M_{enl} en dB será:

$$L_{enl}(dB) = L_{max} - A_{tt}$$

Ejemplo. Se tiene un enlace de 50 kilómetros en la que el cable de fibra óptica (fibras monomodo 9,5/125) y viene en carretes de 2,5 kilómetros. La fibra se trabaja en una longitud de onda de 1310nm, para un sistema de 34 Mbps. La potencia de la fuente óptica es de 0dBm y el umbral de sensibilidad de -30dBm para un BER 10^{-9} . Si cada empalme pierde 0,1dB; cada conector 0,2dB y la reserva se fija en 0,3dB/km, entonces:

a. Cálculo del factor de atenuación de la fibra:

El margen de potencia máxima o máxima atenuación posible del enlace (L_{max}) será:

$$L_{max}(dB) = 10dBm - (-30dBm) = 30dB$$

El número de empalmes será de:

$$N^{\circ}_{emp} = \frac{d}{d_{carr}} - 1 = \frac{50km}{2,5km/carr} - 1 = 20 - 1 = 19 emp$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \alpha_{max}(dB/km) &= \frac{L_{max} - (N^{\circ}_{emp} \cdot L_{emp} + N^{\circ}_{con} \cdot L_{con} + L_{res} \cdot d)}{d} \\ \alpha_{max}(dB/km) &= \frac{30 - (19 \times 0,1 + 2 \times 0,2 + 0,3 \times 50)}{50} = 0.254 dB/km \end{aligned}$$

Con lo cual se puede elegir una fibra con atenuación menor a 0,25dB/km

b. Cálculo de margen de enlace:

La fibra escogida es de 0,25dB/km, entonces:

$$\begin{aligned} A_{tt}(dB) &= \alpha_{max} \cdot d + N^{\circ}_{emp} \cdot L_{emp} + N^{\circ}_{con} \cdot L_{con} = 0,25 \times 50 + 19 \times 0,1 + 2 \times 0,2 \\ &= 14,8dB \end{aligned}$$

Si $L_{max} = 30dB$, el margen de enlace será:

$$L_{enl}(dB) = L_{max} - A_{tt} = 30 - 14,8 = 15,2dB$$

Y será la atenuación máxima adicional permisible para degradaciones futuras del enlace, dentro del cual se debe considerar la reserva de 15dB.

3. ASPECTOS PRELIMINARES SOBRE LAS REDES

Antes de definir las redes HFC, se hace necesario conocer algunos temas que ayudan a entender el funcionamiento y servicios de esas redes.

3.1. Unidades de medida utilizadas en sistemas HFC

Para sistemas de televisión por cable se han adoptado unidades estándar de medición con las que se debe estar familiarizado.

En los sistemas HFC (tanto en el segmento óptico como en el coaxial) existen dos factores básicos que inciden en la señal:

- Pérdidas por transmisión, introducidas por el cable ó la fibra óptica y los dispositivos pasivos.
- Ganancia de Transmisión, introducida por los amplificadores.

También es necesario determinar los niveles de señal que existen o deberían existir en un punto determinado de la red. Debido a esto, se utilizan tres unidades el dB, el dBmV y el dBm, que se explican a continuación.

Decibel (dB): en los sistemas de HFC, para medir las pérdidas o ganancias de los dispositivos, se ha estandarizado el uso del decibel (dB), definido como el logaritmo de una razón entre dos potencias y está expresado de la siguiente forma:

$$dB = 10 \log \frac{Pot_2}{Pot_1}$$

Donde el valor resultante puede ser negativo o positivo, denotando pérdida o ganancia respectivamente.

Decibel-milivoltio (dBmV): se ha establecido un nivel discreto de referencia que se conoce como decibel-milivoltio (dBmV), que permite expresar el valor de la señal en cualquier punto de la red coaxial. Se describe esta unidad como:

$$0dBmV = 1 \text{ milivoltio medido a través de una resistencia de } 75\Omega$$

El dBmV, toma como referencia 1 milivoltio y se compara el nivel de voltaje en un punto particular del sistema para determinar el nivel de señal específico:

$$dBmV = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Donde P_1 es el nivel de potencia de referencia tomada sobre la resistencia de 75Ω y que corresponde a:

$$P_1 = \frac{(1 \times 10^{-3}V)^2}{75\Omega} = 0,0133w$$

Esto quiere decir que si por ejemplo se quiere expresar una potencia de 500mw en dBmV, se calcularía de la siguiente forma:

$$dBmV = 10 \log \left(\frac{0,5}{0,0133} \right) = 15,74dBmV$$

Se debe tener en cuenta que la impedancia característica del sistema debe ser siempre la misma, para el caso de los sistemas HFC, la impedancia es siempre de 75ohms.

Decibel-miliwatt (dBm): esta unidad se utiliza en sistemas ópticos donde la potencia de la señal está asociada a la potencia del haz de luz expresada en mw. El dBm se expresa cómo:

$$dBm = 10 \log \frac{P_{mW}}{1mW}$$

Donde P_{mw} es la potencia medida y 1mw es la potencia de referencia.

3.2. Multiplexación por longitudes de onda

El creciente aumento de servicios que cursan por las redes y el rápido crecimiento en los tamaños de las redes, han obligado a los MSO (Multiple System Operator) a crecer su infraestructura de red, lo que se traduce en redes más grandes y de más capacidad. La fibra óptica tiene la capacidad de transportar varias señales ópticas independientes simultáneamente, en diferentes longitudes de onda, con una mínima interacción mutua entre las mismas.

Sin lugar a dudas, la tecnología clave para el desarrollo de las redes WDM ha sido el amplificador óptico. Los amplificadores ópticos se encuentran optimizados para operar en una determinada zona del espectro de frecuencia, de acuerdo con el tipo de fibra utilizada en el sistema. En particular, los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) se encuentran optimizados para trabajar en tercera ventana (1550 nm) y presentan un ancho de banda de unos 30 a 40 nm. Suponiendo una separación entre longitudes de onda de 100 GHz (0,8 nm), es posible amplificar simultáneamente hasta 40 canales de 10 Gbps, una capacidad total de 400 Gbps por fibra. El término general para este uso compartido de la fibra es *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) o multiplexación por división de longitud de onda.

El espectro óptico está dividido en bandas, la banda “O”, que va desde los 1260nm hasta los 1360nm; la banda “E”, desde los 1360nm hasta los 1460nm; la banda “S” de 1460nm a 1530nm; la banda “C”, de 1530nm a 1565nm; y la banda “L”, de 1565nm a 1625nm.

La multiplexación por longitud de onda se refiere a cualquier aplicación en la cual múltiples señales ópticas en diferentes longitudes de onda comparten la misma fibra, sin embargo, los tres planes de WDM más utilizados se podrían resumir en WWDM, CWDM y DWDM.

3.2.1. WWDM

Se refiere a una de las primeras aproximaciones a la multiplexación por longitudes de onda. Este plan involucraba únicamente dos longitudes de onda, 1310nm y 1550nm. Sin

embargo, la ITU, en el estándar, considera como WDM (*wide wavelength division multiplexing*) cualquier separación de canales superior a 50nm, es decir entre 1310nm y 1550nm se podrían ubicar 4 longitudes de onda.

3.2.2. CWDM

En este plan, se utilizan comúnmente hasta 8 longitudes de onda, espaciadas una de la otra 20nm y centradas aproximadamente en 1550nm, cubriendo las bandas S, C y L. A este esquema se le conoce como CWDM (*coarse wavelength division multiplexing*) de acuerdo con la clasificación de la ITU en el estándar ITU-T G.671, que clasifica en este plan cualquier espaciamiento de canales entre 8nm y 20nm. Posteriormente, en la recomendación G694-2, aprobada en junio de 2002, se amplió el límite inferior hasta 1270nm, lo que permitió el uso de hasta 18 longitudes de onda.

3.2.3. DWDM

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, ha definido un plan de uso en la banda C, que divide esa banda en intervalos de 100GHz (aproximadamente 0,8nm), cada uno de ellos con una designación de canal específica. Este plan se conoce como DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*).

Las redes DWDM transportan 80 canales OC-48/STM-16 de 2,5 Gbps (un total 200 Gbps), ó 40 canales OC-192/STM-64 de 10 Gbps (un total de 400 Gbps).

Ya se está pensando en UDWDM (Ultra DWDM) con la transmisión de 128 y 256 longitudes de onda transportando cada una de ellas velocidades de 2,5 Gbps, 10 Gbps y hasta 40 Gbps.

El estándar de la ITU define una cuadrícula de longitudes de onda permitidas dentro de la ventana que va desde los 1525 nm hasta los 1565 nm, como se muestra en la figura 6.3.

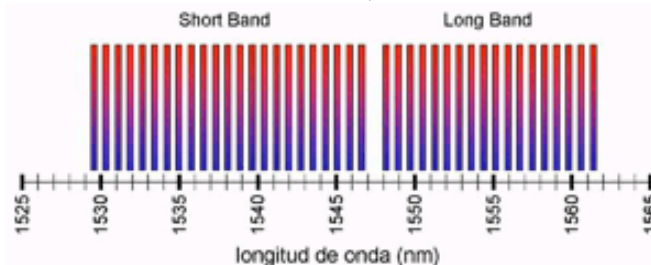


Fig. 6.3. Rejilla estándar de la UIT.

Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM> Descargada abril 2012

Así, el espaciado entre dos de estas longitudes de onda puede ser de 200 GHz (1,6 nm), 100 GHz (0,8 nm), o inclusive menos. La técnica WDM se considera "densa" (DWDM) cuando este espaciado es de 100 GHz o inferior.

3.2.4. Propiedades de la multiplexación por longitudes de onda

- (LARGE & FARMER, 2007) Entre más cerca se encuentren las longitudes de onda, mas difícil y costoso separarlas en *demultiplexores* con un óptimo aislamiento entre puertos.

- Entre más cerca se encuentren las longitudes de onda, debe ser mejor la estabilidad de la frecuencia del transmisor.
- A medida que se incrementa la cantidad de longitudes de onda en el sistema, debe ser menor la potencia por longitud de onda, debido a las propiedades no lineales de propagación de las señales en el vidrio.

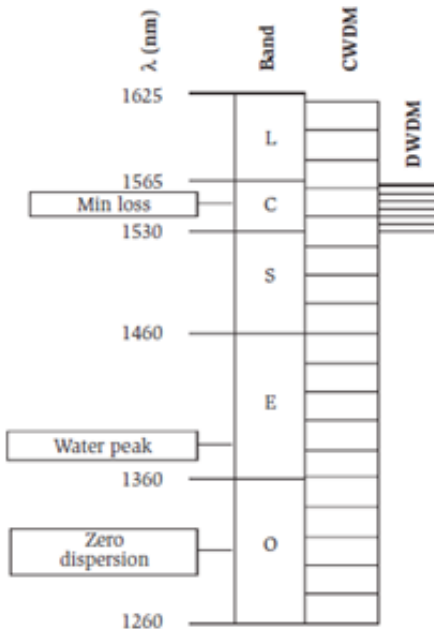


Figura 6.4. Planes de multiplexación por longitudes de onda.

Fuente: LARGE David y FARMER James. Broadband Cable Access Networks: The HFC Plant. Pág. 129
Consultada: abril de 2012

3.3. DOCSIS

(CISCO Corporation, 2008) Se trata de un estándar no comercial que define los requisitos de la interfaz de comunicaciones y operaciones para los datos sobre sistemas de cable, lo que permite añadir transferencias de datos de alta velocidad a un sistema de televisión por cable (CATV) existente. Muchos operadores de televisión por cable lo emplean para proporcionar acceso a Internet sobre una infraestructura HFC (red híbrida de fibra óptica y coaxial).

La especificación DOCSIS ha tenido las versiones, DOCSIS 1.0, DOCSIS 2.0 y DOCSIS 3.0.

El 7 de agosto de 2006 salieron a la luz las especificaciones finales del DOCSIS 3.0, cuya principal novedad reside en el soporte para IPv6 y el "*channel bonding*", que permite utilizar varios canales simultáneamente, tanto de subida como de bajada, por lo que la velocidad podrá sobrepasar los 100 Mbps en ambos sentidos. Los equipos con el nuevo protocolo llegarán a velocidades de descarga de datos de 160 Mbps y subidas a 120 Mbps.

Tabla 6.1. Cuadro comparativo velocidades DOCSIS.

Fuente: DOCSIS *Version Comparision*: https://supportforums.cisco.com/docs/DOC-1239/* Descargada: mayo 2012

Version	DOCSIS			
	Downstream		Upstream	
	Vel Máxima Sincronización	Vel Máxima Utilizable	Vel Máxima Sincronización	Vel Máxima Utilizable
1.x	42.88 Mbps	38 Mbps	10.24 Mbps	9 Mbps
2.0	42.88 Mbps	38 Mbps	30.72 Mbps	27 Mbps
3.0 4channel	+171.52 Mbps	+152 Mbps	+122.88 Mbps	+108 Mbps
3.0 8channel	+343.04 Mbps	+304 Mbps	+122.88 Mbps	+108 Mbps

La versión europea de DOCSIS se denomina EuroDOCSIS. La principal diferencia es que, en Europa, los canales analógicos por cable tienen un ancho de banda de 8 MHz (PAL), mientras que, en Norte América y Colombia, es de 6 MHz (NTSC). Esto se traduce en un mayor ancho de banda disponible para el canal de datos de bajada (desde el punto de vista del usuario, el canal de bajada se utiliza para recibir datos, mientras que el de subida se utiliza para enviarlos). También existen otras variantes de DOCSIS que se emplean en Japón.

En el estándar DOCSIS, los terminales de usuario conocidos como *cable-modems* son controlados por un dispositivo conocido como Cable Modem Terminal System (en adelante: CMTS). El CMTS actúa como un Controlador de Acceso al Medio (en adelante: MAC), que asigna un espacio de tiempo para la comunicación de cada cable módem, debido a que todos estos en un área de servicio determinada, están compartiendo el medio y una misma señal de *narrowcast*. Esta característica permite que los CMTS puedan ser ubicados tanto en la cabecera (headend) como en los hubs de distribución.

DOCSIS, entre otros aspectos técnicos, establece todos los parámetros de comunicación de la señal de datos entre los cable-módems y el CMTS, como, por ejemplo, la frecuencia operativa de las portadoras de bajada y de subida y el tipo de modulación. Estos parámetros son configurables y administrables por el MSO (Multi-System Operator). Así, el operador determina la frecuencia en la que ubicará su portadora de bajada de datos, el ancho de banda y la modulación de la misma. De igual forma, la frecuencia, ancho de banda del canal y modulación que utiliza el cable módem para comunicarse con el CMTS son parámetros configurables por el MSO.

4. REDES HFC

El término HFC se refiere a una red para transmitir señales moduladas en portadoras de RF, donde estas portadoras de RF son a su vez moduladas en portadoras ópticas, para ser transmitidas sobre fibra óptica, que luego serán adaptadas para ser retransmitidas a través de cable coaxial como medio de transmisión. La mayoría de las redes de cable construidas desde principio de los 90 tienen esta arquitectura, y los operadores de cable MSO la utilizan para llevar los servicios a sus abonados.

Las redes de acceso HFC están caracterizadas por su ancho de banda operativo y la estructura física y servicios que pueden cursar sobre la red.

4.1. Ancho de banda operativo

(ADAMS, Open Cable Architecture: The path to compatibility and retail availability in digital television, 2000) El ancho de banda operativo está determinado por los servicios que se pretende ofrecer en la red. Las redes HFC, en su tramo de acceso RF, son bidireccionales sobre el mismo medio, por lo que existe una banda de bajada o *forward*, que corresponde al segmento de ancho de banda utilizado para llevar las señales desde el MSO al suscriptor, y una banda de retorno, la cual se utiliza para transportar las señales desde el suscriptor hasta el MSO. De esta forma, las señales asociadas a los servicios son multiplexadas en el medio utilizando la Modulación por División de Frecuencia (FDM).

El ancho de banda operativo total que se utiliza va desde 5MHz hasta 1002 MHz aproximadamente, que se divide en las bandas de bajada y retorno de manera asimétrica, donde el *upstream* tiene un ancho de banda menor que el *downstream*. Esto se debe a que la carga de señales que van del MSO hasta el suscriptor es mucho mayor que la que va del suscriptor hasta el MSO.

La frecuencia inferior de la banda de *downstream* está determinada por el servicio de video que se lleva al usuario. Tanto en Norte América como en Sur América, el canal de televisión más bajo en frecuencia (canal 2) está entre 53MHz y 60MHz, dependiendo del plan de canales seleccionado, lo que implica que el límite inferior de la banda de *downstream* es generalmente 50MHz.

En la banda de *upstream*, el límite inferior está establecido en 5MHz y el límite superior está determinado por la necesidad de establecer una banda de guarda entre las bandas de *upstream* y *downstream*. Actualmente, en los sistemas de cable, el límite superior de la banda de *upstream* está establecido en 40MHz aproximadamente. En resumen, la banda de *upstream* se encuentra entre 5MHz y 40MHz, la banda de guarda de 40MHz a 50MHz y la banda de *downstream* desde 50MHz en adelante (Estándar ITU-T J-222-1 del 2007 y ANSI/SCTE 22-1 2002R2007 o DOCSIS 1.0). Este tipo de configuración se conoce como *low-split*, y se puede ver más claramente en la Figura 6.5.

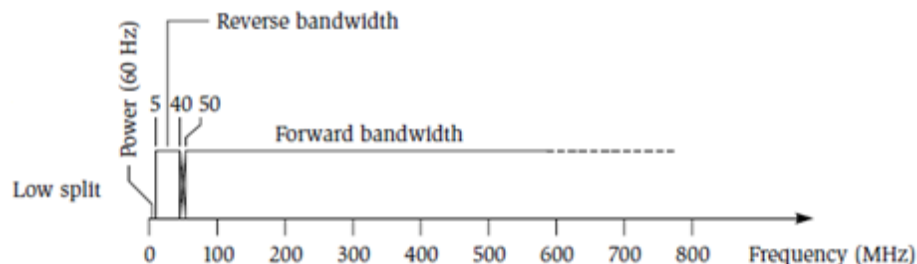


Figura 6.5. Distribución típica de bandas de frecuencia en un sistema HFC
Fuente: ADAMS. Modern Cable Television Technology. Pág. 705. Consultada: abril de 2012

4.2. Arquitectura y servicios que pueden cursar

(ADAMS, Open Cable Architecture: The path to compatibility and retail availability in digital television, 2000) La mayoría de las redes HFC presentan las siguientes partes principales:

- *Headend* (cabecera): donde se conectan los servicios para los usuarios y que entregan unos proveedores.
- *Red óptica troncal de transporte*: segmento de red que conecta el Headend con los hubs de distribución.
- *Red óptica de acceso*: segmento que interconecta los hubs de distribución con los nodos ópticos.
- *Red de distribución*: segmento que lleva la señal desde el nodo óptico hasta los suscriptores

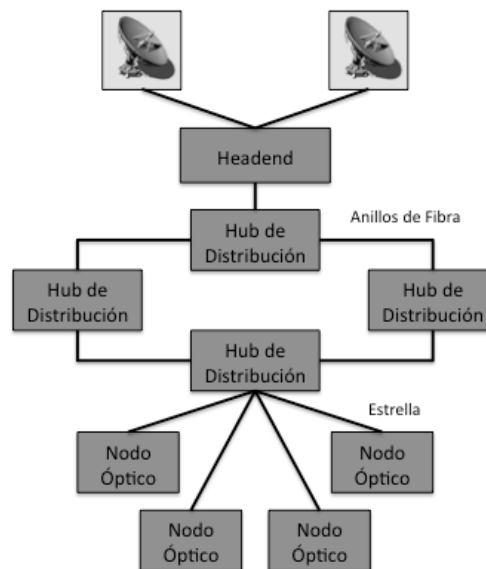


Figura 6.6. Topología de Red HFC

Fuente: Los autores

Los tres primeros segmentos utilizan como medio de transporte fibra óptica y el cuarto segmento utiliza cable coaxial. La figura 6.6 muestra estos niveles y sus componentes.

4.3. Headend

Es el punto central de cualquier MSO. En este sitio se concentran todos los elementos mediante los cuales prestará sus servicios el MSO. Estos servicios, de acuerdo con su naturaleza, son transmitidos sobre la red de HFC en tres tipos principales de señales:

- Señales Analógicas de Video
- Señales Digitales de Video
- Señales de Datos (Acceso a Internet y VoIP)

4.3.1. Señales Analógicas de Video

Las señales analógicas que se introducen en el sistema son las señales de video, sean satelitales, irradiadas o de cualquier otra índole, que se reciben de sus respectivas fuentes.

Existen varios estándares y sistemas de televisión, que determinan los parámetros técnicos de la transmisión de señales de video, como se aprecian en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Estándares y sistemas de video analógico

Fuente: Los autores

<i>Estándar</i>	<i>Sistema</i>
B	PAL, SECAM
D	SECAM
G	PAL, SECAM
H	PAL, SECAM
I	PAL
K	SECAM
K	1 SECAM
L	SECAM
M	NTSC, PAL
N	PAL

Estos estándares y sistemas son definidos por cada país en sus reglamentaciones y son determinantes para que los MSO ofrezcan el servicio de televisión por cable, así:

- El sistema NTSC (National Television Standards Committee), es utilizado en Estados Unidos y América Latina
- PAL (Phase Alternating Line), es utilizado en la mayoría de países europeos
- SECAM (Séquentielle à Mémoire), utilizado en Francia

NTSC es el sistema de televisión analógica que se estableció en los Estados Unidos y que fue adoptado por Norte América, algunos países de Centro y Sur América y algunas regiones de Asia.

La figura 6.7 muestra la estructura de un canal en el sistema NTSC. En este sistema, los canales analógicos son modulados en intervalos de 6MHz.

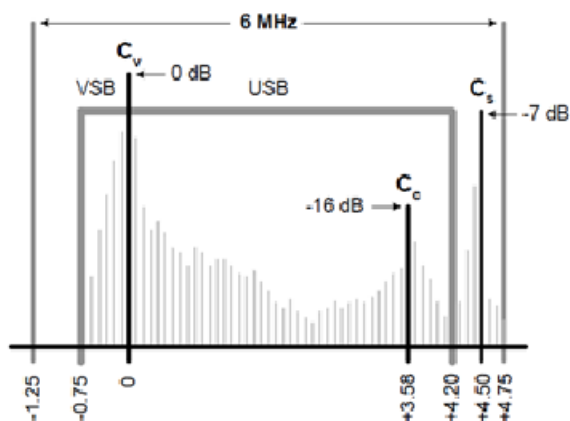


Figura 6.7. Estructura de un canal de video analógico

Fuente: ADAMS. Modern Cable Television Technology Consultado: agosto 2012

Las siglas utilizadas en la figura corresponden a:

- C_v: la portadora de video, modulada en AM. La frecuencia central de esta portadora se ubica 1.25MHz por encima del límite inferior del canal.
- C_c: la portadora de croma, también modulada en AM, la cual se ubica 3.58MHz arriba de la frecuencia central de la portadora de video.
- C_s: la portadora de audio, modulada en FM, la cual se ubica 4.50MHz arriba de la portadora de video.

Estos componentes de cada canal están limitados en intervalos de 6MHz.

Una vez modulado el canal en su respectiva frecuencia, se combina con los demás canales del sistema, para obtener la combinatoria de señales de video analógico. Esta combinatoria y el estándar elegido por el MSO, para realizar la modulación del video analógico, determinan el límite inferior de la banda de bajada.

4.3.2. Señales digitales de video

Las señales de video digital se modulan en portadoras analógicas mediante la utilización de Modulación por Amplitud de Cuadratura, 64QAM y 256QAM, en canales de 6 MHz a 8 MHz de ancho de banda, dependiendo del estándar adoptado por el operador (el uso de cualquiera de estas modulaciones está determinado por las tasas de transferencia que da cada una; una modulación 256QAM ofrecerá una mayor tasa de transferencia que una modulación 64QAM).

En un sistema NTSC, el estándar determina que el ancho de banda operativo de un canal es de 6MHz, por lo cual un MSO que opere bajo este estándar deberá modular sus señales digitales en anchos de banda de 6MHz. De igual forma, en sistemas como PAL y SECAM, el ancho de banda del canal es 8MHz, por lo que el ancho de banda de los canales digitales cumple con la misma norma.

4.3.3. Señales de datos (acceso a Internet y voz sobre IP)

El Headend es el punto de concentración de los datos. Es en esta ubicación donde el MSO tiene su punto de acceso al proveedor de servicios de Internet (en adelante: ISP), en el mismo Headend se concentran los equipos de control de los suscriptores y donde se realiza la conexión a la Red Pública de Telefonía Conmutada (PSTN), para aquellos operadores que ofrecen servicios de telefonía sobre la red de datos.

Los MSO se vieron altamente favorecidos en el año de 1997 con la aparición de DOCSIS, porque sacaron provecho del ancho de banda disponible para ofrecer servicios de datos sobre la infraestructura de red existente. En esa especificación, el MSO utiliza la estructura de fibra óptica y cable coaxial ya instalado para proveer servicios de datos a los suscriptores.

4.4. Características de los equipos de la red óptica

La red óptica de transporte es el primer segmento de la red HFC y está ubicada entre el Headend y los hubs de distribución. Sin embargo, antes de describir la arquitectura del segmento óptico de una red HFC, se debe caracterizar la tecnología utilizada para la

transmisión óptica de las señales en este segmento. Existen cinco elementos fundamentales en el segmento óptico de una red HFC:

- Transmisor óptico lineal.
- Amplificador óptico.
- Receptor óptico.
- Fibra óptica.
- Pasivos ópticos.

4.4.1. Transmisores ópticos lineales

(ADAMS, Modern Television Technology, 2000) La tecnología más utilizada en transmisión óptica consiste en una modulación del tipo *on-off* (este tipo de modulación digital, también se conoce como OOK (on-off keying) o ASK (Amplitude shift keying), en la cual una señal binaria de alta velocidad se convierte en un pulso de luz, donde el detector al final del segmento de transmisión sólo debe detectar la presencia o ausencia de luz para reproducir la señal original.

En contraste, en un sistema HFC donde se utiliza FDM, la transmisión sobre el medio óptico es un poco más compleja. En aplicaciones de este tipo la sumatoria de las señales generadas en el Headend producen una forma de onda compuesta, con componentes que van desde los 54MHz hasta los 1000MHz.

En el transmisor óptico lineal, esta señal compuesta controla la intensidad de la luz de una manera proporcional, teniendo en cuenta el nivel de corriente o voltaje que ingresa al mismo. Si bien existen varias tecnologías para transmisión óptica, sólo algunas cumplen con los dos requisitos básicos para transmisión de señales de este tipo: nivel necesario de salida y una relación lineal entre la corriente o voltaje de entrada y el nivel óptico de salida (este parámetro se conoce como índice de modulación óptica -OMI- por sus siglas en inglés *Optical Modulation Index*).

En redes HFC se utilizan generalmente dos tecnologías de transmisión:

- Láser semiconductor Fabry-Perot (también conocidos como FP)
- Láser semiconductor Distributed Feedback (en adelante: DFB) Siendo éste el más utilizado.

En los diodos de láser de modulación directa DFB, al igual que en los diodos FP, la luz es reflejada en dos espejos ubicados a ambos extremos de un material semiconductor. El material y los dos espejos forman una cavidad resonante que determina aproximadamente la longitud de onda de la luz producida.

El efecto producido es igual a un circuito resonante LC, donde la energía circulante es mucho mayor que la de la carga. Uno de los espejos es parcialmente reflectivo, permitiendo la fuga de una porción de la luz hacia la fibra. En los láseres FP, el espacio entre los espejos genera una cámara de resonancia lo suficientemente larga, que la oscilación puede presentarse en diferentes frecuencias (o modos longitudinales), lo que se interpreta como ruido en el detector.

Para evitar esta situación, el láser del tipo DFB utiliza una rejilla a lo largo de la cavidad resonante, que restringe la oscilación a un solo modo. Es debido a esta característica que se ha empleado más este tipo de tecnología de transmisión en las redes de HFC.

La figura 6.8, muestra una curva típica de un láser DFB. Representa la relación de potencia de salida contra la corriente de entrada, teniendo en cuenta que la potencia es proporcional a la cantidad de fotones que hay en la cavidad. Como se puede ver en la figura, para valores por debajo de la corriente umbral (I_{TH}), la potencia de salida es prácticamente nula. Al aplicar una corriente igual o superior a la corriente umbral, la potencia aumenta linealmente con la corriente, hasta llegar a la zona de saturación (P_{max}) en la que el láser ya no produce más luz aunque se aumente la corriente. Si se exige al láser trabajar mucho tiempo en esta zona el láser se quemaría por alta temperatura.

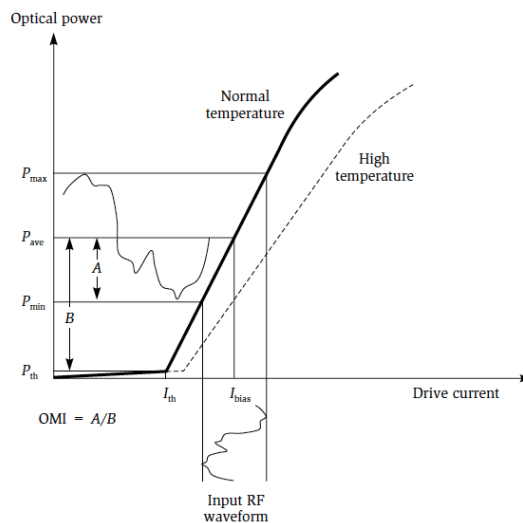


Figura 6.8. Función de transferencia del láser semiconductor

Fuente: ADAMS. Modern Cable Television Technologies. Pág. 535 Consultado: agosto 2012

4.4.2. Amplificadores ópticos

La función de este dispositivo es aumentar el nivel de la amplitud de la luz modulada, sin tener que hacer una conversión de señal óptica a señal eléctrica y amplificar la misma señal en su estado de RF. Los amplificadores más comunes son los amplificadores dopados con erbio ó *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA).

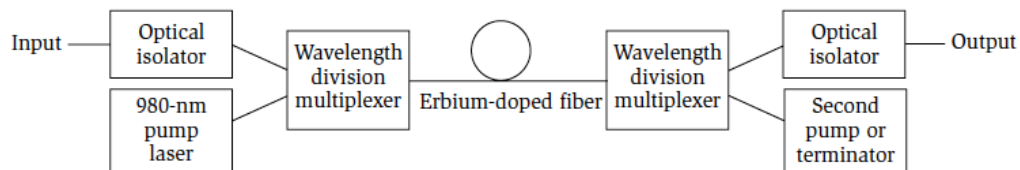


Figura 6.9. Esquema básico de EDFA

Fuente: ADAMS. Modern Cable Television Technologies. Pág. 541 Consultado: agosto 2012

En estos amplificadores la señal de entrada es combinada con una señal de alta potencia no modulada a 980nm o a 1480nm; esta señal se conoce como señal de bombeo. Las dos señales (la de bombeo y la portadora) son enviadas a través de una fibra que ha sido dopada con erbio (es decir, se le ha adicionado una cantidad específica de erbio). La señal de bombeo causa que los electrones de los átomos de erbio salten a una banda de energía más alta y, cuando estos vuelven a su estado normal, la diferencia en energía impulsa la señal a 1550nm para la banda C o a 1625nm para la banda L.

4.4.3. Receptor óptico

El receptor óptico se puede entender como el dispositivo que recibe las señales moduladas en el segmento óptico y las convierte en señales eléctricas de RF. La señal lumínica de entrada incide en el área activa del fotodiodo, que tiene una curva de transferencia muy precisa, donde la potencia de la corriente de salida es proporcional a la señal óptica de entrada. La respuesta de estos dispositivos suele estar entre $0,8 \frac{mA}{mV}$ y $1,0 \frac{mA}{mV}$.

4.4.4. Fibra óptica

La fibra óptica es el medio en el cual se transportan las señales en el segmento óptico de la red HFC. Este medio se comporta igual que una guía de onda, donde la luz que viaja se propaga como una onda dentro del material. El tipo de fibra óptica más utilizado para aplicaciones de este tipo es la fibra Monomodo, debido a los bajos niveles de atenuación por kilómetro que presenta.

La pérdida total para los cables que comercialmente se utilizan en aplicaciones de tipo HFC es de 0.35dB/km a 1310nm, y de 0,25dB/km a 1550nm. La figura 6.10 muestra la atenuación, en dB/km vs la longitud de onda de la luz transmitida.

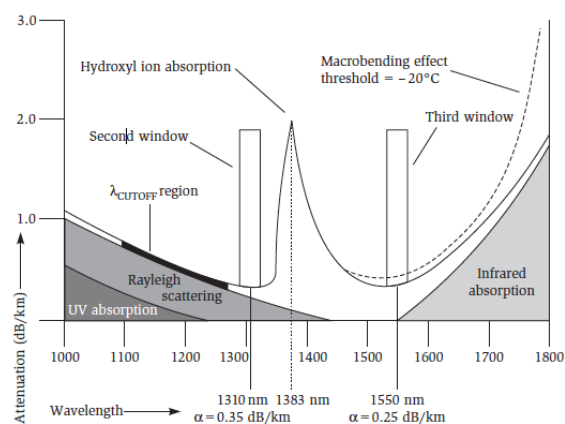


Figura 6.10. Atenuación debido a diferentes características de la fibra óptica

Fuente: LARGE David y FARMER James. Broadband Cable Access Networks: The HFC Plant. Pág. 92

Consultado: agosto 2012

4.4.5. Pasivos ópticos

Los pasivos ópticos son utilizados para dividir o combinar la señal óptica, de acuerdo con las necesidades de distribución de la señal. Como su nombre lo indica, los pasivos ópticos no requieren de ningún tipo de alimentación eléctrica para su operación.

En particular, existen diferentes pasivos ópticos utilizados en el diseño de redes, siendo los más importantes y utilizados:

- Conectores
- Divisores (splitters) y acopladores
- Multiplexores de División por Longitud de Onda
- Atenuadores

Los divisores de señal (splitters) están diseñados para dividir la señal en dos o más caminos. Estos pueden ser balanceados, donde las salidas tienen la misma pérdida de inserción o pueden ser desbalanceados, donde una de las salidas puede perder menos señal que la otra. Un arreglo de varios divisores se usa comúnmente cuando se necesita dividir la señal en más de 2 caminos.

Los multiplexores de División por Longitud de Onda permiten separar o combinar las señales de acuerdo con la longitud de onda asociada. Se utilizan en aplicaciones del tipo WDM que se explican más adelante en esta sección.

4.5. Red óptica troncal de transporte

En esta etapa, las señales combinadas en la cabecera son transportadas sobre la fibra óptica hasta los hubs secundarios de distribución. Generalmente, para la transmisión de las señales en este tramo, se utilizan transmisores ópticos que operan en longitudes de onda de 1550nm (1.5 μ m banda C). Esto sucede, principalmente, porque las distancias asociadas al segmento troncal de transporte deben abarcar áreas metropolitanas de gran extensión, donde se requiere utilizar una banda de transmisión con poca pérdida de atenuación por kilómetro. La figura 6.11 muestra las bandas de transmisión de fibra óptica.

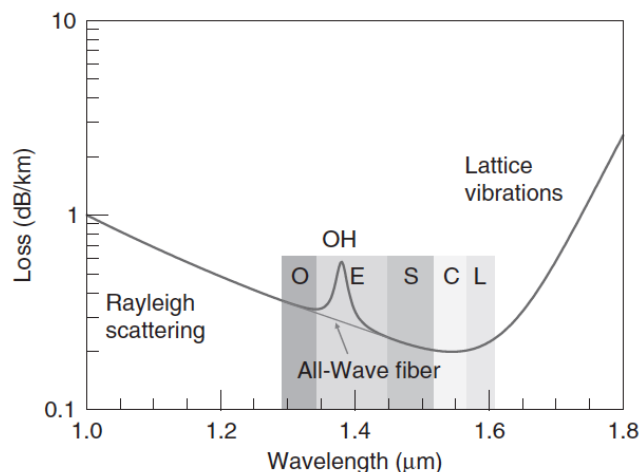


Figura 6.11. Bandas de transmisión fibra óptica

Fuente: LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and Practice. Pág. 25 Consultado: agosto 2012

En algunos casos, el uso de amplificadores ópticos EDFA es necesario para compensar las pérdidas por atenuación. Debido a la importancia de este tramo, los MSO suelen tener configuraciones redundantes, donde se tiene respaldo de equipos y de ruta.

4.6. Red óptica de acceso

La red óptica de acceso es el segmento que interconecta los hub de distribución y los nodos ópticos. Se entiende por nodo óptico aquel equipo que recibe las señales moduladas linealmente en el segmento óptico y las convierte nuevamente a RF para ser distribuidas en el tramo coaxial de la red (ADAMS, Modern Television Technology, 2000). A diferencia de la red de transporte, en este segmento se utilizan longitudes de onda en la banda O (1310 nm), para transportar las señales.

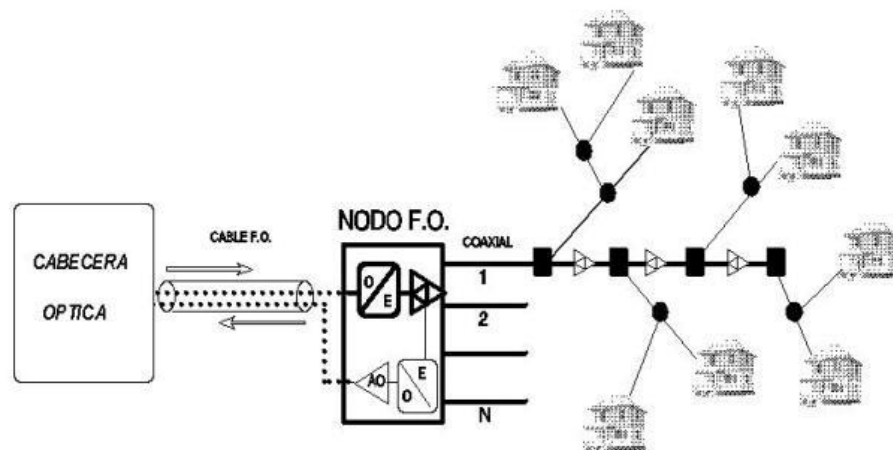


Figura 6.12. Red de acceso para HFC

Fuente: Sergio Márquez. <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/cyberlaw/actual/9/con01-09-01.htm>

Descargada: septiembre 2012

4.7. Red de distribución.

La red de distribución corresponde al segmento entre el nodo óptico y el suscriptor final. En este segmento la naturaleza de las señales vuelve a ser RF y las señales se propagan utilizando como medio cable coaxial, con una impedancia característica de 75Ω . En este segmento intervienen los siguientes componentes:

- Nodo óptico
- Amplificadores de RF

4.7.1. El nodo óptico

Es el dispositivo que recibe las señales ópticas de la red de acceso y las convierte en señales eléctricas para ser distribuidas sobre el cable coaxial. De igual forma, el nodo óptico está equipado con un transmisor óptico de retorno que recibe las señales de subida desde los suscriptores y las envía sobre el segmento óptico hacia la cabecera de la red (Headend).

Anteriormente en redes por fibra óptica, el dispositivo que recibía las señales de la cabecera y las convertía en señales eléctricas era conocido simplemente como *receptor*. Cuando aparecieron los servicios bidireccionales, un transmisor óptico de retorno fue

adicionado a este dispositivo, por lo que el término *receptor* llegó a ser confuso. Desde entonces se conoce a este dispositivo como *nodo óptico*.

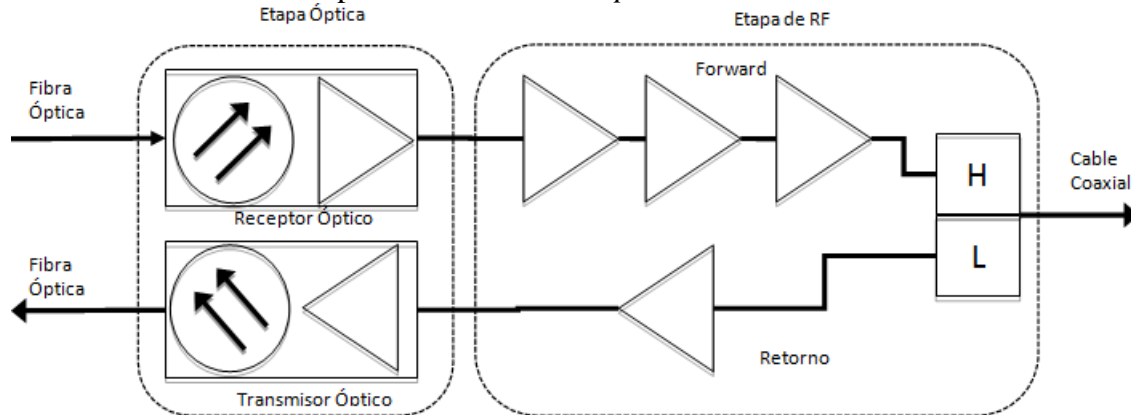


Figura 6.13. Esquema de un nodo óptico

Fuente: LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and Practice. Consultado: octubre 2012

4.7.2. Los amplificadores de RF

Para poder compensar las pérdidas de la señal cuando ésta se transmite por el cable coaxial, es necesaria la utilización de amplificadores de RF en la red de distribución. Generalmente el fabricante del dispositivo especifica una ganancia operacional, expresada en dB, la cual permite determinar el nivel de salida del amplificador (en dBmV), conociendo el nivel de entrada en RF (dBmV).

Cuando se diseña el sistema de HFC y en especial la red de distribución, se debe tener en cuenta que la amplificación de la señal genera distorsión en la misma, por lo cual se debe tener especial cuidado en el diseño de este tramo.

Para realizar el diseño del segmento de RF, se deben tener en cuenta tres características de los amplificadores:

- Ruido aleatorio de banda ancha (*broadband random noise*)
- Ruido del amplificador (*amplifier noise*) y
- Distorsión.

4.8. Áreas de servicio.

El área de servicio se puede definir como un segmento de la red HFC de un tamaño determinado expresado en *casas pasadas* (*home passed*), que serán atendidas o servidas mediante el uso de un grupo único de señales. Dado que el uso del ancho de banda de RF se comparte entre todos los usuarios en el área de servicio, el tamaño del área de servicio determina el máximo ancho de banda por casa pasada.

DOCSIS establece las velocidades de transferencia de datos de subida y de bajada, relacionadas con la versión de la especificación que se esté utilizando. Así, un área de servicio estará alimentada por un único grupo de señales DOCSIS y todos los usuarios en el área de servicio compartirán el ancho de banda que ofrece esta portadora.

4.8.1. Cálculo de capacidad del servicio de datos DOCSIS en un área de servicio

Para poder calcular la capacidad del servicio de datos en un área de servicio, es necesario conocer los siguientes conceptos:

- **Casa pasada (*home passed*):** El término se refiere a una unidad residencial dentro de un área determinada donde el operador ofrece servicios.
- **Penetración del Servicio:** la cantidad de usuarios con servicio, sobre el número de casas pasadas, por ejemplo, un área de servicio de 500 casas pasadas, donde existen 50 clientes con servicio, tendrá una penetración del servicio del 10%.
- **Concurrencia:** es la relación de usuarios que se estima estén conectados en un momento determinado. Así, una concurrencia de 10:1, significa que de 10 usuarios, 1 estará conectado.

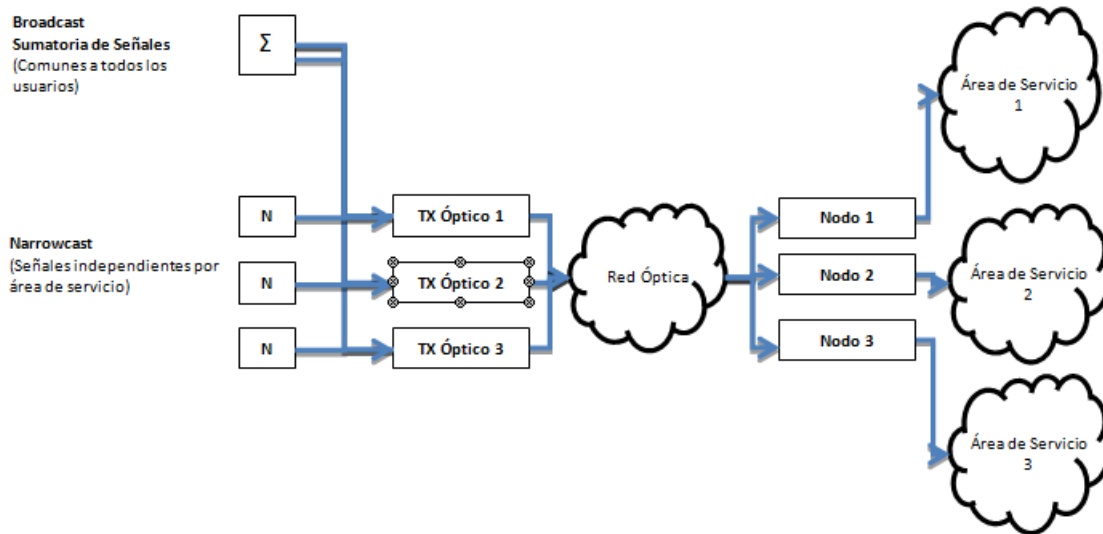


Figura 6.14. Distribución de varias señales de *narrowcast* a sus correspondientes áreas de servicio

Fuente: Los autores

Ejemplo. Considérese un área de servicio de 500 casas pasadas, que será alimentada con servicios de video y datos con una velocidad en el canal de bajada de 38 Mbps (especificación DOCSIS 2.0). Presenta una penetración en el servicio de datos del 10%, y una concurrencia de 10:1

Entonces:

- Hay 50 usuarios con servicio disponible
- De esos 50 usuarios, solo 5 están conectados
- Por lo anterior, la velocidad de bajada disponible para cada usuario conectado será de 7,6 Mbps.

De esta forma, el MSO (Operador Multi-Servicio) está en capacidad de determinar, aproximadamente, la capacidad de servicios que puede ofrecer en un área de servicio o, en su defecto, el tamaño del área de servicio que le permita ofrecer unas velocidades de datos determinadas.

Si en el ejemplo anterior, el MSO quisiera ofrecer velocidades de datos superiores a 8 Mbps, deberá considerar áreas de servicio más pequeñas o versiones superiores de DOCSIS que ofrezcan mayor capacidad de datos en el canal de bajada.

4.8.2. Consideraciones del área de servicio

Una de las principales consideraciones que se debe tener en un área de servicio es la densidad de hogares pasados con respecto al tamaño del área misma. Si bien no existe ninguna normatividad en la industria, se han establecido algunos indicadores *de facto* que permiten al MSO determinar esta densidad de casas pasadas. El más utilizado es el que relaciona la cantidad de casas pasadas con los kilómetros de cable tendido (casas pasadas/km de cable). La densidad está relacionada directamente con el tipo de zona que se debe atender con servicios, por ejemplo, una zona urbana de edificios tendrá una densidad mayor que una zona urbana de casas y ésta, a su vez, tendrá una mayor densidad que una zona rural, donde las casas se encuentran separadas por largas extensiones.

4.9. Diseño de red HFC

Para el diseño de una red HFC, se deben considerar los cálculos de potencia y desempeño asociados a los segmentos de fibra óptica y cable coaxial. Para realizar el proceso de diseño, se deben conocer las características de los equipos que componen los tramos ópticos y de RF y se deben seguir los procedimientos descritos en esta sección.

4.10. Diseño del enlace óptico

Los cálculos de potencia están directamente relacionados con la longitud del enlace, así a mayor distancia, se necesitará una mayor potencia para poder excitar el receptor óptico en sus rangos operativos. Generalmente, el fabricante especifica los niveles de llegada a los diferentes dispositivos involucrados en el enlace óptico (EDFA, receptor, nodo, etc), y estos son el punto de partida para realizar los cálculos de señal.

Los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de realizar el cálculo de potencia en el enlace óptico son:

- **Longitud de onda operativa:** la longitud de onda del enlace determina las pérdidas del sistema. Un sistema a 1310nm opera a una frecuencia superior que otro a 1550nm, por lo cual para el primer sistema la atenuación será mucho mayor que la atenuación del segundo sistema.
- **Atenuación de la fibra:** este parámetro debe ser dado por el fabricante, y especifica la pérdida expresada en dB/km de un determinado cable de fibra óptica.
- **Número de longitudes de onda:** cuando se realiza el diseño de un sistema WDM, es importante conocer la potencia óptica compuesta, que está expresada como:

$$P_{COM} = P_{\lambda} + 10\log(N)$$

Donde:

P_{COM} : Potencia óptica compuesta expresada en dBm.

P_{λ} : Potencia por longitud de onda, expresada en dBm.

N : Número de longitudes de onda.

Esta fórmula aplica cuando todas las longitudes de onda del sistema tienen la misma potencia y están dadas en dBm. Cuando difieren en potencia, estas deben convertirse en mW, sumarse y luego volver a convertirse en dBm.

- **Potencia máxima de entrada a la fibra:** el nivel de potencia de luz transmitido por un cable de fibra óptica, debe tener un valor tal para que en el extremo final de la fibra, no supere una potencia umbral. Más allá de ese nivel umbral la potencia recibida permanece relativamente constante, mientras que la energía reflejada hacia la fuente se incrementa dramáticamente. Este fenómeno es conocido como dispersión estimulada de Brillouin o SBS por su sigla en inglés (Stimulated Brillouin Scattering).

SBS es una función con base en la geometría, atenuación y longitud de la fibra, así como de la potencia transmitida. La ecuación básica para el nivel umbral SBS de una única longitud de onda, está expresada así (LARGE & FARMER, 2007):

$$P_{SBS} = \frac{21A\alpha}{\gamma(1 - e^{-\alpha L})}$$

Donde:

P_{SBS} : el nivel umbral de SBS expresado en mW

A: Área del núcleo de la fibra, típicamente $80 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para fibras NDS, y $50 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para fibras DS

γ : Coeficiente de ganancia de Brillouin, típicamente $2.3 \times 10^{-14} \text{ m/mW}$

α : Atenuación de la fibra expresada en dB/km

L: Longitud de la fibra en metros.

4.11. Cálculos de desempeño del enlace óptico

Las características del transmisor, la fibra de interconexión, el receptor y los amplificadores (en caso de que existan en el sistema) determinan el desempeño del enlace. En particular, la interacción entre señales y el medio de transmisión es mucho más compleja en enlaces ópticos que en enlaces coaxiales.

La contribución total de C/N (relación portadora a ruido) del enlace óptico está determinada por las contribuciones individuales de cada componente del sistema, y se clasifican en:

- C/N_{RIN} : *relative intensity noise* (intensidad relativa de ruido) por canal. Esta contribución está asociada al transmisor.
- C/N_{EDFA} : contribución de ruido asociada al EDFA.
- C/N_{SHOT} : *Shot noise* (ruido de disparo) a la entrada del detector óptico.
- $C/N_{Postamplificador}$: Ruido térmico generado por el amplificador que se encuentra luego del detector óptico.

El C/N_{RIN} es debido a que la luz emitida por el diodo láser presenta fluctuaciones aleatorias en amplitud. Este fenómeno se conoce como Intensidad Relativa de Ruido (*Relative Intensity Noise* ó RIN) y es generalmente expresado en términos de la potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz, comparado con el promedio del nivel de potencia óptica. Un valor típico de RIN para el láser DFB (Distributed FeedBack Laser) es -160dB/Hz.

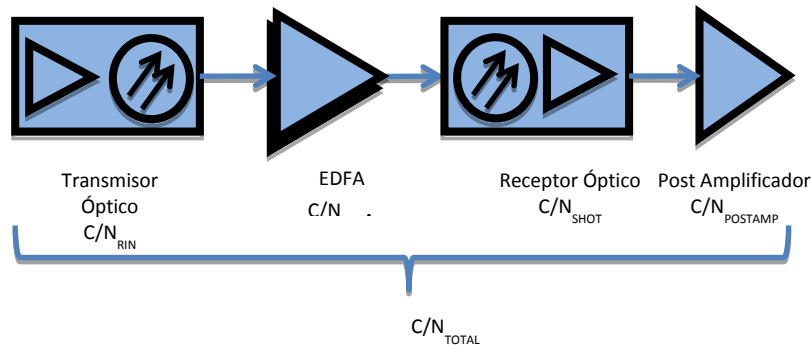


Figura 6.15. Contribuciones independientes al C/N en un enlace óptico por componente
Fuente: SICARD, Sergio Andrés. Universidad Piloto de Colombia. Biblioteca. Octubre de 2010. Pag. 23

Para poder evaluar el efecto de una fuente con RIN en el C/N del enlace, es necesario compararlo con la modulación que sufre la fuente de luz por cada portadora. Aparece así otro concepto de importancia en los transmisores ópticos analógicos, el *índice de modulación óptica* (OMI: Optical Modulation Index), que mide la diferencia en dB entre la amplitud de la portadora y la amplitud de primera banda lateral resultante.

Se puede hablar de la modulación total del transmisor, expresado como la sumatoria de todas las portadoras de RF o de la modulación de la fuente de luz por cada portadora. Si bien es necesario que el OMI total no exceda el 100%, generalmente los cálculos de desempeño se hacen con respecto a una sola portadora de RF. El pico de modulación o porcentaje de modulación de la portadora óptica causado por una subportadora de RF de video, es abreviado como m_i , que es un factor importante cuando se calcula el desempeño de ruido en un enlace óptico.

Considerando lo anterior, se puede calcular la contribución del transmisor al C/N del enlace óptico en función del RIN, m_i , y el ancho de banda del canal mediante la siguiente fórmula:

$$C / N_{RIN} = -RIN - 10 \log(BW) + 20 \log\left(\frac{m_i}{\sqrt{2}}\right)$$

Donde:

C/N_{RIN} : contribución de la fuente de ruido al C/N de la señal, expresado en dB.

RIN : el nivel de ruido de la fuente, relativo a la potencia de luz sin modular, expresado en dB/Hz.

BW : Ancho de banda del canal que está siendo evaluado, expresado en Hz.

m_i : El pico de modulación de la portadora óptica o porcentaje de modulación causado por una subportadora de RF. Dado en decimal (5% = 0,05).

Ejemplo. Una fuente óptica tiene un RIN de -160 dB/Hz y un OMI por canal del 3% (típico en sistemas de televisión por cable con una carga de 77 canales analógicos aproximadamente).

La medición de desempeño se realizará sobre un canal de video NTSC (analógico), cuya intensidad de ruido esta medida sobre un ancho de banda de 4MHz.

Por lo tanto la contribución de la fuente al C/N del enlace óptico debido al RIN es:

$$C / N_{RIN} = -160dB / Hz - 10 \log(4'000.000Hz) + 20 \log\left(\frac{0.03}{\sqrt{2}}\right) = 60.5dB$$

Por otro lado, C/N_{EDFA} es la contribución al C/N del EDFA al enlace óptico y está dada por la siguiente fórmula:

$$C/N_{EDFA} = 86,2 + P_i + 10 \log(m_i) - NF_{EDFA}$$

Donde:

C/N_{EDFA} : la contribución del EDFA al C/N del enlace, medido en un ancho de banda de 4Mhz.

P_i : Potencia óptica de entrada al EDFA en dBm.

m_i : índice de modulación óptica por subportadora (de cada canal de TV)

NF_{EDFA} : figura de ruido del amplificador, este parámetro es generalmente dado por el fabricante.

Ejemplo. Si se considera el mismo valor de m_i del ejemplo anterior y asumiendo una potencia óptica de entrada de 5dBm a un EDFA, el cual tiene una figura de ruido de 5.9dB, la contribución de ruido sobre el sistema dado por el EDFA, será de:

$$C / N_{EDFA} = 86.2 + 5dBm + 10 \log(0.03) - 5.9dB = 70.07dB$$

Ahora bien, C/N_{SHOT} es un tipo de ruido, conocido como ruido de disparo o *shot noise*, que se debe a la variación estadística de la distribución de llegada de los fotones al detector, y está expresado de la siguiente forma:

$$C/N_{SHOT} = P_r + 20 \log\left(\frac{m_i}{\sqrt{2}}\right) + 10 \log(R) - 10 \log(BW) + 154.94$$

Donde:

C/N_{SHOT} : El nivel de C/N debido a ruido del tipo *shot* en el detector óptico, expresado en dB.

P_r : el nivel de potencia óptica en el receptor, expresado en dBm.

m_i : OMI del canal.

R : es la responsividad o respuesta del diodo detector (cantidad de corriente que entrega, versus cantidad de luz que le entra) dado en amperios por vatio de luz [A/w].

BW : ancho de banda del canal en Hz.

Ejemplo. Para un OMI del 3% y una respuesta del diodo de 0.9 A/w, con un nivel de llegada al detector óptico de 0 dBm, y un ancho de banda del canal de 4MHz; la contribución al C/N del enlace, por efecto del ruido de *shot* será:

$$C / N_{SHOT} = 0dBm + 20 \log\left(\frac{0.03}{\sqrt{2}}\right) + 10 \log\left(0.9 \frac{mA}{mW}\right) - 10 \log(4'000.000Hz) + 154.94 = 54.99dB$$

Por último, $C/N_{\text{Postamplificador}}$ es la contribución del post amplificador que puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$C/N_{\text{POSTAMPLIFICADOR}} = 2P_r + 20 \log\left(\frac{m_i}{\sqrt{2}}\right) + 20 \log(R) - 10 \log(BW) - 20 \log(I_r) + 180$$

Donde:

P_r : potencia de entrada al receptor óptico, expresado en dBm.

m_i : OMI del canal evaluado.

R : Responsividad del fotodiodo en amperios por vatio (ó mA/mw)

I_r : densidad equivalente de corriente de entrada del ruido en el post amplificador, expresada en pA/\sqrt{Hz} .

180: factor (constante) resultado de convertir la potencia de entrada de vatios a milivatios, y el ruido del amplificador de amperios a picoamperios.

Ejemplo. El C/N de un post amplificador, considerando los datos de los ejemplos anteriores es de:

$$C/N = 2 \times 0.1 + 20 \log\left(\frac{0.001}{\sqrt{2}}\right) + 20 \log(1) - 10 \log(4 \times 10^6) - 20 \log(10^{-12}) + 180$$

Así, el cálculo total de desempeño del enlace óptico, corresponde a la sumatoria de las contribuciones independientes de cada uno de los componentes del mismo y se puede expresar de la siguiente forma:

$$C/N_{\text{TOTAL}} = -10 \log \left[10^{-\frac{C/N_R}{10}} + 10^{-\frac{C/N_F}{10}} + 10^{-\frac{C/N_S}{10}} + 10^{-\frac{C/N_P}{10}} \right]$$

$$C/N_{\text{TOTAL}} = -10 \log \left[10^{-\left(\frac{6.05 \text{ dB}}{10}\right)} + 10^{-\left(\frac{7.00 \text{ dB}}{10}\right)} + 10^{-\left(\frac{5.49 \text{ dB}}{10}\right)} + 10^{-\left(\frac{6.26 \text{ dB}}{10}\right)} \right]$$

$$C/N_{\text{TOTAL}} = 53.81 \text{ dB}$$

Como se puede apreciar en los cálculos asociados a la relación C/N, se utiliza un ancho de banda de 4MHz, a pesar de que se especificó anteriormente un ancho de banda por canal de 6MHz en el sistema. Esto se debe a que técnicamente, según el Código de Regulaciones Federales C.F.R de la FCC, el ruido es definido como aquel que ocupa la banda entre 1.25MHz y 5.25MHz sobre el límite inferior del canal.

4.12. Cálculos de desempeño de la etapa coaxial

Las contribuciones de C/N en la etapa coaxial están determinadas por los amplificadores de RF en la misma. Para señales de televisión analógicas, como las del tipo NTSC, el nivel de potencia de la portadora de video es el máximo nivel de la amplitud alcanzada por la señal modulada. Para poder calcular cuál será la contribución de un amplificador al C/N, se debe conocer el nivel de entrada, expresado en dBmV y la figura de ruido del mismo (dada por el fabricante) expresada en dB, y se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$C/N_{\text{AMP}} = P_i + 59.2 - NF$$

Donde:

C/N_{AMP} : contribución de ruido del amplificador, expresado en dB

P_i : es la potencia de entrada al amplificador, expresada en dBmV

NF : figura de ruido del amplificador, expresada en dB.

Es importante tener en cuenta que en un sistema FDM el C/N se evalúa en cada canal independientemente, donde se compara el nivel de las respectivas portadoras con el ruido en el ancho de banda que afecta esa señal.

Cuando existe más de un amplificador en cascada, se debe calcular primero el C/N de cada amplificador y luego el C/N compuesto para la cascada de amplificadores de la siguiente forma:

$$C/N_{COMP} = 10 \log \left(10^{\frac{-C/N_1}{10}} + 10^{\frac{-C/N_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{-C/N_n}{10}} \right)$$

5. REDES PASIVAS DE FIBRA ÓPTICA (PON)

La estructura general de una red moderna de telecomunicaciones consiste en tres grandes partes, el *backbone* o *core*, la red *metro* o *regional* y la *red de acceso*, siendo esta última la que entrega la conectividad al usuario final. Las redes de acceso se sitúan lo más cerca al usuario final posible y los operadores de servicio tienden a invertir en tecnologías que les permitan crecer sin hacer grandes inversiones a futuro para ofrecer más y mejores servicios.

En este orden de ideas, tiene mucho sentido el desarrollar tecnologías de acceso que le permitan al operador llegar al usuario final con fibra óptica. En comparación con los accesos tradicionales de cobre (ya sea par trenzado o cable coaxial), la fibra óptica ofrece virtualmente anchos de banda ilimitados, con lo cual el proveedor de servicios puede construir hoy una red que le permita soportar los desarrollos de tecnologías y protocolos por venir.

Así, una red pasiva de fibra óptica, PON, es una forma de red de acceso de fibra óptica. Mucha gente tiende a usar el término PON como sinónimo de FTTx (*Fiber to the x*, término al que suelen referirse para este tipo de redes, donde la *x* tiene diferentes connotaciones, *Fiber to the Curb*, *Fiber to the Home*, etc.).

5.1. Estructura PON

Existen varias alternativas para redes FTTx, como se puede ver en la figura 6.16. En el caso más simple mostrado en esta figura, cables ópticos individuales salen desde la oficina central (CO) hasta los usuarios finales en una arquitectura de estrella. Alternativamente, una terminal remota, pasiva o activa (RT), tiene como función multiplexar las señales en terreno para optimizar el uso de la fibra por el operador de servicio. Las redes PON se caracterizan por tener un RT pasivo.

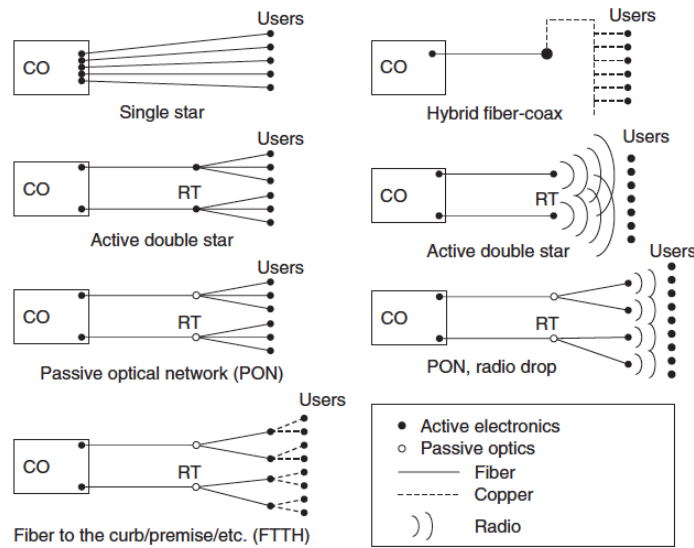


Figura 6.16. Diferentes alternativas de esquemas FTTx

Fuente: LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and Practice. Pág 21 Consultado: octubre 2012

A nivel de acceso, existen dos tipos de categorías para clasificar las arquitecturas de redes PON: *Time Division Multiplexing PON* (TDM-PON) y *Wavelength Wivision Multiplexing PON* (WDM-PON):

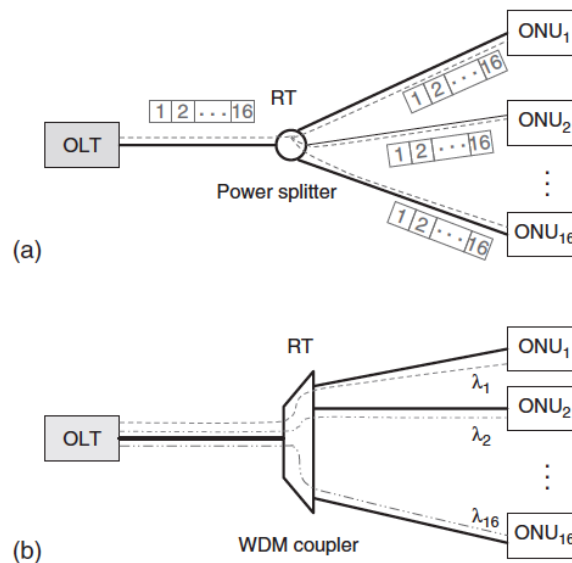


Figura 6.17. TDM-PON vs WDM-PON

Fuente: LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and Practice. Pág. 22) Consultado: octubre 2012

En ambas estructuras la planta de fibra desde el terminal óptico de fibra (OLT), hasta el terminal de usuario o unidad óptica de red (en adelante: ONU) es completamente pasiva. En el esquema de TDM-PON, las señales hacia las diferentes ONU emitidas por el OLT, son multiplexadas en el dominio del tiempo y viajan hacia la red a través de un acoplador óptico. Cada una de las ONU identifica las señales específicas que le pertenecen, mediante

direccionamientos embebidos en la señal. La mayoría de los tipos comerciales de PON caen en esta categoría.

Por el contrario, el esquema WDM-PON usa un acoplador WDM para llevar las diferentes longitudes de onda a los ONU. Si bien este esquema tiene una mayor escalabilidad y seguridad al transportar una única longitud de onda por usuario, es significativamente más costoso que TDM, por lo que es económicamente menos atractivo en el momento.

5.2. Estándares establecidos de redes PON

Existen diferentes nomenclaturas para tecnologías PON. Aunque algunas de ellas han ganado más popularidad que las otras, ninguna de ellas se ha convertido en un estándar dominante en la industria. A medida que crece la demanda, crece la investigación y el desarrollo en tecnologías PON, con la intensa participación en este mercado de los fabricantes y operadores de red.

Sin embargo, existen tres estándares que se han popularizado en los últimos años, BPON, GPON y EPON:

BPON: ITU-T G.983, su acrónimo se refiere a *Broadband PON*.

GPON: ITU-T G.984.1, *Gigabit-capable Passive Optical Networks*

EPON: IEEE802.3ah, *Ethernet PON*

6. SONET (Synchronous Optical Network)

(Attoum, Charlie, Vasquez, & Mardelinis, 2005)

6.1. Orígenes

La decisión de la creación de SONET fue tomada en 1984 por la ECSA (Exchange Carriers Standard Association) en USA *para posibilitar la conexión normalizada de los sistemas de fibra óptica entre sí aunque estos fueran de distinto fabricante*. En las últimas etapas de desarrollo de SONET entró también el CCITT (Comité Consultivo Internacional Telefónico y Telegráfico) para que se pudiera desarrollar una norma que posibilitara la interconexión mediante fibra de las redes telefónicas a nivel mundial.

En esta etapa de desarrollo nace la *Jerarquía Digital Síncrona* o SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Aún cuando tienen puntos de compatibilidad, el estándar SONET es aplicado en USA y Canadá, mientras que SDH se aplica en el resto del mundo.

6.2. La señal básica de SONET

SONET define una tecnología para transportar muchas señales de diferentes capacidades a través de una jerarquía óptica síncrona y flexible. Esto se logra por medio de un esquema de multiplexado por *interpolación de bytes*. La interpolación de bytes simplifica la multiplexación y ofrece una administración de la red extremo a extremo.

El primer paso en el proceso de la multiplexación de SONET implica la generación de señales de bajo nivel. En SONET la señal básica se conoce como *señal de nivel 1* o también

STS-1 (Synchronous Transport Signal level 1). Está formada por un conjunto de 810 bytes distribuidos en 9 filas de 90 bytes. Este conjunto es transmitido cada 125 microsegundos (8000 Hz), por lo que la velocidad binaria de la señal STS-1 es 51,84Mbps (810 x 8 x 8000).



Figura 6.18. Estructura de trama de la señal STS-1

Fuente: <http://www.oocities.org/es/charlieattoum/redes/trabajo1.html> Descargada noviembre 2012

- Las señales de niveles más altos están formadas por la multiplexación de diversas señales STS-1, creando una familia de señales STS-N, donde la N indica el número de señales de nivel 1 que la componen. En la tabla 6.3 se indican las denominaciones de las señales eléctricas y portadoras ópticas, así como sus velocidades y los puntos de coincidencia con SDH.

Tabla 6.3 Señales y velocidades binarias SONET

Fuente: <http://www.oocities.org/es/charlieattoum/redes/trabajo1.html> Descargada: noviembre 2012

Señal eléctrica	Portadora óptica	Velocidad binaria (Mbps)	Equivalencia SDH
STS-1	OC-1	51,84	-
STS-3	OC-3	155,52	STM-1
STS-9	OC-9	466,56	-
STS-12	OC-12	622,08	STM-4
STS-18	OC-18	933,12	-
STS-24	OC-24	1244,16	-
STS-36	OC-36	1866,24	-
STS-48	OC-48	2488,32	STM-16

6.3. Elementos de la Red SONET

- Multiplexor terminal:** Es el elemento que actúa como un concentrador de las señales DS-1 (Jerarquía digital para Norte América compuesta de 24 DS-0 de 64kbps, para un total de 1,544 Mbps) tributarias, así como de otras señales derivadas de ésta y realiza la transformación de la señal eléctrica en óptica y viceversa. Dos multiplexores terminales unidos por una fibra con o sin un repetidor intermedio conforman el más simple de los enlaces de SONET.
- Regenerador o repetidor:** Se necesita un regenerador cuando la distancia que separa a dos multiplexores terminales es muy grande y la señal óptica que se recibe es muy baja. El reloj del repetidor se apaga cuando se recibe la señal y este reemplaza parte

de la cabecera de la trama de la señal antes de volver a retransmitirla. La información de tráfico que se encuentra en la trama no se ve alterada.

- c. **Multiplexor Add/Drop (ADM):** El multiplexor de extracción-inserción (ADM) permite el extraer en un punto intermedio de una ruta parte del tráfico cursado y a su vez inyectar nuevo tráfico desde ese punto. En los puntos donde haya un ADM solo aquellas señales que se necesiten serán descargadas o insertadas al flujo principal de datos. El resto de señales seguirán a través de la red. Aunque los elementos de red son compatibles con el nivel OC-N, puede haber diferencias en el futuro entre distintos vendedores de distintos elementos. SONET no restringe la fabricación de los elementos de red. Por ejemplo, un vendedor puede ofrecer un ADM con acceso únicamente a señales DS-1, mientras que otro puede ofrecer acceso simultaneo a señales DS-1 (1,544 Mbps) y DS-3 (44,736 Mbps).

6.4. Configuración de la red SONET

- a. **Punto a punto:** La configuración de red punto a punto está formada por dos multiplexores terminales, unidos por medio de una fibra óptica, en los extremos de la conexión y con la posibilidad de un repetidor en medio del enlace si éste hiciese falta. En un futuro las conexiones punto a punto atravesarán la red en su totalidad y siempre se originarán y terminarán en un multiplexor.
- b. **2.- Punto a multipunto:** Una arquitectura *punto a multipunto* incluye elementos de red ADM a lo largo de su recorrido. El ADM es el único elemento de red especialmente diseñado para esta tarea. Con esto se evitan las complejas arquitecturas de red de demultiplexado, conectores en cruz (cross-connect), y luego volver a multiplexar. Se coloca el ADM a lo largo del enlace para facilitar el acceso a los canales en los puntos intermedios de la red.
- c. **3.- Red Hub:** La arquitectura de red hub está preparada para los crecimientos inesperados y los cambios producidos en la red de una forma más sencilla que las redes punto a punto. Un hub concentra el tráfico en un punto central y distribuye las señales a varios circuitos.
- d. **4.- Arquitectura en anillo:** El elemento principal en una arquitectura de anillo (Figura 6.11) es el ADM. Se pueden colocar varios ADM en una configuración en anillo para tráfico bidireccional o unidireccional.

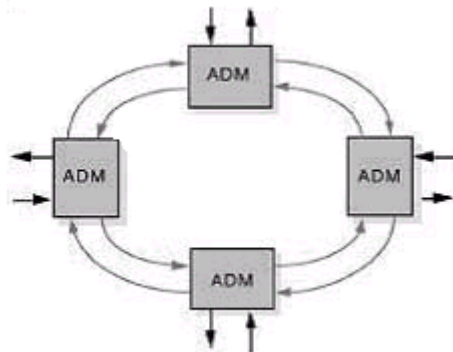


Figura 6.19. Arquitectura en anillo

Fuente: <http://www.oocities.org/es/charlieattoum/redes/trabajo1.html> Descargada: noviembre 2012

La principal ventaja de la topología de anillo es su seguridad; si un cable de fibra se rompe o se corta, los multiplexores tienen la inteligencia necesaria para desviar el tráfico a través de otros nodos del anillo sin ninguna interrupción. La demanda de servicios de seguridad, diversidad de rutas en las instalaciones de fibra, flexibilidad para cambiar servicios para alternar los nodos, así como la restauración automática en pocos segundos, ha hecho de la arquitectura de anillo una topología muy popular en SONET.

6.5. Beneficios de la Red SONET

La clave de SONET es que permite interfaces con fuentes asíncronas por lo que los equipos existentes pueden ser sustituidos o soportados por la red SONET. De esta forma las transiciones se pueden realizar gradualmente.

Esta son algunas ventajas que presenta SONET frente a otros sistemas:

- La creciente flexibilidad de configuración y la disponibilidad de ancho de banda, proporciona significativas ventajas frente a otros sistemas de telecomunicación más antiguos.
- Reducción de los equipos necesarios para la multiplexación y la extracción-inserción de tráfico en puntos intermedios de las grandes rutas.
- Aumento de la fiabilidad de la red, como consecuencia del menor número de equipos implicados en las conexiones.
- Proporciona bytes de cabecera que facilitan la administración de los bytes de información y el mantenimiento de los propios equipos.
- Definición de un formato síncrono de multiplexación para el transporte de señales digitales de la *Jerarquía Digital Plesiócrona* o PDH, en sus diversos niveles (como DS-1, DS-3) y una estructura síncrona que simplifica enormemente la interfaz de los conmutadores digitales, así como los conectores y los multiplexores.
- La existencia de una gran gama de estándares genéricos que permiten la interconexión de productos de diferentes fabricantes.
- La definición de una arquitectura flexible capaz de incorporar futuras aplicaciones, con una gran variedad de velocidades de transmisión.

Otras ventajas son:

- Interfaz centralizado, integrado y remoto para los equipos de transporte y multiplexación.
- Rápido aislamiento de fallos.
- Monitorizado de rendimiento extremo a extremo.
- Soporte de nuevos servicios de alta velocidad.
- Permite REDES VIRTUALES privadas.
- La posibilidad de crear estructuras de red distribuidas de forma muy económica gracias a los multiplexores ADD/DROP (ADM)
- Estructura en doble anillo para mayor inmunidad a los fallos.

7. SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS HÍBRIDOS WDM-SCM

Las fibras ópticas disponen de un gran ancho de banda de transmisión del orden de THz. Para aprovechar esta enorme capacidad de espectro óptico pueden emplearse distintas técnicas de multiplexación de la información a transmitir, como por ejemplo la multiplexación en longitud de onda (wavelength division multiplexing, WDM). Pero en el caso de los sistemas ópticos analógicos todavía es posible aumentar un escalón más el nivel de multiplexación si modulamos cada portadora óptica con la señal multicanal de RF proveniente de un transmisor CATV o receptor de TV satélite. Esta técnica de multiplexación en el dominio eléctrico se conoce con el nombre de SCM (subcarrier multiplexing). Surgen de este modo los llamados sistemas híbridos WDM-SCM, los cuales analizaremos a continuación. (MORA, 2010)

7.1. Sistemas SCM

Los sistemas de subportadoras multiplexadas (subcarrier multiplexing, SCM) se utilizan comúnmente para la transmisión de señales de RF sobre enlaces de fibra óptica. SCM es una técnica en la que una señal de banda ancha, compuesta por diversos canales multiplexados en frecuencia se aplica directamente a un láser modulado en intensidad.

Estos sistemas se caracterizan por acomodar en el espectro tanto canales analógicos como digitales, transportando señales de voz, datos, vídeo, audio digital, TV de alta definición, y cualquier combinación de servicios que se desee. Cada usuario puede servirse con una única subportadora, o bien distribuir una señal multicanal entre todos los usuarios. Su enorme flexibilidad los hace muy atractivos en el caso de aplicaciones de banda ancha, especialmente si los servicios se originan desde distintos proveedores utilizando esquemas de modulación y anchos de banda diferentes.

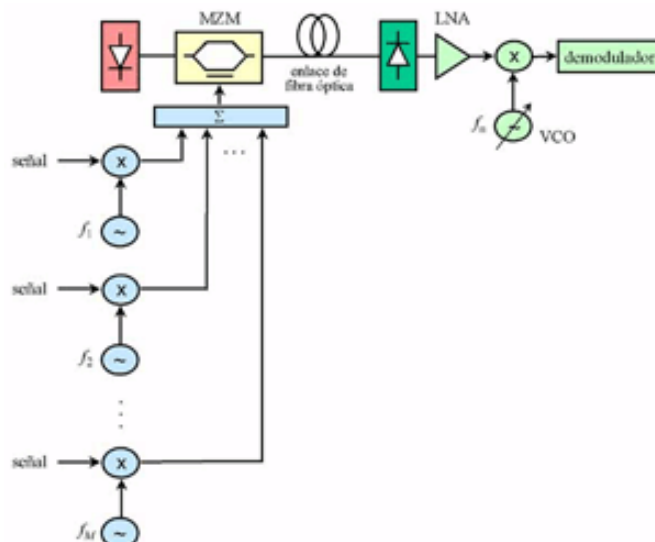


Fig. 6.20. Diagrama de bloques de un sistema SCM.

Fuente: <http://conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com/2010/03/sistemas-de-comunicaciones-opticas.html>. Descargada: Enero 2013

La configuración básica de un sistema SCM se muestra en la figura 6.20. Un gran número de subportadoras de microondas, moduladas con las señales a transmitir, se combinan para generar una señal multiplexada en frecuencia. Esta señal compuesta se aplica ahora junto con la corriente de polarización a un láser de semiconductor o modulador externo, el cual actuará como transmisor óptico del sistema. La señal óptica modulada en intensidad se transmite sobre un enlace de fibra óptica monomodo y finalmente se foto detecta utilizando regularmente un fotodiodo InGaAs PIN de banda ancha.

En el caso de aplicaciones que requieran mayor sensibilidad en el receptor, tales como redes de distribución con múltiples etapas de repartidores pasivos o troncales de CATV, se puede utilizar un fotodiodo InGaAs APD de banda ancha que presenta una mayor ganancia. La señal de microondas recibida puede amplificarse por medio de un amplificador de banda ancha y bajo ruido o un receptor PIN-FET.

Comercialmente existen amplificadores de bajo ruido con anchos de banda de 2-8 GHz y figuras de ruido menores que 2 dB. En el caso de un receptor p-i-n-FET con ancho de banda de DC a 8 GHz, es posible un valor RMS de corriente de ruido en torno a los $12 \text{ pA/Hz}^{-1/2}$, equivalente a una figura de ruido de un amplificador de 2,5 dB. Esta solución sería válida en un sistema SCM híbrido que combinara una señal digital banda base junto con canales de alta frecuencia.

En un sistema de distribución a abonados, como por ejemplo CATV, sólo necesitamos seleccionar un canal para la demodulación. Por tanto, se puede utilizar simultáneamente un oscilador local sintonizable, un mezclador y un filtro de banda estrecha para seleccionar el canal SCM deseado y bajarlo a una frecuencia intermedia más conveniente para realizar finalmente la demodulación. En el caso de los receptores de TV satélite, todos estos componentes electrónicos se integran dentro del elemento conocido como LNB (low-noise block), que consiste en un amplificador con 1 dB de figura de ruido, un mezclador y un oscilador local de banda X.

La calidad de los sistemas SCM, dado que se trata de sistemas ópticos analógicos, se mide al igual que ocurre con los sistemas radio sobre fibra por medio de la relación portadora a ruido (CNR) de las subportadoras y del nivel de distorsión de intermodulación (CSO/CTB) a la entrada del demodulador del receptor. En el caso de transportar señales multicanal CATV con modulación AM-VSB se exigen unos niveles de CNR mayores de 50 dB y de CSO/CTB menores de -60 dBc. Por el contrario, si se transmiten canales con modulación digital los requisitos anteriores se reducen en unos 30 dB. (MORA, 2010)

7.2. Sistemas WDM-SCM

La mayoría de redes WDM transportan tráfico homogéneo, por ejemplo todos los canales ópticos transportan tramas SONET (Synchronous Optical NETwork) OC-48 (2,5 Gbit/s) y OC-192 (10 Gbps). Sin embargo, en el caso de tráfico no homogéneo (bien analógico/digital, o bien digital con distintas velocidades y formatos de modulación) resulta más eficiente acudir a soluciones alternativas. En esta situación, la solución consiste en proporcionar un nuevo nivel de multiplexación sobre cada uno de los canales ópticos, es decir SCM. De este modo se llega a un esquema de multiplexación híbrido WDM-SCM, en el cual se tiene un canal de

información independiente por cada una de las subportadoras que componen cada uno de los canales ópticos WDM.

Las señales SCM a diferentes longitudes de onda provenientes de distintos transmisores ópticos se pueden multiplexar en el dominio óptico empleando un combinador e inyectarse posteriormente en una misma fibra. En la figura 6.21 se representa el espectro óptico típico de uno de estos sistemas. En especial, alguna de las portadoras ópticas podría estar modulada directamente por una señal digital en banda base. La ventaja de este esquema de multiplexación conjunto es que permite enrutar cada portadora hacia un determinado nodo óptico en función de su longitud de onda, y posteriormente seleccionar la subportadora de cada usuario en el dominio eléctrico.

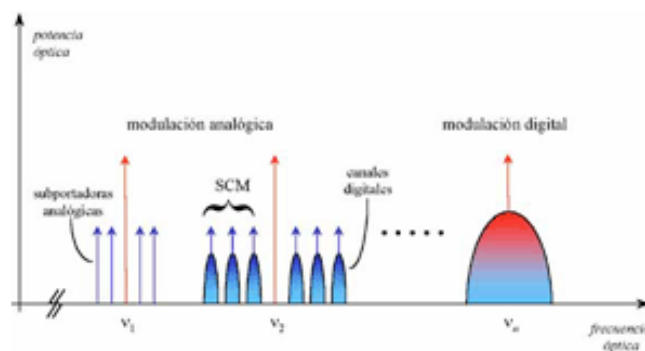


Fig. 6.21. Espectro óptico del sistema WDM-SCM.

Fuente: <http://lo-interesante.blogspot.com/2007/12/sistemas-de-comunicaciones-pticas.html> Descargada:
Enero 2013

En combinación con la modulación directa, la técnica WDM-SCM no requiere una circuitería compleja de estabilización de frecuencia. Además, no necesita control de polarización ni filtros selectivos. La inclusión de nuevos usuarios se realiza de forma flexible sin modificar la arquitectura de la red, simplemente acomodando nuevos canales ópticos o subportadoras de RF. Por último, no es necesaria ningún tipo de sincronización entre los transmisores y los receptores.

Una de las principales fuentes de degradación de los sistemas WDM-SCM es el proceso no lineal de mezclado de cuatro ondas que se produce a lo largo del trayecto de propagación por la fibra óptica. Para evitarlo es indispensable trabajar en zonas de dispersión cromática no nula. Es por ello que se utilizan las llamadas fibras de dispersión desplazada casi nula (NZDSF, nearly zero dispersion-shifted fiber), puesto que además se reducen los niveles de dispersión cromática. De hecho, el efecto conjunto de la dispersión cromática y de la auto modulación de fase introducida por la fibra en el caso de potencias ópticas elevadas es la principal causa de distorsión no lineal sobre la señal multicanal SCM a la salida del foto detector.

Adicionalmente, otro factor perjudicial lo constituye la diafonía producida por diversos efectos no lineales como por ejemplo la modulación de fase cruzada o la dispersión estimulada de Raman. Finalmente, cuando los canales SCM a una misma longitud de onda se introducen

en el sistema empleando transmisores ópticos distintos, la interferencia que se produce en el foto detector entre los espectros ópticos del ruido de fase de cada uno de los láseres da lugar a un fondo de ruido que afecta principalmente a las frecuencias bajas de la señal (menores de 1 GHz). Para evitarlo es necesario el empleo de láseres con reducido ancho de línea. (Roll, 2007)

7.3. Gestión de redes ópticas mediante tonos piloto

Las tareas de supervisión y gestión de las redes WDM pueden realizarse empleando tonos piloto generados por medio de modulación de amplitud de la señal. Esta técnica es atractiva desde el punto de vista de que no necesita ninguna fuente óptica adicional.

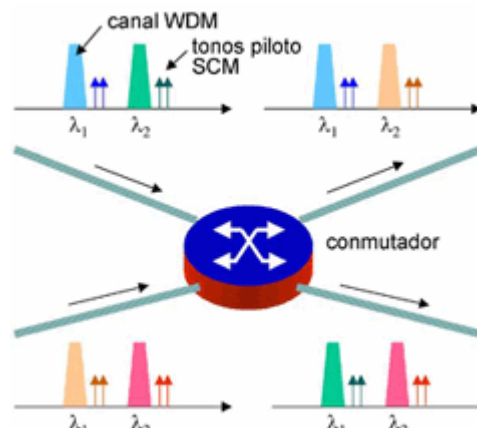


Fig. 6.22. Enrutamiento de canales WDM mediante tonos piloto

Fuente: <http://conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com/2010/03> Descargada: Enero 2013

En realidad, la introducción de tonos piloto en los canales WDM puede considerarse como una multiplexación WDM-SCM. En la figura 6.22 se muestra esquemáticamente el proceso de enrutamiento de los canales WDM en una red óptica empleando un conmutador controlado por medio de la información transportada por los tonos piloto de cada uno de los canales. Ahora bien, dado que los convertidores de longitud de onda utilizados en los conmutadores fotónicos tienen una función de transferencia no lineal (en contraposición a los acopladores, filtros y amplificadores), es necesario prestar atención a la influencia de estos efectos no lineales sobre los tonos piloto.

En un experimento reciente (A. Kloch et al., Photon. Technol. Lett., pp. 448-450, 1998) se estudió la influencia de un convertidor de longitud de onda basado en un interferómetro de Michelson sobre estos tonos piloto, y la degradación que provocaba sobre las señales transmitidas. El montaje experimental utilizado se muestra en la figura 6.23. Un tono piloto de 40 KHz con un índice de modulación del 27 % se inserta por medio de modulación directa en un láser operando a 1555 nm. Posteriormente, la señal óptica se modula externamente con una PRBS de 2,5 Gbps y se aplica al convertidor de longitud de onda.

La señal convertida a 1553 nm finalmente se foto detecta para observar su espectro y realizar medidas de BER. Tras el proceso de conversión de longitud de onda aparece un

armónico a 80 KHz, reduciendo la relación señal a ruido del tono piloto en aproximadamente 5 dB. La función de transferencia sinusoidal del convertidor es la responsable de la generación de componentes frecuenciales a múltiplos de la frecuencia del tono piloto. Fijando como requisito un $BER = 10^{-9}$ se demostró que la inclusión del tono piloto producía una penalización de potencia inferior a 1 dB. Estas mismas medidas se repitieron para tonos piloto de frecuencias comprendidas entre 10 KHz y 10 MHz, obteniéndose idénticos resultados.

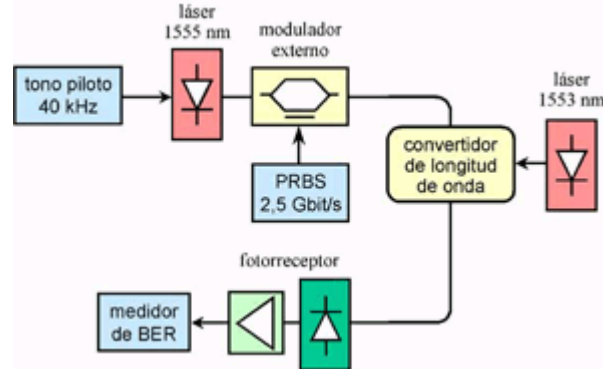


Fig. 6.23. Montaje experimental para estudiar la influencia del tono piloto sobre el convertidor de longitud de onda.

Fuente: <http://conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com/2010/03/sistemas-de-comunicaciones-opticas.html> Descargada: Enero 2013

En resumen, un canal WDM que transporta un tono piloto puede convertirse sin deteriorar la calidad de la señal significativamente.

En la literatura existen multitud de protocolos de enrutamiento en redes ópticas que hacen uso de la información transportada por los tonos piloto SCM. Algunos de ellos colocan todos los tonos piloto en el interior de un mismo canal óptico habilitado para tal efecto, de tal forma que el conmutador se encuentra sintonizado a dicho canal y obtiene la información de enrutamiento de todos los canales WDM. Por otro lado, también existe la posibilidad de colocar los tonos piloto de forma individualizada sobre cada uno de los canales WDM. (emagister, 2001)

8. ANILLOS SONET/SDH

(Revista Conectronica, 2000)

Los anillos SONET/SDH son la arquitectura de red más común debido a su implementación relativamente simple y a su fácil gestión. El elemento clave para la construcción de anillos SONET/SDH es el ADM (add-drop multiplexer). Como se comentó en el anterior artículo, un ADM puede insertar o extraer señales STS-1 o VTs individualmente, a la vez que permite el paso del resto del tráfico sin ningún tipo de procesamiento costoso. Adicionalmente, también se encarga de realizar diversas funciones para mantener la supervivencia de la red. Estos anillos SONET/SDH basados en ADMs pueden interconectarse posteriormente entre sí por medio de DXCs (digital cross-connects) mediante topologías de anillos o árboles de anillos.

Existen tres tipos de configuraciones de anillos estandarizadas y que se conocen como: anillo unidireccional con conmutación de ruta (UPSR, unidirectional path-switched ring), anillo bidireccional de dos fibras con conmutación de línea (BLSR/2, two-fiber bidirectional line-switched ring) y anillo bidireccional de cuatro fibras con conmutación de línea (four-fiber bidirectional line-switched ring). Así, un UPSR consiste en dos anillos de fibra que propagan las señales de forma unidireccional y sentidos contrarios, tal y como se muestra en la figura 6.24. La protección se consigue enviando simultáneamente dos copias idénticas de la señal sobre los dos anillos. Posteriormente, en el destino se selecciona la señal del anillo con mejor calidad, basándose en la monitorización de ciertos parámetros de las señales. Este mecanismo de protección se conoce como conmutación 1+1, y no requiere ningún tipo de comunicación entre los diferentes nodos de la red. Por lo tanto, puede implementarse fácilmente y permite la recuperación de la forma más rápida.

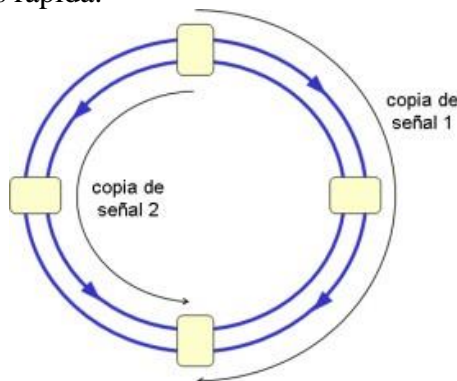


Figura 6.24. Anillos UPSR

Fuente:

http://moodle.unid.edu.mx/dts_cursos_md1/maestria_en_tecnologias_de_informacion/tem_sel_redes/sesion7/actividades/RedesSONET.pdf Descargada: Enero 2013

No obstante, el UPSR no utiliza el ancho de banda eficientemente. El requisito de ancho de banda del UPSR sobre un tramo de fibra situado entre dos nodos es el máximo, ya que no es posible reutilizar el ancho de banda de ninguna forma. Resulta imposible transmitir tráfico extra porque la capacidad destinada a la protección se encuentra siempre reservada para una posible conmutación. La arquitectura UPSR alcanza su máxima eficiencia cuando todo el tráfico del anillo se encamina entre un nodo concentrador y otros nodos remotos, es decir, un modelo de tráfico centralizado. Esta arquitectura es pues adecuada para redes de acceso.

Por otra parte, un BLSR/2 consiste en dos anillos formados cada uno de ellos por dos fibras. Las señales de cada uno de los anillos viajan en sentido contrario, tal y como se representa en la figura 6.25. Al mismo tiempo, la mitad de la capacidad de cada anillo se utiliza para transportar el tráfico de la red (capacidad de trabajo), mientras que la otra mitad se reserva como protección (capacidad de protección). Así, los canales operativos de un anillo se protegen con los canales de protección del otro anillo. Evidentemente, como todavía no se está hablando de WDM, estos canales se identifican desde un punto de vista temporal (multiplexación TDM). Por ejemplo, en un anillo OC-n el tráfico a transmitir se coloca en las primeras $n/2$ ranuras temporales STS-1, sirviendo de protección las restantes $n/2$ ranuras temporales STS-1. A diferencia de la protección 1+1, aquí en un determinado instante de tiempo sólo se transmite una copia de las señales.

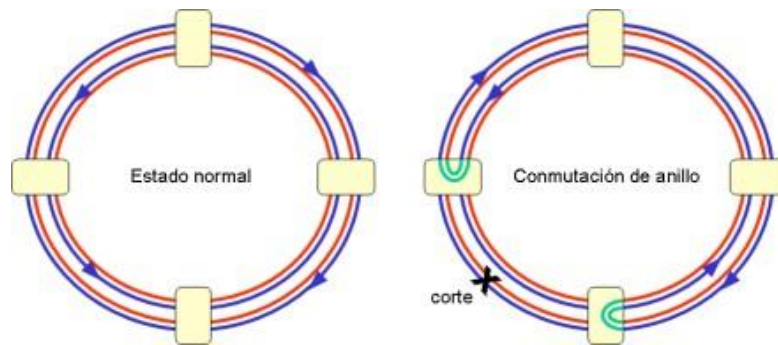


Figura 6.25. Esquemas BLSR/2

Fuente:

http://moodle.unid.edu.mx/dts_cursos_md/maestria_en_tecnologias_de_informacion/tem_sel_redes/sesion7/actividades/RedesSONET.pdf Descargada: Enero 2013

En una situación normal, las señales se transmiten utilizando únicamente la capacidad de trabajo, mientras que la capacidad de protección puede utilizarse para transportar tráfico extra de baja prioridad (acceso de protección). En caso de fallo en algún enlace, la situación se restaura por medio de la conmutación del anillo. La detección de posibles fallos se realiza mediante la monitorización de ciertos parámetros a nivel físico que determinan la calidad o la pérdida del canal de señal. Cuando se detecta la pérdida de la señal o un nivel de calidad inaceptable, el mecanismo de protección/conmutación debe coordinarse entre los dos nodos adyacentes al enlace que ha fallado. La coordinación se realiza mediante el intercambio de mensajes APS (automatic protection switching) siguiendo un determinado protocolo. Estos mensajes APS se transportan sobre los canales que transportan el tráfico de protección.

El número máximo de nodos en un BLSR/2 no debe exceder de 16 debido a que se utiliza un campo de tan sólo 4 bits en los mensajes ASP para identificar a los nodos. Esta limitación de tamaño de los anillos también permite asegurar un tiempo de restauración inferior a 50 ms. La localización de cada nodo debe conocerse por cada uno de los otros nodos del anillo por medio de un mapa de red. La arquitectura BLSR/2 proporciona cierta flexibilidad para liberar de tráfico tramos de fibra saturados y, de este modo, soporta una carga máxima mayor que en el caso de un UPSR. En la literatura se pueden encontrar diversos algoritmos de enrutamiento del tráfico para minimizar la carga del anillo. De todos modos, la utilización de ancho de banda del BLSR/2 depende del modelo de tráfico del anillo. La mayor eficiencia en la utilización del ancho de banda se consigue para el caso de redes metropolitanas.

Por último, un BLSR/4 utiliza cuatro anillos de fibra tal y como se muestra en la figura 6.26. Dos de los anillos de fibra con diferentes sentidos de propagación se dedican a la capacidad de trabajo, mientras que los otros dos se destinan al tráfico de protección. El tráfico se envía normalmente a través de los anillos de trabajo hasta la utilización máxima de estas fibras. Se permite además acceso de protección como en BLSR/2. Debido a la separación entre los anillos de trabajo y de protección, BLSR/4 soporta tanto conmutación de tramo (directamente entre dos nodos) como conmutación de anillo (a lo largo de la ruta más larga entre dos nodos). Ambos esquemas de protección se muestran en la figura 6.26. Su funcionamiento es muy similar al caso de BLSR/2, existiendo un protocolo de intercambio de mensajes APS.

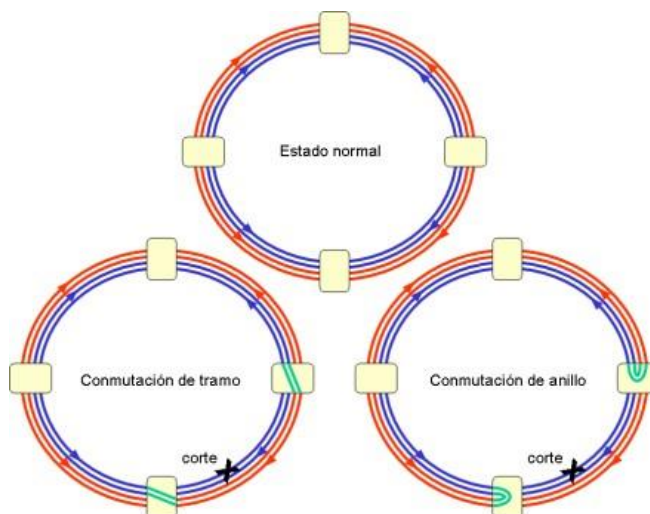


Figura 6.26. Esquemas BLSR/4.

Fuente:

http://moodle.unid.edu.mx/dts_cursos_md/maestria_en_tecnologias_de_informacion/tem_sel_redes/sesion7/actividades/RedesSONET.pdf Descargada: Enero 2013

El entorno más apropiado para la utilización de BLSR/4 es en el caso de redes metropolitanas de largo alcance, ya que duplica el ancho de banda de utilización y posee un grado mayor de protección. En la tabla 6.4 se resumen las características de cada uno de estos anillos.

TABLA 6.4. Comparativa entre los diferentes anillos SONET/SDH.

Fuente:

http://moodle.unid.edu.mx/dts_cursos_md/maestria_en_tecnologias_de_informacion/tem_sel_redes/sesion7/actividades/RedesSONET.pdf Descargada: Enero 2013

	UPSR	BLSR/2	BLSR/4
Anillos de fibra	2	2	4
Capacidad de trabajo	Completa	Mitad	Completa
Acceso de protección	Ninguno	Permitido	Permitido
Entidad protegida	Ruta	Línea	Línea
Mecanismo de protección	Conmutación 1+1	Conmutación de anillo	Conmutación de tramo o anillo
Reutilización de canal	Ninguna	Permitida	Permitida
Enrutado	Trivial	Complicado	Mismo que en BLSR/2
Aplicación	Redes de acceso	Redes metropolitanas	Redes metropolitanas de largo alcance
Costo	Bajo	Ligeramente mayor	El doble
Gestión	Sencilla	Más difícil	Similar a BLSR/2

9. REDES ÓPTICAS BASADAS EN GMPLS

Conforme la infraestructura de las redes públicas evoluciona de un modelo basado en tecnologías de conmutación de circuitos a otro modelo más optimizado para el tráfico de datos, también deben hacerlo las redes ópticas de transporte subyacentes. El plano de control

es clave en este cambio, y los esfuerzos se centran en la actualidad en GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching). En este artículo analizaremos los fundamentos básicos de GMPLS y los requisitos que cumplen los dispositivos y redes ópticas basadas en estos protocolos.

Las redes ópticas en la actualidad presentan un gran número de capas. Cada una de estas capas está preparada para manejar un determinado tipo de tráfico y proporcionar unos servicios específicos. Con el tiempo han surgido incluso equipos independientes que están especializados en una capa y en un tipo de tráfico como por ejemplo: enrutadores IP, conmutadores ATM, dispositivos SONET/SDH o conmutadores DWDM.

Si bien este planteamiento permite simplificar el diseño de los dispositivos, conduce a redes complejas y difíciles de gestionar. Por ello, últimamente se está tendiendo a reducir el número de dispositivos distintos que podemos encontrar en la red, consolidando determinadas capas y mejorando sus funcionalidades, a la vez que se eliminan otras redundantes. Como se comentó en el anterior artículo, se tiende a un esquema de red con tan sólo dos capas. En este escenario, el modelo "peer" proporciona una mayor eficiencia de red que el modelo "overlay" tradicional, ya que se puede desarrollar un plano de control común para todas las capas con una única serie de protocolos como GMPLS.

Para el correcto funcionamiento de esta red basada en GMPLS, se requieren además elementos de conmutación ópticos capaces de encaminar o conmutar el tráfico de cualquier tipo: TDM, paquetes o longitudes de onda. En la figura 6.27 se puede ver la evolución que está sufriendo el modelo de capas de las redes ópticas.

Actualmente, los esfuerzos para mejorar la eficiencia y escalabilidad de las redes se centran en tres planteamientos distintos: IP sobre DWDM, MPLS y GMPLS con conmutación fotónica. IP sobre DWDM utiliza direccionamiento y enrutamiento IP sobre redes DWDM. La mayoría de los desarrollos emplean paquetes sobre SONET (PoS) directamente sobre canales DWDM con el fin de consolidar los planos IP y de datos sobre las longitudes de onda y la fibra. No obstante, esto conduce finalmente a un sacrificio de velocidad y además no existe ningún mecanismo de comunicación entre los enrutadores y otros equipos de transporte.

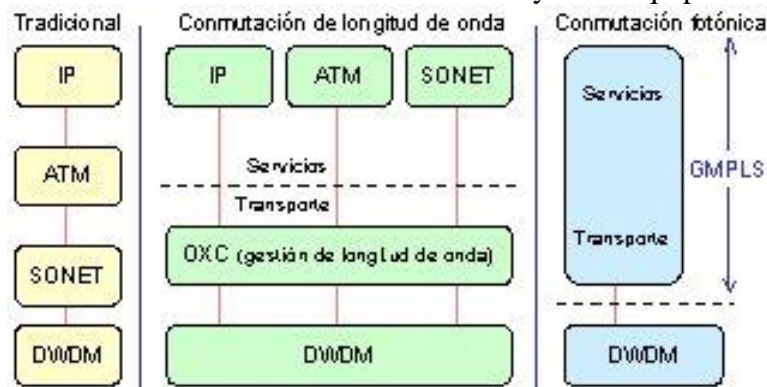


Fig. 6.27. Evolución del modelo de capas.

Fuente: http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/1007/2/Beatriz_Díaz.pdf Descargada: Febrero 2013

MPLS, por su parte, propone añadir extensiones al protocolo del plano de control con el fin de incorporar etiquetas y mecanismos de señalización a los servicios de longitud de onda y ofrecer conexiones inteligentes entre los OXCs (Optical cross connects) en sistemas DWDM de largo alcance. Al igual que IP sobre DWDM, MPLS se construye sobre una estrategia ya existente, por lo que tiene al apoyo de diversos fabricantes de OXCs. Sin embargo, este planteamiento asume un modelo "overlay" basado en un interfaz usuario-red y, por lo tanto, no integra el plano de encaminamiento de los paquetes de datos.

Las redes MPLS requieren pues enrutadores en su núcleo para procesar los paquetes, así como ADMs y DXCs de banda ancha para procesar las ranuras temporales de los canales SONET/SDH. Dado que MPLS se aplica sobre los OXCs, y los OXCs disponibles comercialmente ofrecen una conmutación relativamente lenta y no pueden manejar paquetes o tráfico TDM de una forma eficiente, el plano de control proporciona mejoras tan solo a un número limitado de servicios. Luego no se espera que MPLS gane aceptación en más de unas pocas aplicaciones de larga distancia específicas. (Díaz, 2007)

CAPÍTULO 7: NORMAS SERIE G DE LA UIT-T

A continuación se realizará una presentación y comparación de las normas para los cables de fibra óptica monomodo. Estas normas son establecidas por la UIT-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones), el cual es uno de los organismos más importantes en la estandarización aspectos relacionados con las telecomunicaciones a nivel mundial.

En este caso particular se enfocará en 3 normas de la serie G, dado que en éstas hacen referencia a los Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales, y más exactamente en las Características de los Medios de Transmisión para cables de fibra óptica monomodo.

Cabe aclarar que el comportamiento de la fibra necesario para una determinada aplicación, depende en gran medida de los parámetros esenciales de la propia fibra y del sistema, es decir, del diámetro del campo modal, de la longitud de onda de corte, de la dispersión cromática, de la longitud de onda de trabajo del sistema y de la velocidad binaria/frecuencia de funcionamiento.

1. **Norma G.652.** Esta recomendación trata sobre las características geométricas y de transmisión de las ***fibras y cables ópticos monomodo***, cuya dispersión y corte no se desplazan de la región de longitud de onda de 1310 nm.

A continuación en la Tabla 7.1 se muestran las principales características mencionadas en la norma.

Tabla 7.1. Características de un Cable de Fibra Optica Monomodo.

Fuente. Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT. 1997 Consultado: Febrero 2013

Descripción	Valor
Longitud de onda de corte	1,18 a 1,27 μm
Diámetro del campo modal	9,3 (8 a 10) μm (+/- 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (+/- 3 μm)
Recubrimiento de silicona (Coating)	245 μm (+/- 10%)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación para 1300 nm	De 0,4 a 1 dB/Km
Atenuación para 1550 nm	De 0,25 a 0,5 dB/Km
Dispersión cromática 1285-1330 nm	3,5 ps/Km.nm
Dispersión cromática 1270-1340 nm	6 ps/Km.nm
Dispersión cromática 1550 nm	20 ps/Km.nm

2. **Norma G.653.** Esta recomendación en general se enfoca en las diversas características de los ***cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada***. En general una fibra monomodo con dispersión desplazada, con longitud de onda de dispersión nula nominal próxima a 1550 nm y un coeficiente de dispersión que aumenta monótonicamente con la longitud de onda. Esta fibra está optimizada para uso a longitudes de onda en la región entre 1500 nm y 1600 nm, pero puede utilizarse

también a longitudes de onda cercanas a 1310 nm, con las restricciones indicadas en ésta recomendación.

3. **Norma G.655.** (Características de un cable de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada no nula). En esta recomendación se describe una fibra monomodo cuya dispersión cromática (valor absoluto) tiene que ser mayor que algún valor diferente de cero en toda la gama de longitudes de onda de la utilización prevista. Esta dispersión suprime el efecto no lineal conocido por mezcla de cuatro ondas, que puede ser particularmente perjudicial en una multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM).

Tabla 7.2. Comparación normas fibras monomodo utilizadas

Fuente. Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT. 1998 Consultado: Febrero 2013

Descripción	G.653	G.655
Tipo de Cable de Fibra Óptica Monomodo	Con dispersión desplazada	Con dispersión desplazada no nula
Características de la Fibra		
Diámetro del Campo Modal	En la ventana de 1550 nm de 7,0 a 8,3 μm	Entre 8 y 11 μm
Desviación del diámetro del campo modal	$<\pm 10\%$ de su valor nominal	$<\pm 10\%$ de su valor nominal
Diámetro del revestimiento	125 μm	1,25 μm
Error de concentricidad del campo modal	En la ventana de 1550 nm, $< 1\mu\text{m}$	En la ventana de 1550 nm, $< 1\mu\text{m}$
No circularidad del campo modal	Es muy baja para tenerse en cuenta	Es muy baja para tenerse en cuenta
No circularidad del revestimiento	$< 2\%$	$< 2\%$
Atenuación para 1550 nm	De 0,2 a 0,5 dB/Km	De 0,22 a 0,30 dB/Km
Atenuación para 1300 nm	Inferior a 1 dB/Km	No presenta
Dispersión cromática	3,5 ps/Km.nm entre 1525-1575 nm	4,6 ps/Km.nm en 1550 nm

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, M. (2000). *Modern Television Technology*. Indianapolis.
- ADAMS, M. (2000). Open Cable Architecture: The path to compatibility and retail availability in digital television. Indianapolis: Cisco Press.
- Attoum, Charlie, Vasquez, & Mardelinis. (2005). *oocities.org/es*. Retrieved from <http://www.oocities.org/es/charlieattoum/redes/trabajo1.html>
- CHALACÁN, A., & Orosco, E. (2011). *Monografias.com*. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos69/normas-fibra-optica/normas-fibra-optica2.shtml>
- CISCO Corporation. (2008). *www.supportforums.cisco.com*. Retrieved from https://supportforums.cisco.com/docs/DOC-1239/*
- COMMONS, Atribución Creative. (2013). *wikipedia*. Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_óptica
- CONVERSI. (2012). *conversi.blogspot.com*. Retrieved from <http://conversi.blogspot.com/>
- Díaz, B. (2007). *biblioteca.cenace.org.ec*. Retrieved from http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/1007/2/Beatriz_Díaz.pdf
- emagister, C. (2001). *emagister.com/uploads_courses*. Retrieved from http://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_35141_35141.pdf
- Empalmes de fibras ópticas. Cap 6.* (n.d.). Retrieved septiembre 11, 2013, from <ftp://neutron.ing.ucv.ve/pub/Carlos%20Bianchi/08-Empalmes.pdf>
- FIBERCOM. (2011). *www.fibercom.es*. Retrieved from www.fibercom.es/productos
- FIBRA óptica hoy. (2011). *www.fibraopticahoy.com*. Retrieved from <http://www.fibraopticahoy.com/valoracion-e-importancia-de-la-conexion-optica-ii/>
- LARGE, D., & FARMER, J. (2007). Broadband Cable Access Networks: The HFC Plant. In D. y. James.
- MARTIN Pereda, J. A. (2002). *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*. Madrid: Pearson Educación.
- MEAVE, D. A. (2009). *comunicaciones opticas*. Retrieved agosto 2012, from <http://comunicacionesopticas.files.wordpress.com/2007/10/informe-tipos-de-fo-final.pdf>
- monografias.com*. (2009). Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>

MORA, J. (2010). *conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com*. Retrieved from <http://conocimientosopticalfibertransmission.blogspot.com/2010/03/sistemas-de-comunicaciones-opticas.html>

NERY, V. R. (1998). *Líneas de transmisión*. Mexico: McGraw Hill.

NETPOINT. (2011). *www.netpoint.com*. Retrieved from <http://www.netpoint.com.mx/servicios/jumpers.html>

POWER, J. (2000). *An introduction to fiber optic systems*. Boston: McGraw Hill.

Power, J. (2000). *Optical communication system*. Boston: McHillGraw .

Revista Conetrónica. (2000). *moodle.unid.edu.mx*. Retrieved from http://moodle.unid.edu.mx/dts_cursos_md/maestria_en_tecnologias_de_informacion/tem_sel_redes/sesion7/actividades/RedesSONET.pdf

Roll, B. (2007). *lo-interesante.blogspot.com/sistemas-de-comunicaciones-pticas.html*. Retrieved from <http://lo-interesante.blogspot.com/2007/12/sistemas-de-comunicaciones-pticas.html>

SCIENCE Daily. (2007). *www.sciencedaily.com*. Retrieved agosto 2009

SICARD, S. A. (2010). *Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Telecomunicaciones* (1 ed., Vol. 1). Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

TOMASI, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4ª ed.). Mexico, Mexico: Prentice Hall.