



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA  
PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD**

**Pedro José Orellana Melchor**

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, enero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA  
PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**PEDRO JOSÉ ORELLANA MELCHOR**

ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis García Cienfuegos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Anibal Silva de Los Angeles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de agosto de 2012.

  
**Pedro José Oreitana Melchor**



Guatemala, 27 de junio de 2013

Ingeniero  
Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador del Área de Electrónica  
Escuela Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Ingeniero Guzmán:

De acuerdo con la designación efectuada por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he asesorado el Trabajo de Graduación titulado: CARACTERIZACION DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD, desarrollado por el estudiante PEDRO JOSÉ ORELLANA MELCHOR, carné 2004-12606 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo, remitiéndolo a esa Coordinación para el trámite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me es grato suscribirme, deseándole éxitos en sus labores cotidianas.

Atentamente

*Ing. Byron Arrivillaga Méndez*  
*Col. 5217*

---

Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez  
Colegiado 5217  
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 78. 2013  
Guatemala, 17 de JULIO 2013.


Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA PARA  
TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD, del estudiante Pedro José  
Orellana Melchor, que cumple con los requisitos establecidos para tal  
fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrotécnica



SFO



REF. EIME 78. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; PEDRO JOSÉ ORELLANA MELCHOR titulado: CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD, procede a la autorización del mismo.**

  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



**GUATEMALA, 24 DE OCTUBRE 2013.**



Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 012.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA PARA TRANSMISIÓN A ALTA VELOCIDAD**, presentado por el estudiante universitario **Pedro José Orellana Melchor**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 20 de enero de 2014

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por guiarme y darme las fuerzas para alcanzar lo que un día fue una meta y hoy es una realidad.
<b>Mis padres</b>	Fulvia Melchor y Pedro Orellana, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Sofía, Gladys y Otto Orellana por su amistad, cariño y amor.
<b>Mi novia</b>	Alejandra Monroy, por ser mi mejor amiga y acompañarme en el camino de la vida.
<b>Mis abuelos</b>	Por todos aquellos consejos que me guiaron desde mis primeros días. (q.e.p.d.)
<b>Mis tíos y primos</b>	Con mucho cariño.
<b>Mis amigos</b>	Que de muchas maneras me apoyaron a seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida y permitirme terminar mi carrera universitaria.
<b>Mis padres</b>	Sin su incondicional apoyo no habría sido posible alcanzar ésta meta.
<b>Mis hermanos</b>	Por apoyarme cada vez que lo necesite.
<b>Mi novia</b>	Por todo su amor y estar siempre ahí.
<b>Mis amigos</b>	Por todas las situaciones difíciles que vivimos durante la carrera en grupo y sobrepasamos.
<b>Mi asesor</b>	Por su dedicación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. HISTORIA DE LA FIBRA ÓPTICA .....	1
1.1. Importancia de la adecuación de la fibra óptica.....	3
1.2. Dispersión cromática .....	3
1.3. Definición de dispersión cromática .....	4
1.4. Dispersión cromática .....	6
1.4.1. Parámetros de dispersión cromática .....	6
1.4.2. Variación de la dispersión cromática .....	7
1.4.3. Dispersión cromática positiva y negativa .....	7
1.4.4. Pendiente de dispersión .....	8
1.5. Las causas de la dispersión cromática .....	10
1.5.1. Dispersión del material .....	10
1.5.2. Dispersión de la guía de onda .....	11
1.5.3. Dispersión cromática combinada.....	14
1.6. Tipos de fibra, historia de la CD. ....	15
1.6.1. Fibras de dispersión no desplazada .....	15
1.6.2. Fibra de dispersión desplazada .....	16
1.6.3. Fibra de dispersión desplazada no nula .....	17
1.6.4. Banda ancha NZ – DSF.....	18

1.6.5.	Resumen gráfico .....	18
1.6.6.	Especificaciones Técnicas ITU – T .....	19
1.7.	Dispersión cromática y transmisión óptica .....	21
1.7.1.	Dispersión cromática inducida en la propagación del pulso.....	21
1.7.2.	Limitaciones de los parámetros de transmisión.....	24
1.7.2.1.	Ancho de banda de la señal y formato de modulación .....	24
1.7.2.2.	Señal Chirp.....	27
1.7.3.	Límites de dispersión cromática de interfaces estandarizadas. ....	28
1.7.4.	Limitaciones de longitud de fibra debido a la dispersión cromática. ....	30
1.8.	Tratar con valores excesivos de dispersión cromática .....	30
1.8.1.	Compensación de banda ancha – fibra de compensación de dispersión.....	32
1.8.1.1.	Gestión de pendiente de dispersión y compensación .....	34
1.9.	Medición de la dispersión cromática .....	38
1.9.1.	Cuándo realizar mediciones.....	38
1.9.2.	Qué parámetros se miden .....	39
1.9.3.	Métodos de medición .....	39
2.	DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) .....	41
2.1.	Birrefringencia de fibra .....	41
2.2.	Definición de PMD.....	43
2.2.1.	Diferencial del retardo de grupo .....	44
2.2.2.	Polarización por modo de acoplamiento .....	45

2.2.2.1.	Modo de polarización débil de acoplamiento .....	47
2.2.2.2.	Modo de acoplamiento de polarización fuerte .....	48
2.2.2.3.	Dependencia de la longitud de onda de DGD.....	48
2.3.	PMD en sistemas de transmisión de 40 Gbps.....	49
2.4.	Técnicas de compensación de PMD .....	51
2.5.	Medición de dispersión por modo de polarización.....	52
2.5.1.	Cuando medir PMD .....	53
3.	PERFIL DE ATENUACIÓN (AP) O ESPECTRO DE ATENUACIÓN (SA).....	55
3.1.	Atenuación de la fibra vs longitud de onda .....	56
3.2.	Fibras de bajo pico de agua .....	58
3.3.	Diferentes tipos de fibras monomodo .....	59
3.4.	Fibra para sistemas de transmisión DWDM extendido y CDWM.....	61
3.5.	Requerimientos de medición del perfil de atenuación .....	62
3.5.1.	Métodos de medición.....	63
3.5.2.	Caracterización, atenuación versus longitud de onda, incluyendo la absorción OH <sup>-</sup> del pico con un analizador de espectro óptico .....	63
4.	ENLACE DE FIBRA Y CARACTERIZACIÓN DE RED.....	65
4.1.	Definición de caracterización de enlace de fibra .....	65
4.2.	Cuando caracterizar un enlace de fibra óptica .....	66
4.3.	Definición de caracterización de red.....	67
4.4.	Mediciones de pérdida de inserción .....	68

4.5.	Mediciones ópticas de las pérdidas de retorno .....	69
4.6.	Distancia y caracterización de eventos usando un OTDR .....	71
4.6.1.	Medición de dispersión cromática .....	72
4.6.2.	Medición de dispersión por modo de polarización...	73
4.6.3.	Medición del perfil de atenuación .....	74
CONCLUSIONES.....		75
RECOMENDACIONES .....		77
BIBLIOGRAFÍA.....		79



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Propagación de pulso por longitudes de onda que viajan a diferentes velocidades de grupo .....	5
2.	Dispersión cromática positiva y negativa. ....	7
3.	Ejemplo de retraso del pulso, CD, y pendiente de dispersión.....	8
4.	Variación de pendiente de dispersión .....	10
5.	El índice de refracción del vidrio de sílice utilizado en la fibra óptica en función de longitud de onda .....	11
6.	Variación de MFD de acuerdo a la longitud de onda. ....	12
7.	La luz se propaga más rápido en el revestimiento (rojo) que en el núcleo (naranja).....	13
8.	Coeficiente de Dispersión Cromática (ps/nm/km) .....	14
9.	Esquema de variación del índice de refracción para SSMF .....	16
10.	Esquema de variación del índice de refracción para DSF. ....	17
11.	Esquema de variación del índice de refracción para NZ-DSF. ....	18
12.	Las curvas de dispersión de acuerdo a los tipos de fibra. ....	19
13.	Esquema de pulso superpuesto de acuerdo a la tasa de bit. ....	22
14.	Ejemplo de un retorno a cero (RZ) transmisión de una señal a 10 Gbps a través de dos veces 40 km en fibra G.652, donde la dispersión causa que los pulsos se ensanchen y claramente se solapen en el bit adyacente. ....	23
15.	Efecto del aumento en la tasa de bits sobre el ancho de pulso y los intervalos.....	25

16.	Ancho de banda óptico de NRZ y un 50 % de RZ de modulación de amplitud de señal (operando ambos a la misma velocidad de datos). .....	26
17.	Respuesta eléctrica a una señal chirp. ....	28
18.	Esquema de un amplificador de dos etapas con DCF insertada entre las dos etapas .....	32
19.	Las especificaciones para DCF varían significativamente entre los diferentes proveedores. ....	34
20.	Diferencia entre no tener gestión de la pendiente y tener la gestión de la pendiente de tres longitudes de onda que se compensan con la misma magnitud. ....	36
21.	Ejemplo de los diagramas de ojo que muestran el impacto de diferentes compensaciones de dispersión de longitudes de onda con y sin gestión de pendiente. ....	37
22.	Propagación en material birrefringente. ....	42
23.	Estrés extremo causa birrefringencia. ....	43
24.	Señales transmitidas a través de una fibra que experimenta birrefringencia y un modo de polarización lento y rápido. ....	44
25.	Diferencial de retardo de grupo en una fibra con alta birrefringencia. ....	45
26.	Birrefringencia en un enlace de fibra óptica. ....	46
27.	Modo fuerte de acoplamiento en telecomunicaciones de fibra óptica. ....	47
28.	DGD en función de la longitud de onda óptica. ....	49
29.	Longitud máxima de transmisión contra PMD .....	50
30.	Diagrama esquemático de un compensador óptico de PMD. ....	52
31.	Fluctuaciones a largo plazo del promedio de DGD. ....	53
32.	Atenuación de la fibra en función de la longitud de onda 1. ....	57
33.	Atenuación de la fibra en función de la longitud de onda 2 .....	59

34.	Atenuación en la fibra como función de la longitud de onda en relación con las transmisiones CWDM .....	61
35.	Absorción versus el tiempo de manufacturación de la fibra.....	62
36.	Traza de la medición de la fibra bajo prueba. ....	71

## TABLAS

I.	Ejemplo de especificaciones de coeficientes de CD de la fibra óptica.....	9
II.	ITU – T G.652 especificaciones de CD. ....	20
III.	ITU – T G.653.A especificaciones de CD.....	20
IV.	ITU – T G.655 especificaciones de CD. ....	20
V.	ITU – T G.656 especificaciones de CD. ....	20
VI.	Ejemplo de características de dispersión para diferentes tipos de fibra. ....	21
VII.	Máximo teórico permisible de CD para una transmisión a 1550 nm con 1 db de penalidad. ....	29
VIII.	Máximo teórico permitido de CD para una transmisión Ethernet de 10 Gbps a 1550 nm.....	29
IX.	Máxima distancia teórica de alcance para tipos de fibra G.652 y G.655 .....	30
X.	Método de ensayo de CD y referencias asociadas. ....	40
XI.	Bandas de longitud de onda de DWDM. ....	56
XII.	Características de fibra mono modo.....	60
XIII.	Sumario de test para caracterizar un enlace de fibra óptica .....	66



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>D</b>	Coeficiente de dispersión
<b>DCF</b>	Compensación de dispersión de fibra
<b>NZ-DSF</b>	Fibra de dispersión desplazada no nula
<b>NDSF</b>	Fibra de dispersión no desplazada
<b>IOR</b>	Índice de refracción
<b>MFD</b>	Modo de diámetro de campo
<b>IL</b>	Pérdida de inserción
<b>AP</b>	Perfil de atenuación
<b>DGD</b>	Retardo de grupo diferencial





## GLOSARIO

<b>Birrefringencia</b>	La descomposición de un haz de luz en dos haces divergentes (ordinaria y extraordinaria) cuando pasan a través de un material con un índice de refracción en función de la polarización de la luz (tales como fibras). También se llama doble refracción.
<b>Chirp</b>	Un cambio abrupto de la longitud de onda central de un láser durante un único impulso, debido a la inestabilidad láser.
<b>DCF</b>	Fibra que se utiliza para cancelar los efectos de la dispersión cromática, debido a su dispersión opuesta de la fibra que se utiliza en el sistema de transmisión. Proviene del término en inglés "Dispersion-Compensating Fiber".
<b>Dispersión</b>	Es la propagación temporal de una señal, causada por señales de luz que viajan a velocidades diferentes, ya sea debido a los efectos modales, cromáticos o efectos de polarización.

**Dispersión cromática positiva**

Índice de refracción: el índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un material transparente. El índice de refracción puede ser utilizado para calcular el ángulo de curvatura de un haz de luz cuando pasa de un medio transparente a otro. Como, plásticos transparentes.

**Fibra de compensación de dispersión**

Es un tipo de fibra que se utiliza para cancelar los efectos de la dispersión cromática, debido a su dispersión opuesta a la fibra que se utiliza en el sistema de transmisión.

**Fibra de dispersión desplazada no nula**

Es un tipo de fibra mono modo diseñada para tener la longitud de onda de dispersión nula cerca de la ventana de 1550 nm fuera de la ventana utilizada para la transmisión. Esto permite minimizar el fenómeno de mezcla de cuatro ondas y otros efectos no lineales y maximizar el ancho de banda.

**Fibras sin dispersión desplazada**

Un tipo de fibra diseñada para tener dispersión cero a una longitud de onda cerca de 1310 nm. Este es el tipo de fibra mono modo más popularmente desplegada.

**Índice de refracción**

El índice de refracciones la relación de la velocidad de la luz en el vacío a la velocidad de la luz en un material transparente. El índice de refracción se puede utilizar para calcular el ángulo de curvatura de un haz de luz a medida que pasan de un medio transparente a otro. Así, el índice de refracción se utiliza como una comprobación de control de calidad de los plásticos transparentes.

**Modo de diámetro de campo**

Una medida del tamaño del punto o el ancho de haz de luz que se propaga en una fibra monomodo. MFD está en función de la longitud de onda de la fuente, el radio de núcleo de la fibra, y el perfil del índice de refracción de la fibra.



## RESUMEN

El presente documento consta de cuatro capítulos en los que, se describen los pasos que se deben realizar para caracterizar un enlace de fibra óptica en el que se desea transmitir a altas velocidades y los parámetros que es obligatorio medir, esto debido a que la fibra óptica debe permanecer en ciertos niveles para que los equipos de transmisión y recepción en ambos extremos del enlace se entiendan entre sí. El primer capítulo trata sobre la medición de la dispersión cromática, que es un parámetro muy importante a controlar, ya que limita la capacidad de transmisión cuando la velocidad aumenta y, es factor de medición de las limitaciones de la transmisión del canal en cuanto a velocidad se refiere. En este capítulo se describen los tipos de dispersión cromática, las causas, las formas de medición y compensación.

En el segundo capítulo, se realiza el análisis de la medición de un parámetro que a diferencia de la dispersión cromática tiene relación con la forma de instalación y mantenimiento de la red de fibra óptica. Dicho parámetro es la dispersión por modo de polarización y tiene su origen en la forma de fabricación e instalación del mismo cable de fibra óptica. En el segundo capítulo se detallan las técnicas para compensar la dispersión por modo de polarización y cuando se debe medir dicho parámetro.

En el tercer capítulo se analiza, el efecto que tiene la longitud de onda de los equipos de transmisión y recepción en la atenuación que la fibra óptica hace sobre la potencia de la señal de transmisión. Y ya que dicha atenuación es intrínseca al diseño del cable de fibra óptica es necesario realizar sus mediciones previo y posteriormente a la instalación.

En el cuarto y último capítulo, se define cuando debe ser caracterizado un enlace de fibra óptica para poder cumplir con los requerimientos exactos de desempeño para soportar las demandas de acceso generalizado del despliegue tecnológico de banda ancha.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar la caracterización de los enlaces de fibra óptica para optimizar el desempeño del medio de transmisión y garantizar las transmisiones de datos a altas velocidades.

Se presentarán las bases para el estudio y análisis de las causas de los fenómenos de dispersión, que generan la necesidad de caracterizar los enlaces de fibra óptica. Identificar las causas que generan dichos fenómenos y dar a conocer sus modelos matemáticos para la interpretación de los mismos.

Dar a conocer cuándo afectan más dichos fenómenos y poder proveer de herramientas para compensar los efectos de los mismos.

### **Específicos**

1. Mostrar la historia de la fibra óptica.
2. Presentar los fundamentos de dispersión cromática y dispersión por modo de polarización.
3. Exponer el perfil de atenuación y su diferente comportamiento frente a diferentes longitudes de onda de las señales de transmisión.

4. Demostrar cuándo y cómo aplicar las técnicas de compensación de las diferentes dispersiones.
5. Presentar la caracterización de fibra como solución a los tres fenómenos que aparecen en las redes de fibra óptica cuando se transmite a alta velocidad.

## INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en las telecomunicaciones, ha permitido migrar de las redes de cobre a redes de fibra óptica que desde su invención, ha mejorado parámetros como su tamaño, peso, facilidad de manejo, flexibilidad, baja atenuación, etc. Es por ello que hoy en día son posibles los enlaces de fibra óptica a una distancia de 200 kilómetros en redes de fibra mono modo.

Los enlaces de fibra óptica pueden ser aéreos en postes, subterráneos en ductos y pozos y hasta submarinos debajo de los océanos. Dichos enlaces se vieron limitados en cuanto a la distancia y pérdidas de potencia cuando las velocidades de transmisión de datos aumento, viéndose en la necesidad de corregir nuevos parámetros que aparecieron juntamente con el aumento de la tasa de transmisión.

Para poder llevar al mismo nivel que los equipos de transmisión el medio de transmisión (fibra óptica), es necesario caracterizar la red, para ello se necesita medir tres parámetros del cable de fibra óptica y saber cómo deben ser compensados y en qué momentos.



# 1. HISTORIA DE LA FIBRA ÓPTICA

Las ondas de luz son una forma de energía electromagnética y la idea de transmitir información por medio de luz, como portadora, tiene más de un siglo de antigüedad. Hacia 1880, Alexander G. Bell, construyó el fotófono que enviaba mensajes vocales a corta distancia por medio de la luz. Sin embargo, resultaba inviable por la falta de fuentes de luz adecuadas.

Con la invención y construcción del láser en la década de los 60 volvió a tomar idea la posibilidad de utilizar la luz como soporte de comunicaciones fiables y de alto potencial de información, debido a su elevada frecuencia portadora 10<sup>14</sup> Hz. Por entonces, empezaron los estudios básicos sobre modulación y detección óptica. Los primeros experimentos sobre transmisión atmosférica pusieron de manifiesto diversos obstáculos como la escasa fiabilidad debida a precipitaciones, contaminación o turbulencias atmosféricas.

El empleo de fibras de vidrio como medio guía no tardó en resultar atractivo: tamaño, peso, facilidad de manejo, flexibilidad y coste. En concreto, las fibras de vidrio permitían guiar la luz mediante múltiples reflexiones internas de los rayos luminosos, sin embargo, en un principio presentaban elevadas atenuaciones.

En 1966 se produce un gran hito para los que serán las futuras comunicaciones por fibra óptica, y es la publicación por Kao y Hockman de un artículo en el cual se señalaba que la atenuación observada hasta entonces en las fibras de vidrio, no se debía a mecanismos intrínsecos sino a impurezas originadas en el proceso de fabricación. A partir de esta fecha empiezan a

producirse eventos que darán como resultado final la implantación y utilización cada vez mayor de la fibra óptica como alternativa a los cables de cobre:

- 1970 Corning obtiene fibras con atenuación 20 dB/km.
- 1972 fibra óptica con núcleo líquido con atenuación 8 dB/km.
- 1973 Corning obtiene fibra óptica de SiO<sub>2</sub> de alta pureza con atenuación 4 dB/km y deja obsoletas a las de núcleo líquido.
- 1976 NTT y Fujicura obtienen fibra óptica con atenuación 0,47 dB/km en 1300 nm, muy próximo al límite debido a factores intrínsecos (Rayleigh).
- 1979 se alcanzan atenuaciones 0,12 dB/km con fibras monomodo en 1550 nm. También en 1975 se descubría que las F.O. de SiO<sub>2</sub> presentan mínima dispersión en torno a 1300 nm, lo cual suponía disponer de grandes anchuras de banda para la transmisión, en cuanto la dispersión del material de la fibra constituye un factor intrínseco limitativo. Las nuevas posibilidades que ofrecían las F.O. también estimularon la investigación hacia fuentes y detectores ópticos fiables, de bajo consumo y tamaño reducido:
- 1970 primer láser de AlGaAs capaz de operar de forma continua a temperatura ambiente. Sin embargo, el tiempo de vida medio era de unas pocas horas. Desde entonces, los procesos han mejorado y hoy es posible encontrar diodos láser con más de 1 000 000 horas de vida media.



- 1971 C.A. Burrus desarrolla un nuevo tipo de emisor de luz, el LED, de pequeña superficie radiante, idóneo para el acoplamiento en F.O. Por lo que se refiere a los foto detectores, los diodos PIN y los de avalancha a base de Si, fueron desarrollados sin dificultades y ofrecían buenas características. Sin embargo, no podían aplicarse en longitud de onda > 1100 nm. El Ge era un buen candidato a ser utilizado para trabajar entre 1100 y 1600 nm, y ya en 1966 se disponía de ellos con elevadas prestaciones eléctricas. Sin embargo, la corriente de oscuridad (ruido) del Ge es elevada y da motivo a ensayos con fotodiodos con materiales como InGaAsP. El primer PIN de InGaAs se realiza en 1977.

### **1.1. Importancia de la adecuación de la fibra óptica**

A medida que los enlaces de fibra admiten mayores anchos de banda con requerimientos más exigentes, cada vez es más importante garantizar que los enlaces troncales cumplen estándares estrictos de pérdidas. La necesidad de mayor capacidad de transmisión de datos sigue aumentando a medida que crecen y se expanden las aplicaciones de red. Estas mayores velocidades de transmisión exigen cables que soporten mayor ancho de banda. Esta guía de pruebas describe requisitos de rendimiento de cableado, pruebas de campo, certificación y técnicas e instrumentos para resolución de problemas que permitan asegurarse de que el cableado de fibra óptica instalado es compatible con aplicaciones

### **1.2. Dispersión cromática**

La dispersión cromática (CD), es un parámetro importante de la fibra óptica, limita la capacidad de transmisión cuando las tasas de bits aumentan, especialmente con óptica amplificada en enlaces medianos y largos. La

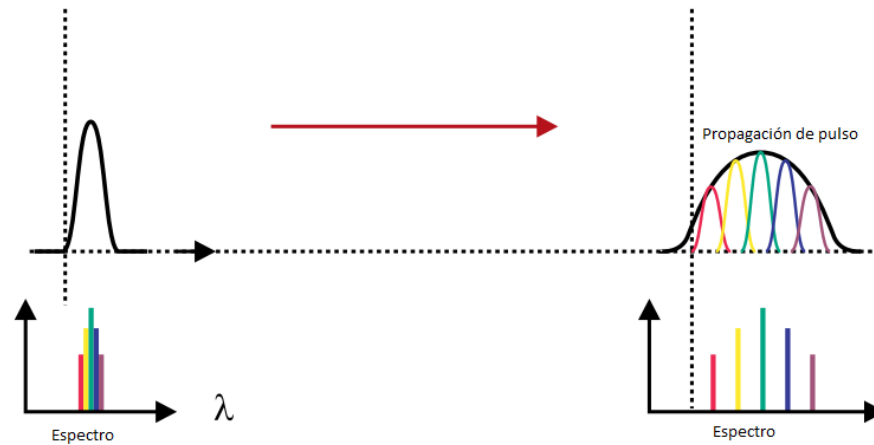
caracterización de la CD de la fibra es crítica para la comprensión de las limitaciones de la transmisión y la implementación de la correcta compensación que sea la solución para cumplir con los requerimientos de los sistemas de transmisión. Se pueden utilizar varios métodos para medir la dispersión cromática.

### **1.3. Definición de dispersión cromática**

CD es la propiedad de un medio (fibra óptica) que hace que diferentes longitudes de onda de luz se propaguen a velocidades diferentes a medida que viajan en él. En una fibra óptica, la longitud de onda depende tanto del material con el que la fibra está hecha (de vidrio) y de las propiedades de la estructura que el índice de refracción (IOR) crea en el medio en el que la luz se confina y se propaga.

En la transmisión de telecomunicaciones ópticas, un pulso de luz está compuesto de múltiples longitudes de onda (colores) y cada una viaja a diferente velocidad (velocidades de grupo), a causa de la CD. El pulso se propaga como ondas que llegan a intervalos diferentes. Que la longitud de onda dependa de la velocidad de grupo es formalmente conocida como velocidad de dispersión del grupo. Sin embargo, los términos velocidad de dispersión del grupo y CD se utilizan normalmente de forma intercambiable en la descripción de la propagación de longitudes de onda a diferentes velocidades.

Figura 1. **Propagación de pulso por longitudes de onda que viajan a diferentes velocidades de grupo**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 4.

La propagación de pulso en multiplexación densa por división de longitud de onda (DWDM) en transmisiones ópticas puede extenderse en períodos de bits adyacentes y perjudicar o reducir la calidad de la transmisión, lo que resulta en una mala señal de recepción. Por lo tanto, la caracterización de la CD es vital para garantizar la calidad de la señal de transmisión. CD es el mecanismo de dispersión dominante en fibras monomodo.

## 1.4. Dispersión cromática

Para analizar la dispersión cromática, se han estandarizado parámetros de medición, y se han identificado los tipos de dispersión cromática que existen.

### 1.4.1. Parámetros de dispersión cromática

La CD de una fibra dada representa el retardo de la llegada relativa (en ps) de dos componentes de longitud de onda separadas por un nanómetro (nm). Tenga en cuenta estos cuatro parámetros:

- El valor de CD está en función de una determinada longitud de onda expresada en ps / nm (CD puede cambiar en función de longitud de onda).
- El coeficiente CD (referido como D) tiene un valor que se normaliza a la distancia de un kilómetro, por lo general se expresa en ps / (nm x km).
- La pendiente de CD (S), representa la cantidad de cambio de CD como una función de longitud de onda expresada en ps / nm<sup>2</sup>.
- El coeficiente de la pendiente de CD tiene un valor que generalmente se normaliza a la distancia de un kilómetro, expresada en ps / (nm<sup>2</sup> x km).

La longitud de onda de dispersión cero,  $\lambda_0$ , expresada en nm, se define como una longitud de onda con una CD igual a cero. Operando a esta longitud de onda no presenta CD, pero por lo general presenta problemas derivados de la no linealidad óptica y el efecto de mezcla de cuatro ondas en sistemas DWDM. La pendiente en esta longitud de onda se define como pendiente de dispersión cero ( $S_0$ ).

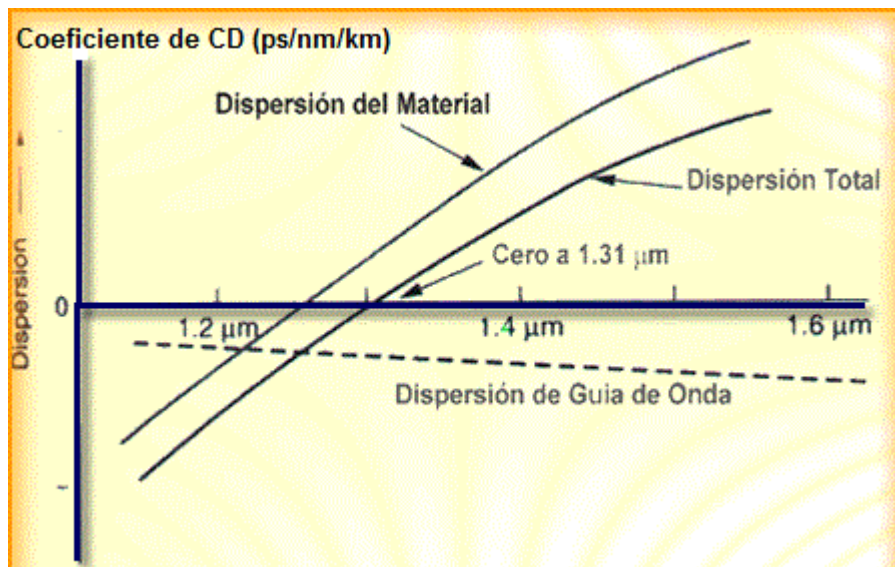
### 1.4.2. Variación de la dispersión cromática

CD generalmente no varía significativamente con el tiempo y las condiciones de instalación debido a su baja sensibilidad a la temperatura, que típicamente es  $-00.0025 \text{ Ps} / (\text{nm} \times \text{km} \times ^\circ \text{C})$  para el coeficiente de  $0,0025$  y  $\text{PS} / (\text{nm}^2 \times \text{km} \times ^\circ \text{C})$  por la pendiente.

### 1.4.3. Dispersión cromática positiva y negativa

Las longitudes de onda cortas viajan más rápido que las largas cuando la CD es positiva. Cuando la CD es negativa, longitudes de onda corta viajan más lento. Lo contrario es cierto para longitudes de onda largas, que viajan más lento cuando CD es positiva y más rápido cuando CD es negativa.

Figura 2. Dispersión cromática positiva y negativa



Fuente: [www.lafibraoptica.com/category/conceptos-basicos-fibra-optica/](http://www.lafibraoptica.com/category/conceptos-basicos-fibra-optica/) Consulta: septiembre de 2012.

La dispersión negativa se utiliza con frecuencia para compensar la excesiva dispersión positiva en una red de transmisión de fibra.

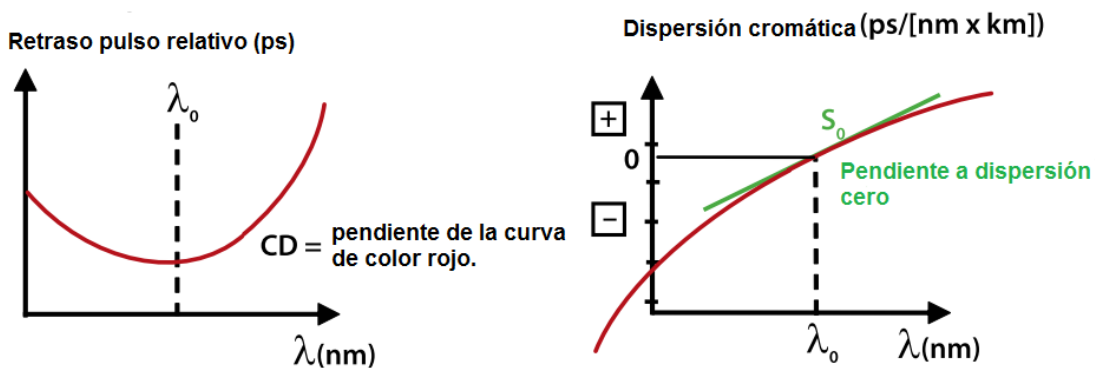
#### 1.4.4. Pendiente de dispersión

La pendiente de dispersión (S) describe la cantidad de cambio en CD como una función de longitud de onda.

- Expresada en unidades de ps / (nm<sup>2</sup> x km).
- La pendiente en  $\lambda_0$  muestra de dónde sale  $S_0$  y se expresa en ps / (nm<sup>2</sup> x km).

Como se muestra a continuación, la CD es la derivada del retraso de impulsos relativos. La pendiente de la CD es la derivada de los valores de CD.

Figura 3. Ejemplo de retraso del pulso, CD, y pendiente de dispersión



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 6.

Fabricantes de fibra utilizan el coeficiente de dispersión (ps / [nm x km]) para especificar los parámetros de la fibra, mientras que los fabricantes de equipos utilizan el valor de la dispersión total (ps / nm) para garantizar la adecuación de la fibra para la transmisión de determinadas longitudes de onda a velocidades de bits dadas.

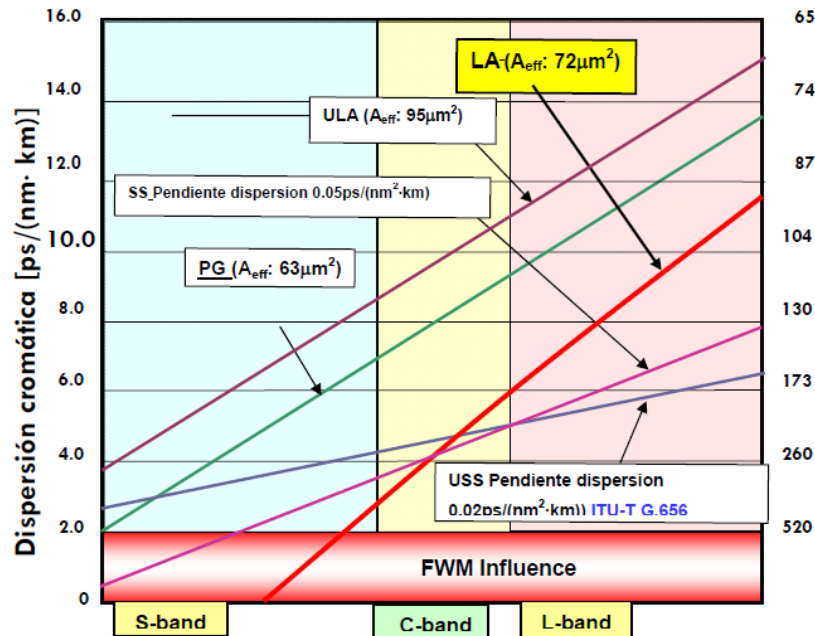
Tabla I. **Ejemplo de especificaciones de coeficientes de CD de la fibra óptica**

Banda - C: 1530 a 1565 nm	2,6 a 6,0 ps/(nm X km)
Banda - L: 1565 a 1625 nm	4,0 a 8,9 ps/(nm X km)
Pendiente de Dispersión a 1550 nm	$\leq 0,05$ ps/(nm <sup>2</sup> X km)

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010.

Una baja pendiente de dispersión da lugar a menos cambios de dispersión a lo largo de la longitud de onda y, por tanto la CD se mantiene constante como una función de la longitud de onda. Para alta velocidad, redes multicanal DWDM, las bajas pendientes de dispersión permiten más uniformidad y óptimo rendimiento en toda la longitud de onda DWDM.

Figura 4. Variación de pendiente de dispersión



Fuente: <http://www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica/>. Consulta: septiembre de 2012.

## 1.5. Las causas de la dispersión cromática

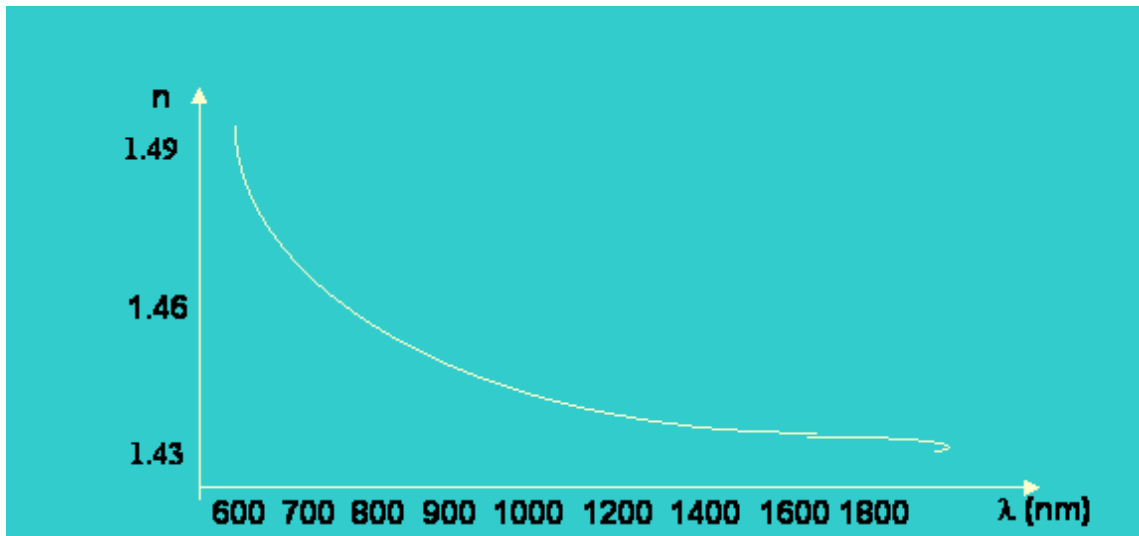
El material y la dispersión de la guía de onda se combinan para producir CD en fibras monomodo.

### 1.5.1. Dispersión del material

El IOR para el material que compone el núcleo de la fibra, como el vidrio y / o agentes de dopado, depende de la longitud de onda. En consecuencia, la velocidad (velocidad de grupo) de cada componente de longitud de onda puede variar con longitud de onda.



Figura 5. **El índice de refracción del vidrio de sílice utilizado en la fibra óptica en función de longitud de onda**



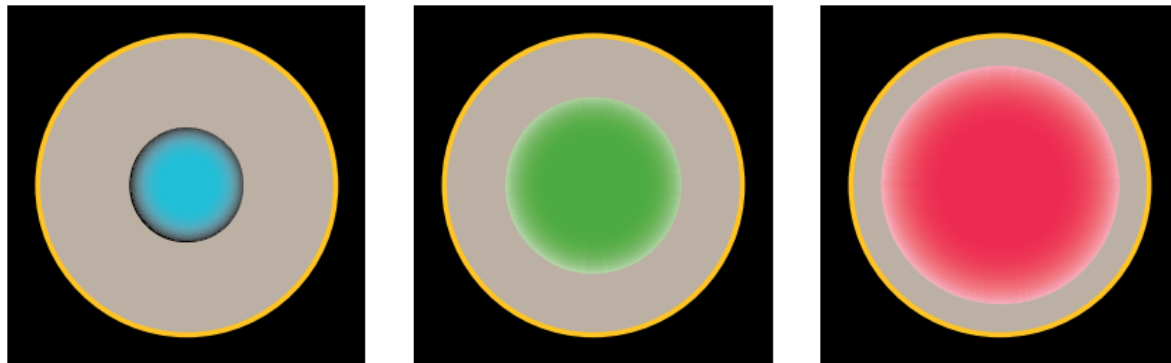
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos76/evolucion-fibra-optica-futuro/evolucion-fibra-optica-futuro2.shtml>. Consulta: septiembre de 2012.

### 1.5.2. **Dispersión de la guía de onda**

La dispersión de la guía de onda es la variación en la velocidad de grupo de diferentes componentes de longitud de onda de la luz causada principalmente por el modo del diámetro de campo (MFD), o el diámetro del haz de luz dentro de la longitud de onda de una fibra monomodo.

Diferencias en ingeniería en el IOR, entre el núcleo de la fibra y las regiones del revestimiento hacen que la luz se propague más rápido en el revestimiento que en el núcleo. La diferencia de la velocidad de propagación es en gran medida independiente de la longitud de onda. Por lo tanto, a medida que aumenta MFD, un mayor porcentaje de la luz se propaga dentro de la región de revestimiento resultando en una propagación más rápida.

Figura 6. **Variación de MFD de acuerdo a la longitud de onda**



**Longitud de Onda Corta**

**Longitud de Onda Mediana**

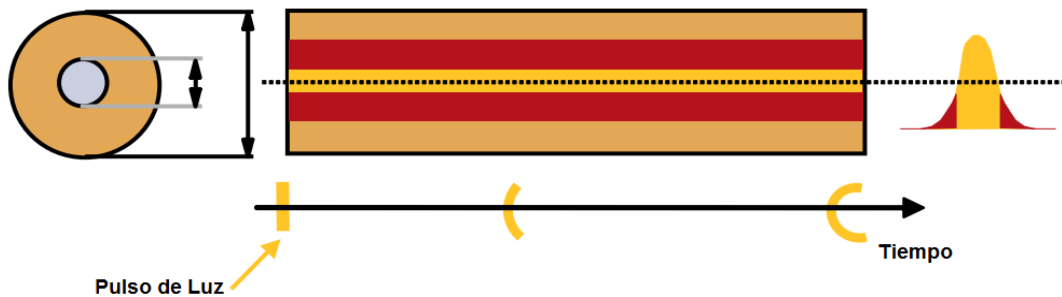
**Longitud de Onda Larga**

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 10.

Largas longitudes de onda exhiben mayor MFD y, por tanto, más rápida propagación.

El perfil del índice de la fibra (variación de la IOR en la fibra) y el MFD (superficie de la luz de la longitud de onda), agrupados definen la dispersión de la guía de onda.

Figura 7. **La luz se propaga más rápido en el revestimiento (rojo) que en el núcleo (naranja)**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 10.

La dispersión de guías de ondas (por unidad de longitud) dependen de muchos parámetros:

- $\Delta n$ , la diferencia entre el IOR del núcleo y el IOR del revestimiento, o el índice del perfil.
- El diámetro del núcleo, cuando el diámetro del núcleo disminuye generalmente la dispersión aumenta.
- Fabricación de la fibra (determina el núcleo, la forma del revestimiento y el buen perfil del índice radial).

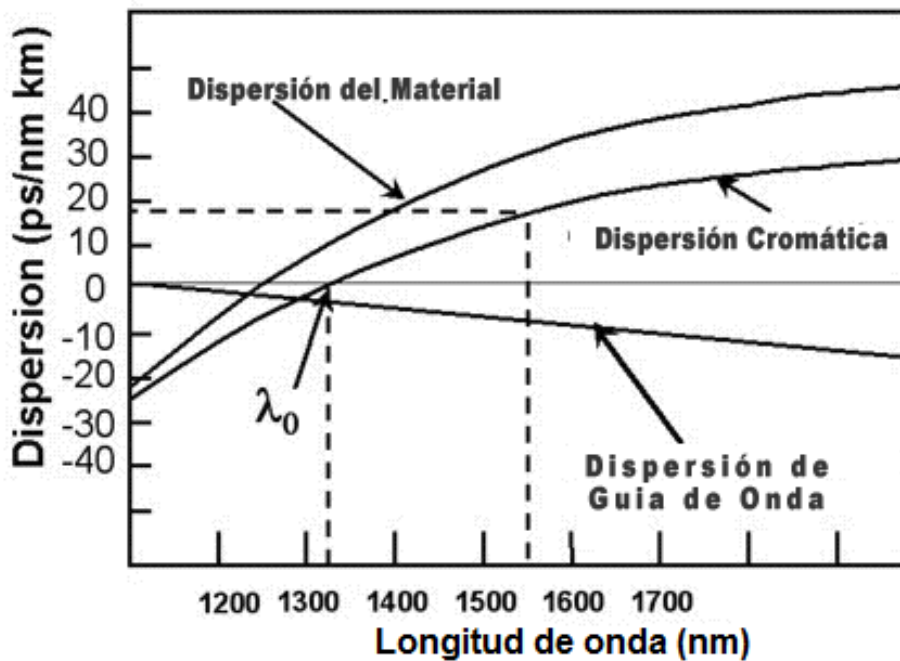
Los fabricantes de fibra típicamente ajustan la dispersión de la guía de onda para lograr ciertas características de CD.

### 1.5.3. Dispersión cromática combinada

CD combinada se refiere al valor tanto para la dispersión del material y el de la guía de ondas juntos. El total de CD combinada para un enlace de fibra depende de la distancia (km).

Debates anteriores de CD y sus mediciones se refieren al combinado CD, como las dispersiones del material y de la guía de onda.

Figura 8. **Coefficiente de dispersión cromática (ps/nm/km)**



Fuente: <http://www.lafibraoptica Peru.com/la-dispersion-cromatica-en-la-fibra-optica/>. Consulta: septiembre de 2012.

## **1.6. Tipos de fibra, historia de la CD**

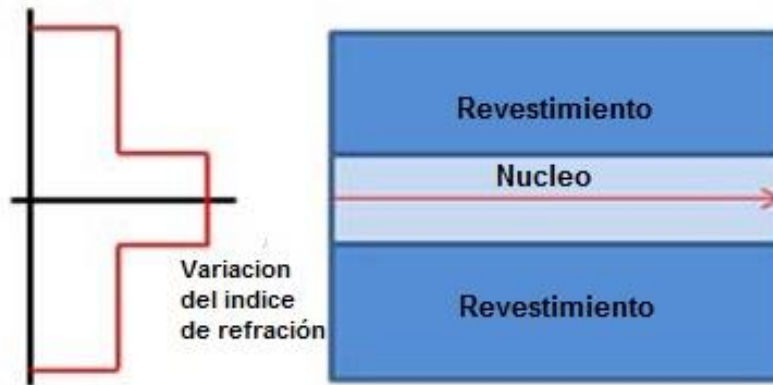
Fabricantes de fibra continúan manipulando la CD para producir diferentes tipos de fibras para diferentes aplicaciones y requisitos. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha clasificado estas diversas fibras monomodo en cuatro categorías principales, según a las propiedades de sus CD: fibras de dispersión no desplazada (NDSF), fibra de dispersión desplazada (DSF), fibras de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF) y NZ-DSF de banda ancha.

Nota: la CD no se limita a las fibras monomodo, también afecta las fibras multimodo. Las fibras multimodo no se consideran en este documento.

### **1.6.1. Fibras de dispersión no desplazada**

Fibra ITU-TG.652, a menudo referida como estándar de fibra monomodo (SSMF), fue el primer tipo de fibra monomodo fabricada. Era originalmente desarrollada para la transmisión óptima en torno a 1310 nm, con un perfil de índice con cambio abrupto entre el núcleo y el revestimiento (ver figura abajo). Hoy en día, la SSMF está bien adaptada para transmisión DWDM en las bandas C y L.

Figura 9. **Esquema de variación del índice de refracción para SSMF**

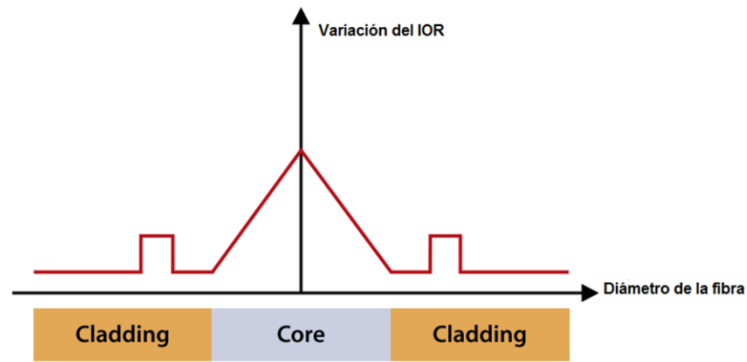


Fuente: <http://www.fibraopticahoy.com>. Consulta: septiembre de 2012

### **1.6.2. Fibra de dispersión desplazada**

La fibra de dispersión desplazada fue diseñada con la dispersión cero para longitud de onda dentro de la región de 1550 nm para incrementar el alcance de los sistemas de transmisión de larga distancia, así como para aprovecharla fibra de menor atenuación. Clasificado como el ITU-TG.653 de fibra, es ideal para la transmisión de longitud de onda única en redes de muy larga distancia.

Figura 10. **Esquema de variación del índice de refracción para DSF**

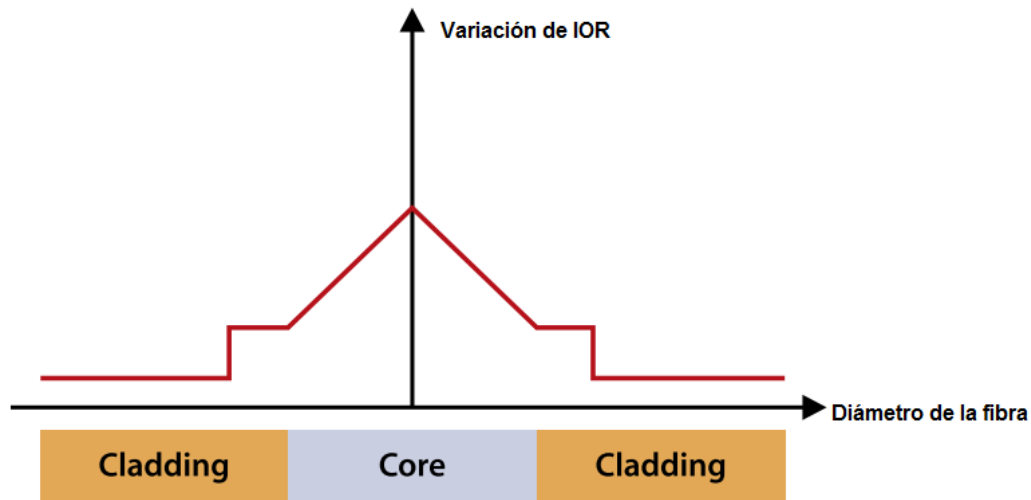


Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 13.

### **1.6.3. Fibra de dispersión desplazada no nula**

Con la llegada de las aplicaciones DWDM, una ligera CD positiva o negativa es deseable para longitudes de onda alrededor de 1550 nm, esto elimina las interacciones no lineales entre los múltiples canales DWDM, conocidos como mezcla de cuatro ondas. Típicamente, la fibra clasificada como ITU-T G.655 tiene una magnitud de CD de un tercio de la de NDSF de dispersión positiva o negativa.

Figura 11. Esquema de variación del índice de refracción para NZ-DSF



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 13.

#### 1.6.4. Banda ancha NZ – DSF

Una nueva estandarización de un tipo de fibra conocida como ITU-T G.656 ofrece una mayor capacidad de transmisión WDM que se extiende más allá de las convencionalmente definidas banda C y L (nominalmente de 1530 a 1565 nm y de 1570 a 1610 nm, respectivamente). Ofrece una dispersión moderada (2 a 14 ps / [nm x km]) entre longitudes de onda de 1460 y 1625 nm.

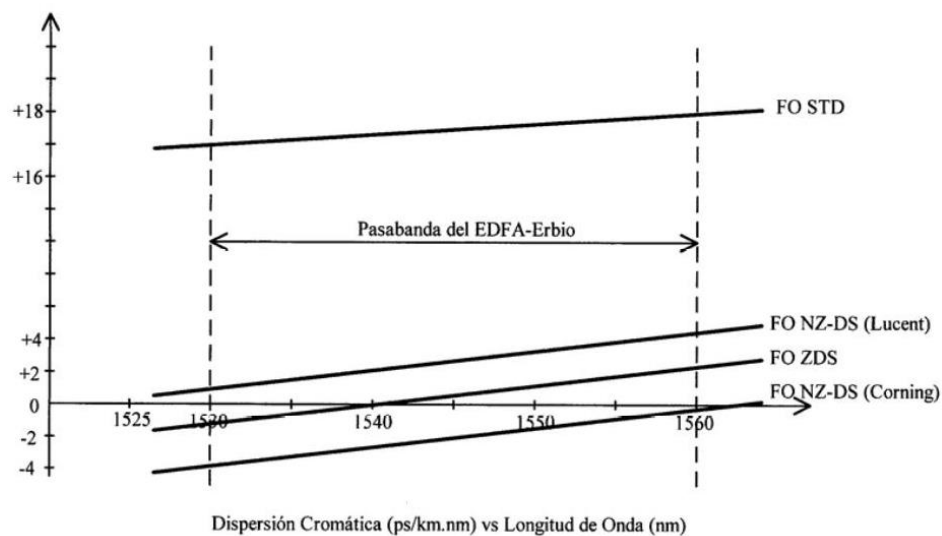
#### 1.6.5. Resumen gráfico

Cada uno de los tipos de fibras descritas tiene sus propiedades de dispersión. La cantidad de dispersión frente a longitud de onda y la pendiente de dispersión y la longitud de onda de dispersión cero varía en función del tipo de fibra. Además, tenga en cuenta que cada tipo de fibra y las especificaciones



de dispersión propias proporcionan un rango de valores aceptables y, por tanto, las propiedades de dispersión reales pueden variar de un segmento de fibra a la siguiente.

Figura 12. Las curvas de dispersión de acuerdo a los tipos de fibra



Fuente: [www.robertoares.com.ar/wp-content/uploads/2010/06/Seccion-5.pdf](http://www.robertoares.com.ar/wp-content/uploads/2010/06/Seccion-5.pdf). p 1402-(4).

Consulta: octubre de 2012.

### 1.6.6. Especificaciones Técnicas ITU – T

Como se mencionó anteriormente, la ITU – T diferencia cada tipo de fibra y proporciona los requerimientos de parámetros técnicos relevantes, como la longitud de onda dispersión cero ( $\lambda_0$ ), la pendiente de dispersión ( $S_0$ ) a  $\lambda_0$ , el coeficiente de dispersión ( $D_{1550}$ ) en la longitud de onda de 1550 nm, y la pendiente de dispersión a 1550 nm. Las siguientes tablas proporcionan relevantes requisitos para cada clase de tipo de fibra en general (algunos tipos de fibras tienen subtipos, como G.652.A y G.652.B).

Tabla II. ITU – T G.652 especificaciones de CD

$\lambda_{0min}$	1300 nm
$\lambda_{0max}$	1324 nm
$S_{0max}$	0,092 ps / (nm <sup>2</sup> )
$D_{1550}$ (valor típico)	17 ps/(nm * km)
$S_{1550}$ (valor típico)	0,056 ps/(nm <sup>2</sup> * km)

Fuente: www.telnet-ri.es. Consulta: noviembre 2012

Tabla III. ITU – T G.653.A especificaciones de CD

$\lambda_{0min}$	1500 nm
$\lambda_{0max}$	1600 nm
$S_{0max}$	0,085 ps / (nm <sup>2</sup> )
$\lambda_{min}$	1525 nm
$\lambda_{max}$	1575 nm
$D_{max}$ [ $D(\lambda_{min}) \leq  D_{max}  \leq D(\lambda_{max})$ ]	3,5 ps/(nm * km)

Fuente: www.telnet-ri.es. Consulta: noviembre 2012

Tabla IV. ITU – T G.655 especificaciones de CD

Clasificación	$D_{min}$ (ps/nm/km) a 1530 nm	$D_{max}$ (ps/nm/km) a 1565 nm	Signo D
G.655.A - C	1,0	10,0	+ o -
G.655.D	1,2	7,2	+
G.655.E	4,8	10,1	+

Fuente: www.telnet-ri.es. Consulta: noviembre 2012

Tabla V. ITU – T G.656 especificaciones de CD

$\lambda_{min}$ y $\lambda_{max}$	1460 y 1625 nm
Valor mínimo de $D_{min}$	2 ps/(nm * km)
Valor máximo de $D_{max}$	14 ps/(nm * km)
Signo	Positivo

Fuente: www.telnet-ri.es. Consulta: noviembre 2012

A partir de las especificaciones, la tabla siguiente proporciona ejemplos prácticos de CD para diversos tipos de fibras. Sin embargo, tenga en cuenta que la CD puede variar de estos valores para un tipo de fibra dado.

Tabla VI. **Ejemplo de características de dispersión para diferentes tipos de fibra**

ITU - T Tipo de Fibra	Descripción	Longitud de onda Dispersión cero	Ejemplo Dispersión a 1550 nm	Ejemplo de S de D a 1550 nm
G.652	Fibra de dispersión no desplazada	1300 - 1324 nm	~17ps/nm/km	0,057 ps/nm <sup>2</sup> /km
G.653 Desplazada	Fibra de dispersión	1500 - 1600 nm	0 ps/nm/km	0,07 ps/nm <sup>2</sup> /km
G.655.A - C de cero.	Fibra de dispersión desplazada diferente 1450 - 1480 nm	No especificado pero aproximado	4 ps/nm/km	0,045 a 0,1 ps/nm <sup>2</sup> /km
cero.	Fibra de dispersión negativa diferente de		-5 ps/nm/km	0,05 a 0,12 ps/nm <sup>2</sup> /km

Fuente: www.telnet-ri.es. Consulta: noviembre 2012

## 1.7. Dispersión cromática y transmisión óptica

La dispersión cromática tiene un gran efecto en la transmisión óptica o en la transmisión de luz, por realizar el efecto de ensanchamiento del pulso inicial dentro del medio.

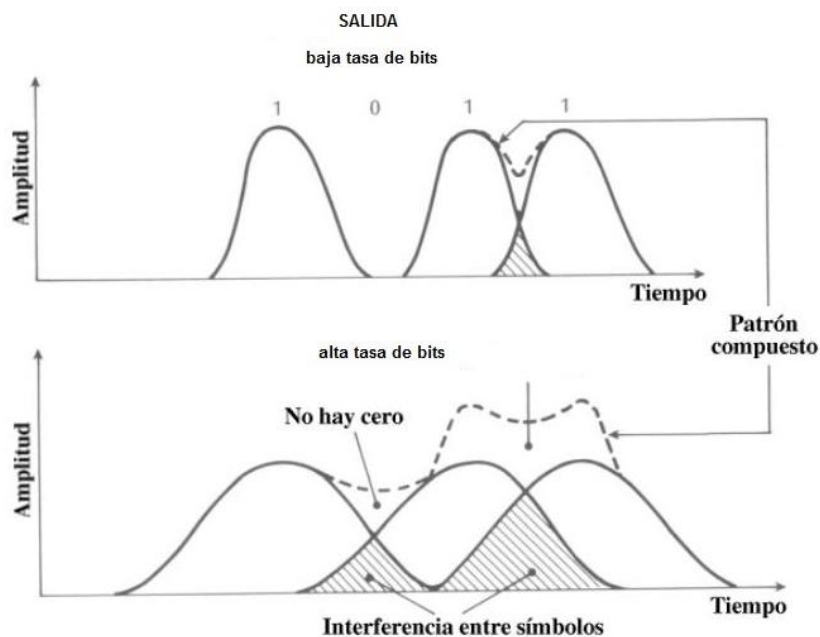
### 1.7.1. Dispersión cromática inducida en la propagación del pulso

Pulsos ópticos viajan a través de la fibra en una matriz de longitudes de onda, típicamente alrededor de una longitud de onda central. Porque la velocidad de propagación depende del índice de refracción y la CD, las

longitudes de onda pueden viajar a velocidades diferentes. Los que viajan más rápido llegan antes de los que viajan más lento, lo que resulta en un temporal de ampliación del pulso inicial. Los efectos de este fenómeno en la calidad de la transmisión óptica dependen de la tasa de bits de la señal, aunque, las tecnologías y el formato de la señal tienen el mayor impacto en la tolerancia de la señal para la propagación del pulso.

La figura 13 ilustra la propagación del pulso de acuerdo a la tasa de bits para una cantidad de CD dada.

Figura 13. **Esquema de pulso superpuesto de acuerdo a la tasa de bit**

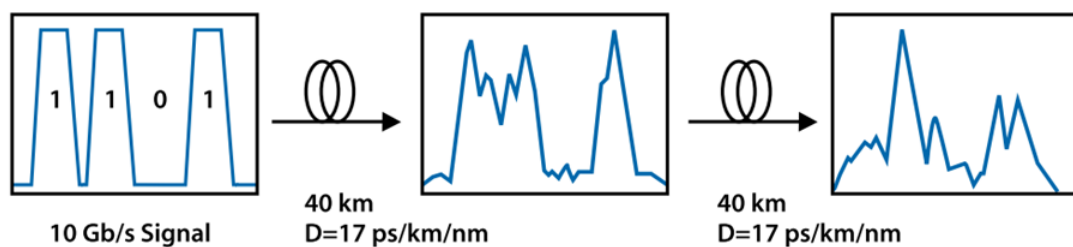


Fuente: Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, Universidad de Las Palmas gran Canaria. [www.iuma.ulpgc.es/](http://www.iuma.ulpgc.es/) Consulta: octubre de 2012.

Para señales de baja velocidad de datos, la cantidad de CD amplía de manera significativa los pulsos en períodos de bits adyacentes, por lo tanto, la dispersión no afecta a la discriminación adecuada de cada bit.

Con una velocidad alta de datos en la entrada, los impulsos son más cortos y están más cerca de estar juntos. Cuando se produce la dispersión, la propagación del pulso en los periodos de bit adyacentes hace que sea difícil discernir si un pulso condujo a la ocurrencia de errores de bits. Este solapamiento en períodos de bits adyacentes se conoce como la interferencia entre símbolos (ISI), debido a que interfiere con la recepción adecuada de un bit vecino.

Figura 14. **Ejemplo de un retorno a cero (RZ) transmisión de una señal a 10 Gbps a través de dos veces 40 km en fibra G.652, donde la dispersión causa que los pulsos se ensanchen y claramente se solapan en el bit adyacente**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p 18.

## **1.7.2. Limitaciones de los parámetros de transmisión**

Las formas digitales para codificar la señal afectan otros parámetros aparte de la forma de la señal puramente.

### **1.7.2.1. Ancho de banda de la señal y formato de modulación**

El formato de modulación utilizado para codificar la información digital en la señal óptica puede afectar significativamente la tolerancia de la señal a CD experimentada durante la transmisión. Con la codificación convencional de la información digital sobre la amplitud de la señal óptica (ejemplo de no retorno a cero [NRZ]), tanto el ancho de banda óptico de la señal y el ancho de los pulsos ópticos son directamente relacionados con la velocidad de datos de la señal. Para velocidades de datos superiores, los impulsos son más cortos y espaciados más juntos con un espectro óptico más amplio.

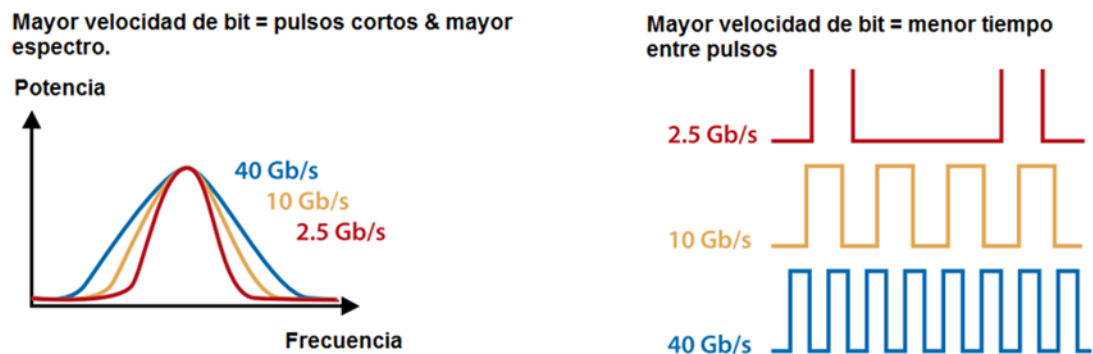
El impacto de CD-inducida en el pulso de propagación se empieza a incrementar significativamente en las tasas de datos más altas, por ser más corto, el espacio entre los pulsos, tienen menos espacio para difundirse antes de la superposición con el bit del período adyacente. Además, dado el espectro más amplio, estos pulsos comprenden una mayor gama de componentes de longitud de onda, que viajan a diferentes velocidades y, por tanto, experimentan una mayor propagación.

Estos dos efectos, acercan los pulsos y amplían el espectro óptico, disminuyendo la tolerancia de la señal óptica para CD por un factor de 4 cuando la tasa de datos se duplica (suponiendo un formato de modulación constante).

Un factor de tolerancia menor a 2x es debido a la mitad del espaciado de la mitad de muchos impulsos. El otro factor de 2x proviene de que el espectro es dos veces el ancho, debido a que los pulsos se acortan en un factor de dos.

El aumento de la tasa de bits por un factor de 4 reduce la tolerancia a CD por un factor de 16.

Figura 15. **Efecto del aumento en la tasa de bits sobre el ancho de pulso y los intervalos**



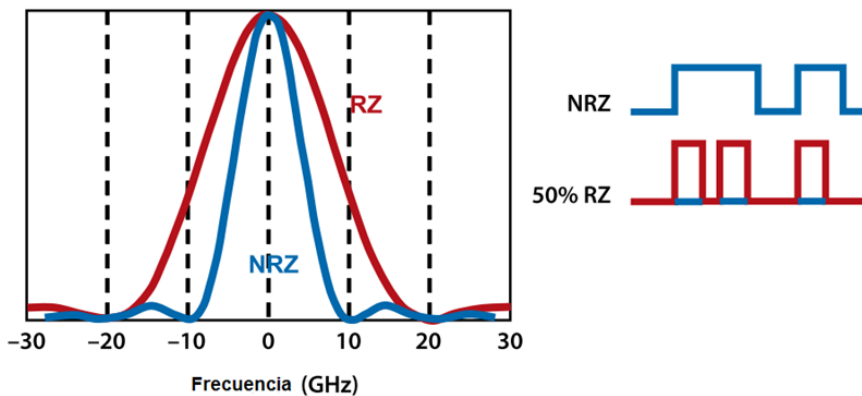
Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 19.

Por ejemplo, una señal de 10 Gbps tiene nominalmente una tolerancia de la 1/16 va parte de la cantidad de CD que una señal de 2,5 Gbps asumiendo que ambos utilizan el mismo formato de modulación. Sin embargo, note que diferentes formatos de modulación y métodos de generación y modulación de la señal óptica codificada tienen gran impacto en la tolerancia de una señal a CD. Por lo tanto, la tolerancia de los sistemas actuales no puede seguir el mismo escalamiento de la tasa de bits como se muestra en el ejemplo anterior. Típicamente, los formatos y métodos que dan como resultado señales con una

mayor tolerancia para CD se utilizan para las tasas de bits más altas, simplemente para mitigar las deficiencias de dispersión.

Convencionalmente, los formatos de modulación de amplitud, tales como NRZ y retorno a cero (RZ), se han utilizado en velocidades de datos de 2,5 y 10 Gbps. Formatos de modulación, tales como duobinaria y modulación de frecuencia de cuadratura desplazada (DQPSK), son más robustos frente a las consecuencias de la CD y se utilizan a velocidades de datos de 10 y 40 Gbps para superarlas deficiencias de dispersión.

**Figura 16. Ancho de banda óptico de NRZ y un 50 % de RZ de modulación de amplitud de señal (operando ambos a la misma velocidad de datos)**



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 20.

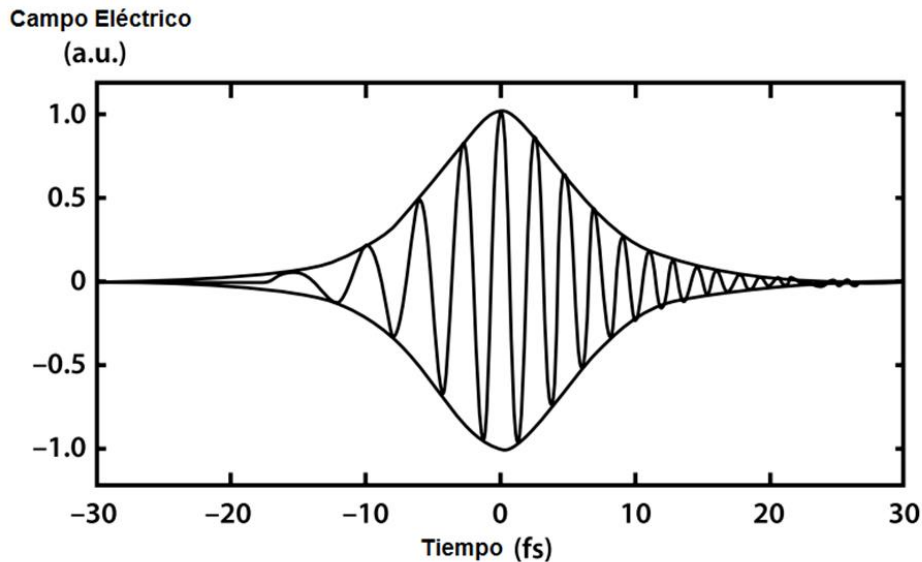


### 1.7.2.2. Señal Chirp

El cambio de la fuente de modulación del láser entre el encendido y apagado puede afectar a la modulación de amplitud de una señal modulada, lo que complica los efectos de la CD. Durante el proceso, la salida de longitud de onda de la señal se desplaza ligeramente a medida que la potencia de salida aumenta y disminuye. Este desplazamiento causa un ruido en la frecuencia que le da al láser un espectro óptico más ancho ya que introduce componentes adicionales de longitud de onda en los bordes anterior y posterior del pulso.

Si estos componentes están orientados de tal manera que la CD causa que el borde anterior del impulso viaje más rápido y los del borde final viajen más lento, el pulso se ampliará más rápidamente como si la señal no tuviera ruido. Por lo tanto la señal tendrá una débil tolerancia a la dispersión cromática. Sin embargo, si la dispersión provoca que los componentes del borde anterior viajen más lento que el resto del pulso y los componentes del borde final viajen más rápido, este comprimirá la anchura temporal del pulso y puede resultar en una mayor tolerancia para la dispersión en comparación con una señal sin ruido. Nótese que estos dos casos, respectivamente, pueden ser causados por utilizar los signos opuestos de CD y, en algunos casos, la frecuencia del ruido es aplicada intencionalmente para mejorar la tolerancia de dispersión.

Figura 17. **Respuesta eléctrica a una señal chirp**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p 21.

### **1.7.3. Límites de dispersión cromática de interfaces estandarizadas**

Para las interfaces ópticas estandarizadas de los sistemas de transporte de red óptica síncrona (SONET), GR-253-CORE define los límites de tolerancia de CD de acuerdo con la tasa de bit por canal. Se afirma que el pulso generado por el ensanchamiento de CD no debe exceder de 0,306 veces el período de bit NRZ. Para interfaces de jerarquía digital síncrona (SDH), ITU-T G.957 y G.693 proporcionará los límites de tolerancia.

La siguiente tabla proporciona ejemplos de estos límites para la transmisión a 1550 nm utilizando codificación NRZ con una penalización de potencia de 1 dB.

Tabla VII. **Máximo teórico permisible de CD para una transmisión a 1550 nm con 1 db de penalidad**

Velocidad de bit /Canal	Gbps	Transmisión		Tolerancia CD a 1550 nm (ps/nm)
		SDH	SONET	
2,5		STM - 16 ( L - 16,2)	OC-48 (LR-2)	18817
10		STM - 64 (L - 64,2)	OC -192 (LR-2)	1176
40		TM - 256 (VSR - 2000-3L)	OC-768(SR-2)	73,5

Fuente:COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 22.

Aunque las interfaces de transmisión no estandaricen sus propiedades tienen un máximo específico total de tolerancia a CD, los valores pueden variar significativamente a medida que se utilizan distintas tecnologías para servir a diferentes aplicaciones de transmisión.

Considerando la transmisión de Ethernet, como se define en el estándar IEEE 802.3ae-2002, los niveles de tolerancia de una transmisión de 10 Gbps de Ethernet son muy inferiores que los de SONET / SDH, que impulsa un límite más estricto de CD.

Tabla VIII. **Máximo teórico permitido de CD para una transmisión Ethernet de 10 Gbps a 1550 nm**

Velocidad de bit/ Canal (Gbps).	Transmisión	Tolerancia a CD a 1550 nm (ps/nm)
10	Ethernet	738

Fuente:COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 22.

#### 1.7.4. Limitaciones de longitud de fibra debido a la dispersión cromática

CD es un efecto lineal que se acumula en un enlace linealmente con la distancia. En consecuencia, el total de CD en una fibra aumenta proporcionalmente con la distancia. La siguiente tabla proporciona la máxima tolerancia para el total de CD para cada interfaz estandarizada correspondiente.

Tabla IX. **Máxima distancia teórica de alcance para tipos de fibra G.652 y G.655**

Velocidad de bit / Canal (Gbps).	Tolerancia a CD a 1550 nm (ps/nm)	Dist. max. (km) para ITU-T G652	Dist. max. (km) para ITU-T G655
2,5	18817	> 1100	>4700
10	1176	~ 70	~290
40	73,5	~ 5	~20

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 23.

Similarmente, cada interfaz de transmisión propia tiene un total de tolerancia a CD. El adecuado rendimiento del enlace quiere que el total dispersión cromática para el enlace entero de fibra sea menor que el valor máximo tolerable.

#### 1.8. Tratar con valores excesivos de dispersión cromática

CD es un parámetro lineal intrínseco de la fibra, lo que requiere compensación mediante la inserción de un dispositivo óptico en el enlace para producir dispersión de signo contrario para cancelar los efectos de la dispersión.

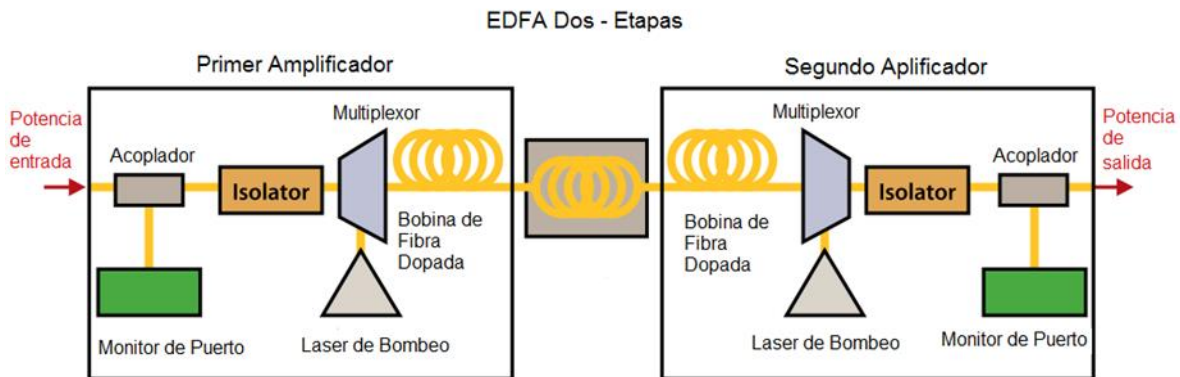
Por ejemplo, si los componentes de longitud de onda más largos viajan más lento en la fibra, en relación a los componentes de longitud de onda más cortas, a continuación, dentro del elemento compensador, aquellos componentes de longitud de onda más larga deben viajar más rápido.

Diversas técnicas permiten la compensación de CD. CD de alojamiento pasivo (DA), la técnica, que se define en la recomendación UIT-T G.691, puede ser utilizado en un largo recorrido, tramos múltiples, alta velocidad de datos de un sistema de transmisión. Un compensador de la dispersión pasiva (PDC, G.671) puede ser implementado usando, en general, la compensación de la dispersión de banda ancha (compensación de la dispersión de fibras [DCF]) o compensación de dispersión de banda estrecha (de fibra de redes de Bragg).

La compensación de la dispersión puede ser incorporada en el transmisor óptico, el receptor óptico, y / o dentro de un amplificador óptico lineal, que actualmente es la aplicación más común.

Para compensar la pérdida adicional de los módulos de compensación de dispersión (DCM), amplificadores en línea son comúnmente diseñados en dos etapas de configuraciones de los dispositivos con DCM intercalados entre cada etapa, aumentando considerablemente la relación óptica de señal a ruido (OSNR). ITU-T G.798 introdujo este amplificador de ayuda al proceso de acomodamiento de la dispersión.

Figura 18. **Esquema de un amplificador de dos etapas con DCF insertada entre las dos etapas**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 25.

### 1.8.1. **Compensación de banda ancha – fibra de compensación de dispersión**

DCF es mono modo con un alto valor negativo de CD a compensar por la dispersión total en una longitud dada de una fibra de transmisión, tales como G.652 o G.655. Similar a la fibra de transmisión, la dispersión frente a la longitud de onda es continua y puede ser diseñada de modo que la pendiente de la CD total de la longitud de DCF complementa eso de la fibra de transmisión. Por lo tanto, el residuo acumulado (o sin compensar) de dispersión de la combinación de la longitud de DCF y la fibra de transmisión son ambas continuas y casi cero.

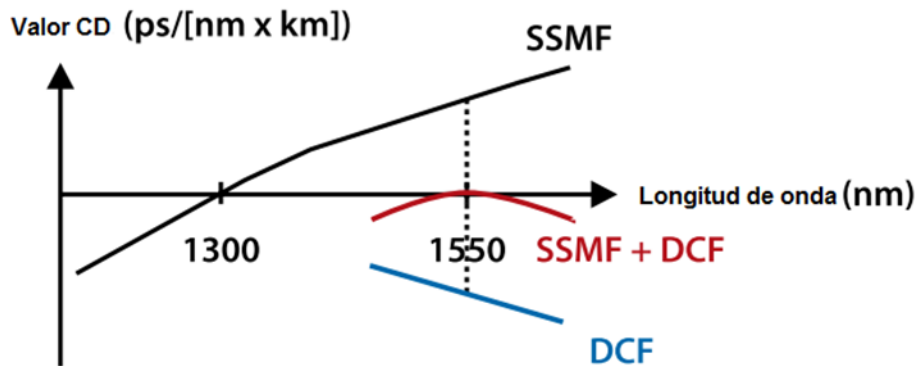
Porque la dispersión de la DCF frente a longitud de onda es continua, esto no limita el plan de canales o el ancho de banda de canal. Más bien, el DCF presenta varias ventajas:

- Ofrece una solución de compensación de dispersión de banda ancha.
- Mantiene casi constante la dispersión residual a través de la región espectral.
- Permite la configuración del contador de dispersión cambiando la longitud de la fibra.
- Ofrece un dispositivo pasivo con valores fijos de dispersión.

Desventajas y otras características de DCF:

- Proporcionan típicamente en longitudes fijas resultantes en virtud y exceso de compensación por las situaciones en un intento de compensar fibra de transmisión se extiende con una gama de longitudes y, por tanto, valores totales de dispersión.
- Significante pérdida óptica añadida (0,6 db/km de DCF) y generalmente doble sensibilidad.
- Pérdida óptica adicional puede requerir amplificadores ópticos más complejos.
- Generalmente un tamaño de núcleo pequeño de DCF provoca altas intensidades ópticas y, por tanto, un umbral inferior de potencia total para ópticas no lineales.
- Puede causar dispersión adicional por modo de polarización.

Figura 19. **Las especificaciones para DCF varían significativamente entre los diferentes proveedores**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 26.

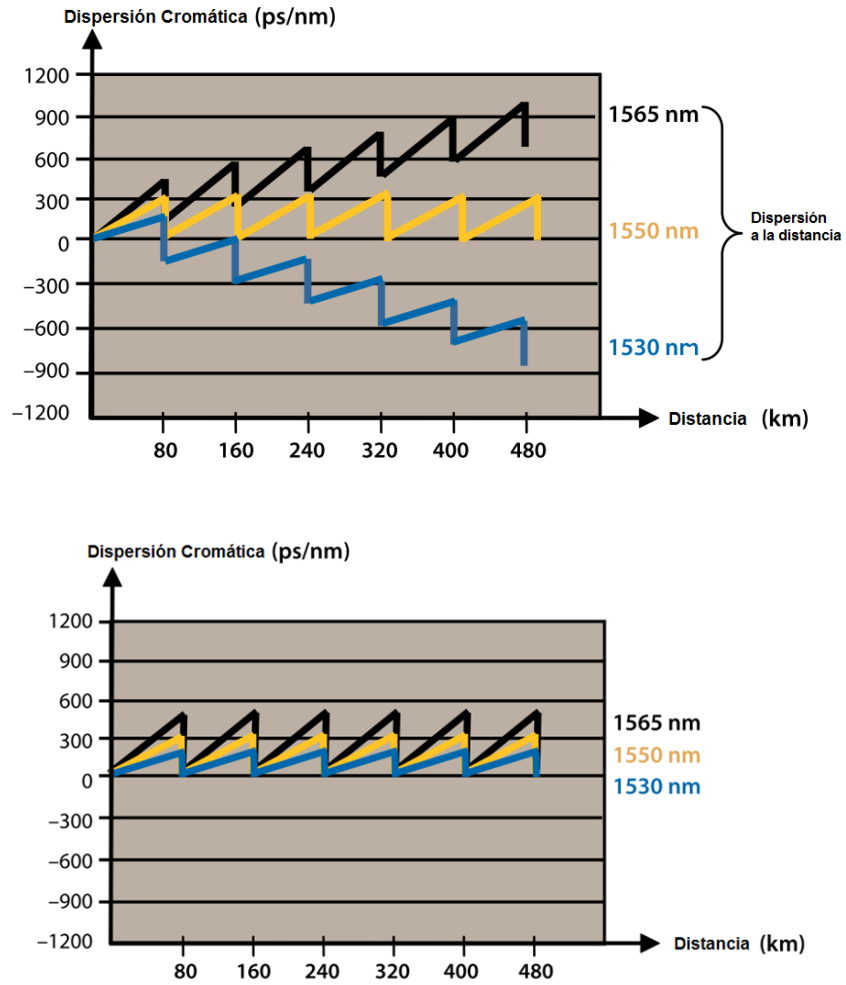
### 1.8.1.1. **Gestión de pendiente de dispersión y compensación**

En un sistema de transmisión de múltiples longitudes de onda, el DCF puede compensar la CD en una longitud de onda dada. Sin embargo, si la pendiente de dispersión de compensación de la DCF no es efectiva para la transmisión de otras longitudes de onda, la combinación puede resultar en una inadecuada compensación de dispersión para las otras longitudes de onda. La aplicación de la compensación de dispersión y la compensación de pendiente de dispersión juntas pueden minimizar la diferencia en la dispersión residual entre canales.



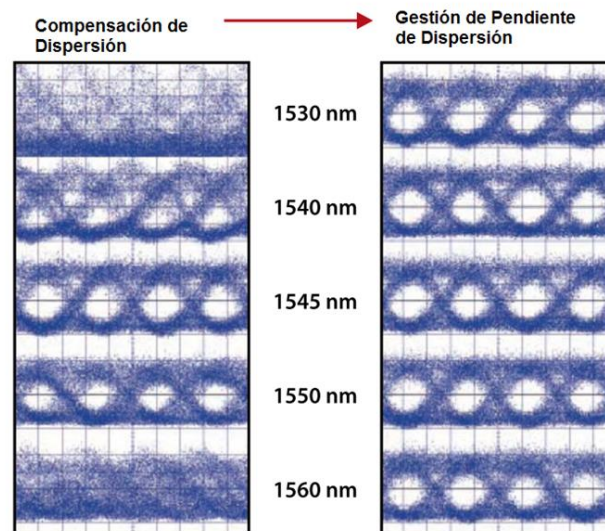
La figura 20 ilustra la dispersión residual como una función de la longitud, con y sin compensación de la pendiente de dispersión, en los sucesivos 80 kilómetros se extiende por tres longitudes de onda de transmisión a lo largo de cada tramo de 80 kilómetros. Como la dispersión se acumula, un compensador se inserta para corregir la dispersión de nuevo a cero. Sin una gestión de la pendiente de dispersión en el primer caso, solamente la longitud de onda de 1550 nm es compensada correctamente. A medida que la pendiente de dispersión no se contabiliza para, las longitudes de onda 1565 y 1530 nm son compensadas arriba o abajo. En el segundo caso, con la propia gestión de compensación de pendiente de dispersión, el módulo de dispersión provee diferentes cantidades de corrección para cada longitud de onda y todas las longitudes de onda son compensadas correctamente.

Figura 20. **Diferencia entre no tener gestión de la pendiente y tener la gestión de la pendiente de tres longitudes de onda que se compensan con la misma magnitud**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 28.

**Figura 21. Ejemplo de los diagramas de ojo que muestran el impacto de diferentes compensaciones de dispersión de longitudes de onda con y sin gestión de pendiente**



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 29.

Gestión de dispersión se adapta exactamente a la dispersión y pendiente de dispersión para manejar la dispersión para cualquier tipo de fibra NZDSF o SMF a cualquier distancia de tramo.

Tanto las fibras G.655 y G.652 generalmente requieren compensación de dispersión para cubrir distancias convencionales en el área metropolitana, regional, y de larga distancia, operando a 10 Gbps o más. Como la fibra G.655 tiene una dispersión alrededor del 75% menos que una fibra G.652, puede permitir una mejora de 4x en el tramo sin compensación, simplemente debido a la dispersión inferior por unidad de longitud.

## **1.9. Medición de la dispersión cromática**

Como la dispersión cromática es una limitante importante el día de hoy y de mañana, en la transmisión de las telecomunicaciones sobre fibra, es fundamental caracterizar la red de fibra con el fin de cuantificar el nivel de CD y saber la magnitud de compensación que tendrá que ponerse en práctica.

### **1.9.1. Cuándo realizar mediciones**

Aunque el CD es un fenómeno relativamente estable reportado por el fabricante de la fibra, las pruebas de CD es probable que se realicen varias veces durante el ciclo de vida de la red.

Durante el proceso de fabricación, los fabricantes de fibra de realizan mediciones de CD para garantizar las especificaciones apropiadas para la fibra para el aseguramiento de la calidad.

La medición de CD también se puede realizar después de la fabricación del cable para confirmar la dispersión de la fibra.

En el campo, la medición de la fibra se realiza típicamente:

- Durante o justo después de la instalación de la fibra óptica.
- Antes de activar las tasas de bit más altos en los tramos instalados con el fin de saber cuánta compensación de CD es necesaria.
- Antes de tomar fibras arrendadas por terceros, para conocer los límites de la fibra, y seleccionar los elementos apropiados para la red, tales como amplificadores, transmisores, compensadores, etc.
- Durante o después de un mantenimiento o reparación para verificar el tipo de fibra instalada y saber si no se ha cambiado sin informarlo.

### **1.9.2. Qué parámetros se miden**

Analizadores de CD no sólo proporcionan los valores de CD de acuerdo con la longitud de onda, sino también otros parámetros, tales como la longitud de onda de dispersión cero. Los resultados que se informaron dependen principalmente de los requisitos del cliente. Las normas internacionales establecen la siguiente lista de los parámetros a medir:

- Los del coeficiente de dispersión medido en cierta longitud de onda específica.
- Máxima dispersión (o máximas) durante un intervalo específico de longitudes de onda.
- Longitud de onda de dispersión cero y pendiente de dispersión de onda en esta longitud de onda.

### **1.9.3. Métodos de medición**

El proceso de medición de CD también provee valores directos de CD o valores de retardo de grupo como función de la longitud de onda. El valor de CD y pendiente de dispersión se encuentran derivados de estos datos. La diferenciación se realiza con mayor frecuencia después de que los datos se ajustan a un modelo matemático.

Estos métodos de medición son descritos y estandarizados por el principal cuerpo de estandarizaciones: el IEC, TIA, y ITU – T.

En la actualidad tres métodos de campo populares y eficaces de prueba se dividen en dos categorías: medición de la velocidad de fase y de medida del retardo de grupo. Varios métodos se utilizan para las mediciones de CD en el campo.

Tabla X. **Método de ensayo de CD y referencias asociadas**

Estándar	Descripción
IEC 60793-1-42	Métodos de medición y procedimientos de prueba de dispersión cromática
ITU – T G.650.1	Definiciones y métodos de prueba lineales, atributos deterministas de fibra mono modo.
TIA FOTP-175-B	Medición de CD para fibras óptica mono modo.
GR-761-CORE	Set de prueba de dispersión cromática de criterios genéricos.

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 33.

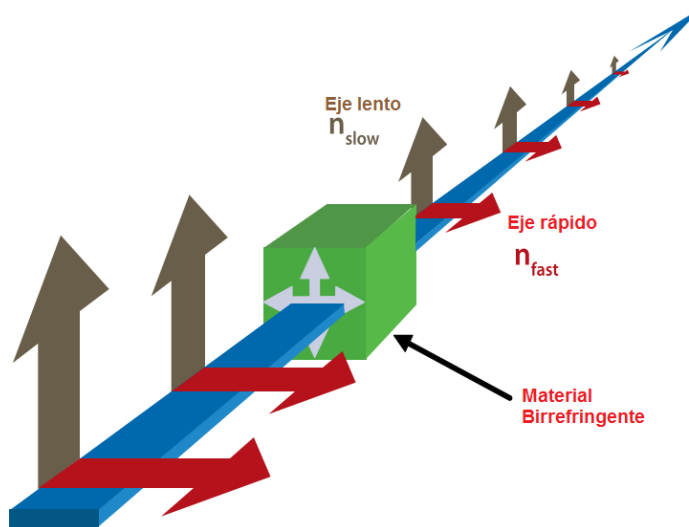
## **2. DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD)**

Cuando se instala una nueva red de fibra óptica o se actualiza la existente a una red de mayor velocidad de datos, la calidad y propiedades de la fibra óptica determinan la idoneidad de esta red para llevar una velocidad de transmisión definida. La dispersión por modo de polarización (PMD) puede representar graves obstáculos en la transmisión a altas tasas de datos sobre la infraestructura de fibra existente. Como resultado, las mediciones de PMD se han convertido en una parte esencial del proceso de caracterización de fibra. Aunque los efectos detallados de PMD sobre la transmisión de señales ópticas es de alta complejidad, la cantidad medida de PMD (media diferencial de retardo de grupo [DGD]) en cualquier fibra dada puede ser evaluado con exactitud a través de mediciones relativamente simples.

### **2.1. Birrefringencia de fibra**

La PMD es causada por la birrefringencia local (o de doble refracción) en la fibra, que puede surgir de la combinación de la birrefringencia del material y de la guía de onda. Si una fibra exhibe diferentes índices de refracción (IOR) basado en el estado de polarización (rotación orientada respecto al eje de la fibra) de la señal de transmisión, a continuación se dice que esta fibra es birrefringente. Los diferentes IOR dan lugar a diferentes velocidades de propagación de los modos. En las fibras ópticas de silicio, birrefringencia del material es típicamente el resultado de tensión interna o externa en el núcleo de la fibra, introducido en la fibra en el proceso de fabricación o en el proceso de cableado de fibra a través de flexión y torsión.

Figura 22. **Propagación en material birrefringente**



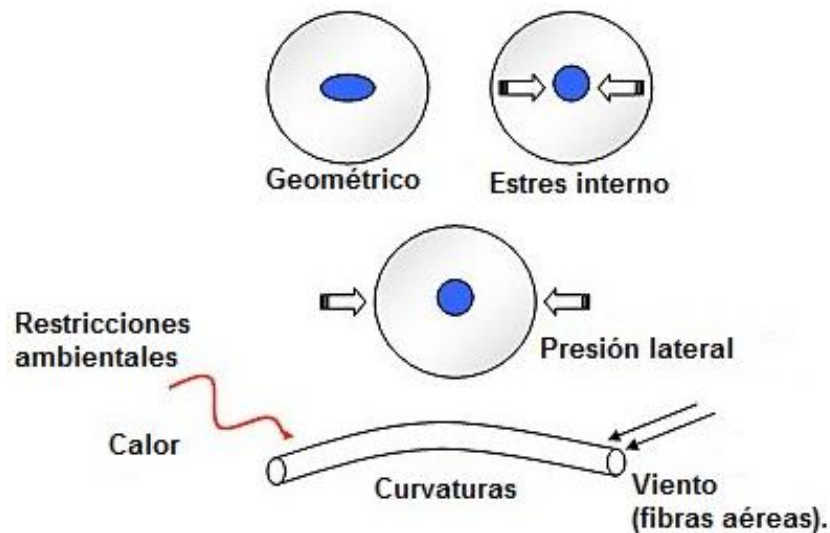
Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 50.

Birrefringencia de guía de onda, por otro lado, los resultados de imperfecciones en la geometría del núcleo de fibra y/o revestimiento, generalmente introducido en el proceso de manufactura.

Nótese que algunas fibras, tales como las de mantenimiento de la polarización (PMFs), son intencionalmente diseñadas para ser altamente birrefringentes. Endichas fibras, la velocidad de propagación (velocidad de la luz) varía sustancialmente con el estado de polarización de la señal de marcha.



Figura 23. **Estrés extremo causa birrefringencia**



Fuente: [www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica/](http://www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica/). Consulta: octubre de 2012.

## 2.2. Definición de PMD

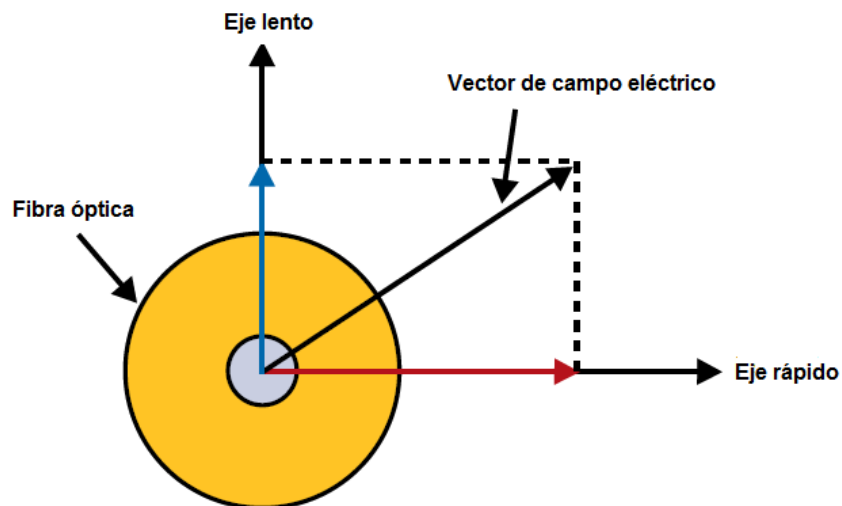
La dispersión por modo de polarización, o PMD, es definida como la propagación temporal de los pulsos de la señal de transmisión debido a la birrefringencia. PMD es generalmente conceptualizada y modelada matemáticamente, como el tiempo diferencial resultante del retardo entre componentes de la señal que es transmitida en dos bien definidos estados de polarización ortogonal, o estados principales de polarización (PSP's) de la fibra. Los dos PSP propagan a diferentes velocidades a través de la fibra. Esto crea dos copias retardadas de la señal en marcha que puede causar severa distorsión en el receptor óptico en el extremo de la fibra. Además el PMD puede variar con el tiempo y la frecuencia óptica debido al orden superior de efectos de PMD. Por lo tanto, las señales transmitidas a través de canales de diferentes

longitudes de onda de una fibra dada, suelen experimentar diferentes cantidades de distorsión.

### 2.2.1. Diferencial del retardo de grupo

La diferencia en tiempo de llegada entre dos modos principales de polarización (conocido como modos Eigen de la fibra) se conoce como birrefringencia. Las fibras siempre exhiben dos modos polarizados ortogonalmente que atraviesan la fibra a velocidades muy diferentes. Se introduce un diferencial de retardo de tiempo entre los componentes de señales ópticas que se transmiten en estos dos modos. La magnitud de PMD en la fibra es usualmente expresada como la diferencia que se conoce como DGD y usualmente es denotada como  $\Delta\delta$ .

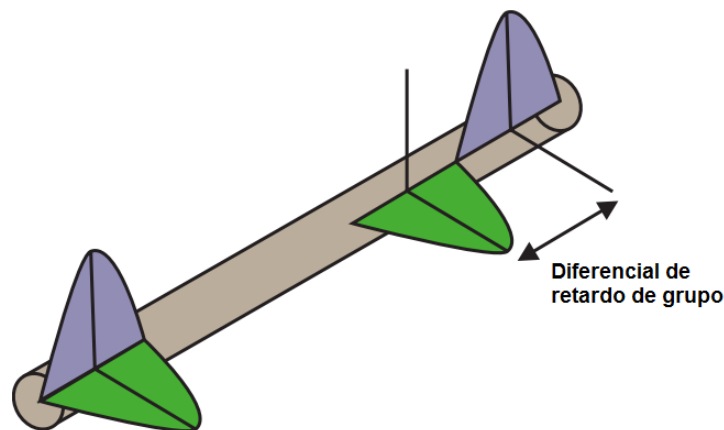
Figura 24. **Señales transmitidas a través de una fibra que experimenta birrefringencia y un modo de polarización lento y rápido**



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 52.

Por lo tanto, un pulso corto de señal transmitida a través de una fibra con alta birrefringencia se puede descomponer en dos pulsos polarizados ortogonalmente que viajan a diferentes velocidades a través de la fibra, como se muestra esquemáticamente en la figura 25.

Figura 25. **Diferencial de retardo de grupo en una fibra con alta birrefringencia**



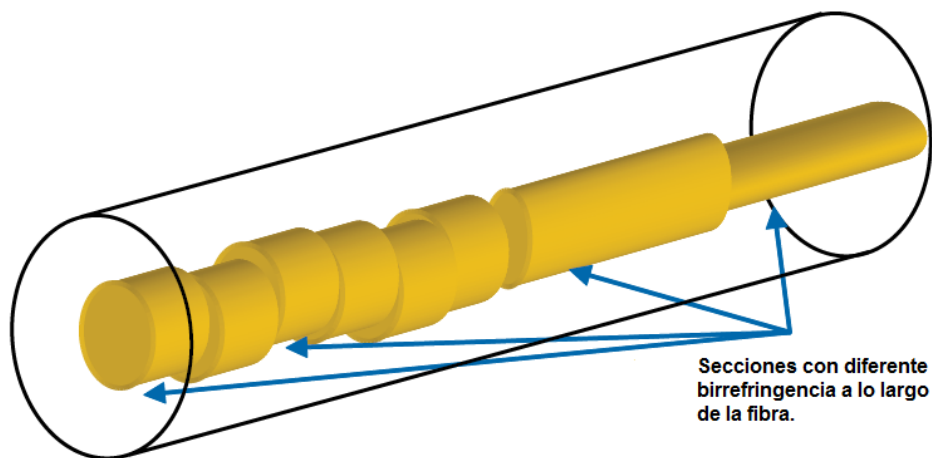
Fuente: LAURENCE Choquet. Reference Guide to Fiber Optic Testing Glossary. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 56.

### 2.2.2. Polarización por modo de acoplamiento

Con la excepción de la polarización que mantienen las fibras, utilizadas para los sistemas de transmisión especiales, fibras ópticas más convencionales empleadas en sistemas de telecomunicaciones están diseñadas para tener birrefringencia mínima. No obstante, las fibras de telecomunicaciones individuales pueden presentar cantidades notables de birrefringencia causadas por material residual o birrefringencia de la guía de onda. Pero a diferencia de las fibras que mantienen alto nivel de birrefringencia, la birrefringencia causada

por el PMD no es uniforme a lo largo de la fibra debido al aleatorio modo de polarización de acoplamiento introducido por micro-flexión o la torsión de la fibra. Dicho de otra forma, estas fibras pueden ser vistas como fibras compuestas de muchas longitudes cortas de fibras birrefringentes cuyos ejes de polarización son orientados aleatoriamente rápida y lentamente. La orientación aleatoria de las piezas individuales de fibra en este modelo causa los mismos efectos que el modo de polarización de acoplamiento en fibras reales.

Figura 26. **Birrefringencia en un enlace de fibra óptica**

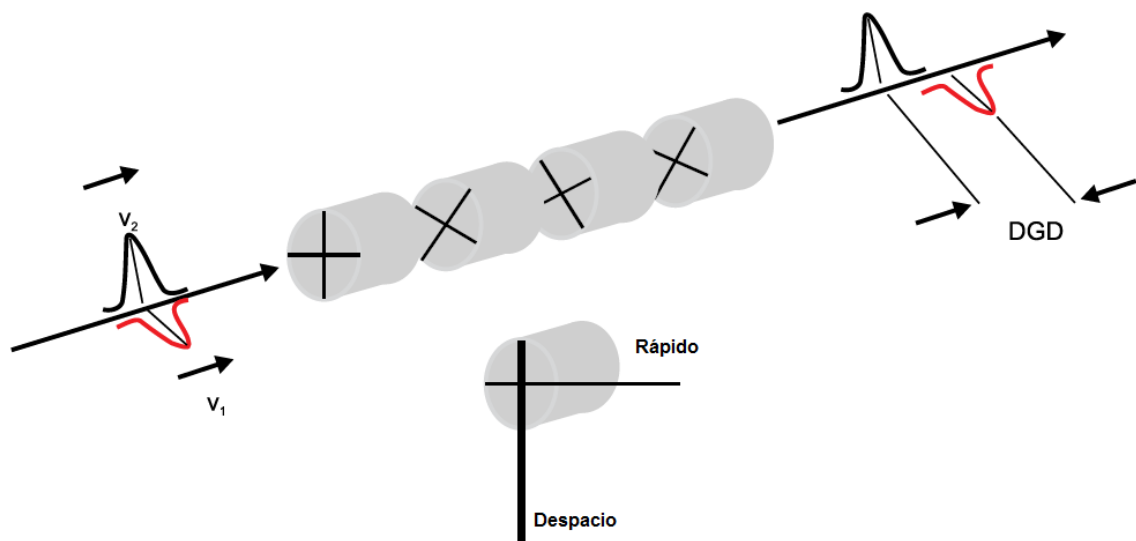


Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 54.

La fibra no exhibe los modos de polarización bien definidos. De hecho, la matriz de transferencia de polarización de dicha fibra es una función extremadamente complicada de frecuencia óptica. Sin embargo, puede ser demostrado que el PMD en las fibras siempre puede ser modelado como dos estados de polarización lanzados ortogonalmente que introducen una distorsión mínima en la señal transmitida, igual que los modos Eigen en una fibra

birrefringente. Un retardo de tiempo diferencial es introducido entre los componentes de la señal que son transmitidos en estos dos PSPs. Hay que notar, sin embargo, que a diferencia de los modos Eigen de las fibras birrefringentes las dos PSPs cambian su orientación a lo largo de la fibra. Además la orientación de PSP cambian al azar con frecuencia óptica.

Figura 27. **Modo fuerte de acoplamiento en telecomunicaciones de fibra óptica**



Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 54.

### 2.2.2.1. Modo de polarización débil de acoplamiento

Los componentes individuales con birrefringencia con una débil o ninguna polarización de modo de acoplamiento, tales como aisladores, acopladores, o

fibras de longitud corta, usualmente exhiben poca o ninguna dependencia de longitud de onda dentro del DGD. Además el DGD de estos elementos escala linealmente con la longitud del dispositivo.

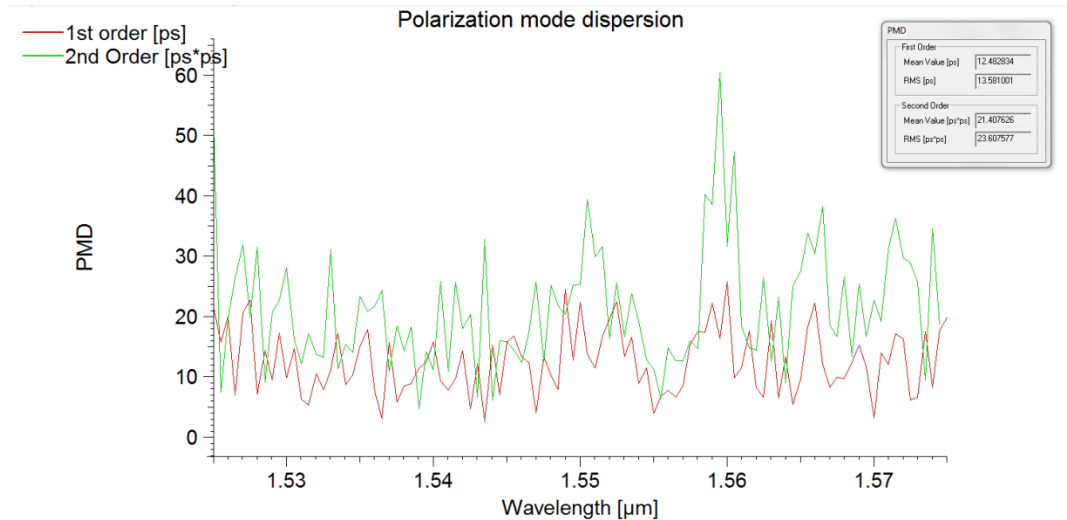
#### **2.2.2.2. Modo de acoplamiento de polarización fuerte**

Las fibras estándar de telecomunicaciones exhiben por lo general un modo de polarización fuerte de acoplamiento. Como resultado, el DGD en esas fibras varía aleatoriamente con la frecuencia óptica. Además, el promedio DGD en esas fibras escala con la raíz cuadrada de la longitud de la fibra.

#### **2.2.2.3. Dependencia de la longitud de onda de DGD**

En las fibras con modo de acoplamiento de polarización fuerte, el DGD y el PSPs, varía al azar con la frecuencia óptica como se muestra en la siguiente gráfica. Variaciones aleatorias similares se pueden observar con los cambios en la temperatura de la fibra. A menudo, la longitud de onda depende de los cambios drásticos de DGD con solo unos pocos grados de variación de temperatura. Similarmente, la manipulación de la fibra también puede cambiar el DGD y su dependencia de la frecuencia. Como resultado el DGD en cualquier longitud de onda no es constante en el tiempo y puede cambiar aleatoriamente.

Figura 28. **DGD en función de la longitud de onda óptica**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Optifiber de Optiwave Software.

### 2.3. **PMD en sistemas de transmisión de 40 Gbps**

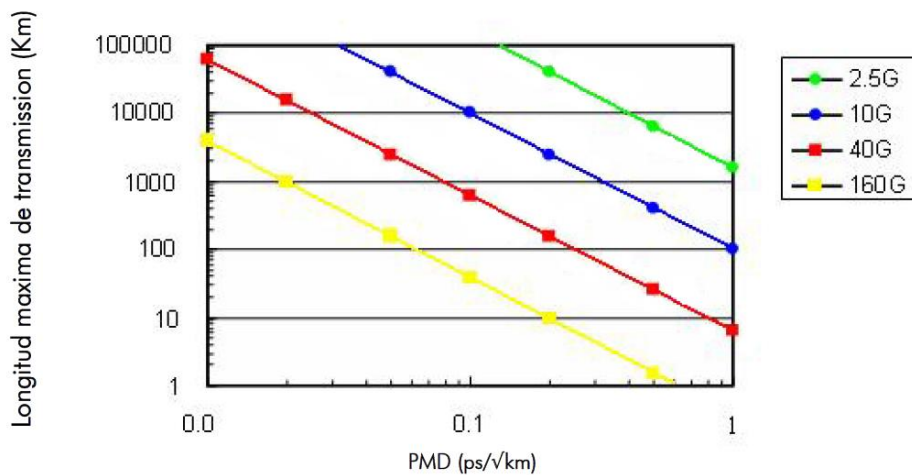
Como se describió anteriormente, la sensibilidad de la información digital en la señal óptica a PMD se incrementa linealmente con la velocidad de bits. Por lo tanto, las señales a 40 gbps son 4 veces más sensibles al PMD que las señales a 10 Gbps y 16 veces más sensibles que las señales a 2,5 Gbps. Por lo tanto, la tolerancia a PMD es un parámetro importante para ser especificado en los sistemas a 40 Gbps. Se incrementa linealmente con la velocidad de los bits. Sin embargo, la tolerancia a PMD depende tanto del formato de modulación.

Por ello de cara a las futuras velocidades de transmisión, 40 G, 100G, 160G, etc., es extremadamente necesario evaluar su impacto de la PMD en las redes instaladas y disminuir al máximo su valor para las fibras actuales y futuras. Valores que hace años eran aceptados, incluso en normas

internacionales, como  $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , deben ser ahora obligatoriamente revisados para las redes de larga distancia y alta velocidad.

En el siguiente gráfico se pueden comprobar los límites recomendados para que las comunicaciones sean correctas bajo la influencia de la PMD. La transmisión en la fibra queda limitada de la siguiente manera:

Figura 29. **Longitud máxima de transmisión contra PMD**



Fuente: [www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica/](http://www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica/). Consulta: octubre de 2012.

Según esto, un sistema de 40 Gbps puede tener una PMD acumulada de hasta 2,5 ps, y alcanzar distancias de enlace de hasta 625 kilómetros con un coeficiente de PMD de  $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .



## 2.4. Técnicas de compensación de PMD

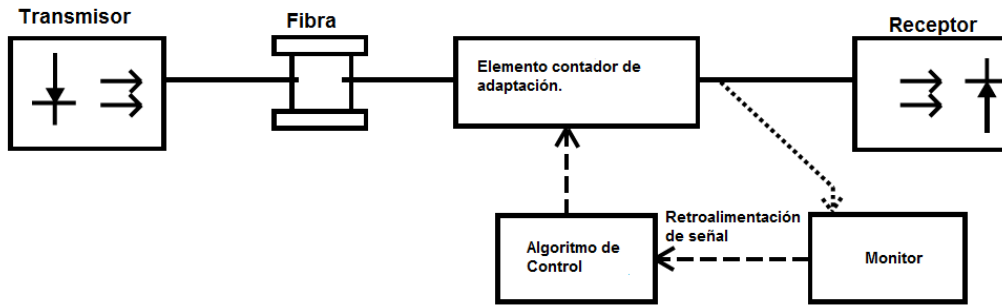
El PMD es muy difícil de compensar porque el DGD y el PSPs varían aleatoriamente con el tiempo y la frecuencia óptica. Sin embargo se han desarrollado o propuesto un número de técnicas de compensación de PMD que pueden ser clasificadas en tres categorías principales:

- Mitigación eléctrica de PMD en detección directa en los receptores.
- Compensación eléctrica de PMD en los receptores coherentes.
- Compensación óptica de PMD antes del receptor.

En sistemas que utilizan detección de envolvente no coherente, se pueden mitigar las distorsiones inducidas del PMD en la señal en el receptor eléctrico, utilizando filtros eléctricos transversales ajustables (TEFs) o ecualizadores de alimentación adelantada (FFE), o ecualizadores no lineales de retroalimentación de decisión (DFEs), o por último estimadores de secuencia de máxima probabilidad (MLSEs). Estos ecualizadores eléctricos, que también se utilizan para mitigar otras degradaciones de la transmisión, son relativamente baratas y robustas, pero su eficacia disminuye rápidamente cuando el PMD se hace grande.

Los compensadores ópticos de PMD, por otro lado, se consideran que son capaces de atenuar grandes cantidades de PMD. El diagrama de bloques de un compensador típico de PMD es mostrado sistemáticamente en la figura 30. Este compensador comprende un elemento ajustable para adaptar la compensación de PMD y un monitor óptico para generar una retroalimentación de la señal de control para el compensador.

Figura 30. Diagrama esquemático de un compensador óptico de PMD



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 68.

El elemento de compensación adaptativa generalmente comprende un ajustable transformados de polarización y una línea diferencial de demora ajustable para contrarrestar las variaciones aleatorias en la DGD y PSPs de la fibra.

## 2.5. Medición de dispersión por modo de polarización

PMD es una limitante importante en las transmisiones de telecomunicaciones sobre fibra, por lo que es crítico caracterizar la fibra con el fin de cuantificar el nivel de PMD y entender la idoneidad de la fibra a una tasa de transmisión dada.

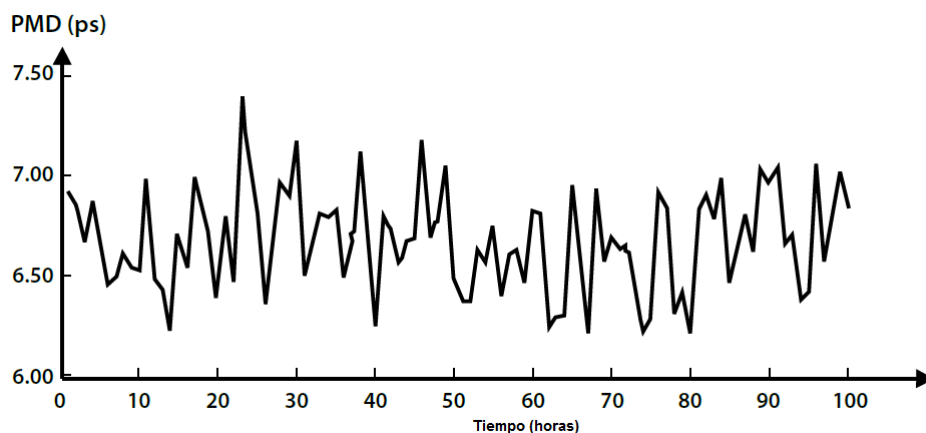
### 2.5.1. Cuando medir PMD

En general, el PMD se debe considerar un posible problema en sistemas de transmisión que operan a velocidades de bit superiores a 2,5 Gbps. El siguiente listado resume los casos típicos cuando las mediciones de PMD se deben llevar a cabo:

- Actualización de las redes existentes a una velocidad de 10 Gbps.
- Actualización de las redes existentes a una velocidad de 40 Gbps.
- Errores de fabricación de la fibra.
- Errores durante la instalación de la fibra.

PMD es un fenómeno estadístico, por lo tanto, puede ser necesario repetir la medición en un momento posterior para vigilar a largo plazo fluctuaciones de PMD.

Figura 31. Fluctuaciones a largo plazo del promedio de DGD



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 71.



### **3. PERFIL DE ATENUACIÓN (AP) O ESPECTRO DE ATENUACIÓN (SA)**

En la transmisión de fibra óptica, varias regiones de longitud de onda, llamadas ventanas, se utilizan con diferentes aplicaciones. Esas ventanas son centradas generalmente sobre 850nm, 1310, y 1550. Cada una de estas ventanas ha sido históricamente seleccionada debido a una ventaja tecnológica o de rendimiento, como por ejemplo láseres disponibles (850 nm), la baja dispersión cromática (1310), o baja atenuación (1550). Inicialmente, solamente un único canal de longitud de onda era usado por cada ventana de longitud de onda, sin embargo, la densa multiplexación por división de longitud de onda (DWDM), la tecnología de transmisión introdujo el concepto de embalaje múltiple de longitud de onda de canales independientes en la ventana de 1550 nm. Esta ventana (aproximadamente 1530 – 1565 nm), que comúnmente se conoce como la banda C. Para incrementar más la capacidad, una segunda ventana DWDM de 1565 – 1625 nm se ha empleado, comúnmente referida como la banda L.

La tabla XI muestra la asignación de bandas espectrales para los sistemas de fibra monomodo.

Tabla XI. **Bandas de longitud de onda de DWDM**

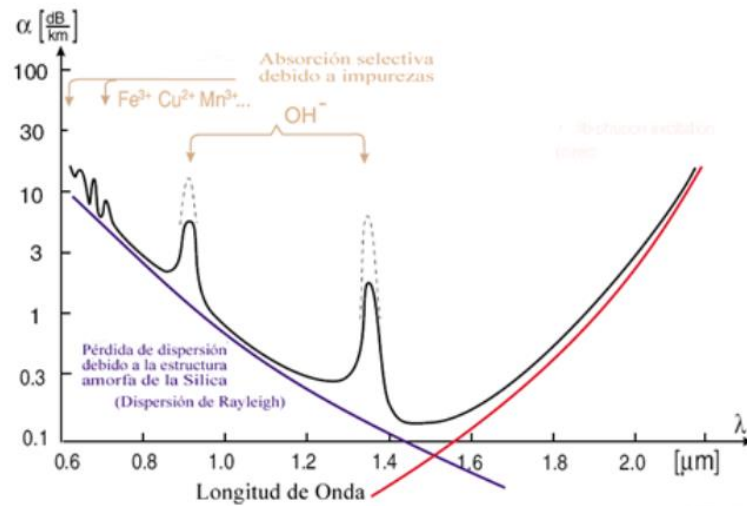
<b>Banda de Longitud de Onda</b>	<b>Rango de Longitud de Onda</b>
O-band	1260 – 1360 nm
E-band	1360 – 1460 nm
S-band	1460 – 1530 nm
C-band	1530 – 1565 nm
L-band	1565 – 1625 nm
U-band	1625 – 1675 nm

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 91.

### **3.1. Atenuación de la fibra vs longitud de onda**

La atenuación de la fibra óptica cambia con la longitud de onda y con el diseño general de la fibra o el tipo de fibra. La principal aportación y última limitante de las pérdidas de la fibra es debido a la dispersión de Rayleigh, donde la pérdida es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Al representar la atenuación de la fibra versus la longitud de onda, se pueden identificar algunas características de la fibra. La figura 32 ilustra la pérdida frente a la longitud de onda de una fibra óptica.

Figura 32. **Atenuación de la fibra en función de la longitud de onda 1**



Fuente: <http://www.lafibraoptica peru.com/la-atenuacion-de-la-fibra-optica/>. Consulta: noviembre de 2012.

Las principales ventanas de longitudes de onda de transmisión de telecomunicaciones están localizadas en regiones donde la atenuación está en los niveles más bajos.

Alrededor de las longitudes de onda de 950, 1244 y 1383 nm, la presencia de hidrogeno e iones de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), dentro del material de la fibra, provoca un aumento de la atenuación ("picos de agua"). Estos iones resultan de las trazas de agua que entran en el material de la fibra durante el proceso de fabricación. Dos longitudes de onda caen dentro de las ventanas de longitud de onda de las telecomunicaciones; una es la de 1244 nm, y la otra es a 1383 nm. La absorción atribuida al pico de agua a 1240 (en db/km) es siempre mayor que a 1383 nm.

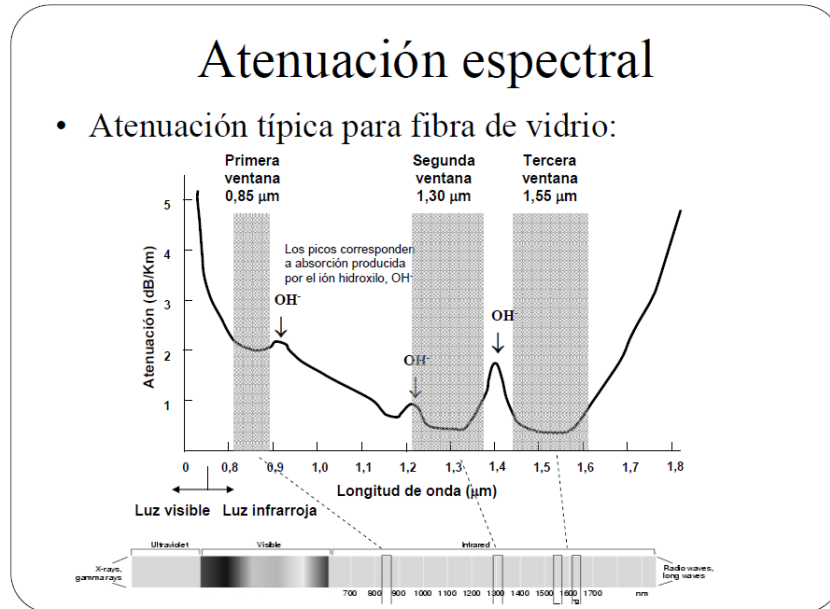
La atenuación es intrínseca al diseño y fabricación de la fibra. También es importante para verificar la atenuación de la fibra después de la instalación, medir la pérdida debida a la flexión. La pérdida de la fibra debida a la flexión es generalmente altamente dependiente de la longitud de onda. Pequeñas curvas en la fibra, creada por presiones desiguales, generan un aumento de pérdidas que aumentan con la longitud de onda. La dependencia de la longitud de onda es aproximadamente exponencial pero oscilaciones periódicas también se superponen, lo que resulta en una dependencia compleja con la longitud de onda.

### **3.2. Fibras de bajo pico de agua**

Los recientes avances en la fabricación de fibra óptica han reducido significativamente a 1383 nm la atenuación máxima por el pico de agua y resultó en un “bajo pico de agua” en fibras.



Figura 33. **Atenuación de la fibra en función de la longitud de onda 2**



Fuente: <http://www.fdi.ucm.es/?vertab32614=1&vertab29833=1>. Consulta: noviembre de 2012.

### 3.3. Diferentes tipos de fibras monomodo

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) ha tomado el factor de atenuación en cuenta para clasificar las fibras monomodo en función de su conveniencia para las aplicaciones de transmisión dadas.

La tabla XII muestra cuatro de las subclasificaciones de la fibra G.652, basada en la atenuación de la fibra a longitudes de onda diferentes.

Tabla XII. **Características de fibra mono modo**

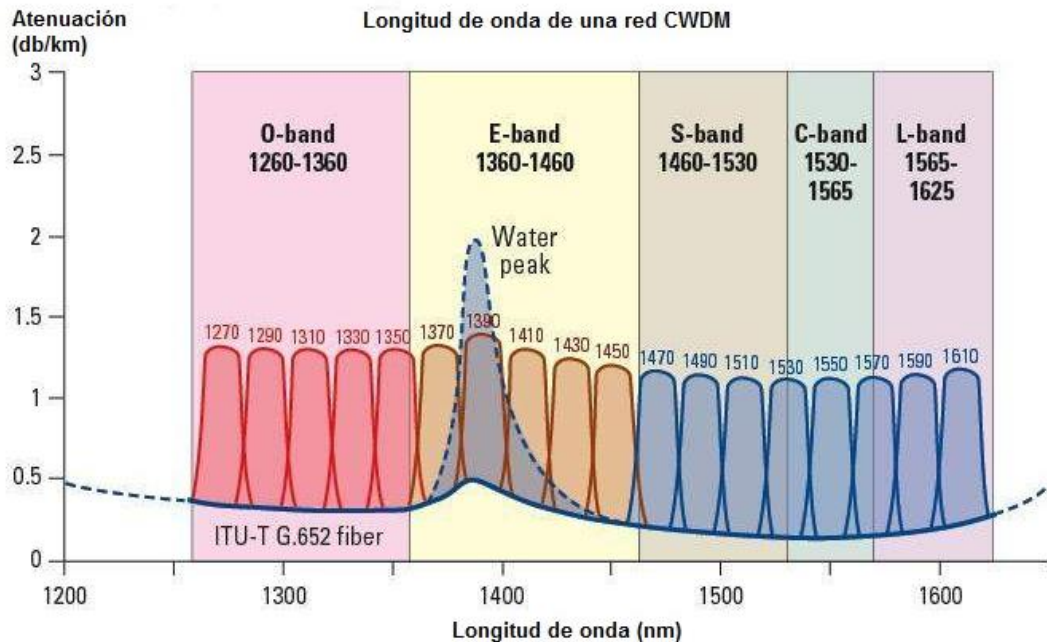
	<b>Características</b>	<b>Cobertura Longitud de Onda</b>	<b>Aplicaciones</b>
G.652.A		Regiones 1310 y 1550 nm. (Bandas O y C)	Soporta aplicaciones como los recomendados en G.957 y G.691 hasta STM-16, de 10 Gb / s hasta a 40 km (Ethernet), y STM-256 para G.693.
G.652.B	Máxima atenuación específica a 1625 nm.	Regiones 1310, 1550 y 1625 nm. (Bandas O, C y L)	Soporta algunas aplicaciones con alta tasa de bit hasta STM-64 en G.691 y G.692 y algunas aplicaciones STM-256 en G.693 y G.959.1.
G.652.C	Máxima atenuación específica a 1383 nm. (igual o inferior a 1310 nm).	De la banda O a la banda C.	Similar a G.652.A, pero este estándar permite la transmisión en porciones de un prolongado rango de longitud de onda desde 1360 a 1530 nm. Adecuado para sistemas CWDM.
G.652.D	Máxima atenuación específica de 1310 a 1625 nm. Máxima atenuación específica a 1383 nm (igual o inferior a 1310 nm).	Cobertura de banda ancha (de la banda O a la banda L).	Similar a G.652.B, pero este estándar permite la transmisión en porciones de un prolongado rango de longitud de onda desde 1360 a 1530 nm. Adecuado para sistemas CWDM.

Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 96.

### 3.4. Fibra para sistemas de transmisión DWDM extendido y CDWM

Las más recientes fibras, se han desarrollado para cumplir con las subcategorías de la ITU-T para superar la alta atenuación de pico de agua alrededor de 1383 nm. Mientras tanto, esta cuestión sigue siendo una consideración importante con respecto a la ampliación del espectro utilizable de la fibra existente.

Figura 34. **Atenuación en la fibra como función de la longitud de onda en relación con las transmisiones CWDM**

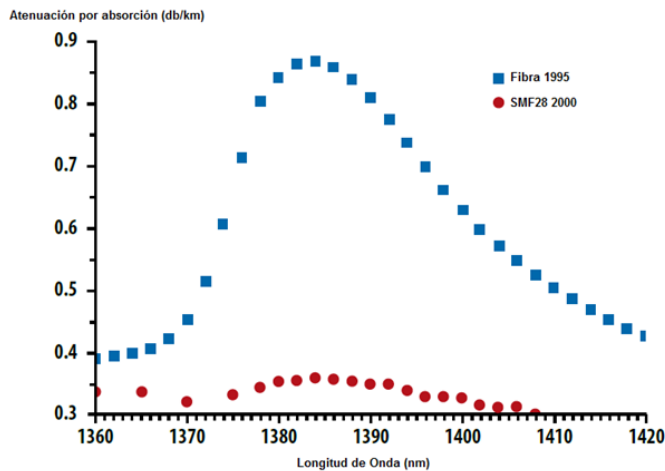


Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>. Consulta: noviembre de 2012.

Para ilustrar la figura 35 muestra dos mediciones de atenuaciones alrededor de 1383 nm de dos fibras diferentes. Un tipo de fibra viejo que posee

una pérdida de pico de agua típica y la otra fibra de baja pérdida de pico de agua diseñada para tener una mejor atenuación en esa región.

Figura 35. **Absorción versus el tiempo de manufacturación de la fibra**



Fuente: COLLINGS, Brandon; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p 98.

El conocimiento de la atenuación de la fibra en esta área 1383 nm permite al operador determinar la compatibilidad con sistemas de transmisión CWDM y DWDM extendido.

### 3.5. **Requerimientos de medición del perfil de atenuación**

El propósito de la medición del AP es para caracterizar y medir la atenuación en función de la longitud de onda.

En la mayoría de los sistemas operativos actuales, las mediciones de atenuación se llevan a cabo solo en puntos seleccionados. Sin embargo, con el

aumento del despliegue de CWDM y la ampliación de la gama de la longitud de onda del DWDM, se hace necesario tener una idea clara del perfil de atenuación de la fibra para evaluar la idoneidad de una fibra para estas aplicaciones.

### **3.5.1. Métodos de medición**

Diferentes métodos son utilizados para medir el perfil de atenuación:

- El uso de una fuente de banda ancha y un analizador de espectro óptico (OSA). Ambos tienen un rango de longitud de onda igual o mayor que la banda de transmisión.
- El uso de una fuente de luz de longitud de onda múltiple o sintonizable y un medidor de potencia de banda ancha.
- El uso de un OTDR de múltiples longitudes de onda.

Como medida del perfil de atenuación es muy recomendable antes de instalar CWDM / DWDM, el uso de un analizador de espectro óptico que proporciona la mejor solución con el fin de caracterizar la fibra, así como al realizar el sistema de pruebas de verificación.

### **3.5.2. Caracterización, atenuación versus longitud de onda, incluyendo la absorción OH<sup>-</sup> del pico con un analizador de espectro óptico**

Si la banda C se utiliza para la transmisión de DWDM, entonces el espectro de atenuación deberá ser en la banda C. Sin embargo, consideraciones para el futuro, la atenuación espectral podrá estar fácilmente por encima de un rango de longitud de onda más amplio. Cuando la transmisión

CWDM está involucrada, entonces la banda completa (1261 – 1621 nm) debe ser caracterizada.

Usando la combinación de fuentes de banda ancha y OSA, el procedimiento es el siguiente:

- A. Conecte directamente la fuente de banda ancha y la OSA a través de un jumper un nivel de potencia versus la longitud de onda de referencia. Esto permite que cualquier estructura normalice la potencia emitida versus la longitud de onda de la fuente de banda ancha, así como la pérdida del jumper de la fibra.
- B. Conectar la fuente de banda ancha y el OSA a cualquiera de los dos extremos de fibra.
- C. Medir la atenuación y la potencia óptica versus la longitud de onda, después de que la señal ha sido propagada a través de la fibra. Reste la potencia de referencia versus los datos de la medición de longitud de onda (en unidades logarítmicas) de esta para obtener el perfil de atenuación de la fibra.
- D. Determine las pérdidas de potencia de acuerdo con la longitud de onda comparando esta con el espectro de referencia.

## **4. ENLACE DE FIBRA Y CARACTERIZACIÓN DE RED**

### **4.1. Definición de caracterización de enlace de fibra**

Las redes actuales de fibra tienen que cumplir con los requerimientos exactos de desempeño para soportar las demandas de acceso generalizado del despliegue tecnológico de banda ancha. Además de desplegar, estructuras de fibra con un desempeño perfecto, los operadores de red están cambiando por la necesidad de reducir los costos operativos, al mismo tiempo que añaden nuevos servicios generadores de ingresos, dentro de un entorno que parece ser más complejo cada minuto.

En el nivel de prueba, la creciente demanda de 10 GigE y 10 Gbps de sistemas SONET / SDH, así como la aparición de 40 y 100 Gbps requieren más y más que los enlaces de fibra sean caracterizados. Además de la complejidad de probar estas redes, es el tipo de transmisión y la velocidad de bits asociada y las especificaciones del fabricante de los equipos, los cuales determinan el tipo de prueba para llevar a cabo la medición y los límites a considerar.

La caracterización del enlace de fibra no es simplemente una función de prueba. Más bien, es un conjunto integral de capa física punto a punto (incluyendo los componentes) de pruebas de mediciones ópticas, para determinar la calidad y la compatibilidad de potencial de transmisión de una fibra óptica dada. La caracterización de un enlace de fibra óptica incluye los test mostrados en la tabla XIII.

Si una o más de esas mediciones no está de acuerdo con los umbrales establecidos (ya sea proporcionados por las normas internacionales o por los operadores y / o fabricantes de equipos), entonces la red no funciona correctamente o no se podrán actualizar a una mayor tasa de bits los niveles de transmisión.

Tabla XIII. **Sumario de test para caracterizar un enlace de fibra óptica**

<b>Parámetros a medir</b>	<b>Herramienta de medición</b>
Inspección de conector	Inspección con microscopio
Inserción de medición de prueba	Linterna óptica / medidor de potencia
Medición de distancia	OTDR
Mediciones de conectores / empalmes	OTDR
Mediciones de reflectancia	OTDR
Mediciones ORL	Medidor ORL u OTDR
Mediciones PMD	Analizador PMD
Mediciones CD	Analizador de CD
Mediciones AP	Analizador de espectro

Fuente: COLLINGS, Brandom; HEISMANN Fred. Reference Guide to Fiber Optic Testing Vol. 2, Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization. JDS Uniphase Corporation, 2010. p. 106.

#### **4.2. Cuando caracterizar un enlace de fibra óptica**

Mediciones de caracterización de enlaces de fibra óptica se deben hacer durante todas las fases del ciclo de vida de la red:

- Al momento de la primera instalación de fibra.
- Para el acondicionamiento final y aceptación.
- Durante la actualización del sistema.



- Después de la reparación de un corte, para la solución de problemas y mantenimiento.

Aunque un conjunto completo de caracterización de enlaces de fibra óptica incluye la lista de mediciones mencionadas, los escenarios de prueba pueden variar de un operador a otro. Las principales consideraciones para definir un escenario de prueba, es el tipo de transmisión previsto, y las condiciones del enlace, como por ejemplo la edad del enlace y el rendimiento actual. Por ejemplo, podría consistir solamente en pruebas de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR), la dispersión cromática (CD) y el modo de dispersión de polarización (PMD). Cuando las pruebas se han completado, los datos son recolectados y reportados para la aceptación final. Luego archivados en un base de datos para ser actualizados si es necesario.

#### **4.3. Definición de caracterización de red**

La caracterización de la red se distingue de la caracterización del enlace de fibra, ya que se realiza después de la implementación de los elementos de red, incluyendo los módulos de compensación de dispersión y amplificadores ópticos, justo antes de cambiar a activo. Se proporciona una línea de base de la arquitectura de la red y el rendimiento que se esperaba de la misma. Esta es una medida de extremo a extremo que requiere pruebas solamente de CD, PMD y perfil de atenuación (AP).

- La medición de CD confirma que la compensación correcta ha sido implementada.
- La medición de PMD verifica que la inserción de los elementos de red no han adherido PMD excesivo.

- La medición de AP confirma la ubicación y configuración adecuada de los amplificadores ópticos, y verifica la pérdida contribuida por las características de los elementos de red, en cada longitud de onda de operación de la red.

La caracterización de la red requiere del uso de métodos de medición adecuados para la medición a través de diferentes elementos, tales como amplificadores y compensadores de dispersión.

#### **4.4. Mediciones de pérdida de inserción**

La medición de pérdida de inserción (IL) es la prueba más importante para llevar a cabo, ya que cada combinación de transmisor / receptor tiene una potencia límite de rango. Si se alcanza ese límite, la señal no se transmite o se recibe con ruido.

La medición de la pérdida por inserción de una señal sobre un enlace completo requiere que se calibre la fuente y el medidor de potencia. La fuente envía una señal a un nivel de potencia dado, y el medidor de potencia lee el nivel de potencia al otro extremo del enlace.

Una medición de IL es una operación de dos pasos:

- El primer paso se realiza, llamado medición de potencia de referencia, se realiza al comienzo del ciclo de medición, o cada vez que los puentes están desconectados de la fuente. El propósito de la medición de referencia de potencia es cuantificar la pérdida de potencia debido a los puentes de fibra utilizados para conectar la red.

- El segundo paso es la inserción de la fibra bajo prueba y la medida de potencia de los elementos conectados (puentes de fibra + fibra bajo prueba).

La diferencia entre las dos lecturas de potencia dadas de la pérdida por inserción de la fibra, es proporcionada en decibeles (dB).

$$\text{Pérdida (dB)} = \text{Potencia de entrada} - \text{Potencia de Salida}$$

Esta es una medida unidireccional, sin embargo, se puede realizar bidireccionalmente con fines operativos.

Nota: la pérdida total proveída por el OTDR, puede ser usada al mismo tiempo como la del empalme / conector y de la medida de la distancia.

Los conjuntos de pruebas de pérdidas proporcionan longitudes de onda que puedan ser representativas de la señal de transmisión; sin embargo, utilizando longitudes de onda múltiples permite una fácil detección de fallas en la instalación de fibra óptica, tales como las curvas. Para aplicaciones de mono modo, la recomendación es usar 1310/1550/1625 nm como ajuste de prueba de pérdida.

#### **4.5. Mediciones ópticas de las pérdidas de retorno**

La pérdida de retorno óptico (ORL) de un enlace, representa la parte de la luz que es reflejada a la fuente del láser por el enlace.

El ORL es por lo tanto, la relación entre la potencia emitida y la potencia recibida en el origen de la fibra. Este retorno de la luz se debe a diferentes

fenómenos físicos, como los reflejos de los conectores, retro dispersión de Rayleigh y difusión.

Para medir el ORL en el enlace de fibra, una fuente de luz y un medidor de potencia usando el mismo puerto de prueba, es conectado a la fibra bajo medición. Este método es llamado “Reflectometría óptica de onda continua” (OCWR). La fuente de laser envía una señal a un nivel de potencia conocida entre la fibra y el medidor de potencia mide la potencia reflejada en la misma ubicación.

Antes de medir el ORL, es necesario tener una medición de ORL de referencia. A medida de que el conjunto de medición se conecta con un puente, es necesario restar el valor del ORL en el puente de la lectura total del ORL para mostrar solamente el ORL del enlace y no el ORL del puente mas es del enlace.

Los medidores de ORL proveen longitudes de onda que son representativas de la señal de transmisión. La recomendación es utilizar un medidor de ORL a 1310 / 1550 nm o un OTDR, con 1625 nm como opcional.

Esta medición se realiza al finalizar la instalación, con propósitos de condicionamiento y es unidireccional, excepto si la transmisión destinada es bidireccional.

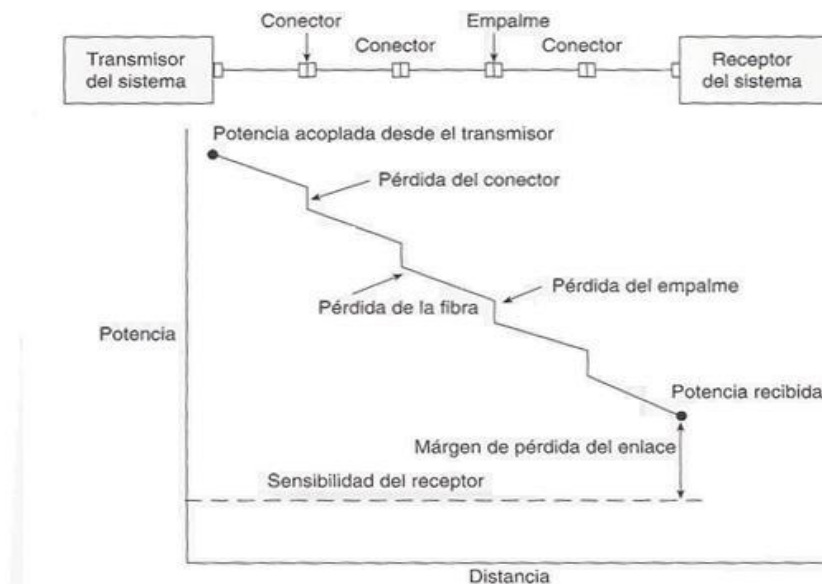
Nota: si la fibra está abierta en el extremo lejano de la prueba, se recomienda utilizar una terminal o enrollar la fibra en un mandril para reducir el efecto de la reflexión del vidrio con el aire, que introduce un error en la medición del ORL.

#### 4.6. Distancia y caracterización de eventos usando un OTDR

Los enlaces de fibra están hechos de secciones de cables de fibra que están conectados utilizando empalmes de fusión (o empalmes mecánicos), y los conectores, cada sección y evento debe ser caracterizado. Esto podría ser llamado “caracterización de eventos”. Consiste en medir, la atenuación de la sección de la fibra, la pérdida en cada evento, la reflectancia asociada, y las distancias relacionadas.

El OTDR es el único instrumento que puede medir la pérdida por empalme, pérdida del conector y reflectancia. Se puede obtener la “asignatura” de la fibra con la distancia y la información de la pérdida / reflectancia para cada evento presente a lo largo del enlace. Una fuente de laser envía una serie de impulsos en la fibra y un fotodiodo receptor analiza la retro dispersión y la luz reflejada de retorno.

Figura 36. Traza de la medición de la fibra bajo prueba



Fuente: HAYE, Jim. Manual del Técnico de fibra óptica.

La prueba del OTDR se realiza utilizando longitudes de onda que caracterizan la fibra alrededor de la longitud de onda de la red de transporte; por ejemplo, 1550 nm para DWDM de la banda C de transmisión, sin embargo, utilizando longitudes de onda múltiples, permite la fácil detección de un defecto en la instalación de la fibra, tales como las curvas. Por lo general se recomienda utilizar un OTDR a 1310/1550/1625 nm.

Si los conectores de inicio y final tienen que ser certificados, se deben utilizar bobinas de lanzamiento al inicio y final de cada extremo. La longitud de la bobina de lanzamiento es generalmente de 1 o 2,2 kilómetros.

Realizar mediciones de con el OTDR en ambas direcciones del enlace de fibra, para cada empalme / conector, permite calcular la pérdida promedio para conocer la pérdida real mediante la eliminación de posibles diferencias de los coeficientes de retro dispersión entre las secciones de la fibra, lo que evita lecturas incorrectas de pérdidas como ganancias. Esta medición es aún más importante si el enlace contiene diferentes tipos de fibras o fibras de diferentes fabricantes. Este proceso se conoce como pruebas bidireccionales de OTDR.

#### **4.6.1. Medición de dispersión cromática**

Mida CD en un rango de longitud de onda dada y correlacione los resultados a los límites de transmisión de acuerdo con la tasa de bit que será relacionado.

Varios métodos pueden ser usados para medir CD. El método de cambio de fase es el más versátil y requiere la conexión de una fuente (de banda ancha o de banda estrecha) y un receptor (medidor de fase) para el extremo del enlace.

La medición de CD se realiza típicamente unidireccionalmente con la un rango de longitud de onda de medición equivalente como mínimo al sistema de transmisión: Banda C o banda C + L. Sin embargo, la solución de banda completa (1260 a 1640) permite una medición precisa de la dispersión cero de longitud de onda de la fibra G.652 y es compatible con cualquier escenario de transmisión (incluyendo la banda completa de CWDM).

#### **4.6.2. Medición de dispersión por modo de polarización**

PMD es el fenómeno más complejo para poder mitigar porque varía aleatoriamente en el tiempo. Es importante determinar el retardo de PMD en un enlace de fibra de modo que pueda ser correlacionada con los límites del sistema de transmisión, proporcionando un entendimiento del margen entre la medición y los límites definidos.

El rango de medición de PMD debe ser compatible con la velocidad de transmisión de bits. Con el fin de cumplir con una amplia gama de aplicaciones de campo, debe medir entre 0,1 y 60 ps para caracterizaciones precisas de enlaces de fibra para las tasas de transmisión, tales como 10 y 40 Gbps.

Varios métodos se utilizan para medir el PMD en campo. El más relevante y versátil es el método de analizador fijo, ya que puede ser construido sin partes móviles para la mejor robustez en campo y durabilidad.

La fuente de banda ancha envía una luz polarizada que es analizada por un analizador de espectro, después de pasar a través de un analizador de espectro.

Las mediciones de PMD se realizan típicamente unidireccionalmente. Cuando los resultados están muy cerca de los límites del sistema, un análisis de medición a largo plazo puede ser requerido para obtener una mejor imagen de la variación en el tiempo.

#### **4.6.3. Medición del perfil de atenuación**

Cada fibra presenta diversos niveles de atenuación a través del espectro de transmisión. El propósito de la medición de AP es representar la atenuación como una función de la longitud de onda.

Una medida de referencia de la fuente y de los puentes de la fibra se requiere antes de realizar las mediciones.

El receptor registra la atenuación por longitud de onda de la fuente usada para la transmisión que entonces se puede utilizar para determinar las ubicaciones de los amplificadores y podría tener un impacto en la ecualización del canal.

La obtención del perfil de atenuación normalizado (atenuación dada en dB/km) requiere dividir la pérdida de una longitud de onda dada por el enlace distanciado en kilómetros.

Las mediciones espectrales de atenuación se realizan típicamente unidireccionalmente con el rango de mediciones de longitud de onda como mínimo que sea equivalente al sistema de transmisión: Banda C o banda C + L.



## CONCLUSIONES

1. La dispersión cromática es un efecto lineal que se acumula en un enlace de fibra óptica linealmente con la distancia.
2. La compensación de la dispersión puede ser incorporada en el transmisor óptico, en el receptor óptico, y / o dentro de un amplificador óptico lineal.
3. La dispersión cromática no varía significativamente con el tiempo ni con las condiciones de instalación debido a su baja sensibilidad a la temperatura.
4. Cuando el diámetro del núcleo de la fibra óptica disminuye la dispersión aumenta.
5. La dispersión por modo de polarización se debe medir en repetidas ocasiones por ser un fenómeno estadístico.
6. Es necesario caracterizar un enlace de fibra óptica al momento de la primera instalación, para el acondicionamiento final y aceptación, durante la actualización del sistema y después de la reparación de un corte de fibra para la solución de problemas y mantenimiento.

7. La pérdida en el cable de fibra es altamente dependiente de la longitud de onda y las pequeñas curvaturas por presiones desiguales generan un aumento de pérdidas que aumentan con la longitud de onda.

## RECOMENDACIONES

1. Cambiar tramos de fibra óptica que presenten altos índices de PMD hasta alcanzar los valores permitidos para poder transmitir a alta velocidad.
2. Si al momento de poner en producción la fibra no se realizaron pruebas de PMD, será necesario realizarlas posteriormente a las reparaciones para localizar los segmentos que sean necesarios reemplazar.
3. Si la instalación es aérea utilizar un dinamómetro para tensar el cable y evitar generar dispersión por modo de polarización a consecuencia del estrés, que se agregaría al momento de sobrepasar los límites de tensión del fabricante.
4. Al momento de una reparación del enlace de fibra óptica se debe utilizar el mismo tipo de núcleo para no crear atenuaciones y PMD.
5. Las mediciones de PMD deben ser tomadas a lo largo de un periodo de 48 horas porque la PMD es un fenómeno aleatorio.
6. Realizar mediciones después de instalada la fibra óptica, para observar que no existan atenuaciones debido a la flexión del cable de fibra. Y evitar así, que se generen mayores pérdidas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. *Características de las fibras ópticas*. [en línea]. Disponible en <[www.robertoares.com.ar/wp-content/uploads/2010/06/Seccion-5.pdf](http://www.robertoares.com.ar/wp-content/uploads/2010/06/Seccion-5.pdf)>. [Consulta: Octubre 2012].
2. CHOQUET, Laurence. *Reference Guide to Fiber Optic Testing*. Glosary. *Estados Unidos*: JDS Uniphase Corporation. 2008. 81 p.
3. COLLINGS, Bandom; HEISMANN, Fred. *Reference guide to fiber optic testing, advance fiber optic testing, high-speed fiber link and network characterization*. Vol. 2. *Estados Unidos*: JDS Uniphase Corporation. 2010. p. 138.
4. FORTIZ. *La fibra óptica*. [en línea]. Disponible en <[www.lafibraoptica Peru.com/category/conceptos-basicos-fibra-optica](http://www.lafibraoptica Peru.com/category/conceptos-basicos-fibra-optica)>. [Consulta: septiembre 2012].
5. GARCÍA YAGUE, Adolfo. *Formación transportes SDH/10G y xWDM*. [en línea]. Disponible en <<http://www.telnet-ri.es/tecnologia/informacion-tecnica>>. [Consulta: septiembre 2012].
6. HAYES, Jim. Planta de cables – análisis del presupuesto de pérdida del enlace. En: Delmar Cenange. *Manual del técnico de fibra óptica*. *Estados Unidos*: Thomson, 2007. p. 120.

7. *Plataforma FiberSec.* [en línea]. Disponible en <[www.fibraopticahoy.com](http://www.fibraopticahoy.com)>. [Consulta: septiembre 2012].
  
8. *Universidad Complutense Informática.* [en línea]. Disponible en <[www.fdi.ucm.es/?vertab32614=1&vertab29833=1](http://www.fdi.ucm.es/?vertab32614=1&vertab29833=1)>. [Consulta: septiembre 2012].