

**Implementación del Método de
Cambio de Fase para la Medición de
Dispersión Cromática en Fibras para
Telecomunicaciones ©**



Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
División de Fotónica

**Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición
de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones**

Tesis de Maestría

Que para obtener el grado de

Maestro en Optomecatrónica

Presenta

Bernon Edgardo Ayala Martínez

Asesor:

Dr. Ismael Torres Gómez

Co-Asesor:

Dr. Eric Rosas Solís

Comité de Sinodales:

Dr. Ismael Torres

Dr. Olivier Pottiez

Dr. Alexander Kiriyanov

Santiago de Querétaro, Querétaro. Diciembre de 2011.

DERECHOS RESERVADOS 2011, Centro Nacional de Metrología, México.

Todos los derechos están reservados. Ninguna parte de este documento puede ser reproducida, guardada en algún sistema de recuperación, o transcrita, en ninguna forma o por ningún medio -electrónico, mecánico, fotocopiado, grabado, u otro- con fines de lucro, sin el permiso escrito del Centro Nacional de Metrología, México.

El permiso para realizar copias de este documento, con fines de lucro, deben ser solicitadas por correo a: División de Óptica y Radiometría, CENAM, km 4.5 carretera a los Cués, 76246, Querétaro, México.

Para citar esta referencia use: Ayala Martínez, B. E., “Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones”, Tesis de Maestría, CENAM, México, 2011.

Versión electrónica generada en la División de Óptica y Radiometría del Centro de Nacional de Metrología, (CENAM), México, 2011.

Escrito con L^AT_EX 2_ε.

Contenido

Resumen	1
Introducción	2
1 La Fibra Óptica como Medio de Transmisión	5
1.1 Fibra Óptica	5
1.1.1 Tipos de Fibra Óptica	8
1.2 Atenuación y Dispersión	10
1.2.1 Atenuación	10
1.2.2 Dispersión	12
1.3 Dispersión Modal e Intramodal (Cromática)	13
1.3.1 Dispersión Modal	13
1.3.2 Dispersión Intramodal o Cromática	13
1.4 Penalización por Dispersión Cromática	14
1.5 Tipos de Fibra para Telecomunicaciones de Larga Distancia	15
1.6 Dispersión por el Modo de Polarización	16
2 Dispersión Cromática en Fibras Ópticas	20
2.1 Velocidad de Fase y Velocidad de Grupo	20
2.2 Dispersión en la Velocidad de Grupo	22
2.3 Fuentes de Dispersión Cromática	23
2.3.1 Dispersión debida al Material	23
2.3.2 Dispersión debida a la Guía de Onda	25
2.4 Parámetro de Dispersión de Grupo	26
3 Métodos de Medición de la Dispersión Cromática	31
3.1 Método de Tiempo de Vuelo	31
3.2 Método de Tiempo de Vuelo con OTDR	32

3.3	Método Diferencial de Cambio de Fase	33
3.4	Método Interferométrico	34
3.5	Respuesta en Banda Base AM	36
3.6	Método de Modulación de Cambio de Fase	38
3.7	Comparación entre los Métodos de Medición	40
3.7.1	Tiempo de Vuelo	40
3.7.2	Tiempo de Vuelo con OTDR	40
3.7.3	Diferencial de Cambio de Fase	40
3.7.4	Interferométrico	41
3.7.5	Respuesta en Banda Base AM	41
3.7.6	Modulación de Cambio de Fase	41
4	Medición de la Dispersión Cromática	44
4.1	Descripción del Sistema	44
4.1.1	Láser	45
4.1.2	Medidor de Longitud de Onda	45
4.1.3	Modulador	46
4.1.4	Analizador de Redes	47
4.1.5	Detector Rápido	48
4.2	Proceso de Medición	49
4.2.1	Consideraciones en el Arreglo Experimental	51
4.3	Mediciones en la Banda C de Telecomunicaciones	54
4.4	Mediciones en la Banda O de Telecomunicaciones	56
4.5	Simulación de la Dispersión Cromática	58
5	Estimación de la Incertidumbre	62
5.1	Retardo de Grupo	62
5.1.1	Mensurando y Fuentes de Incertidumbre	62
5.1.2	Cuantificación	64
5.1.3	Incertidumbre Combinada	67
5.2	Dispersión Cromática	68
5.2.1	Mensurando y Fuentes de Incertidumbre	68
5.2.2	Cuantificación	69
5.2.3	Incertidumbre Combinada	71
5.3	Longitud de Onda de Cero Dispersión	71
5.3.1	Mensurando y Fuentes de Incertidumbre	71
5.3.2	Cuantificación	73
5.3.3	Incertidumbre Combinada	74

5.4	Pendiente a la Longitud de Onda de Cero Dispersión	74
5.4.1	Mensurando y Fuentes de Incertidumbre	74
5.4.2	Cuantificación	75
5.4.3	Incertidumbre Combinada	76
Conclusiones		79
Apéndices		81
A Reflexión Interna Total		81
A.1	Ángulo Crítico	83
B Derivación de la Dispersión de Grupo		84
C Método para el Ajuste de la Dispersión Cromática		87
C.1	Definición de Ecuaciones y Coeficientes de Ajuste	87
C.2	Procedimiento de Ajuste	89
Anexos		89
Anexo A		90
Anexo B		92

Lista de Figuras

1.1	Estructura básica de una fibra óptica.	6
1.2	Geometría del rayo para la derivación de la AN	7
1.3	Tipos de fibras ópticas: (a) monomodo, y (b) multimodo.	8
1.4	Dispersión cromática para diferentes tipos de fibra óptica	9
1.5	Perfil de: (a) índice escalonado, e (b) índice gradual.	10
1.6	Pérdidas por absorción en fibras ópticas	11
1.7	Vector de campo eléctrico de los modos degenerados en una fibra óptica monomodo	16
1.8	Dispersión por el modo de polarización para una fibra óptica monomodo asimétrica	17
2.1	Retardo relativo de grupo en función de la longitud de onda	23
2.2	Variación del índice de refracción n y el índice de grupo n_g con respecto a la longitud de onda para sílice puro	25
2.3	Variación de b y sus derivadas $d(bV)/dV$ y $V\{d^2(bV)/dV^2\}$, con respecto al parámetro V	27
2.4	Gráfica de la dispersión con todas sus contribuciones D_m , D_w y D_p , para la fibra óptica fabricada con los materiales de la Tabla 2.1	28
3.1	Arreglo experimental para el método de tiempo de vuelo	31
3.2	Arreglo experimental para el método de tiempo de vuelo con OTDR	32
3.3	Arreglo experimental para el método diferencial de cambio de fase	34
3.4	Arreglo experimental para el método interferométrico	35
3.5	Arreglo experimental para el método de respuesta en banda base AM	37
3.6	Arreglo experimental para el método de cambio de fase	38
4.1	Arreglo experimental para la medición de dispersión cromática.	45
4.2	Esquema de funcionamiento de un modulador tipo Mach-Zender.	47
4.3	Responsividad espectral del fotodetector con respecto a la longitud de onda	48

4.4	Responsividad espectral del fotodetector con respecto a la frecuencia	49
4.5	Retardo de grupo, por unidad de longitud en función de la longitud de onda, para la fibra G.653.	53
4.6	Dispersión cromática obtenida para la fibra óptica DSF G.653.	54
4.7	Comparación entre la dispersión cromática obtenida de las mediciones experimentales y las calculadas por medio de la norma internacional y la recomendada por el fabricante	55
4.8	Retardo de grupo, por unidad de longitud en función de la longitud de onda, para la fibra G.652.	56
4.9	Dispersión cromática obtenida para la fibra óptica G.652.	57
4.10	Comparación entre la dispersión cromática obtenida de las mediciones experimentales y la proporcionada por el fabricante	58
4.11	Perfiles de índice propuestos para las fibras (a) G.653 y (b) G.652	59
4.12	Dispersión cromática de las fibras ópticas (a) G.653 y (b) G.652, obtenidas experimentalmente, simuladas numéricamente y calculadas a partir de los modelos teóricos sugeridos por el fabricante y por la norma.	59
A.1	Representación de la Ley de Snell por medio de rayos.	82
A.2	Esquema del ángulo crítico, derivado por medio de la ley de Snell.	82

Lista de Tablas

1.1	Fibras ópticas comerciales utilizadas en comunicaciones de largas distancias. . . .	15
2.1	Parámetros de Sellmeier para una fibra óptica fabricada con sílice puro y con sílice dopado con germanio	24
4.1	Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos para la fibra óptica DSF G.653.	55
4.2	Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos para la fibra óptica G.652.	57
4.3	Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos mediante simulación numérica realizada a partir de los perfiles de índice propuestos para las fibras ópticas G.652 y G.653.	60
5.1	Presupuesto de incertidumbre para el retardo de grupo a 1 550 nm, para la fibra óptica G.653.	67
5.2	Presupuesto de incertidumbre para el retardo de grupo a 1 310 nm, para la fibra óptica G.652.	68
5.3	Presupuesto de incertidumbre para la dispersión cromática a 1 548.75 nm, para la fibra óptica G.653.	71
5.4	Presupuesto de incertidumbre para la dispersión cromática a 1 311 nm, para la fibra óptica G.652.	72
5.5	Presupuesto de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.653.	74
5.6	Presupuesto de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.652.	75
5.7	Presupuesto de incertidumbre para la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.653.	76
5.8	Presupuesto de incertidumbre para la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.652.	76

C.1	Definición de los tipos y coeficientes de ajuste; ecuaciones para el retardo de grupo y el coeficiente de dispersión.	88
C.2	Ecuaciones para la pendiente.	88
C.3	Ecuaciones para la longitud de onda y pendiente de cero dispersión	88

Resumen

La presente Tesis está enfocada a la medición de uno de los fenómenos que limitan la velocidad de transmisión en sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. A este fenómeno se le conoce con el nombre de dispersión cromática, el cual es el responsable del ensanchamiento y superposición de los pulsos transmitidos, y por tanto de pérdidas en la información. Para la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo, actualmente existen varios métodos, los cuales se han analizado a detalle y se ha determinado utilizar el método de cambio de fase para su implementación en el Laboratorio de Fibras Ópticas del Centro Nacional de Metrología (CENAM).

La implementación del método de cambio de fase implicó el estudio del fundamento teórico de la dispersión en fibras ópticas monomodo, la metodología del método de cambio de fase y la implementación del sistema de medición, en el cual se evaluaron las componentes del arreglo, el funcionamiento y las limitaciones de éstos en relación al buen funcionamiento del método de medición. Este método se utilizó para medir la dispersión cromática de dos fibras ópticas monomodo, una con dispersión nula en 1 310 nm y otra con dispersión nula en 1 550 nm, obteniendo buenas aproximaciones en relación a los datos proporcionados por el fabricante.

Para evaluar el sistema de cambio de fase implementado y la metodología utilizada, se realizó una estimación de la incertidumbre de: el retardo de grupo, la dispersión cromática, la longitud de onda de cero dispersión y finalmente la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión. Todo ello con el fin de que en un futuro se facilite la inter-comparación entre laboratorios que realizan la medición de dispersión cromática en fibras ópticas monomodo y de igual forma proveer a la industria con referencias que le sean confiables en el ámbito de las comunicaciones por medio de fibra óptica.

Introducción

La evolución constante en las telecomunicaciones ha producido cambios no sólo en la manera en que se transporta la información, sino también en la capacidad de información que puede transmitirse y en la calidad que ésta tiene una vez transmitida. Estos dos aspectos son de fundamental importancia cuando se evalúa el desempeño del canal de transmisión de un sistema de telecomunicaciones. Con la inclusión de las fibras ópticas en los sistemas de telecomunicaciones, se han alcanzado velocidades de transmisión en el orden de los giga bits por cada segundo (Gbps), pero al mismo tiempo se han vuelto significativos los efectos que algunos fenómenos ópticos tienen sobre la calidad de la información transmitida. Uno de éstos y quizá el más importante, es el fenómeno de la dispersión, el cual se manifiesta como una variación en la velocidad de transmisión de las distintas componentes en frecuencia que componen la señal óptica del pulso. El viaje de estas componentes a distintas velocidades conlleva a que se tengan diferentes tiempos de viaje y, como consecuencia, se produzca un ensanchamiento temporal de los pulsos de información transmitidos, dando a lugar a pérdidas en la información.

De particular interés para las telecomunicaciones mediante fibra óptica, es la medición y caracterización de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo. La dispersión cromática resulta de la combinación de la dispersión intrínseca del material con el cual se fabricó la fibra óptica y las contribuciones de dispersión generadas por la guía de onda. En el diseño de fibras ópticas, para propósitos de compensar o mitigar la dispersión, es común el manejo de materiales en combinación con las dimensiones y el perfil de índice de la guía. Actualmente existen varios métodos convencionales para medir y caracterizar las curvas de dispersión cromática en fibras ópticas. Uno de ellos se realiza con la ayuda de una fuente de longitud de onda sintonizable con la cual se mide el cambio de fase como función de la longitud de onda; este método se conoce como “Método de Cambio de Fase” y es el que se seleccionó para su implementación en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM.

La importancia de medir la dispersión cromática en fibras ópticas para telecomunicaciones reside en la necesidad que tiene este sector de contar con referencias confiables que le permitan evaluar y calificar el desempeño de sus productos y servicios. Asimismo, cumplir

con las regulaciones establecidas por el Estado Mexicano; las cuales buscan proveer un marco estandarizado y competitivo para la industria y la sociedad mexicanas.

Motivación

Ante el evidente auge de las telecomunicaciones de alta velocidad por fibra óptica, los nuevos servicios de red, administración y servicios móviles requieren de una mayor capacidad de transmisión. Esta demanda en capacidad de transmisión ha obligado a los proveedores de estos servicios, a realizar una actualización periódica de sus redes en relación a un aumento en las tasas de transmisión de datos. Sin embargo, antes de poder realizar esta actualización los operadores deben verificar que la infraestructura del sistema debe obedecer ciertos requisitos de rendimiento y confiabilidad. En este sentido, un elemento clave en la actualización de la infraestructura para el incremento de capacidad en los sistemas de telecomunicaciones de alta velocidad es la fibra óptica o canal de transmisión.

En la optimización del canal de transmisión de los sistemas de telecomunicaciones de alta velocidad, tres parámetros principales deben ser considerados en la fibra óptica: la dispersión cromática, la dispersión por el modo de polarización y el perfil de atenuación de la fibra óptica. Tomando en cuenta estos parámetros, se ha decidido evaluar el parámetro de dispersión cromática en fibras ópticas monomodo, con el fin de proporcionar una referencia confiable, que permita a los usuarios de este medio de transmisión, evaluar el rendimiento de sus sistemas de comunicaciones basados en fibras ópticas.

Objetivos

- Implementar el método de cambio de fase para medir dispersión cromática en fibras ópticas monomodo.
- Obtener un primer presupuesto de incertidumbre para la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo.

Organización de la Tesis

La presente Tesis consta de cinco Capítulos, los cuales se describen a continuación. En el Capítulo 1 se da una descripción de la estructura básica de una fibra óptica y se presenta una clasificación general de las fibras ópticas para comunicaciones en monomodo y multimodo. Asimismo, se presentan los parámetros de transmisión que caracterizan a la fibra óptica

como canal de transmisión, haciendo énfasis en la atenuación y en los distintos mecanismos de dispersión en estas fibras ópticas. Además, se muestra el impacto de la dispersión cromática y de la dispersión por el modo de polarización en las fibras ópticas monomodo para telecomunicaciones. Finalmente se numeran algunas de las fibras ópticas monomodo típicamente empleadas en los sistemas de telecomunicaciones.

En el Capítulo 2 se presenta una descripción más detallada del fenómeno de la dispersión cromática, los factores que dan origen a este fenómeno en fibras ópticas monomodo, como lo son, las propiedades debidas al material con el cual se fabrica la fibra óptica, las propiedades debidas a la guía de onda, las propiedades debidas al perfil con el cual se fabrica la fibra óptica y, finalmente, el conjunto de éstas que dan a lugar a la dispersión cromática y que es representado por medio del parámetro de dispersión de grupo.

En el Capítulo 3 se presenta una descripción general de los métodos comúnmente utilizados para medir la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo; las ventajas y desventajas de la implementación de cada uno de ellos y la las razones por las que se seleccionó del método de cambio de fase para su implementación en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM.

En el Capítulo 4 se describe el procedimiento realizado para implementar el método de cambio de fase en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM, al igual que las consideraciones y los resultados obtenidos al realizar la implementación de dicho método.

En el Capítulo 5 se detalla el procedimiento realizado para estimar la incertidumbre en la medición de la dispersión cromática, al implementar el método de cambio de fase, siguiendo para ello la metodología utilizada por la comunidad metroológica internacional.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado, los aspectos a atender a futuro y la inclusión de tres Apéndices, uno que presenta la derivación del caso particular de reflexión total interna, a partir de la ley de Snell; otro que muestra la derivación de la relación para la dispersión de grupo; y un tercero que resume las ecuaciones de ajuste que se usan habitualmente para determinar la dispersión cromática; así como dos Anexos que incluyen los valores de dispersión cromática reportados por los fabricantes de las dos fibras ópticas estudiadas.

Capítulo 1

La Fibra Óptica como Medio de Transmisión

En este Capítulo se darán a conocer algunas generalidades que se deben tomar en cuenta a la hora de manipular fibras ópticas en cualquiera que fuese su aplicación, así como los parámetros de transmisión que caracterizan a la fibra óptica como canal de transmisión, haciendo énfasis en la atenuación y los distintos mecanismos de dispersión en éstas fibras ópticas. Además, se muestra el impacto de la dispersión cromática y de la dispersión por el modo de polarización en las fibras ópticas monomodo utilizadas en telecomunicaciones.

1.1 Fibra Óptica

La fibra óptica es uno de los componentes clave en los sistemas de comunicación óptica. La estructura básica de una fibra óptica se muestra en la Fig. 1.1; la cual consta de un núcleo central con índice de refracción n_1 , un revestimiento con índice de refracción n_2 y un recubrimiento exterior para proteger y reforzar la fibra. Para fabricar el núcleo central generalmente se utiliza el sílice dopado con cualquier tierra rara, como el germanio; para el revestimiento se utiliza de igual forma el sílice, y para el recubrimiento exterior se utiliza un polímero.

Los parámetros estructurales que se deben tomar en cuenta comúnmente al manipular una fibra óptica son los siguientes (Fig. 1.1):

- Radio del núcleo (a).
- Radio del revestimiento (b).
- Radio de la cubierta o polímero (d).

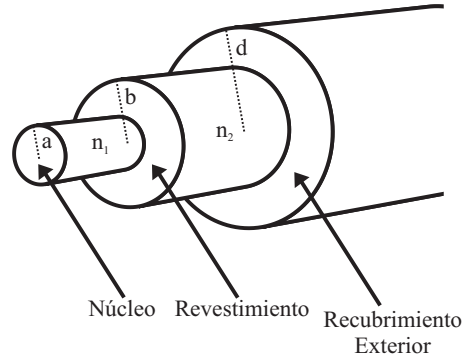


Figura 1.1: Estructura básica de una fibra óptica.

- Índice de refracción del núcleo (n_1).
- Índice de refracción del revestimiento (n_2).
- Diferencia de índice normalizada (Δ).
- Apertura Numérica (AN).

El parámetro de diferencia de índice normalizada (Δ) está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\delta n}{n_1}. \quad (1.1)$$

Otro de los parámetros de gran importancia es la apertura numérica (AN), que se define como el seno del ángulo máximo en el cual la luz se confinará dentro del núcleo de la fibra óptica [1.1]. Una expresión para este ángulo se puede deducir por medio del uso de geometría plana y de la Ley de Snell (Ver Apéndice A), como se muestra en la Ec. (1.2) y en la Fig. 1.2:

$$AN = \text{sen}\theta_{AN} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{2\Delta}. \quad (1.2)$$

Los factores que han permitido que las fibras ópticas sean el medio más atractivo en sistemas de comunicaciones de larga distancia, son los siguientes:

- Baja atenuación (α): Las fibras ópticas son el medio de transmisión con menor atenuación, presentando un mínimo absoluto de $\sim 0.2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ en 1550 nm ; por lo tanto, se pueden establecer enlaces directos sin repetidores a distancias de entre 100 km y 200 km .

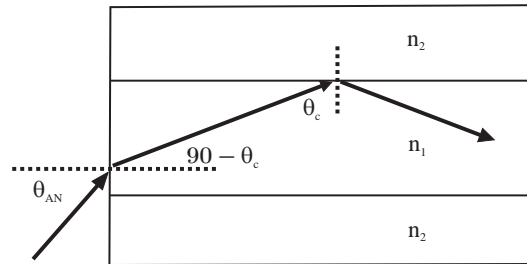


Figura 1.2: Geometría del rayo para la derivación de la AN [1.1].

- Gran ancho de banda (B): La capacidad de transmisión es muy elevada al transmitir simultáneamente múltiples longitudes de onda. Con el multiplexado de 200 longitudes de onda, la fibra óptica puede alcanzar un ancho de banda superior a los 10 Tb·km, dando a lugar a un mayor rendimiento en los sistemas de comunicaciones.
- Peso y tamaño reducidos: El diámetro de una fibra óptica es similar al de un cabello humano; por lo que típicamente un cable de 64 fibras ópticas, tiene un diámetro total de 15 mm y 20 mm, y un peso medio de $250 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$.
- Gran flexibilidad y recursos disponibles: Los cables de fibra óptica se pueden construir totalmente con materiales dieléctricos. El material utilizado típicamente en la fabricación de las fibras ópticas es el dióxido de silicio (SiO_2) que es uno de los recursos más abundantes en la superficie de la tierra.
- Inmunidad a la diafonía: Los cables ópticos son inmunes a la diafonía entre cables vecinos, debida a la inducción magnética. Las fibras de vidrio no conducen la electricidad y por tanto no tienen campos magnéticos asociados a ellas.
- Inmunidad a la interferencia por electricidad estática: Los cables ópticos son inmunes al ruido que causa la interferencia electromagnética. Tampoco se ven afectadas por radiaciones emitidas por otros medios; por lo tanto constituyen el medio más seguro para transmitir información de muy alta calidad sin degradación.
- Costo y mantenimiento: El costo de los cables de fibra óptica y la tecnología asociada con su instalación ha disminuído drásticamente en los últimos años. Hoy en día el costo de construcción de una planta de fibra óptica es comparable con el de una planta de cobre. Además los costos de mantenimiento de una planta de fibra óptica son muy inferiores a los de una planta de cobre; sin embargo, si el requerimiento de capacidad de información es bajo, la fibra óptica puede ser considerada como de un costo mayor.

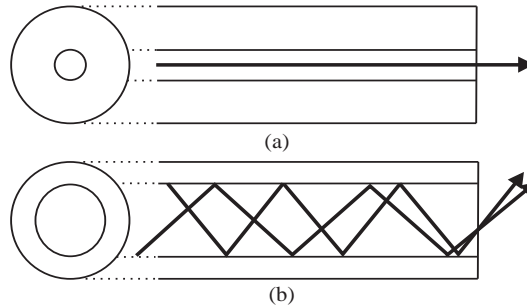


Figura 1.3: Tipos de fibras ópticas: (a) monomodo, y (b) multimodo.

1.1.1 Tipos de Fibra Óptica

Existen distintas clasificaciones de las fibras ópticas siguiendo diferentes criterios, entre los principales podemos encontrar, según el modo de propagación, según el índice de refracción y según los materiales de fabricación, los cuales se resumen a continuación:

1. Fibra Multimodo

- (a) Índice escalonado.
- (b) Índice gradual.

2. Fibra Monomodo

- (a) SMF¹.
- (b) DSF².
- (c) NZ-DSF³.

Las fibras ópticas utilizadas actualmente en telecomunicaciones se clasifican, según su modo de propagación en (Fig. 1.3):

Fibras ópticas monomodo: Son aquellas que debido a su diseño pueden guiar y transmitir un sólo rayo de luz (un modo de propagación) y tienen la particularidad de poseer un gran ancho de banda. Estas fibras ópticas poseen un núcleo que va desde los 8 μm hasta los 10 μm de diámetro y un revestimiento de 125 μm de diámetro.

¹Por las siglas en inglés para *Single Mode Fiber*.

²Por las siglas en inglés para *Dispersion Shifted Fiber*.

³Por las siglas en inglés para *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*.

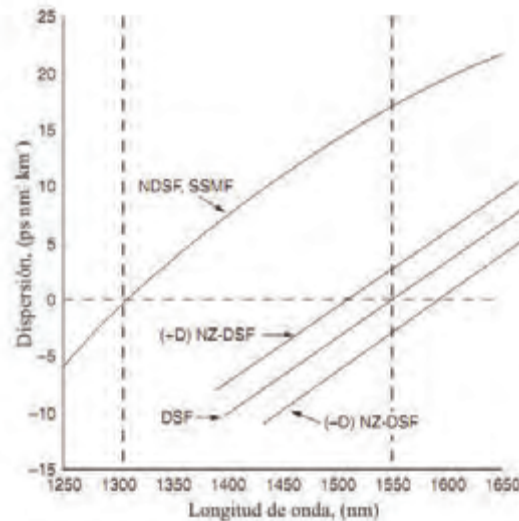


Figura 1.4: Dispersión cromática para diferentes tipos de fibra óptica [1.2].

Fibras ópticas multimodo: Son aquéllas que pueden guiar y transmitir varios rayos de luz (modos) por medio de sucesivas reflexiones. Estas fibras ópticas poseen un núcleo de $50\ \mu\text{m}$ o $62.5\ \mu\text{m}$ de diámetro y un revestimiento de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro.

La propagación en las fibras ópticas se realiza cuando un rayo de luz ingresa al núcleo de la fibra óptica con un ángulo determinado por su valor crítico θ_c (suficientemente inferior al ángulo $90^\circ - \theta_c$, ver Apéndice A), y dentro de él se producen sucesivas reflexiones en la superficie de separación entre éste y su revestimiento. A este fenómeno se le conoce con el nombre de reflexión interna total, que es un caso particular derivable de la Ley de Snell.

Dentro de las fibras ópticas monomodo se destacan tres tipos (Fig. 1.4):

- Fibra SMF: Este tipo de fibra óptica tiene una atenuación de alrededor de $0.2\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ y un coeficiente de dispersión de $16\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ a $1550\ \text{nm}$, y su longitud de onda de cero dispersión a $1310\ \text{nm}$.
- Fibra DSF: En esta fibra óptica la longitud de onda de cero dispersión se encuentra en $1550\ \text{nm}$ y su pendiente a esta longitud de onda es de aproximadamente $0.08\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$. Esto permite reducir la dispersión en esta ventana de las telecomunicaciones; sin embargo, se incrementa la distorsión no-lineal.
- Fibra NZDSF: La longitud de onda de cero dispersión se encuentra fuera de la longitud de onda de $1550\ \text{nm}$, con un coeficiente de dispersión positivo (+) o negativo (-) en un

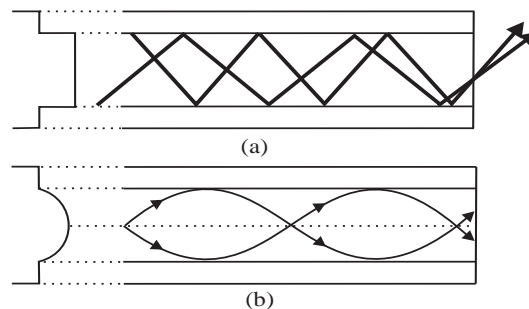


Figura 1.5: Perfil de: (a) índice escalonado, e (b) índice gradual.

intervalo que va desde los $2.4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ hasta los $7 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$, y una pendiente de dispersión del orden de $0.4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ hasta $0.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$. Esta fibra óptica se fabricó con el propósito de mitigar los efectos de la distorsión no-lineal [1.2].

Según su índice de refracción, las fibras ópticas se dividen en dos perfiles (Fig. 4.11):

- Perfil de índice escalonado: Tanto el núcleo como el revestimiento de la fibra óptica contienen un índice de refracción uniforme.
- Perfil de índice gradual: En el revestimiento se tiene un índice de refracción uniforme, pero en el núcleo el índice de refracción no es uniforme; es máximo en el centro y disminuye de forma gradual conforme se aleja de éste.

Cabe mencionar que las fibras ópticas con perfil de índice escalonado se encontrarán en fibras ópticas monomodo y algunas multimodo, y el perfil de índice gradual se encontrará solamente en fibras ópticas multimodo.

1.2 Atenuación y Dispersión

1.2.1 Atenuación

La atenuación en una fibra óptica es uno de los factores más importantes que influyen en las aplicaciones en las que se utilizan las fibras ópticas. Existen varios mecanismos que pueden contribuir a la atenuación en la fibra óptica, tales como la absorción del material, el esparcimiento Rayleigh, los micro o macro-doblamientos, y lo referente a conexiones. Algunos de estos factores son constantes y otros varían a lo largo de la fibra, especialmente si diferentes carretes de fibra son empalmados conjuntamente. La caracterización de la atenuación de la

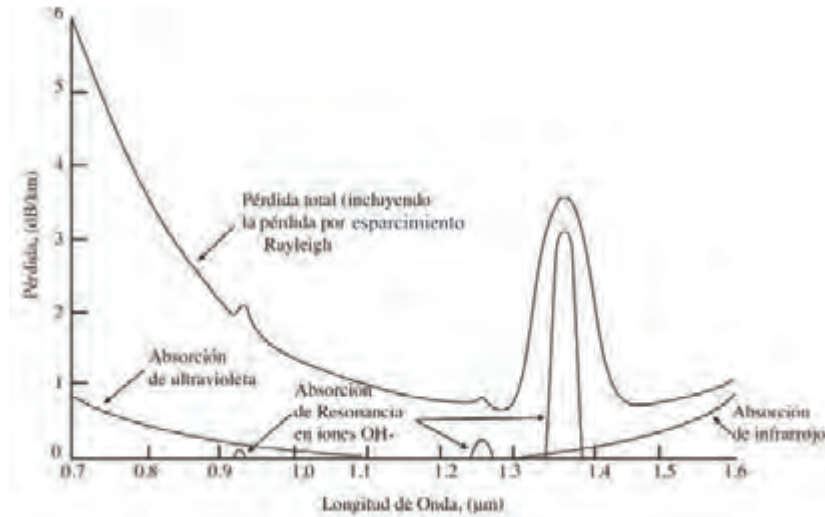


Figura 1.6: Pérdidas por absorción en fibras ópticas [1.4].

fibra es fundamental para el diseño de sistemas ópticos, en su implementación y estimación de rendimiento.

La atenuación α se puede definir como la disminución de potencia de la señal óptica conforme ésta se propaga a lo largo de la fibra óptica [1.3]:

$$P_{\text{sal}} = P_{\text{en}} \cdot e^{-\alpha L}, \quad (1.3)$$

$$\alpha_{\text{dB}} = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{en}}} \right), \quad (1.4)$$

donde P_{en} es la potencia en la entrada de la fibra óptica, P_{sal} es la potencia en la salida de la fibra óptica, L es la longitud de la fibra óptica. La unidad utilizada para medir la atenuación en una fibra óptica es el decibel por cada kilómetro ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$).

Los factores de pérdidas que influyen en la atenuación se pueden dividir en internos y externos. Los factores internos generan las pérdidas por absorción y por esparcimiento.

Las pérdidas por absorción (Fig. 1.6) son aquellas debidas a la interacción de la luz con los modos de resonancia del material con el que se fabrica la fibra. Entre ellas podemos encontrar las pérdidas por absorción en la región ultravioleta, en la región del infrarrojo, y las pérdidas por absorción de iones hidroxilo (OH).

Las pérdidas por esparcimiento se manifiestan como reflexiones del material y son debidas a las irregularidades microscópicas ocasionadas dentro del proceso de fabricación de la fibra óptica; lo cual ocasiona que el rayo se disperse o se refleje al hacer contacto con estas inhomogeneidades e impurezas.

Dentro de estas pérdidas se tienen las debidas al esparcimiento Rayleigh; imperfecciones de la fibra, en especial en la unión entre el núcleo y el revestimiento y a variaciones geométricas del núcleo de la fibra; impurezas y burbujas en el núcleo; e impurezas de materiales fluorescentes; pérdidas debidas a micro-fracturas.

Dentro de los factores externos, el principal y que más afecta, son las deformaciones mecánicas. Dentro de éstas, las más importantes son las curvaturas debido a que conllevan a la pérdida de luz de algunos rayos que no sufren la reflexión interna total y se escapan del núcleo.

Las curvas a las que son sometidas las fibras ópticas se pueden clasificar en macro-curvaturas (radio del orden de 1 cm o más) y micro-curvaturas (el eje de la fibra se desplaza a lo más, a unas decenas de micrómetros sobre una longitud de unos pocos milímetros).

1.2.2 Dispersión

En óptica, la dispersión se define como el fenómeno en el cual la velocidad de fase de una onda depende de la frecuencia [1.5]. Un ejemplo de dispersión es un arcoiris, en el cual la dispersión causa la separación espacial de una luz blanca en componentes de diferentes longitudes de onda (diferentes colores). Un medio que exhibe dispersión se denomina medio dispersivo.

En transmisiones ópticas de telecomunicaciones, la dispersión cromática ocasionará que un pulso de luz que consta de múltiples longitudes de onda, ocasione que éstas viajen a diferentes velocidades de grupo. El pulso se ensanchará conforme las longitudes de onda arriben en distintos intervalos. Este ensanchamiento del pulso es un factor crítico que limita la calidad de la señal transmitida a través de un enlace óptico.

En fibras ópticas monomodo, las cuales se utilizan en redes ópticas de alta velocidad, éstas se encuentran sujetas a la dispersión cromática y a la dispersión por el modo de polarización. Un ensanchamiento excesivo debido a la combinación de éstas dispersiones provocará que los bits se desborden y lleguen a superponerse a los bits vecinos, ocasionando que al receptor le sea difícil discernir e interpretar apropiadamente los bits adyacentes, incrementando la tasa de errores de bits, BER⁴ [1.6].

Con redes ópticas transmitiendo a velocidades que van desde los 2.5 Gbps a los 10 Gbps y de hasta 40 Gbps, la tolerancia de aceptación con respecto a la dispersión neta es reducida drásticamente. Estas pequeñas tolerancias en redes de alta velocidad dan a lugar a que cada fuente de contribución a la dispersión cromática deba identificarse. De la misma forma se determinan las fuentes que generan la dispersión por el modo de polarización. Esto con la finalidad de evaluar la necesidad de compensar la dispersión cromática o mitigar la dispersión

⁴Por las siglas en inglés para *Bit Error Rate*.

por el modo de polarización, a fin de alcanzar el máximo rendimiento de la red para transmitir a mayores velocidades.

1.3 Dispersión Modal e Intramodal (Cromática)

1.3.1 Dispersión Modal

La dispersión modal es aquella que resulta al transmitirse más de un modo a través de la fibra óptica; diferentes modos tendrán diferentes velocidades de propagación. En fibras ópticas multimodo el efecto de dispersión modal es mucho más significativo que el de dispersión cromática, ocasionando que la dispersión cromática usualmente sea despreciada en este tipo de fibras ópticas; típicamente de aproximadamente $50 \text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ [1.7] para fibras ópticas multimodo de índice escalonado, y de $0.2 \text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ a $1 \text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ [1.8] para fibras ópticas multimodo de índice gradual.

La dispersión modal depende del número de modos propagados a través de la fibra óptica, los cuales, de alguna manera están determinados por el tamaño del núcleo de la fibra, por la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, y por el ancho medio en longitud de onda del transmisor.

1.3.2 Dispersión Intramodal o Cromática

Esta dispersión depende principalmente de los materiales con que es fabricada la fibra óptica. Generalmente existen dos fuentes de dispersión: la dispersión debida al material y la dispersión debida a la guía de onda.

La dispersión debida al material proviene de la dependencia en frecuencia que hay en la respuesta de los materiales con respecto a ondas. La dispersión debida a la guía de onda ocurre cuando la velocidad de una onda en una guía de onda depende de su frecuencia debido a razones geométricas, independientemente de cualquier dependencia en frecuencia de los materiales con los cuales se fabrica.

De manera más general, la dispersión debida a la guía de onda puede ocurrir para ondas propagándose a través de cualquier estructura no homogénea, no importando si las ondas están confinadas en la misma región. La combinación de estas dos fuentes conllevan a la degradación de la señal en fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones.

En el Capítulo 2 se describirán con más detalle las fuentes que contribuyen a la dispersión cromática.

1.4 Penalización por Dispersión Cromática

En un sistema de transmisión óptica encontramos un transmisor, el medio de transmisión y un receptor, que representan los elementos fundamentales que se deben tomar en cuenta para realizar un sistema de transmisión. El transmisor se encarga de codificar los datos de forma digital a través de una señal óptica portadora. El medio de transmisión entrega los datos codificados proveniente de la señal óptica portadora al receptor, el cual convierte esta señal a una señal eléctrica y los datos son decodificados. El medio de transmisión puede ser tan simple como una fibra óptica o tan complejo como un amplificador y multiplexador por división de longitud de onda. La fidelidad de la transmisión de los datos es cuantificada por medio del BER. El BER se define como la porción de datos mal decodificados por el receptor y por tanto es una función del factor calidad Q , el cual es una medida eléctrica de la razón de separación entre estados digitales y el ruido de estos estados [1.3].

Actualmente los sistemas ópticos comerciales están diseñados para operar con cierta fidelidad mínima en un determinado periodo de tiempo, por ejemplo un BER máximo de 10^{-15} es usualmente requerido para implementarse en ciudades y a través de distancias entre continentes. En estos diseños generalmente se utiliza un corrector de errores para que el receptor sea más eficiente a la hora de decodificar los datos. Existen una amplia gama de correctores de errores que llegan a corregir un BER tan baja como 10^{-15} y tan alta como 10^{-3} , con respecto a errores no corregidos. En la ausencia de un corrector de errores se exige un BER máximo de 10^{-12} .

La dispersión cromática afecta de algún modo a todas las transmisiones ópticas. Estos efectos se vuelven cada vez más evidentes conforme las tasas de transmisión y la longitud de la fibra óptica se incrementan. Como se discutió anteriormente, se requiere de un BER de 10^{-12} en un sistema de transmisión en donde la dispersión cromática es un factor que limita la transmisión. Expresándolo en términos de la longitud de la fibra óptica, para una fibra óptica monomodo típica, un coeficiente de dispersión de $17 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ es requerido usualmente, el cual limita la distancia de transmisión alrededor de los 100 km para un sistema que transmite a $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. También se introduce una penalización en la potencia óptica de transmisión con pérdidas que van desde 1 dB hasta los 2 dB. Este límite en la potencia óptica permite reducir la máxima sensibilidad especificada para el receptor. La dispersión cromática del enlace se debe mantener debajo o igual a lo especificado por el fabricante para poder mantener el BER que se requiere. Si este límite se llega a sobrepasar es necesario hacer un diseño que permita la compensación de la dispersión cromática.

El límite de la dispersión cromática es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la tasa de transmisión de bits [1.2]. Este efecto se debe a altas tasas de bits con anchos de pulso muy pequeños, los cuales aumentan la sensibilidad a ensanchar el pulso y aumentar el ancho espectral de la señal, lo que resulta en más ensanchamiento temporal del pulso a

Tabla 1.1: Fibras ópticas comerciales utilizadas en comunicaciones de largas distancias.

Tipo de Fibra	Dispersión Típica a 1 550 nm, ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)	Pendiente Típica a 1 550 nm, ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$)
SSMF ITU-G.652	17	0.057
DSF ITU-G.653	0	0.07
NZDSF ITU-G.655	2.6 a 8	0.045 a 0.1
NDF (NZDSF) ITU-G.655	-8 a -3	0.05 a 0.12

través de la dispersión cromática. El límite de la dispersión cromática también es sensible a los formatos de los equipos ópticos y a los tipos de láseres. Estas limitaciones son diferentes tanto para el formato de no retorno a cero, NRZ⁵, como para el de retorno a cero, RZ⁶, láseres con o sin chirp, láseres modulados directamente y externamente, así como láseres con anchos espectrales diferentes.

Debido a lo complicado que resulta poder calcular el límite de la dispersión cromática, se ha utilizado una estimación en la que se asume que los pulsos lanzados a través de la fibra óptica son Gaussianos y que su forma no cambia durante la transmisión. Con esta suposición el límite de la dispersión cromática se puede calcular por medio del cociente entre la desviación típica del pulso a la salida σ , y la desviación típica del pulso de entrada σ_0 , encontrando lo que se conoce como factor de ensanchamiento $f_b = \sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ [1.9].

Algunos factores que contribuyen a la dispersión cromática son el ancho espectral del láser, el método de modulación y el *chirp*; la longitud de onda de la señal óptica; la tasa de bits de transmisión del láser; las características de la dispersión cromática de la fibra utilizada en el enlace; la longitud total del enlace; los demás dispositivos que puedan cambiar la dispersión cromática total del enlace; y los cambios en la temperatura de la fibra o el cable de fibra.

1.5 Tipos de Fibra para Telecomunicaciones de Larga Distancia

En los últimos 30 años la capacidad de transmisión de las fibras ópticas se ha incrementado enormemente. La capacidad de transmisión de una fibra óptica depende de la longitud de

⁵Por las siglas en inglés para *Non-Return to Zero*.

⁶Por las siglas en inglés para *Return to Zero*

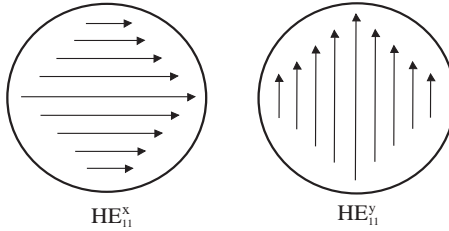


Figura 1.7: Vector de campo eléctrico de los modos degenerados en una fibra óptica monomodo [1.3].

la fibra; cuanto más larga es una fibra óptica, más propensa será a sufrir los efectos de la dispersión cromática y menor será la tasa de transmisión alcanzable.

Para distancias cortas, de alrededor de los 100 m o menos, usualmente es más conveniente utilizar fibras ópticas multimodo, debido a que su costo de instalación es barato. Dependiendo de la tecnología de transmisión y de la longitud de la fibra óptica, éstas pueden alcanzar tasas de datos entre los $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ y los $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$.

Las fibras ópticas monomodo son típicamente utilizadas en largas distancias de unos pocos kilómetros o más (ver Tabla 1.1). Los sistemas de comunicación actuales generalmente transmiten $2.5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ o $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ por canal de datos a distancias de 10 km o más. En un futuro los sistemas podrán llegar a transmitir altas tasas de datos por canal de $40 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ o aún hasta $160 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, pero actualmente la capacidad total requerida se obtiene transmitiendo varios canales con diferentes longitudes de onda a través de las fibras ópticas, lo que se conoce con el nombre de multiplexación por división de longitud de onda. Las tasas de datos totales pueden ser de muchos terabits por segundo, suficiente para transmitir millones de canales telefónicos simultáneamente, aún si esta capacidad no alcanza los límites físicos de una fibra óptica.

1.6 Dispersión por el Modo de Polarización

La dispersión por el modo de polarización, PMD⁷, es un tipo especial de dispersión modal que exhiben las fibras ópticas monomodo. En una fibra óptica monomodo coexisten dos modos fundamentales polarizados ortogonalmente, como se muestra en la Fig. 1.7. En una fibra óptica con simetría cilíndrica perfecta estos dos modos tienen la misma condición de corte y son referidos como modos degenerados [1.3].

Sin embargo, las fibras ópticas pueden no tener una simetría cilíndrica perfecta debido a

⁷Por las siglas en inglés para *Polarization Mode Dispersion*.

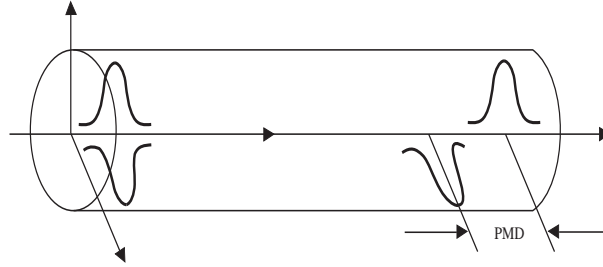


Figura 1.8: Dispersión por el modo de polarización para una fibra óptica monomodo asimétrica [1.10].

la birrefringencia, por lo que estos dos modos fundamentales pueden propagarse a diferentes velocidades (Fig. 1.8). La birrefringencia en una fibra óptica es usualmente causada por pequeñas perturbaciones en la estructura geométrica, así como también por la anisotropía del índice de refracción. Las fuentes de estas perturbaciones pueden clasificarse en intrínsecas y extrínsecas

Las perturbaciones intrínsecas se refieren a perturbaciones estructurales permanentes en la geometría de la fibra óptica, la cual es causada comúnmente por errores en el proceso de fabricación de la fibra óptica; e incluyen un núcleo de la fibra óptica no circular, que se conoce como birrefringencia geométrica, y un esfuerzo no simétrico, conocido como esfuerzo birrefringente.

Por otro lado, la perturbación extrínseca usualmente se refiere a perturbaciones debidas a fuerzas externas aleatorias causadas en el proceso de cableado e instalación de la fibra óptica. La perturbación extrínseca causa también la birrefringencia geométrica y el esfuerzo birrefringente.

El efecto de la birrefringencia es aquél en los que dos modos de polarización ortogonales HE_{11}^x y HE_{11}^y experimentan constantes de propagación ligeramente diferentes cuando viajan a lo largo de la fibra óptica, por lo tanto, sus retardos de grupo son diferentes.

Asumiendo que los índices efectivos en el núcleo de la fibra birrefringente son n_x y n_y para dos modos de polarización, entonces sus correspondientes constantes de propagación serían $\beta_x = \omega n_x c^{-1}$ y $\beta_y = \omega n_y c^{-1}$, respectivamente. Debido a la birrefringencia β_x y β_y no son iguales y su diferencia se encuentra por medio de:

$$\Delta\beta = (\beta_x - \beta_y) = \frac{\omega}{c} \Delta n_{\text{eff}}, \quad (1.5)$$

donde $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\parallel} - n_{\perp}$ es el índice de refracción efectivo diferencial de los dos modos, y c es la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en el vacío. Para una fibra óptica de longitud L , el retardo de grupo relativo entre los dos modos de polarización ortogonales

es:

$$\Delta\tau_g = \frac{(n_{\parallel} - n_{\perp})}{c}L = \frac{L\Delta n_{\text{eff}}}{c}, \quad (1.6)$$

el cual se conoce comúnmente como retardo de grupo diferencial.

Como resultado de la birrefringencia de la fibra óptica, el estado de polarización de la señal óptica rotará conforme se propague ésta a lo largo de la fibra óptica debido a la acumulación relativa de cambios de fase $\Delta\Phi$ entre los dos modos de polarización:

$$\Delta\Phi = \frac{\omega\Delta n_{\text{eff}}}{c}L. \quad (1.7)$$

La evolución de una señal óptica introducida en una fibra óptica birrefringente estará influenciada por los cambios, en la longitud de la fibra L , por el índice de refracción efectivo diferencial Δn_{eff} o por la frecuencia de la señal ω .

En comunicaciones modernas de alta velocidad en las que se utilizan fibras ópticas monomodo, la dispersión por el modo de polarización se ha vuelto uno de los factores más notorios en el rendimiento de la transmisión de la información. Debido a la naturaleza aleatoria de las perturbaciones que causan la birrefringencia, la dispersión por el modo de polarización representa un proceso aleatorio.

Referencias

- [1.1] J.A. Buck, *“Fundamentals of Optical Fibers”*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, (2004).
- [1.2] B. Chomycz, *“Planning Fiber Optic Networks”*, McGraw Hill, USA, (2009).
- [1.3] R. Hui, M. O’Sullivan, *“Fiber Optic Measurement Techniques”*, Elsevier Academic Press, USA, (2009).
- [1.4] W. Tomasi, *“Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”*, Prentice Hall, 4ta. Edición, Pearson Educación de México, S.A. de C.V., México, (2003).
- [1.5] Fiber Optic, *“Chromatic Dispersion (OPTICS)”*, en www.fiberoptic.com/Fiber_Characterization/pdf/chromatic_dispersion.pdf
- [1.6] Anritsu Corporation, Gildas Chauvel, *“Dispersion in Optical Fibers”*, (2008).
- [1.7] R.S. Quimby, *“Photonics and Lasers An Introduction”*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, (2006).
- [1.8] Fiber Optics For Sale Co., *“Optical Fiber Dispersion”*, en <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/optical-fiber-dispersion/>
- [1.9] D.P. Abellán, F.R. Pascual, J.C. Francoy, *“Sistemas de Comunicaciones Ópticas”*, Universidad Politécnica de Valencia, (2006).
- [1.10] B. Collings, F. Heismann, G.y Lietaert, *“Reference Guide to Fiber Optic Testing”*, Volumen 2, JDS Uniphase Corporation, (2010).

Capítulo 2

Dispersión Cromática en Fibras Ópticas

En este Capítulo se describirán las fuentes que dan lugar a la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo, la dispersión de grupo obtenida a partir de las fuentes de dispersión y los parámetros de longitud y pendiente de cero dispersión.

2.1 Velocidad de Fase y Velocidad de Grupo

El campo eléctrico para una onda plana propagándose en la dirección de z a una sola frecuencia se expresa como:

$$E(z, t) = E_0 e^{-i\phi(t, z)}, \quad (2.1)$$

donde $\phi(t, z) = (\omega_0 t - \beta_0 z)$ es la fase óptica, ω_0 es la frecuencia óptica, y $\beta_0 = 2\pi n \lambda^{-1} = n\omega_0 c^{-1}$ es la constante de propagación.

Cuando la fase óptica es constante su velocidad de propagación se conoce con el nombre de velocidad de fase, la cual se define como:

$$\nu_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega_0}{\beta_0}. \quad (2.2)$$

Ahora, si se considera que esta onda óptica es modulada por una señal senoidal de frecuencia $\Delta\omega$, entonces el campo eléctrico de la Ec. (2.1) se expresa como:

$$E(z, t) = E_0 e^{-i(\omega_0 t - \beta_0 z)} \cos(\Delta\omega t). \quad (2.3)$$

Esta modulación divide la señal óptica en dos componentes en frecuencia. En la entrada ($z = 0$) de la fibra óptica, el campo eléctrico es:

$$E(0, t) = E_0 e^{-i\omega_0 t} \cos(\Delta\omega t) = \frac{1}{2} E_0 (e^{-i(\omega_0 + \Delta\omega)t} + e^{-i(\omega_0 - \Delta\omega)t}). \quad (2.4)$$

A partir de que la constante de propagación $\beta = n\omega c^{-1}$ es linealmente proporcional a la frecuencia de la señal óptica, las dos componentes en frecuencias a $\omega_0 \pm \Delta\omega$ tendrán dos constantes de propagación diferentes $\beta_0 \pm \Delta\beta$, respectivamente. Por lo tanto, la expresión para el campo es:

$$\begin{aligned} E(z, t) &= \frac{1}{2} E_0 \{ e^{-j[(\omega_0 + \Delta\omega)t - (\beta_0 - \Delta\beta)z]} + e^{-j[(\omega_0 - \Delta\omega)t - (\beta_0 + \Delta\beta)z]} \}, \\ &= E_0 e^{-i(\omega_0 t - \beta_0 z)} \cos(\Delta\omega t - \Delta\beta z), \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde $E_0 e^{-i(\omega_0 t - \beta_0 z)}$ es la portadora óptica, la cual es idéntica a la de la Ec. (2.1) y en donde $\cos(\Delta\omega t - \Delta\beta z)$ es la envolvente de esta portadora óptica, la cual representa la información que es modulada sobre la portadora óptica. La velocidad de propagación de esta información se le conoce con el nombre de velocidad de grupo, el cual se define como:

$$\nu_g = \frac{d\omega}{d\beta}. \quad (2.6)$$

En un medio no dispersivo, el índice de refracción n es una constante que es independiente de la frecuencia de la señal óptica. En este caso la velocidad de grupo es igual a la velocidad de fase. Sin embargo, en muchos materiales ópticos, el índice de refracción es una función dependiente de la frecuencia, ocasionando que la velocidad de fase sea distinta a la velocidad de grupo.

El retardo de fase por unidad de longitud (normalmente expresada en kilómetros en estos casos), se define como el inverso de la velocidad de fase, tal y como se muestra en:

$$\tau_p = \frac{1}{\nu_p} = \frac{\beta_0}{\omega_0}. \quad (2.7)$$

De forma similar, el retardo de grupo por unidad de longitud, se define como el inverso de la velocidad de grupo:

$$\tau_g = \frac{1}{\nu_g} = \frac{d\beta}{d\omega}. \quad (2.8)$$

2.2 Dispersión en la Velocidad de Grupo

Para comprender la dispersión en la velocidad de grupo, se considera el caso de dos ondas senoidales con frecuencias $\Delta\omega \pm \delta\omega/2$ las cuales son moduladas sobre una frecuencia óptica portadora ω_0 . Cuando se propagan a lo largo de la fibra, cada frecuencia de modulación tendrá su propia velocidad de grupo, por lo que para una fibra óptica, la diferencia en el retardo de grupo por unidad de longitud entre estas dos componentes en frecuencia se encuentra, como:

$$\delta\tau_g = \frac{d\tau_g}{d\omega} \delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) \delta\omega = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \delta\omega. \quad (2.9)$$

En general, la dependencia en frecuencia de la constante de propagación $\beta(\omega)$ puede ser expresada en series de Taylor alrededor de una frecuencia central ω_0 , como se muestra en:

$$\begin{aligned} \beta(\omega) &= \beta(\omega_0) + \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots, \\ &= \beta(\omega_0) + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \end{aligned} \quad (2.10)$$

donde:

$$\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2.11)$$

representa el retardo de grupo, y:

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}, \quad (2.12)$$

es la dispersión en el retardo de grupo.

Por lo tanto, el retardo relativo en el tiempo para dos componentes en frecuencia separadas por un $\delta\omega$ para una fibra óptica con longitud L , se expresa como:

$$\Delta\tau_g = \beta_2 L \delta\omega. \quad (2.13)$$

Para reducir y facilitar la expresión del retardo relativo, es conveniente cambiar la componente en frecuencia ω a longitud de onda λ , obteniendo un retardo relativo por unidad de longitud de:

$$\delta\tau_g = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \delta\lambda \equiv D \delta\lambda, \quad (2.14)$$

donde $D = d\tau_g/d\lambda$, es otro parámetro de dispersión para el retardo de grupo. La relación que existe entre los dos parámetros de dispersión D y β_2 , se expresa como:

$$D = \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d\omega}{d\lambda} \cdot \frac{d\tau_g}{d\omega} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2. \quad (2.15)$$

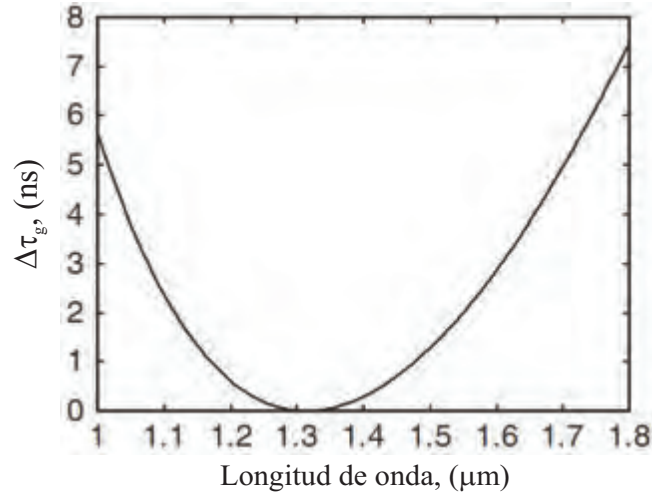


Figura 2.1: Retardo relativo de grupo en función de la longitud de onda [2.1].

Para una fibra óptica con longitud L , se puede encontrar el retardo relativo en el tiempo para dos componentes en longitud de onda separadas por un $\delta\lambda$ (Fig. 2.1), como:

$$\Delta\tau_g = DL\delta\lambda. \quad (2.16)$$

En sistemas de fibra óptica normalmente el retardo relativo se expresa en picosegundos; la separación en longitud de onda, en nanómetros; y la longitud de la fibra en kilómetros. Por lo tanto, las unidades usualmente utilizadas para β_1 , β_2 y D son $s\cdot\text{km}^{-1}$, $\text{ps}^2\cdot\text{km}^{-1}$ y $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, respectivamente.

2.3 Fuentes de Dispersión Cromática

La razón física de la dispersión cromática es la dependencia en longitud de onda que existe en la constante de propagación $\beta(\lambda)$. Tanto las propiedades del material, como la estructura y perfil de índice de la guía de onda de la fibra óptica, contribuyen a esta dependencia, las cuales son referidas como: dispersión debida al material y dispersión debida a la guía de onda. Estas fuentes se describirán con más detalle a continuación.

2.3.1 Dispersión debida al Material

La dispersión debida al material ocurre debido a que el índice de refracción del sílice, cambia con respecto a la frecuencia ω . El origen de la dispersión por el material se relaciona con

Tabla 2.1: Parámetros de Sellmeier para una fibra óptica fabricada con sílice puro [2.2] y con sílice dopado con germanio [2.3].

Material	A_1	$\lambda_1(\mu\text{m})$	A_2	$\lambda_2(\mu\text{m})$	A_3	$\lambda_3(\mu\text{m})$
SiO ₂	0.696 166 3	0.068 404 3	0.407 942 6	0.116 241 4	0.897 479 4	9.896 161
GeO ₂ :SiO ₂	0.711 040	0.064 270	0.451 885	0.129 408	0.704 048	9.425 478

las frecuencias de resonancia a las cuales el material absorbe la radiación electromagnética. Para frecuencias más allá de las resonancias del material se utiliza la fórmula de Sellmeier, la cual se emplea para medir experimentalmente el índice de refracción, tal y como se muestra en:

$$n^2 - 1 = \sum_{j=1}^p \frac{A_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}. \quad (2.17)$$

Para el caso del sílice, se utiliza comúnmente la ecuación de tres términos de Sellmeier, la cual incluye las resonancias tanto en el infrarrojo como en el ultravioleta:

$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}. \quad (2.18)$$

En la Tabla 2.1 se muestran los valores de los parámetros de Sellmeier para el caso de fibras ópticas fabricadas con sílice puro y con sílice dopado con 13.5 % de Germanio [2.2, 2.3].

Por otra parte, el índice de grupo (n_g) se define como el cociente entre la velocidad de la luz y la velocidad de grupo del medio dispersivo, el cual está dado por:

$$n_g \equiv n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (2.19)$$

y se puede obtener por medio de los parámetros de Sellmeier.

Debido a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda, la constante de propagación $\beta(\lambda) = 2\pi n(\lambda)\lambda^{-1}$, también será dependiente de la longitud de onda, por lo que el retardo de grupo por unidad de longitud dependiente de la longitud de onda, se encuentra por medio de:

$$\tau_g = \frac{d\beta(\lambda)}{d\omega} = - \left(\frac{\lambda^2}{2\pi} \right) \frac{d\beta(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{c} \left[n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \right]. \quad (2.20)$$

La Fig. 2.2 muestra la dependencia de n y n_g en el intervalo de 0.5 μm a 1.6 μm , para el sílice puro.

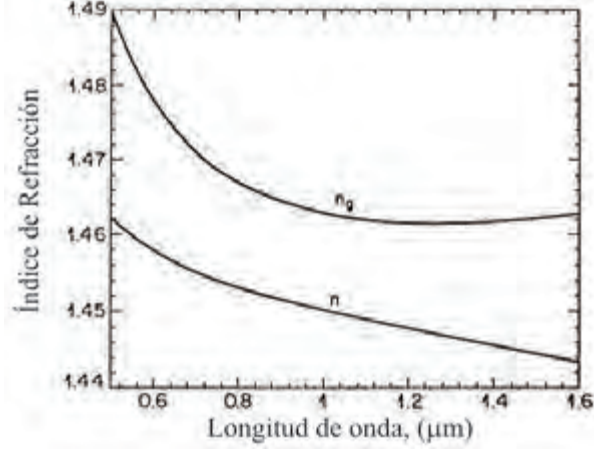


Figura 2.2: Variación del índice de refracción n y el índice de grupo n_g , con respecto a la longitud de onda para sílice puro [2.4].

2.3.2 Dispersión debida a la Guía de Onda

La dispersión debida a la guía de onda se puede explicar como la dependencia en longitud de onda del ángulo al cual se propaga el rayo de luz dentro del núcleo de la fibra óptica. En el modo guiado, la constante de propagación β tiene que satisfacer la condición $kn_2 < \beta \leq kn_1$, donde k es la constante de fase en el vacío expresada como $k = 2\pi\lambda^{-1}$.

Si se define:

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{(\beta/k) - n_2}{n_1 - n_2}, \quad (2.21)$$

como la constante de propagación normalizada, entonces se puede expresar β , en términos de b , como se muestra a continuación:

$$\beta(\lambda) = kn_2(b\Delta + 1), \quad (2.22)$$

donde $\Delta = (n_1 - n_2)n_2^{-1}$ es la diferencia de índice normalizada entre el núcleo y el revestimiento. Entonces al determinar el retardo de grupo podemos ver que éste varía con respecto a la longitud de onda, como se muestra en:

$$\tau_g = \frac{d\beta(\lambda)}{d\omega} = \frac{n_2}{c} \left(1 - b\Delta - k \frac{db}{dk} \Delta \right). \quad (2.23)$$

Las diferencias en el índice de refracción entre el núcleo de la fibra óptica y el revestimiento, provocan que la luz se propague más rápido en el revestimiento que en el núcleo;

en donde la diferencia en la velocidad de propagación es independiente de la longitud de onda. Por lo tanto, conforme el diámetro de campo modal, MFD¹, definido como la medida del alcance transversal de la intensidad de campo electromagnético en una sección transversal, aumenta, un gran porcentaje de la luz se propagará a través del revestimiento resultando en una propagación más rápida [2.5]. Entonces, el retardo de grupo dado por la Ec. (2.23) incluye tanto la contribución del perfil de índice de la fibra óptica (variación del índice de refracción en la fibra óptica) como la superficie de luz de la longitud de onda (MFD).

2.4 Parámetro de Dispersión de Grupo

De acuerdo con la Ec. (2.15), el parámetro de dispersión de grupo $D(\lambda)$ en una fibra óptica monomodo, se encuentra diferenciando el retardo de grupo con respecto a la longitud de onda.

Tomando en cuenta que el retardo de grupo por unidad de longitud se encuentra definido como $\tau_g = d\beta/d\omega$, entonces $D(\lambda)$ también puede expresarse como:

$$D(\lambda) = \frac{d}{d\lambda} \frac{d\beta}{d\omega} = -\frac{1}{2\pi c} \frac{d}{d\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d\beta}{d\lambda} \right). \quad (2.24)$$

Al sustituir β , como se definió en la Ec. (2.22), se realizan las derivaciones con respecto a la longitud de onda y se agrupan los términos de acuerdo a Gambling *et. al.* [2.6] y se encuentra que (ver derivación en el Apéndice B):

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) + D_p(\lambda), \quad (2.25)$$

donde D_m corresponde a la dispersión por el material, D_w a la dispersión por la guía de onda y D_p a la dispersión por el perfil de la fibra óptica; mismas que se expresan como:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} n_1'' A(V) - \frac{\lambda}{c} n_2'' \left\{ 1 - A(V) - \frac{\Delta}{2} \left[b + \frac{d(bV)}{dV} \right] \right\}, \quad (2.26)$$

$$D_w(\lambda) = -\frac{n_2 \Delta}{c\lambda} \left(1 - \frac{\lambda n_2'}{n_2} \right)^2 V \frac{d^2(bV)}{dV^2}, \quad (2.27)$$

$$D_p(\lambda) = \frac{n_2 \Delta'}{c} \left\{ \left(1 - \frac{\lambda n_2'}{n_2} + \frac{\lambda \Delta'}{4\Delta} \right) \left[V \frac{d^2(bV)}{dV^2} + \frac{d(bV)}{dV} - b \right] + \frac{2\lambda n_2'}{n_2} A(V) \right\}, \quad (2.28)$$

donde $n_1' = dn_1/d\lambda$, $n_2' = dn_2/d\lambda$, $n_1'' = d^2n_1/d\lambda^2$, $n_2'' = d^2n_2/d\lambda^2$ y $\Delta' = d\Delta/d\lambda$.

¹Por las siglas en inglés para *Mode Field Diameter*.

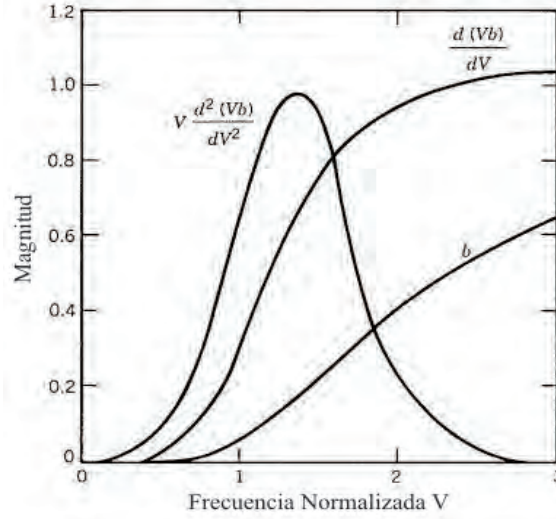


Figura 2.3: Variación de b y sus derivadas $d(bV)/dV$ y $V[d^2(bV)/dV^2]$, con respecto al parámetro V [2.4].

El parámetro $A(V)$ es la fracción de potencia del modo fundamental que es llevada a través del núcleo de la fibra y el cual se define mediante:

$$A(V) = \frac{1}{2} \left[\frac{d(bV)}{dV} + b \right], \quad (2.29)$$

donde V es el parámetro de frecuencia normalizada definido como $V = 2\pi a^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$.

Por su parte el comportamiento de los términos $b, d(bV)/dV$ y $V[d^2(bV)/dV^2]$ con respecto al parámetro V se ilustran en la Fig. 2.3. A partir de que ambas derivaciones son positivas, la dispersión debida a la guía de onda D_w será negativa a lo largo del intervalo en longitud de onda, que va desde $0 \mu\text{m}$ hasta $1.6 \mu\text{m}$. El hecho de que D_m se vuelva positivo a longitudes de onda más allá de $1.3 \mu\text{m}$ muestra la posibilidad de cancelar la dispersión debida al material y a la guía de onda en este intervalo de longitud de onda, tal que el pulso propagado sea cero a una longitud de onda específica.

La D_m contiene la dispersión de la suma de los materiales en el núcleo y en el revestimiento, como también de manera implícita los efectos debidos a la guía de onda. La D_w implica la dependencia que existe con la segunda derivada de bV con respecto a V , en donde también se ve afectada por las propiedades debidas al material. Y finalmente, para la D_p se destaca la dependencia que existe en $d\Delta/d\lambda$ para el perfil de la fibra óptica.

En la Fig. 2.4 se muestran las gráficas de D_m, D_w, D_p y D en función de la longitud de onda λ , calculadas por medio de las Ecs. (2.25)-(2.28), para una fibra óptica estándar

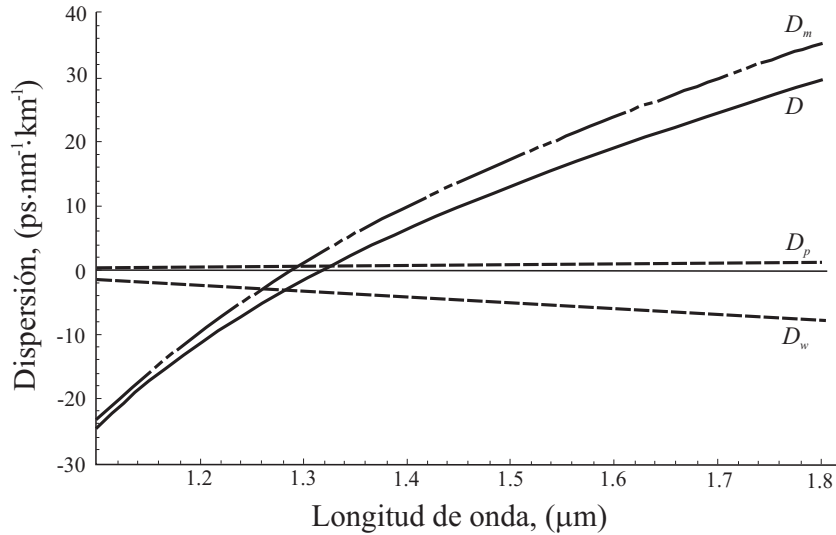


Figura 2.4: Gráfica de la dispersión con todas sus contribuciones D_m , D_w y D_p , para la fibra óptica fabricada con los materiales de la Tabla 2.1[2.7]

monomodo (SMF), utilizada en telecomunicaciones. La SMF es una fibra óptica estándar que presenta un perfil de índice escalonado, una relación de $8.2/125 \mu\text{m}$ de diámetro de núcleo-revestimiento y una apertura numérica de 0.14.

Como se observa en al Fig. 2.4, para ésta fibra óptica la principal contribución a la dispersión de grupo está dada por la dispersión del material, mientras que la dispersión de la guía de onda y el perfil de índice se mantienen negativas en esta región del espectro; siendo ésta última la que tiene una menor contribución. La curva de dispersión de grupo muestra un valor de $D = 0$ para una cierta longitud de onda; a la cual se le denomina longitud de onda de cero dispersión λ_0 y que para este caso corresponde aproximadamente a 1310 nm . La λ_0 divide la curva de dispersión de grupo en dos regiones, una donde $D > 0$ y otra donde $D < 0$. A la primera región se le conoce como región de dispersión normal y a la segunda región de dispersión anómala.

En la región de dispersión normal ($D < 0$), las componentes de alta frecuencia de un pulso óptico viajan más lento que las componentes de baja frecuencia del mismo pulso óptico, por lo que las componentes de baja frecuencia al inicio del pulso darán a lugar a un retardo de grupo grande, y las componentes de alta frecuencia al final del pulso darán lugar a un retardo de grupo pequeño. Esta misma analogía se aplica en la región de dispersión anómala ($D > 0$) pero de forma opuesta, en donde las componentes de alta frecuencia viajan más rápido que las componentes de baja frecuencia. Finalmente, para el caso en el que la dispersión es igual

a cero ($D = 0$), el pulso óptico no sufre modificaciones en su forma, debido a que no existe una dependencia en frecuencia en las componentes del pulso óptico.

Otro parámetro importante a tomar en cuenta es la pendiente de la dispersión cromática a la longitud de onda de cero dispersión de la guía de onda, usualmente expresada por la relación $S_0 \equiv S(\lambda_0)$, donde S_0 es la pendiente a la longitud de cero dispersión y $S(\lambda)$ es la pendiente de la dispersión cromática en función de la longitud de onda. La pendiente de la dispersión cromática usualmente se expresa en $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ y se utiliza para calcular los valores del límite superior e inferior del coeficiente de dispersión de la fibra óptica. La pendiente de la dispersión, tomando en consideración las tolerancias que brinda el fabricante, variará según la temperatura y la humedad.

Referencias

- [2.1] R. Hui, M. O'Sullivan, "*Fiber Optic Measurement Techniques*", Elsevier Academic Press, USA, (2009).
- [2.2] I.H. Malitson, "*Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica*", Journal of the Optical Society of America, Vol.55, pp. 1205-1209, (1965).
- [2.3] J.W. Fleming, "*Material Dispersion in Lightguide Glasses*", Electronics Letters, Vol. 14, pp. 326-328, (1978).
- [2.4] G.P. Agrawal, "*Fiber-Optic Communications Systems*", Wiley-Interscience, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, (2002).
- [2.5] Brandon Collings, Fred Heismann, Gregory Lietaert, "*Reference Guide to Fiber Optic Testing*", Vol. 2, JDS Uniphase Corporation, (2010).
- [2.6] W.A. Gambling, H. Matsumura, C.M. Ragdale, "*Mode Dispersion, Material Dispersion and Profile Dispersion in Graded-index Single-mode Fibers*", IEE J. Microwaves, Optics Acoustics, Vol. 3, No. 6, pp. 239-246, (1979).
- [2.7] J.A. Buck, "*Fundamentals of Optical Fibers*", Wiley Series in Pure and Applied Optics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, (2004).

Capítulo 3

Métodos de Medición de la Dispersión Cromática

Existen diversos métodos para determinar experimentalmente la dispersión cromática de una fibra óptica monomodo; en este Capítulo se dará una descripción general de los métodos más utilizados en Centros Nacionales de Metrología, entre los cuales figuran los métodos de: Tiempo de Vuelo, Cambio de Fase, el Método Interferométrico y el Método de Respuesta en Banda Base Amplitud Modulada, AM. Para finalizar se presentará una comparación acerca de las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos mencionados anteriormente.

3.1 Método de Tiempo de Vuelo

Una de las primeras implementaciones de este método se realizó en el año 1983 por la compañía Lucent Alcatel con el fin de medir la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo en el intervalo de $1.2 \mu\text{m}$ a $1.5 \mu\text{m}$ [3.1].

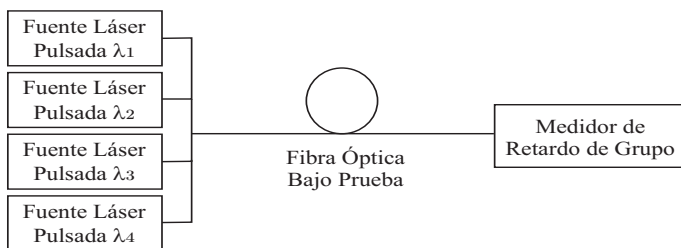


Figura 3.1: Arreglo experimental para el método de tiempo de vuelo [3.3].

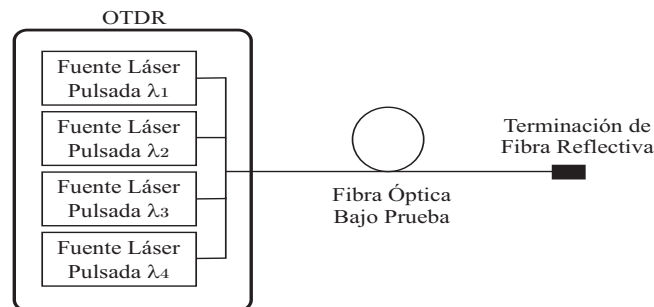


Figura 3.2: Arreglo experimental para el método de tiempo de vuelo con OTDR[3.3].

El Método de Tiempo de Vuelo se basa en la medición del retardo de grupo que existe entre pulsos lanzados a diferentes longitudes de onda [3.2, 3.3, 3.4]. El arreglo experimental para este método (ver Fig. 3.1), consiste de una fuente láser sintonizable, un generador de pulsos y un detector, el cual es capaz de medir el retardo de grupo de pulsos espectrales cortos.

Para determinar la dispersión cromática se deben realizar una serie de mediciones en relación al retardo de grupo para diferentes longitudes de onda, este conjunto de datos se grafican y posteriormente se ajustan por medio de métodos numéricos. En el caso de fibras ópticas, el ajuste se realiza por medio de la fórmula de Sellmeier de tres y cinco términos (ver Apéndice C), siendo estas ecuaciones unas de las más utilizadas para determinar el retardo de grupo. Para este método se utiliza el ajuste de la fórmula de Sellmeier de cinco términos para determinar el retardo de grupo. Una vez determinado el retardo de grupo, se puede encontrar la dispersión cromática por medio de la derivada del retardo de grupo con respecto a la longitud de onda.

3.2 Método de Tiempo de Vuelo con OTDR

Una de las primeras realizaciones de este método se realizó en Japón por la compañía de Telecomunicaciones NTT en el año de 1993 con el fin de implementar un nuevo método para medir dispersión cromática diferente del método de diferencia de fase [3.5].

Este método es una variante del Método de Tiempo de Vuelo mencionado anteriormente, con la única diferencia de que este método contiene un reflectómetro óptico en el dominio tiempo (OTDR¹) conectado en uno de los extremos de la fibra bajo prueba. Se requiere que el otro extremo de la fibra sea altamente reflejante para poder obtener buenas lecturas.

¹Por las siglas en inglés para *Optical Time Domain Reflectometer*.

Un esquema general se presenta en la Fig. 3.2; el cual consta de un OTDR que envía pulsos cortos a la fibra óptica bajo prueba a tres o cuatro longitudes de onda (usualmente 1 310 nm, 1 410 nm, 1 550 nm y 1 625 nm); y mide el tiempo transcurrido entre los pulsos reflejados [3.2, 3.4].

El tiempo total transcurrido de la medición de los pulsos reflejados debe ser dividido por dos debido a que se tiene que tomar en consideración que los pulsos viajan dos veces (uno de ida y otro de vuelta) a lo largo de la fibra. La longitud de la fibra L se determina por medio del retardo del pulso medido por el OTDR, a través de la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\tau_{2L}c}{2n_g}, \quad (3.1)$$

donde L es la longitud de la fibra óptica bajo prueba; τ_{2L} es el tiempo transcurrido del pulso reflejado en ambas direcciones, a una longitud de onda; y n_g es el índice efectivo de grupo de la fibra óptica, a una determinada longitud de onda.

Al medir el retardo del pulso para diferentes longitudes de onda los resultados se ajustan por medio de una curva determinada, ya sea por la ecuación de tres términos de Sellmeier o por la ecuación cuadrática (ver Apéndice C). Al igual que en el método anterior, la derivada de τ con respecto a λ , $(d\tau/d\lambda)$, permite obtener la dispersión cromática a lo largo del intervalo de longitud de onda medido.

En caso de que el extremo final de la fibra provea una reflexión muy baja, tal que las pérdidas sean muy altas, entonces las mediciones para este método no podrán ser posibles. A pesar de este inconveniente, la implementación de este método se hace muy útil para realizar mediciones en campo, debido a que sólo se necesita de un OTDR con al menos cuatro diferentes longitudes de onda, conectado a un extremo de la fibra [3.6, 3.7, 3.8].

3.3 Método Diferencial de Cambio de Fase

Las primeras implementaciones de este método se realizaron en 1982 en Estados Unidos, con el fin de implementar un método que midiera directamente la dispersión cromática [3.9, 3.10].

El método diferencial de cambio de fase (Fig. 3.3) es una variante del método de cambio de fase, el cual permite determinar directamente la dispersión cromática por medio de la señal medida. Como en el método de cambio de fase, la señal es modulada en intensidad; sin embargo, la longitud de onda también es modulada alrededor de una longitud de onda central, en donde el retardo del pulso debe ser medido [3.2, 3.3, 3.4]. La señal detectada no sólo contiene una diferencia de fase proveniente de la señal modulada (en comparación a la señal de referencia), sino que también se tiene una pequeña diferencia en longitud de onda

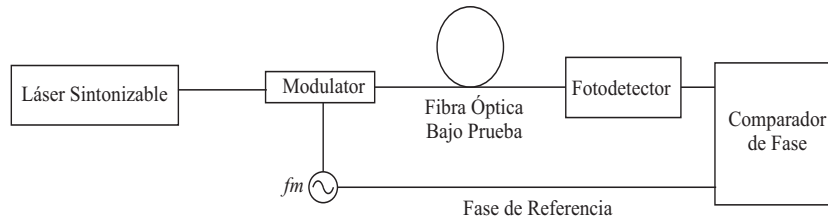


Figura 3.3: Arreglo experimental para el método diferencial de cambio de fase [3.11].

que permite calcular directamente la dispersión cromática como se muestra en:

$$D = \frac{\Delta\phi}{360^\circ \cdot f_{\text{mod}} \cdot \Delta\lambda} \times 10^{12}, \quad (3.2)$$

donde D es la dispersión cromática, $\Delta\phi$ es la medida del cambio de fase de la señal de prueba modulada a un intervalo pequeño de longitud de onda, $\Delta\lambda$ es el paso en longitud de onda, f_{mod} es la frecuencia de modulación. El factor de 360 se utiliza para poder expresar $\Delta\phi$ en grados; mientras que f_{mod} se expresa en hertz y por tanto se utiliza el factor de 10^{12} , lo que permite obtener la dispersión picosegundos sobre nanómetro-kilómetro.

Este método, como los siguientes que se describirán en este Capítulo, se pueden implementar de forma muy adecuada en un entorno controlado, siendo los laboratorios el área comúnmente utilizada para realizar estas implementaciones.

3.4 Método Interferométrico

Una de las primeras implementaciones de este método se realizó en Japón por la compañía Nippon, y en Estados Unidos por los Laboratorios Bell; ambas en el año de 1981 [3.12, 3.13]. A partir de estas implementaciones se han venido proponiendo a través de los años distintas variaciones de este método [3.14, 3.15, 3.16].

El arreglo general para la realización de este método se presenta en la Fig. 3.4, el cual consta generalmente de una lámpara de tungsteno que se utiliza como una fuente de banda ancha que cubre un gran intervalo de longitudes de onda que van desde los 500 nm hasta los 1 700 nm. La señal en longitud de onda se selecciona por medio de un filtro óptico pasa bandas sintonizable, con un ancho de banda a media altura, FWHM, ² de $\Delta\lambda$. La selección en longitud de onda también se puede hacer por medio de un monocromador colocado justo antes del fotodetector. La señal óptica se introduce luego en un interferómetro Mach-Zender con la fibra óptica bajo prueba en uno de los brazos del interferómetro, mientras que la

²Pos las siglas en inglés para *Full Width at Half Maximum*.

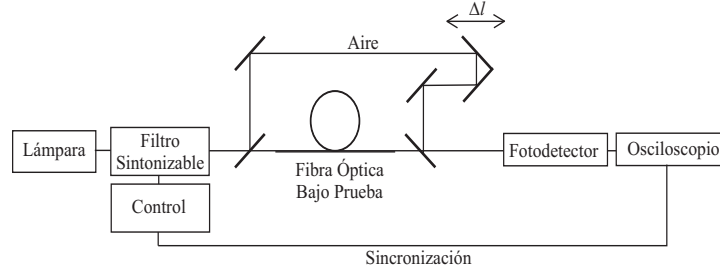


Figura 3.4: Arreglo experimental para el método interferométrico [3.17].

longitud del otro brazo varía continuamente [3.4, 3.17, 3.18]. Se coloca un fotodiodo en la salida del interferómetro para detectar la señal óptica y su forma se visualiza a través de un osciloscopio.

Si la diferencia en longitud entre los dos brazos del interferómetro es mucho menor a la longitud de coherencia de la fuente, esto dará a lugar a una interferencia coherente y la corriente generada en el fotodiodo será de:

$$i(t) = s \cdot \{P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cdot \cos[\Delta\phi(\Delta l)]\}, \quad (3.3)$$

donde Δl es la diferencia de longitud entre los brazos, P_1 y P_2 son las potencias ópticas en los dos brazos, s es la responsividad del fotodiodo, y $\Delta\phi(\Delta l)$ es la diferencia de fase óptica entre los brazos del interferómetro.

Por otro lado, si la diferencia en longitud entre ambos brazos es mucho mayor a longitud de coherencia de la fuente, entonces la interferencia es incoherente y la corriente generada en el fotodiodo será proporcional a la suma de las potencias en ambos brazos:

$$i(t) = s \cdot (P_1 + P_2). \quad (3.4)$$

Para el filtro óptico sintonizable la longitud de coherencia de la señal óptica seleccionada es aproximadamente:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{n_g \Delta\lambda}, \quad (3.5)$$

donde n_g es el índice de grupo del material, λ es la longitud de onda central seleccionada por el filtro óptico, y $\Delta\lambda$ es el ancho de banda FWHM. Adicionalmente, el ancho de la envolvente del patrón de interferencia coherente es aproximadamente:

$$\Delta z_r = \frac{\lambda^2}{n_g \Delta\lambda}. \quad (3.6)$$

Es necesario un ancho Δz_r estrecho para poder determinar con mayor exactitud el retardo diferencial del brazo del interferómetro. Para poder medir la dispersión cromática en una fibra, la dependencia en longitud de onda del retardo de grupo es el parámetro clave que necesita ser evaluado. Esto se puede cumplir barriendo en longitudes de onda el filtro óptico sintonizable y midiendo el retardo en función de la longitud de onda.

En la Fig. 3.4 el brazo de referencia en el cual el retardo de grupo es independiente de la longitud de onda es aquél que se encuentra en aire; entonces el parámetro que se debe evaluar es la derivada del brazo del interferómetro en el que la diferencia en longitud es dependiente de la longitud de onda, la cual nos permite determinar la dispersión cromática, como se muestra en:

$$D(\lambda) = \frac{1}{Lc} \cdot \frac{d(\Delta l(\lambda))}{d\lambda}. \quad (3.7)$$

En la práctica, la resolución de las mediciones de $\Delta l(\lambda)$ están determinadas por la nitidez del patrón de interferencia Δz_r de la Ec (3.6); mientras que el paso mínimo en longitud de onda está limitado por el ancho de banda del filtro sintonizable $\Delta\lambda$; sin embargo, es conveniente que ambos parámetros sean pequeños. La Ec. (3.6) indica que su producto está determinado por el cuadrado de la longitud de onda, pero en la práctica la dependencia en longitud de onda del retardo de grupo, y por tanto la dispersión cromática, puede ser medida en la ventana de 500 nm a 1 700 nm y ajustando los datos medidos con la ecuación de tres términos de Sellmeier (ver Apéndice C).

Este método resulta muy conveniente debido a que se pueden obtener mediciones de dispersión cromática para fibras ópticas con longitudes del orden de centímetros (sin la necesidad de contar con grandes longitudes de fibra); además de contar con un amplio intervalo espectral.

3.5 Respuesta en Banda Base AM

Este método ha sido relativamente uno de los últimos en implementarse; teniendo sus orígenes en el año de 1993 al realizarse en laboratorios de telecomunicaciones de Dinamarca y de Francia [3.19, 3.20].

En este método la dispersión cromática se mide en relación a la interferencia existente entre la modulación de bandas laterales. Debido a la dispersión cromática, diferentes modulaciones de bandas laterales pueden experimentar diferentes retardos de fase y sus interferencias en el receptor pueden ser usadas para predecir el valor de la dispersión [3.17].

El arreglo experimental de este método, que se muestra en la Fig. 3.5, consta de un láser sintonizable modulado en intensidad a su salida por medio de un modulador electro-óptico externo. Al modulador se le introduce una señal de radio frecuencia (RF) proveniente de

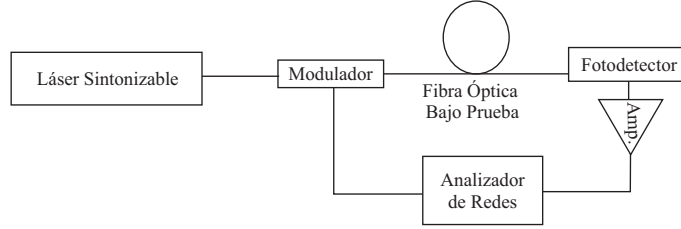


Figura 3.5: Arreglo experimental para el método de respuesta en banda base AM [3.17].

un analizador de redes de RF y la señal de salida se introduce en el puerto de entrada del analizador de redes, que opera en modo S_{21} . El analizador de redes provee un barrido en frecuencia de la señal RF para poder modular la señal óptica. Después de pasar a través de la fibra óptica de prueba, la señal óptica es detectada por medio de un fotodiodo; después la señal RF proveniente del fotodiodo es amplificada e introducida en el puerto receptor del analizador de redes. En este método la corriente del fotodiodo está dada por:

$$i(f) \propto \cos \left[\frac{\pi \lambda^2 D(\lambda) f^2 L}{c} + \arctan(\alpha_{lw}) \right], \quad (3.8)$$

donde α_{lw} es el parámetro modular de *chirp* y f es la frecuencia de modulación. Una característica importante de la respuesta en modulación AM, son los ceros en resonancia a frecuencias determinadas por:

$$f_j = \sqrt{\frac{c}{2D(\lambda)L\lambda^2} \left[1 + 2j - \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(\alpha_{lw}) \right]}. \quad (3.9)$$

Para determinar la dispersión cromática se utiliza la Ec. (3.9) para dos ceros consecutivos en la respuesta AM, f_j y f_{j+1} ; los cuales están relacionados solamente en dispersión cromática acumulada; dando como resultado:

$$D(\lambda) \cdot L = \frac{c}{(f_{j+1}^2 - f_j^2)\lambda^2}. \quad (3.10)$$

Esto permite determinar de forma precisa la dispersión de la fibra por medio de la medición del espectro de la respuesta de modulación en AM a cada longitud de onda de la fuente sintonizable. Al ajustar la longitud de onda λ en la fuente láser sintonizable, el parámetro de dispersión cromática ($D(\lambda)$) puede ser obtenido. Comparado con el método de modulación de cambio de fase, este método mide directamente el parámetro $D(\lambda)$ a cada longitud de onda λ sin la necesidad de medir el retardo de grupo alrededor de esta longitud

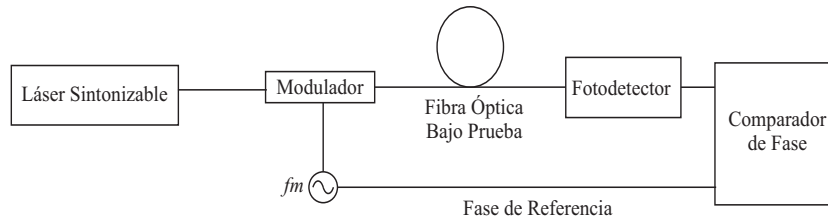


Figura 3.6: Arreglo experimental para el método de cambio de fase [3.16].

de onda. A partir de que los ceros en el espectro de la respuesta en AM son muy marcados, la medición puede ser un tanto precisa; sin embargo, se debe tomar en consideración el ancho de banda RF requerido para el modulador electro-óptico y el analizador de redes. En general, fibras cortas y de baja dispersión cromática en la fibra requieren de un gran ancho de banda en el sistema de medición.

Como se mencionó anteriormente, este método presenta la ventaja de que se puede medir la dispersión cromática directamente, con la única limitante de que los anchos de banda requeridos deben poder ser cubiertos tanto por el modulador externo electro-óptico como por el analizador de redes, haciendo que muchas veces el costo de la implementación de este método sea muy elevado, debido a que los equipos que operan en este rango de frecuencias suelen ser muy costosos.

3.6 Método de Modulación de Cambio de Fase

Este método es uno de los más utilizados para medir la dispersión cromática, implementándose por primera vez en el año de 1992 en el Centro de Estudios y Laboratorio de Telecomunicaciones de Italia [3.21].

Tanto el método de modulación de cambio de fase, como el método diferencial de cambio de fase, son técnicas en las que se modula en intensidad la longitud de onda de una fuente láser a una frecuencia que usualmente varía de 10 MHz a 2 GHz. El cambio de fase de la señal modulada es comparada con respecto a una fuente de referencia y entonces se calcula el retardo debido a la dispersión cromática [3.3, 3.4, 3.17, 3.18].

El arreglo (Fig. 3.6) consiste de un láser sintonizable que permitirá obtener el intervalo de longitudes de onda donde se quiere medir la dispersión cromática. Un modulador electro-óptico de intensidad convierte una señal eléctrica con frecuencia f_m en una señal óptica. Después de que la señal óptica modulada pasa a través de la fibra óptica bajo prueba, ésta se detecta por medio de un fotodetector que convierte y amplifica esta señal óptica en una señal eléctrica que es enviada hacia un osciloscopio. La señal eléctrica con frecuencia f_m

también se mide en el osciloscopio para obtener la diferencia de fase.

Debido a la dispersión cromática en la fibra, el retardo en la propagación de la señal óptica a través de la fibra es diferente para diferentes longitudes de onda ($\tau \equiv \tau(\lambda)$). Para medir esta dependencia del retardo con respecto a la longitud de onda, la fuente óptica es modulada mediante una señal senoidal y el retardo en la propagación se puede evaluar por medio del retardo de fase de la señal RF recibida. Por medio de la variación de la longitud de onda con la fuente sintonizable, se puede obtener el retardo de la señal RF en función de la longitud de onda ($\phi \equiv \phi(\lambda)$).

Si la frecuencia de modulación de la onda senoidal es f_m , un cambio de fase relativo de $\Delta\phi$ igual a 360° entre dos longitudes de onda, corresponderá a una diferencia de retardo de grupo de $\Delta\tau = 1/f_m$ entre ellas [3.17], por lo tanto el retardo de grupo con respecto a la longitud de onda se puede expresar como:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\phi}{360^\circ f_m}, \quad (3.11)$$

donde $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre la señal modulada y la señal de referencia. Conociendo el retardo de grupo podemos obtener la dispersión cromática con la siguiente relación:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot \frac{d(\Delta\tau(\lambda))}{d\lambda}, \quad (3.12)$$

donde L es la longitud de la fibra.

Se debe tomar en cuenta que al seleccionar la frecuencia de modulación de la señal RF, ésta puede tener un gran impacto en la exactitud del método. En general, una frecuencia de modulación alta, ayuda a incrementar la sensibilidad en la medición de la fase. Sin embargo, si la frecuencia de modulación es demasiado alta, la medición del cambio de fase puede exceder fácilmente los 360° , por lo que se debe tomar en consideración que se pueda identificar cuando se excede un ciclo completo de 2π en cambio de fase.

Otro factor que también influye en la exactitud, es el espaciamiento en longitud de onda, el cual debe ser lo suficientemente pequeño de tal forma que haya un número suficiente de mediciones de fase en cada ciclo de 2π . La exactitud en las mediciones puede estar limitada por la exactitud en longitud de onda del láser sintonizable y del tamaño de paso en longitud de onda con el cual se mide. También estará limitado por el ruido en las mediciones cuando el nivel de la señal sea muy bajo.

Este método presenta la ventaja de que se pueden obtener datos muy precisos de la dispersión cromática debido a que se pueden obtener varios puntos en relación al retardo de grupo, obteniendo un mejor ajuste con las ecuaciones de Sellmeier debido al hecho de que se puede controlar el paso en longitud de onda; por tal razón, y debido a los recursos con los que se cuenta en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM, se decidió implementar este método para realizar mediciones de dispersión cromática en fibras ópticas monomodo.

3.7 Comparación entre los Métodos de Medición

3.7.1 Tiempo de Vuelo

Este método presenta la ventaja de que no se requiere de un enlace de comunicación para el equipo de prueba en ambos extremos de la fibra; sin embargo, entre sus desventajas podemos encontrar su baja exactitud, especialmente en longitudes de fibra óptica menores a unos cuantos kilómetros; y que la dispersión cromática no se mide directamente, sino que se requiere de equipos en ambos extremos de la fibra y la medición se dificulta a través de amplificadores ópticos.

3.7.2 Tiempo de Vuelo con OTDR

Entre sus ventajas podemos encontrar que la medición se realiza en un sólo extremo de la fibra, se requiere solamente un instrumento de medición (típicamente un OTDR/CD dual), es de fácil implementación, el procedimiento es de fácil administración y se provee la longitud de la fibra óptica.

Entre sus desventajas se menciona la baja exactitud, especialmente en longitudes de fibra menores a unos cuantos kilómetros, debido a que sólo se cuenta con cuatro longitudes de onda; la dispersión cromática no se mide directamente; no se pueden realizar mediciones a través de DWDM³ ni mediante de amplificadores ópticos u otros componentes no bidireccionales; en caso de baja reflexión en el extremo de la fibra, se debe agregar un extremo altamente reflejante; existe una limitación en la longitud de la fibra óptica debido al intervalo de trabajo del OTDR en 1 310 nm, pues la mediciones se pueden realizar sólo para longitudes de fibra óptica entre 2 km y 100 km; se debe introducir en el OTDR un valor preciso del valor de índice efectivo de grupo n_g y debido a las pocas longitudes de onda disponibles, el ajuste de cinco términos de Sellmeier no se puede utilizar, lo cual reduce aun más la exactitud.

3.7.3 Diferencial de Cambio de Fase

Las ventajas que presenta este método son que los resultados se obtienen en poco tiempo, con buena exactitud y las mediciones pueden ser realizadas a través de amplificadores y otros componentes no bidireccionales.

Entre sus desventajas, se requiere de pasos en longitud de onda mayores para incrementar la exactitud, se requiere de equipo de prueba a ambos extremos de la fibra óptica y de una comunicación con la fibra óptica de referencia; además que su costo de implementación es elevado.

³Por las siglas en inglés para *Dense Wavelength Division Multiplexing*.

3.7.4 Interferométrico

Entre las ventajas que podemos encontrar en este método se encuentran que la fuente de luz puede tener un gran espectro en longitud de onda para su medición, la técnica para la caracterización de la medición de la dispersión cromática en la fibra óptica cubre un gran ancho de banda y este método permite una determinación precisa de la dispersión cromática para fibras ópticas con longitudes del orden de centímetros.

Entre sus desventajas se encuentran que la longitud de la fibra no puede ser muy grande, la longitud del brazo del interferómetro debe ser aproximadamente igual al de la longitud de la fibra y resulta difícil determinar la exactitud del método para fibras DSF o DFF⁴.

3.7.5 Respuesta en Banda Base AM

Las ventajas de este método son que se realiza una medición directa del parámetro de dispersión, la medición puede ser muy precisa, no hay presencia de *chirp* debida a modulación interna del láser y no se necesita de una fibra de referencia.

Entre las desventajas encontramos que se requiere de detectores rápidos con alcance hasta de 30 GHz, el ancho de banda se encuentra limitado debido al modulador y al analizador de redes, para fibras ópticas de poca longitud se requiere un gran ancho de banda, y la medición no es muy precisa en las vecindades de la longitud de cero dispersión (λ_0).

3.7.6 Modulación de Cambio de Fase

Entre las ventajas de este método se encuentra que se obtiene una alta exactitud debido a que se tiene una referencia fija, el retardo puede resolverse a 0.001 ps, el paso en longitud de onda puede reducirse a menos de 0.1 nm con excelente exactitud, se pueden realizar mediciones a través de amplificadores ópticos y otros componentes no bidireccionales, y se obtienen mediciones de alta exactitud para componentes con anchos de banda estrechos, como rejillas de Bragg y DWDM.

Entre las desventajas que podemos encontrar con este método se encuentran que toma más tiempo que el método diferencial de cambio de fase, se requiere de un equipo de prueba en ambos extremos de la fibra óptica y de una comunicación con la fibra óptica de referencia, y el costo para su implementación es elevado.

⁴Por las siglas en inglés para *Dispersion Flattened Fiber*.

Referencias

- [3.1] C. Lin, A.R. Tynes, A. Tomita, P.L. Liu, D.L. Philen, “*Chromatic Dispersion Measurements in Single-Mode Fibers Using Picosecond InGaAsP Injection Lasers in the 1.2-to 1.5- μ m Spectral Region*”, Bell System Technical Journal, Vol. 62, No. 2, (1983).
- [3.2] B. Chomycz, “*Planning Fiber Optic Networks*”, McGraw Hill, USA, (2009).
- [3.3] F. Audet, “*Chromatic Dispersion, Analysis Methods*”, EXFO Application Note, Canadá, (2005).
- [3.4] Subcommittee 86A, “*Optical Fibres - Part 1-42: Measurement methods and test procedures - Chromatic dispersion*”, IEC/CEI-60793-1-42:2007, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, (2007).
- [3.5] M. Ohashi, M. Tateda, *Novel Technique for Measuring Longitudinal Chromatic Dispersion Distribution in Singlemode Fibres*, Electronics Letters, Vol. 29, No. 5, (1993).
- [3.6] Anritsu, “*CMA5000/a CD-OTDR*”, OTDR/Chromatic Dispersion, Product Specifications, (2009).
- [3.7] JDSU, “*T-BERD[®]/MTS-6000,-6000A, and -8000 Platforms*”, Chromatic Dispersion/OTDR Module, Product Specifications, (2009).
- [3.8] EXFO, “*FTB-500*”, Network Testin, Product Specifications, (2009).
- [3.9] A. Barlow, I. Mackenzie, “*Direct Measurement of Chromatic Dispersion by the Differential Phase Technique*”, TuQ1, Proc. of the Optical Fiber Conf., Reno, USA, (1987).
- [3.10] J. Saito, T. Oki, H. Yamamoto, “*Wavelength Dispersion Measuring Equipment, Technical Digest-Symposium on Optical Fiber Measurements*”, 1982, G. W. Day and D. L. Franzen, Eds., NBS, Spec. Publ. 641, USA, (1982).

- [3.11] J. Peerlings, “*From Loss Test to Fiber Certification Fiber Characterization Today Part I: Chromatic Dispersion*”, Agilent Technologies, Inc., (2003).
- [3.12] M. Tateda, N. Shibata, S. Seikai, “*Interferometric Method for Chromatic Dispersion Measurement in a Single-mode Optical Fiber*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 17, No. 3, (1981).
- [3.13] H.T. Shang, “*Chromatic Dispersion Measurement by White-light Interferometry on Metre-length Single-mode Optical Fibres*”, Electronics letters, Vol. 17, No. 17, (1981).
- [3.14] J.Y. Lee, D.Y. Kim, “*Versatile Chromatic Dispersion Measurement of a Single-mode Fiber Using Spectral White Light Interferometry*”, Optics Express, Vol. 14, No. 24, (2006).
- [3.15] N.K. Berger, B. Levit, B. Fischer, “*Measurement of Fiber Chromatic Dispersion Using Spectral Interferometry with Modulation of Dispersed Laser Pulses*”, Optics Communications, Vol. 283, No. 20, (2010).
- [3.16] L. Zong, F. Luo, S. Cui, X. Cao, “*Rapid and Accurate Chromatic Dispersion Measurement of Fiber Using Asymmetric Sagnac Interferometer*”, Optics Letters, Vol. 36, No. 5, (2011).
- [3.17] Ro. Hui, M. O’Sullivan, “*Fiber Optic Measurement Techniques*”, Elsevier Academic Press, USA, (2009).
- [3.18] International Telecommunication Union (ITU), “*Transmission Media Characteristics - Optical Fibre Cables*”, ITU-G.650, (1997-2000).
- [3.19] F. Devaux, Y. Sorel, J.F. Kerdiles, “*Simple Measurement of Fiber Dispersion and of Chirp Parameter of Intensity Modulated Light Emitter*”, J. Lightwave Tech., Vol. 11, No. 12, (1993).
- [3.20] B. Christensen, J. Mark, G. Jacobsen, E. Bodtker, “*Simple Dispersion Measurement Technique with High Resolution*”, Electronics Letters, Vol. 29, (1993).
- [3.21] B. Costa, D. Mazzoni, M. Puleo, E. Vezzoni, “*Phase Shift Technique for the Measurement of Chromatic Dispersion in Optical Fibers Using LED’s*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 18, No. 10, (1982).

Capítulo 4

Medición de la Dispersión Cromática

Después de analizar varios de los métodos utilizados para medir la dispersión cromática se determinó que el método de cambio de fase sería el adecuado para implementarse en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM, debido a que es uno de los métodos que se encuentra más ampliamente descrito en la literatura, además de ser un método ya estandarizado y aceptado a nivel internacional para medir la dispersión cromática. Adicionalmente, facilita la intercomparación entre laboratorios de metrología que han medido la dispersión cromática de fibras ópticas monomodo, en términos de la longitud de onda de cero dispersión y de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión.

4.1 Descripción del Sistema

Como se describió anteriormente, la idea principal del método de cambio de fase es la de medir los cambios relativos en fase de la señal detectada conforme la longitud de onda cambia de valor a través del tiempo, obteniendo de esta forma el retardo de grupo, el cual posteriormente debe ser ajustado por medio de un polinomio de Sellmeier de tres o cinco términos, o incluso con un ajuste cuadrático (ver Apéndice C), según sea la elección. Una vez obtenido el retardo de grupo, se obtiene su derivada para obtener finalmente la dispersión cromática.

Al conocer los diferentes retardos para cada una de las diferentes longitudes de onda utilizadas, podemos conocer los parámetros de dispersión por sucesivas derivaciones con respecto a la longitud de onda, como hemos visto en capítulos anteriores. Se ha optado por conocer el retardo para cada longitud de onda, a través de medidas de fase en el dominio de la frecuencia, para señales sinusoidales moduladas a alta velocidad. Para ello se ha tomado como punto de partida un sistema que consta, como se muestra en la Fig. 4.1, de

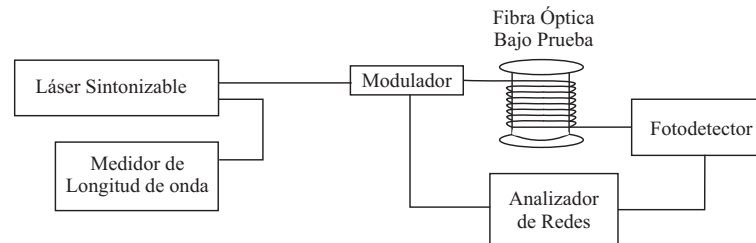


Figura 4.1: Arreglo experimental para la medición de dispersión cromática.

una fuente láser sintonizable, un medidor de longitud de onda, un modulador de intensidad electro-óptico, un analizador de redes y un detector rápido.

4.1.1 Láser

El láser sintonizable utilizado para realizar las mediciones es un láser de fibra dopado con erbio, sintonizable en el intervalo de 1 510 nm a 1 612 nm, de la marca EXFO, modelo IQS-2600B, que cuenta con las siguientes características:

- Intervalo de trabajo en longitud de onda: 1 510 nm a 1 612 nm
- Ancho de línea espectral efectiva: 1.3 GHz
- Potencia de Salida: ≥ -10 dBm
- Repetibilidad: ± 2.5 pm
- Incertidumbre: ± 15 pm
- Tiempo de sintonía: 75 ms
- Estabilidad en potencia: ± 0.005 dB

4.1.2 Medidor de Longitud de Onda

Para poder realizar mediciones de longitud de onda se utilizó un medidor de longitud de onda en lugar de un analizador de espectros ópticos (OSA¹) debido a que el medidor de longitud de onda cuenta con mayor resolución y resulta más sencillo poder monitorear la longitud de onda. El medidor de longitud de onda más popular está basado en un interferómetro de

¹Por las siglas en inglés para *Optical Spectrum Analyzer*.

Michelson, el cual es estructuralmente mucho más simple que un OSA y puede ser construido de manera más compacta con la ayuda de componentes de fibra óptica. Un medidor de longitud de onda basado en un interferómetro de Michelson puede alcanzar usualmente una resolución mayor a los 0.001 nm. El medidor de longitud de onda utilizado en el arreglo es de la marca Anritsu, modelo MF9630A, que cuenta con las siguientes características:

- Intervalo de trabajo en longitud de onda: 0.6 μm a 1.6 μm
- Nivel de entrada óptica: -25 dBm a 0 dBm (onda continua)
- Fuentes de luz aplicables: LD², LED³, Láser de Gas, etc.
- Precisión: ± 0.5 ppm ($\lambda=0.663$ μm y humedad relativa de 50 %)
- Resolución: < 0.1 pm
- Intervalo de medición: < 1.5 s
- Temperatura: 0 °C a 40 °C

4.1.3 Modulador

Para modular la señal óptica proveniente del láser se utilizó un modulador de intensidad electro-óptico de niobato de litio (LiNbO_3) de la marca EOSPACE, con las siguientes características:

- Modulador de intensidad Mach-Zender con corte en z
- *DC bias*: ± 25 V
- Ancho de Banda: c. c. a > 500 MHz
- Pérdida por inserción: < 3.5 dB
- Entrada: Fibra PM⁴, de 1 m de largo.
- Salida: Fibra monomodo, de 1 m de largo.

²Por las siglas en inglés para *Laser Diode*.

³Por las siglas en inglés para *Light Emitting Diode*.

⁴Polarización Mantenido.

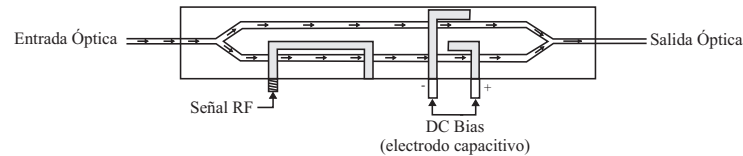


Figura 4.2: Esquema de funcionamiento de un modulador tipo Mach-Zender.

Un esquema del modulador de intensidad Mach-Zender se muestra en la Fig. 4.2; y su funcionamiento se describe a continuación: La luz que entra en el modulador se divide en dos caminos por medio de una unión en Y, pasando la mitad de la potencia en cada uno de los brazos de ésta unión. Los electrodos están colocados de tal forma que el campo eléctrico generado por la tensión eléctrica aplicada se encuentre en dirección opuesta en cada brazo, dando a lugar a un aumento en el retardo de uno de los brazos del Mach-Zender y a un decrecimiento en el otro.

Cuando éstos se encuentran en fase, el haz de luz se combina a la salida de tal forma que se obtiene un haz Gaussiano. En el caso contrario, en el cual éstos se encuentran desfasados, se forma un modo superior que consta de dos lóbulos. La salida de la guía de onda actúa como un filtro espacial y sólo deja pasar el modo inferior suprimiendo totalmente la transmisión del modo de orden superior. Un máximo ocurrirá cuando ambos brazos del modulador Mach-Zender sean iguales. Cuando la fase relativa entre las ondas es de π rad, toda la luz se combina en el modo superior, ocasionando que no se tenga luz a la salida. La fibra que se tiene en la entrada del modulador es una fibra que mantiene la polarización, la cual debido a su geometría se conoce con el nombre de PANDA y a la salida del modulador se tendrá, ya sea otra fibra tipo PANDA o como en este caso, una fibra monomodo.

4.1.4 Analizador de Redes

El sistema utilizado para medir la diferencia de fase entre dos señales eléctricas es el analizador de redes, el cual mide la magnitud y fase de circuitos y componentes de microondas. Este equipo consta de un detector de frecuencia intermedia (FI), un procesador y un generador de barrido sintetizado. El proceso de medida de este aparato consiste en aplicar una señal RF generada y controlada por el mismo equipo, a un dispositivo cualquiera y compararla con la señal reflejada o transmitida por el equipo. El analizador de redes utilizado para las mediciones de fase es de la marca Agilent, modelo ENA E5061A, el cual cuenta con las siguientes características:

- Intervalo de trabajo en frecuencia: 300 kHz a 1.5 GHz
- Estabilidad de la fuente: ± 5 ppm (5 °C a 40 °C)

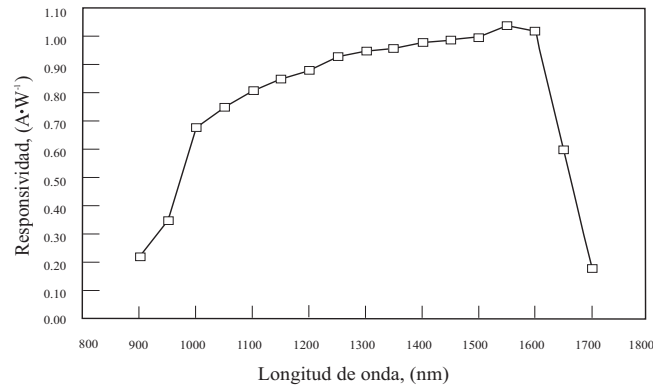


Figura 4.3: Responsividad espectral del fotodetector con respecto a la longitud de onda [4.1].

- Resolución: 1 Hz
- Precisión de onda continua: ± 5 ppm, $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Estabilidad en magnitud (3 MHz a 3 GHz): $0.01\text{ dB} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Estabilidad en fase (3 MHz a 3 GHz): $0.1^{\circ} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4.1.5 Detector Rápido

El detector utilizado para medir la señal óptica proveniente de la fibra óptica bajo prueba es un fotodetector PIN de InGaAs con amplificador de bajo ruido, el cual recibe una señal óptica y la convierte a eléctrica para ser comparada posteriormente en el analizador de redes. El fotodetector utilizado es de la marca New Focus, modelo 1611, cuya responsividad espectral se muestra en las Figs. 4.3 y 4.4, en función de la longitud de onda, expresada en amperes sobre watt; y en función de la frecuencia, expresada en decibeles, respectivamente.

Las características de este detector se presentan a continuación:

- Acoplamiento: c. a.
- Ancho de banda (3 dB): 30 kHz a 1 GHz
- Intervalo de trabajo en longitud de onda: 900 nm a 1 700 nm
- Diámetro del fotodiodo: $100\text{ }\mu\text{m}$
- Potencia de entrada (operación lineal): 1 mW (máximo a $1.3\text{ }\mu\text{m}$)

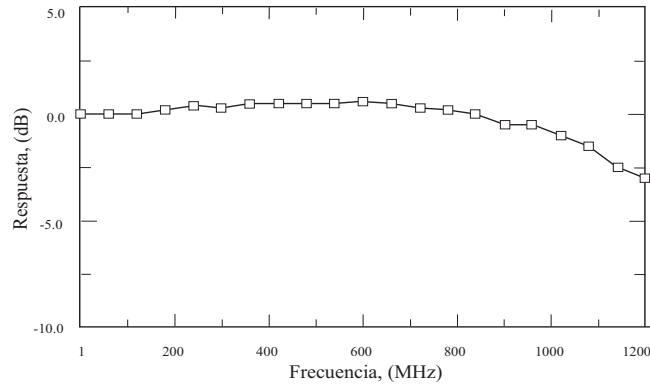


Figura 4.4: Responsividad espectral del fotodetector con respecto a la frecuencia [4.1].

- Potencia de entrada (onda continua): 10 mW (máximo o daño)
- Corriente de salida: 10 mA (máximo a 50 Ω)
- Tiempo de subida: 400 ps

4.2 Proceso de Medición

Como ya se mencionó, la implementación del método de cambio de fase requiere utilizar la señal RF proveniente de uno de los puertos del analizador de redes en un modulador electro-óptico para poder modular la señal óptica. Esta señal modulada se hace pasar a través de una fibra óptica de longitud L y se hace incidir en un detector a la salida de ésta. Posteriormente se compara en el analizador de redes, la señal eléctrica proveniente del detector con la señal eléctrica generada por el analizador de redes, obteniendo de esta forma una señal vectorial cuya diferencia de fase temporal se relaciona directamente con el retardo temporal que introduce la fibra por medio de la Ec. (3.11).

En el caso de la longitud de onda se obtienen mediciones precisas de ésta por medio de un medidor de longitud de onda de alta resolución, el cual se utiliza para monitorear la longitud de onda en cada una de las mediciones de fase que se realizan con la fibra óptica bajo prueba. Para determinar la longitud de la fibra óptica, se utilizó el método de cambio de fase [4.2].

Los equipos anteriormente descritos se disponen según el arreglo mostrado en la Fig. 4.1. Se sintoniza por medio de un láser la primera longitud de onda del intervalo de trabajo en el cual se desea saber la dispersión cromática; el láser contiene dos salidas, una de ellas es

utilizada solamente para monitoreo de la longitud de onda y la otra para uso general del láser. La salida de monitoreo se conecta al medidor de longitud de onda por medio de una fibra óptica monomodo con conector en ángulo FC⁵/APC⁶ en uno de sus extremos, proveniente del láser y del otro extremo, por medio de un conector FC/PC⁷ conectado al medidor de longitud de onda.

La salida de uso general del láser se conecta a un modulador externo electro-óptico. Inicialmente se utilizan varias fibras ópticas con diferentes conectores en sus extremos para poder llevar la luz proveniente del láser al modulador externo. La primera fibra óptica, con conector FC/APC en uno de sus extremos se conecta en la salida del láser; el otro extremo con conector FC/PC se conecta a otra fibra óptica por medio de un acoplador FC. Esta fibra óptica cuenta con un conector FC/PC en uno de sus extremos, el cual se conecta al acoplador FC mencionado anteriormente y del otro extremo de esta fibra óptica se tiene un conector tipo DIN, que se conecta a un atenuador óptico. Del atenuador óptico sale otra fibra óptica con conector DIN en uno de sus extremos y del otro extremo un conector FC/PC el cual se conecta finalmente a la fibra óptica que entrega la luz al modulador externo electro-óptico por medio de un acoplador FC. El modulador cuenta con una fibra óptica que mantiene la polarización (PMF⁸) en uno de sus extremos y de una fibra óptica monomodo del otro.

Al modulador externo electro-óptico se le introduce la señal proveniente del láser por medio de una PMF. Seguidamente se introduce la señal de modulación proveniente de uno de los puertos del analizador de redes, la cual cumplirá la función de modular la señal óptica dentro del modulador. Al mismo tiempo que se introduce esta señal de modulación, se alimenta al modulador con una tensión eléctrica directa de operación de 3.5 V. Posteriormente, a la salida del modulador se tiene una fibra óptica monomodo, la cual cumplirá la función de fibra óptica de referencia para poder obtener las mediciones de cambio de fase con la fibra óptica bajo prueba.

Seguidamente de la fibra óptica monomodo a la salida del modulador, se conecta la fibra óptica de la cual se desea medir la dispersión cromática, posteriormente se conecta ésta directamente al fotodetector por medio de un conector FC, el cual se encargará de convertir la señal óptica en eléctrica, cuya salida se obtendrá a través del puerto sma⁹ del fotodetector, el cual se conectará al segundo puerto del analizador de redes por medio de un adaptador sma a tipo N, para obtener de esta manera la correspondiente diferencia de fase entre la señal de referencia y la señal proveniente de la fibra óptica bajo prueba.

Para poder obtener los datos de diferencia de fase provenientes del analizador de redes,

⁵Por las siglas en inglés para *Fiber Connector*.

⁶Por las siglas en inglés para *Angled Physical Contact*.

⁷Por las siglas en inglés para *Physical Contact*.

⁸Por las siglas en inglés para *Polarization Maintaining Fiber*.

⁹Por las siglas en inglés para *Sub-Miniature version A*.

se cuenta con un programa realizado en LabVIEW[®], el cual obtiene los datos de forma digital tanto del medidor de longitud de onda como del analizador de redes. Estos datos son utilizados posteriormente para determinar el retardo de grupo por cada longitud de onda en la cual se quiere determinar la dispersión cromática. Inicialmente el programa requiere de la selección de los puertos de comunicación (GPIB¹⁰) del medidor de longitud de onda y del analizador de redes, la introducción del nombre del archivo en donde se almacenarán los datos y en seguida, se comienzan las mediciones por medio de un botón en donde se le pide al usuario en primer lugar, conectar la fibra óptica de referencia al fotodetector.

Una vez conectada la fibra óptica, el analizador de redes normaliza esta señal y posteriormente se requiere la conexión de la fibra óptica bajo prueba para poder hacer las mediciones de fase y almacenarlas en el archivo creado anteriormente. Luego se cambia manualmente la longitud de onda, según el paso elegido y se vuelve a repetir el proceso de conexión de la fibra óptica de referencia y la fibra óptica bajo prueba, hasta obtener finalmente las diferencias de fase de todas las longitudes de onda en las cuales se desea determinar la dispersión cromática.

La potencia del láser se selecciona de tal manera que la relación señal/ruido sea la más adecuada para evitar influencias de este parámetro en las mediciones de fase, siendo una potencia de -6 dBm la más adecuada para el arreglo anteriormente descrito.

Se utilizó un paso en longitud de onda de 2.5 nm en un barrido espectral de 40 nm, pues con éste se obtuvieron suficientes puntos para lograr un buen ajuste de la curva de retardo.

Con respecto a la frecuencia de modulación, se hace un barrido, con una variación de aproximadamente $\pm 0.4\%$, con respecto a la frecuencia de modulación central, para evitar cualquier error en el muestreo. La frecuencia de modulación central, se selecciona de tal forma que se obtenga una mayor resolución para determinar el retardo de grupo; siempre y cuando, esta frecuencia se encuentre dentro de los límites del modulador externo, el fotodetector y el analizador de redes.

4.2.1 Consideraciones en el Arreglo Experimental

Temperatura Ambiental

Para poder realizar mediciones de alta exactitud con la fibra óptica bajo prueba, es necesario que se tenga un control adecuado de la temperatura ambiental del laboratorio, ya que el valor de la longitud de onda de cero dispersión es dependiente de la ésta. Esta dependencia tiene un valor de $0.030 \text{ nm}\cdot\text{°C}^{-1}$ para una fibra óptica DSF (G.653) y un valor de $0.025 \text{ nm}\cdot\text{°C}^{-1}$ para una fibra óptica convencional G.652 [4.3, 4.4].

¹⁰Por las siglas en inglés para *General Purpose Instrumentation Bus*.

También se debe tomar en consideración la dependencia del retardo de grupo con respecto a la temperatura ambiental, la cual, tiene un valor de $180 \text{ ps} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ [4.5]. Esto se debe a que para poder determinar la dispersión cromática, el método se basa en las mediciones de diferencia de fase y por tanto del retardo de grupo.

Para evitar que estas dependencias afectasen en gran medida las mediciones, se optó por colocar la fibra óptica en una cámara en donde la temperatura permaneció controlada, logrando alcanzar variaciones menores a un grado Celsius, durante el tiempo de medición.

Paso en Longitud de Onda y Frecuencia de Modulación

Para poder determinar el paso en longitud de onda de 2.5 nm, se comenzó haciendo mediciones con un paso de 5 nm en longitud de onda, para diferentes frecuencias de modulación; es decir, que para cada longitud de onda se obtenían una serie de diferencias de fase correspondientes a cada frecuencia de modulación. Luego de obtener todas las diferencias de fase para cada una de las frecuencias de modulación, en un intervalo determinado de longitud de onda, se graficaron los datos para obtener el retardo de grupo de cada una de las frecuencias de modulación.

Se observó que para ciertas frecuencias de modulación la gráfica de retardo de grupo presentaba un comportamiento diferente al que se tiene típicamente, semejante a una parábola con su mínimo ubicado en la longitud de onda de cero dispersión. Una vez realizado un barrido a diferentes frecuencias de modulación, se determinaron las frecuencias a las cuales se obtiene un buen ajuste del retardo de grupo.

Modulador

Como se mencionó anteriormente, a determinadas frecuencias de modulación el retardo de grupo no presenta un buen ajuste de los datos, esto debido a que existe una frecuencia de modulación mínima f_{\min} a la cual las mediciones serán precisas, y que depende en gran medida del promedio de inestabilidad en fase del equipo, del paso en longitud de onda, y de la longitud de la fibra óptica; como se muestra en:

$$f_{\min} = \frac{\Delta\phi \cdot 10^7}{L \cdot \Delta\lambda^2}, \quad (4.1)$$

donde $\Delta\phi$ es el promedio de inestabilidad en fase, $\Delta\lambda$ es el paso en longitud de onda y L es la longitud de la fibra óptica.

Además de determinar la frecuencia de modulación, este tipo de moduladores necesitan ser alimentados por medio de una tensión eléctrica directa de operación para que el modulador opere de manera lineal, la cual se determinó como de 3.5 V. Para llegar a este valor de

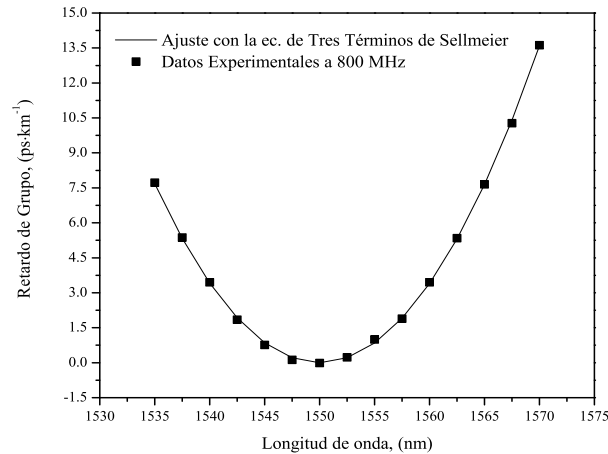


Figura 4.5: Retardo de grupo, por unidad de longitud en función de la longitud de onda, para la fibra G.653.

tensión eléctrica se obtuvo la función de transferencia del modulador mediante la medición de la potencia de salida del modulador con respecto a la variación de la tensión eléctrica. Una vez determinada la función de transferencia se eligió el punto de trabajo en el que se deseaba operar el modulador, de entre los tres puntos con que cuenta:

- Punto de cuadratura (QP¹¹): Es aquel que se encuentra en el centro de la zona lineal, a la mitad de la tensión eléctrica de media onda (diferencia entre la tensión eléctrica máxima y mínima de la amplitud de la señal modulada, dividida entre dos).
- Punto de mínima transmisión: La potencia en la salida es nula o cero, obteniendo modulaciones en doble banda lateral sin portadora y la señal detectada es a doble frecuencia.
- Punto de máxima transmisión: La potencia en la salida es máxima, junto con el punto de mínima transmisión, sirve para calcular la tensión eléctrica de media onda.

El punto de cuadratura resultó el más adecuado para operar el modulador, debido a que la relación que existe entre la salida y la entrada siempre va a ser lineal, permitiendo que las mediciones de diferencia de fase no se vean afectadas por el modulador.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se puede notar que para lograr una implementación satisfactoria del método, se deben tomar en cuenta el paso en longitud de onda, la

¹¹Por las siglas en inglés para *Quadrature Point*.

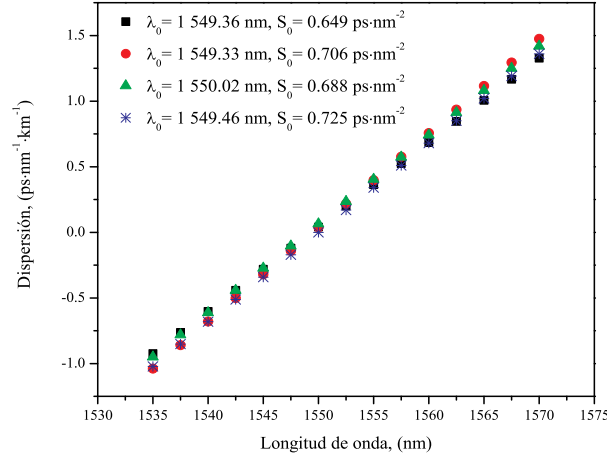


Figura 4.6: Dispersión cromática obtenida para la fibra óptica DSF G.653.

frecuencia de modulación y a tensión eléctrica directa de operación del modulador; siempre y cuando estos parámetros se encuentren dentro del alcance de los equipos de medición.

4.3 Mediciones en la Banda C de Telecomunicaciones

La fibra óptica utilizada es una fibra óptica monomodo con dispersión desplazada (G.653), fabricada por Corning[®], con una longitud medida de $L = 10.099\ 63$ km, con una incertidumbre expandida $U = 0.05$ m, para un factor de cobertura de $k = 2$, una longitud de onda de cero dispersión $\lambda_0 = 1\ 548.898$ nm, $U = 0.06$ nm, ($k = 2$), y la pendiente de dispersión a la longitud de onda de cero dispersión $S_0 = 0.704$ $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}$, $U = 0.008$ $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}$, ($k = 2$) [4.6].

Para esta fibra óptica se realizaron cuatro réplicas, para las cuales se utilizó un paso en longitud de onda $\Delta\lambda$ de 2.5 nm, una frecuencia de modulación f_m de 800 MHz, en un intervalo de trabajo en longitud de onda de 1 535 nm a 1 570 nm. Se ajustó el retardo de grupo por medio de la ecuación de Sellmeier de tres términos (ver Apéndice C), como se muestra en la Fig. 4.5; y posteriormente se derivó esta ecuación para poder obtener la dispersión cromática.

Los resultados obtenidos en estas cuatro réplicas se muestran en la Fig. 4.6, con sus respectivos valores de longitud de onda de cero dispersión y de pendiente a la longitud de onda de cero dispersión.

Estas gráficas fueron promediadas en conjunto y el promedio se comparó contra los modelos teóricos dados por el fabricante [4.7], y recomendado por la norma internacional para

Tabla 4.1: Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos para la fibra óptica DSF G.653.

Réplica Experimental	Longitud de Onda de Cero Dispersión, (nm)	Pendiente a la Longitud de Onda de Cero Dispersión, ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}$)
1	1 549.36	0.649
2	1 549.33	0.706
3	1 550.02	0.688
4	1 549.46	0.725
Promedios	1 549.542	0.692

los métodos de medida de dispersión cromática [4.8]. Esta comparación muestra una buena aproximación de la dispersión cromática entre los datos obtenidos experimentalmente y los dos calculados por medio de los modelos teóricos, dicha comparación se presenta de manera gráfica en la Fig. 4.7.

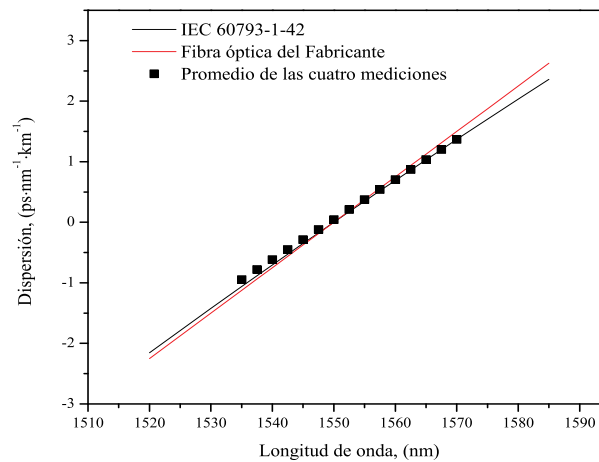


Figura 4.7: Comparación entre la dispersión cromática obtenida de las mediciones experimentales y las calculadas por medio de la norma internacional [4.8] y la recomendada por el fabricante [4.7], para la fibra G.653.

En la Tabla 4.1 se listan las longitudes de onda de cero dispersión obtenidas para las cuatro réplicas realizadas, así como sus correspondientes pendientes a la longitud de cero dispersión, y los valores promedio para ambos parámetros.

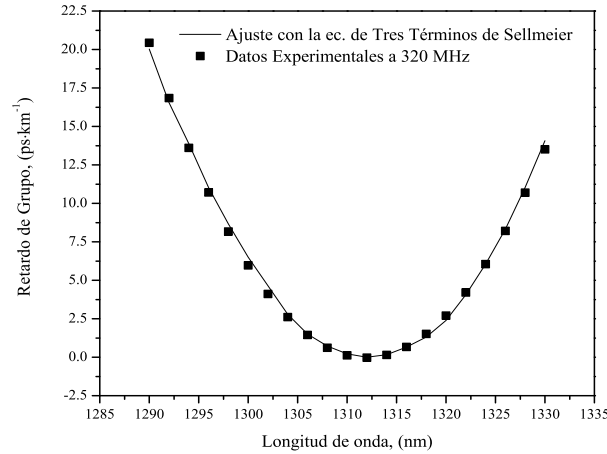


Figura 4.8: Retardo de grupo, por unidad de longitud en función de la longitud de onda, para la fibra G.652.

4.4 Mediciones en la Banda O de Telecomunicaciones

La fibra óptica que se utilizó en este caso es una fibra óptica monomodo convencional (G.652), fabricada por Corning[®], con una longitud medida de $L = 12.060\ 02$ km, $U = 0.04$ m, ($k = 2$), una longitud de onda de cero dispersión $\lambda_0 = 1\ 313$ nm, y la pendiente de dispersión a la longitud de onda de cero dispersión $S_0 = 0.086$ ps·nm⁻²·km⁻¹ [4.9].

Para esta fibra óptica también se realizaron cuatro réplicas, para las cuales se utilizó un paso en longitud de onda $\Delta\lambda = 2$ nm, una frecuencia de modulación $f_m = 320$ MHz, en un intervalo de trabajo en longitud de onda de 1 290 nm a 1 330 nm. Se ajustó el retardo de grupo por medio de la ecuación de Sellmeier de tres términos (ver Apéndice C), como se muestra en la Fig. 4.8, y finalmente se derivó esta ecuación para determinar la dispersión cromática.

La dispersión cromática de estas cuatro réplicas se muestra en la Fig. 4.9, con sus respectivos valores de longitud de onda de cero dispersión, y de pendiente a la longitud de onda de cero dispersión.

Al igual que en el caso de la fibra óptica G.653, las cuatro réplicas fueron promediadas en conjunto para ser comparadas con el modelo teórico proporcionado por el fabricante [4.9]. Esta comparación también muestra una buena aproximación de la dispersión cromática entre los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos por medio del modelo teórico, y se presenta de manera gráfica en la Fig. 4.10.

En la Tabla 4.2 se listan las longitudes de onda y pendientes de cero dispersión para las cuatro réplicas realizadas y su correspondiente valor promedio.

Tabla 4.2: Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos para la fibra óptica G.652.

Réplica Experimental	Longitud de Onda de Cero Dispersión,(nm)	Pendiente a la Longitud de Onda de Cero Dispersión, ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}$)
1	1 311.87	0.941
2	1 311.80	0.980
3	1 311.91	1.011
4	1 311.90	1.011
Promedios	1 311.87	0.986

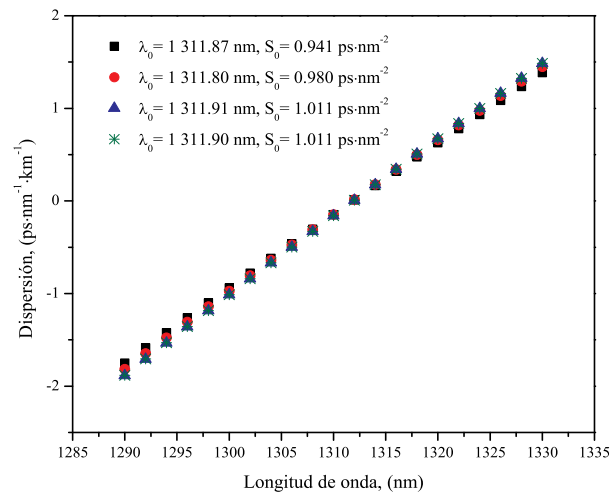


Figura 4.9: Dispersión cromática obtenida para la fibra óptica G.652.

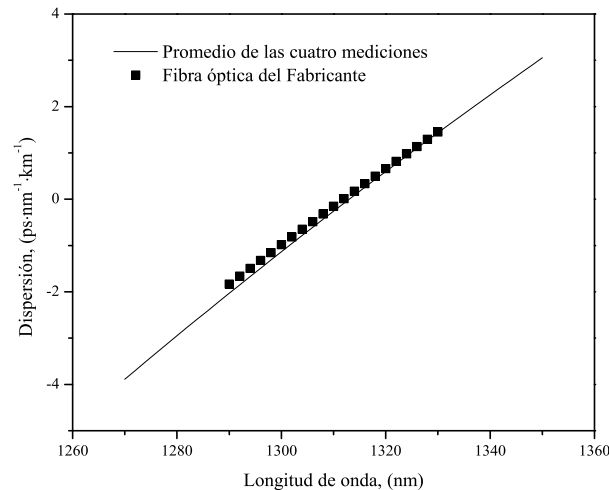


Figura 4.10: Comparación entre la dispersión cromática obtenida de las mediciones experimentales y la proporcionada por el fabricante [4.9], para la fibra G.652.

4.5 Simulación de la Dispersión Cromática

Utilizando el programa OptiFiber[®] y los datos proporcionados por el fabricante para el perfil de índice de las fibras G.652 y G.653 [4.7, 4.9] se propusieron respectivamente los perfiles mostrados en la Fig. 4.11, y con éstos se realizaron simulaciones numéricas para obtener sus dispersiones cromáticas.

En la Fig. 4.12 se muestran las gráficas de dispersión cromática obtenidas mediante la simulación para las fibras G.653 y G.652, comparadas con las medidas experimentalmente y con las calculadas a partir de los modelos teóricos sugeridos por el fabricante [4.7, 4.9] y por la norma [4.8].

Para la fibra óptica G.652 la dispersión cromática simulada presenta una buena aproximación para la pendiente y un ligero desplazamiento en la longitud de cero dispersión; en cambio, para la fibra óptica G.653 se obtienen una buena aproximación para la longitud de onda de cero dispersión y una desviación en la pendiente con respecto a la proporcionada por el fabricante; debido a que la simulación del perfil de índice de esta fibra óptica es mucho más complejo que el de la fibra óptica G.652, por lo que se requiere de mucho más trabajo para poder realizar una buena aproximación de éste perfil de índice.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos para longitud de onda de cero dispersión y la pendiente de cero dispersión, mediante la simulación numérica realizada a partir de los perfiles de índice propuestos para las fibras G.652 y G.653.

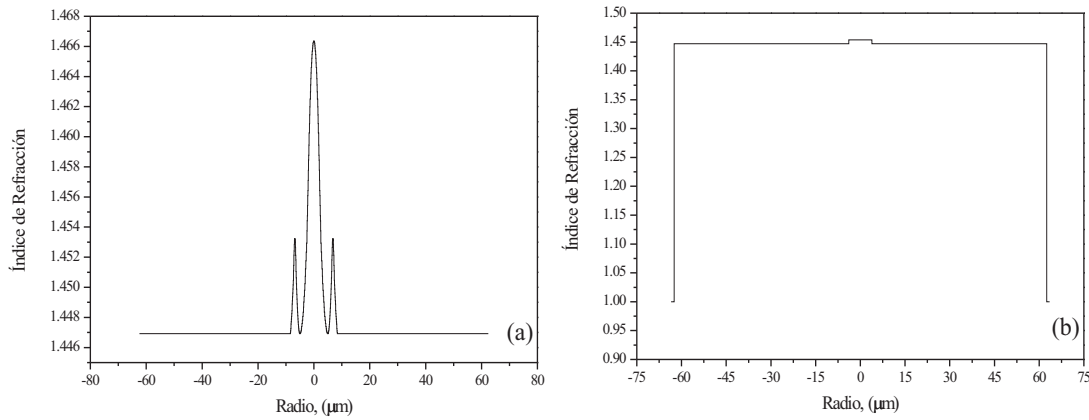


Figura 4.11: Perfiles de índice propuestos para las fibras (a) G.653 y (b) G.652, [4.7, 4.9].

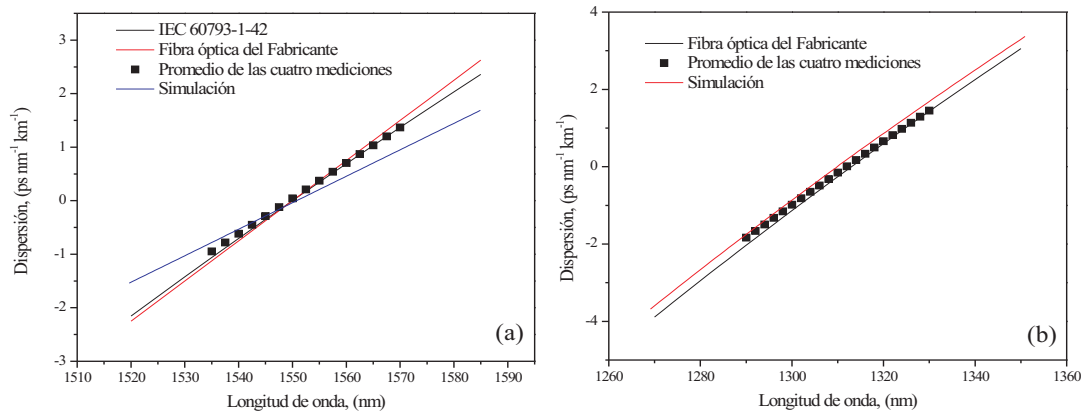


Figura 4.12: Dispersión cromática de las fibras ópticas (a) G.653 y (b) G.652, obtenidas experimentalmente, simuladas numéricamente y calculadas a partir de los modelos teóricos sugeridos por el fabricante y por la norma.

Tabla 4.3: Longitudes de onda de cero dispersión y pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos mediante simulación numérica realizada a partir de los perfiles de índice propuestos para las fibras ópticas G.652 y G.653.

Fibra Óptica	Longitud de Onda de Cero Dispersión, (nm)	Pendiente a la Longitud de Onda de Cero Dispersión, (ps·nm⁻²·km⁻¹)
G.652	1 311.7	0.085
G.653	1 550.8	0.091

Referencias

- [4.1] New Focus Inc., “*Models 1601 and 1611 User’s Manual High-Speed Photoreceivers*”, 160118 Rev. F.
- [4.2] Subcommittee 86A, “*Optical Fibres - Part 1-22: Measurement Methods and Test Procedures - Length Measurement*”, IEC/CEI-60793-1-22:2001, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, (2001).
- [4.3] W. Hatton, M. Nishimura, “*Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in Single-mode Fibers*”, J. Lightwave Technol. 4, 1552-1555, (1986).
- [4.4] J. Kilmer, W. Anderson, A. Johnson, “*Chromatic Dispersion Temperature Dependence of Matched-clad, Depressed-clad, and Dispersion-shifted Single-mode Fibers*”, Proc. Soc. Photo-Optical Instrum. Engrs. 841, pp. 274-278, (1987).
- [4.5] A. Hartog, A. Conduit, D. Payne, “*Variation of Pulse Delay with Stress and Temperature in Jacketed and Unjacketed Optical Fibres*”, Optical Quantum Electronics 11, 265-273, (1979).
- [4.6] T.E. Gills, “*Optical Fiber Chromatic Dispersion Standard*”, National Institute of Standards and Technology, Calibration Certificate 2524-5, Gaithersburg, USA, (1997).
- [4.7] Corning Incorporated, “*Corning® SMF/DSTM CPC6 Single-mode Dispersion-shifted Optical Fiber*”, Product Information PI1037, Corning Incorporated, New York, USA, (1998).
- [4.8] Subcommittee 86A, “*Optical Fibres - Part 1-42: Measurement Methods and Test Procedures - Chromatic Dispersion*”, IEC/CEI-60793-1-42:2007, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, (2007).
- [4.9] Corning Incorporated, “*Corning® SMF-28e® Optical Fiber*”, Corning Incorporated, New York, USA, (2005).

Capítulo 5

Estimación de la Incertidumbre

En este Capítulo se abordará el procedimiento realizado para estimar la incertidumbre de las mediciones realizadas con el método descrito en el Capítulo 4. Para llevar a cabo esta estimación se utilizó la metodología GUM¹ [5.1], la cual nos permitió conocer la exactitud que se pudo alcanzar con la implementación de este método para la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo.

5.1 Retardo de Grupo

5.1.1 Mensurando y Fuentes de Incertidumbre

Para estimar la incertidumbre del retardo de grupo se utilizó el modelo matemático representado en la Ec. (3.11), el cual relaciona el retardo de grupo con la diferencia de fase:

$$\Delta\tau(\lambda) = \frac{\Delta\phi}{360^\circ f_m}. \quad (5.1)$$

y para el que se consideró que afectan en su medición las siguientes fuentes de incertidumbre:

1. **Medición de la diferencia de fase ($\Delta\phi$).** Esta fuente de incertidumbre indica qué tan estables son las mediciones de fase en el analizador de redes, durante el tiempo en el que se realizan las mediciones de fase para el intervalo de trabajo en longitud de onda, dentro del que se desea determinar el retardo de grupo y por tanto la dispersión cromática.

¹Por las siglas en inglés para *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

Esta estabilidad dependerá en gran medida del nivel de potencia a la cual se realizan las lecturas de las mediciones de fase y del promedio del número de muestras tomadas por el analizar de redes.

2. **Deriva en la medición de la diferencia de Fase ($\delta_{\Delta\phi}$).** Al igual que en el caso de la fuente de incertidumbre descrita anteriormente, se introduce una fuente de incertidumbre asociada a la variación temporal de la fase medida con el tiempo, en relación a la deriva propia de los sistemas o circuitos eléctricos.
3. **Resolución en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{r\Delta\phi}$).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con la resolución del analizador de redes en relación a mediciones de fase.
4. **Reproducibilidad en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{R\Delta\phi}$).** Esta fuente de incertidumbre está asociada a la capacidad del analizador de redes de dar el mismo resultado para diferentes mediciones realizadas en las mismas condiciones, a lo largo de ciertos periodos de tiempo.
5. **Reproducibilidad de la fase con respecto al barrido en longitud de onda ($\delta_{R\Delta\phi\lambda}$).** Esta fuente está asociada al hecho de que en condiciones de igual longitud de onda y temperatura ambiental, las mediciones de diferencia de fase deben poder reproducirse. En caso de que no haya reproducibilidad, esto puede deberse a un fallo en las piezas mecánicas que se encargan de seleccionar la longitud de onda en el láser sintonizable.
6. **Influencia de la temperatura ambiental en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{\Delta\phi T}$).** La influencia de la temperatura ambiental sobre la medición de fase es de particular interés, debido a que esta medición de fase depende en gran medida de la longitud de la fibra óptica y, dado que la fibra óptica es fabricada de sílice, esto provocará que la longitud de la fibra óptica cambie conforme lo haga la temperatura ambiental; siendo éste un cambio muy notorio cuando se tiene un carrete de fibra óptica con longitud del orden de kilómetros.
7. **Factor de calibración de la fase del analizador de redes (FC_{ϕ}).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con la calibración en fase del analizador de redes, con respecto a ciertas frecuencias de modulación.
8. **Deriva en el factor de calibración ($\delta_{FC\phi}$).** Esta fuente de incertidumbre se debe a la variación que existe en el factor de calibración entre periodos de calibraciones consecutivas del analizador de redes.

9. **Error en la selección de la frecuencia de modulación (f_m).** Se considera el error especificado por el fabricante del analizador de redes para la selección en frecuencia que posee este dispositivo, además de tomar en cuenta la estabilidad en frecuencia que presenta el analizador de redes.
10. **Resolución en frecuencia del analizador de redes (δ_{rf_m}).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con la resolución del analizador de redes para mediciones de frecuencia.
11. **Factor de calibración de la frecuencia del analizador de redes (FC_{f_m}).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con la calibración en frecuencia del analizador de redes.

5.1.2 Cuantificación

Para poder cuantificar las fuentes de incertidumbre existen dos métodos principales, el método de evaluación tipo A, que está basado en un análisis estadístico de una serie de datos, y el método de evaluación tipo B, que comprende aquéllos en donde no existen observaciones o mediciones y no se pueden hacer análisis estadísticos con los resultados. Para cuantificar una fuente de incertidumbre, generalmente se le atribuyen a los datos o mediciones una función de distribución de densidad de probabilidad, que típicamente suelen ser normal, rectangular o triangular [5.1].

Evaluación Tipo A

1. **Reproducibilidad en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{R\Delta\phi}$).** En esta fuente de incertidumbre se introducen los errores debidos a la conexión y desconexión de las fibras ópticas, a las posibles reflexiones en las conexiones, y al mismo deterioro de los acopladores.

Esta fuente se considera como una distribución Gaussiana y su incertidumbre estándar se representa por:

$$u(\delta_{R\Delta\phi}) = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (5.2)$$

donde s es la desviación estándar de los datos experimentales y n es el número lecturas repetidas.

2. **Reproducibilidad de la fase con respecto al barrido en longitud de onda ($\delta_{R\Delta\phi\lambda}$).** Para esta fuente se consideró una distribución Gaussiana, cuya incertidumbre

estándar queda dada por:

$$u(\delta_{R\Delta\phi\lambda}) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (5.3)$$

Evaluación Tipo B

3. **Medición de la diferencia de fase ($\Delta\phi$).** Para esta fuente de incertidumbre se analizó la estabilidad en fase que presenta el analizador de redes a través de la lectura de una fase inicial de la cual se fueron tomando lecturas cada minuto con respecto a un valor promediado de 64 muestras, para un tiempo total de 50 min. La estimación de la incertidumbre se realizó tomando en cuenta la diferencia entre los puntos máximo y mínimo de la variación de fase, en un tiempo de 50 min, que es el tiempo que tomó hacer una medición de las diferencias de fase para la determinación del retardo de grupo. Para dicha estimación se considera una distribución rectangular y la relación:

$$u(\Delta\phi) = \frac{0.384}{\sqrt{12}} = 0.110 \text{ 9}. \quad (5.4)$$

4. **Deriva en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{\Delta\phi}$).** Al adquirir lecturas durante aproximadamente 50 min, se han encontrado variaciones en la fase de aproximadamente 0.384° y, asociándole una distribución rectangular, obtenemos la siguiente contribución a la incertidumbre:

$$u(\delta_{\Delta\phi}) = \frac{0.384}{\sqrt{12}} = 0.110 \text{ 9}. \quad (5.5)$$

5. **Resolución en la medición de la diferencia de fase ($\delta_{r\Delta\phi}$).** La resolución del analizador de redes en la medición de fase es de 0.01° , la cual se considera como una distribución rectangular y cuya incertidumbre estándar se determina por medio de:

$$u(\delta_{r\Delta\phi}) = \frac{0.01}{\sqrt{12}} = 0.002 \text{ 9}. \quad (5.6)$$

6. **Error en la selección de la frecuencia de modulación (f_m).** Para esta fuente se consideró una distribución rectangular, cuya estimación de incertidumbre se realiza tomando en cuenta la estabilidad del equipo en relación a la selección de la frecuencia, la cual corresponde a $f_a = \pm 5$ ppm; dicha estimación se representa mediante:

$$u(f_m) = \frac{f_m \times f_a}{\sqrt{12}}. \quad (5.7)$$

7. **Resolución en frecuencia del analizador de redes** (δ_{rf_m}). La resolución del analizador de redes en la medición de la frecuencia es de 1 Hz y se considera como una distribución rectangular, cuya incertidumbre estándar se determina por medio de:

$$u(\delta_{rf_m}) = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.2887. \quad (5.8)$$

8. **Factor de calibración de la frecuencia del analizador de redes** (FC_{f_m}). Debido a que el analizador de redes no se encuentra calibrado en frecuencia, se consideró que ésta fuente contribuye a la incertidumbre con 1 Hz y, asociándole una distribución rectangular, se obtuvo:

$$u(cal_{f_m}) = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.2887. \quad (5.9)$$

9. **Influencia de la temperatura ambiental en la medición de la diferencia de fase** ($\delta_{\Delta\phi T}$). Para estimar la incertidumbre en el retardo debido a la temperatura para una fibra de 10.099 63 km, se tomará en cuenta el coeficiente de sensibilidad de $c_t = 1 \text{ cm}\cdot\text{C}^{-1}$ [5.2], el índice de grupo n_g , la frecuencia de modulación f_m y la cámara donde se encuentra la fibra, la cual reproduce una estabilidad en temperatura de $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ y para la que se considera una distribución rectangular, dando como resultado :

$$u(\delta_{\Delta\phi T}) = \frac{0.01 \times \Delta t \times L \times f_m \times n_g \times 360}{c\sqrt{12}}. \quad (5.10)$$

10. **Factor de calibración de la fase del analizador de redes** (FC_ϕ). El certificado de calibración emitido para el analizador de redes con respecto a la medición de fase, reporta una incertidumbre de:

$$u(cal_\phi) = 0.055. \quad (5.11)$$

11. **Deriva en el factor de calibración** ($\delta_{FC\phi}$). Esta fuente de incertidumbre se refiere a la variación del factor de calibración con respecto a diferentes periodos de calibración. Debido a que el analizador de redes cuenta con dos certificados de calibración se estimó ésta incertidumbre en base a una distribución rectangular, tomando en consideración los dos certificados de calibración, como se muestra en:

$$u(\delta_{cal\phi}) = \frac{0.000439\Delta\phi(\lambda)}{\sqrt{12}}. \quad (5.12)$$

Tabla 5.1: Presupuesto de incertidumbre para el retardo de grupo a 1 550 nm, para la fibra óptica G.653.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (s)
Repetibilidad en las lecturas de diferencia de fase	3.849×10^{-13}
Deriva en las lecturas de diferencia de fase	3.849×10^{-13}
Resolución en fase del analizador de redes	1.002×10^{-14}
Reproducibilidad en las lecturas de diferencia de fase	2.488×10^{-14}
Efecto de la longitud de onda en la reproducibilidad de las lecturas de diferencia de fase	2.848×10^{-13}
Efecto de la temperatura en la reproducibilidad de las lecturas de diferencia de fase	1.406×10^{-13}
Factor de calibración de la fase del analizador de redes	1.910×10^{-13}
Deriva en el factor de calibración del analizador de redes	1.525×10^{-17}
Error en la frecuencia de modulación del analizador de redes	1.737×10^{-19}
Resolución en frecuencia del analizador de redes	4.343×10^{-23}
Factor de calibración de la frecuencia del analizador de redes	4.343×10^{-23}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	6.591×10^{-13}

5.1.3 Incertidumbre Combinada

Los coeficientes de sensibilidad que se obtuvieron de acuerdo al modelo de la Ec. (5.1) son:

$$c_{\Delta\phi(\lambda)} = \frac{1}{360^\circ f_m}, \quad (5.13)$$

$$c_{f_m} = -\frac{\Delta\phi(\lambda)}{360^\circ f_m^2}. \quad (5.14)$$

Una vez calculada la incertidumbre estándar combinada por medio de los coeficientes de sensibilidad, se procedió a integrar los presupuestos de incertidumbre para el retardo de grupo con un factor de cobertura ($k = 1$), para las fibras ópticas de las bandas C y O medidas. Tales presupuestos se presentan en las Tablas 5.1 y 5.2, respectivamente.

Tabla 5.2: Presupuesto de incertidumbre para el retardo de grupo a 1 310 nm, para la fibra óptica G.652.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (s)
Repetibilidad en las lecturas de diferencia de fase	9.623×10^{-13}
Deriva en las lecturas de diferencia de fase	9.623×10^{-13}
Resolución en fase del analizador de redes	2.506×10^{-14}
Reproducibilidad en las lecturas de diferencia de fase	3.854×10^{-14}
Efecto de la longitud de onda en la reproducibilidad de las lecturas de diferencia de fase	1.889×10^{-13}
Efecto de la temperatura en la reproducibilidad de las lecturas de diferencia de fase	1.406×10^{-13}
Factor de calibración de la fase del analizador de redes	4.774×10^{-13}
Deriva en el factor de calibración del analizador de redes	1.487×10^{-16}
Error en la frecuencia de modulación del analizador de redes	1.694×10^{-18}
Resolución en frecuencia del analizador de redes	1.059×10^{-21}
Factor de calibración de la frecuencia del analizador de redes	1.059×10^{-21}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	1.462×10^{-12}

5.2 Dispersión Cromática

5.2.1 Mensurando y Fuentes de Incertidumbre

Para el caso de la dispersión cromática, la estimación de la incertidumbre se realizó de acuerdo al modelo:

$$D(\lambda_i) = \frac{\Delta\tau(\lambda_i)}{L\Delta\lambda}, \quad (5.15)$$

donde λ_i es la longitud de onda promedio entre dos longitudes de onda adyacentes λ'_i y λ''_i , $\Delta\tau(\lambda_i)$ es el retardo de grupo a esta longitud de onda promedio, y L es la longitud de la fibra.

En este caso, las fuentes de incertidumbre que afectan al modelo dado en la Ec. (5.15) se describen a continuación:

1. **Incertidumbre del retardo de grupo (τ).** Para esta fuente de incertidumbre se toma en consideración el valor de la incertidumbre obtenida en el análisis anterior para el retardo de grupo $\Delta\tau(\lambda_i)$.

2. **Resolución en el valor del retardo de grupo ($\delta_{r\tau}$).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra relacionada con la resolución en la que se mide el retardo de grupo, que se encuentra dada por la frecuencia de modulación f_m y la resolución en fase del analizador de redes por medio de la Ec. (5.1).
3. **Longitud de la fibra (L).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con el valor de la longitud de la fibra óptica conforme la temperatura ambiental varía durante el transcurso de la medición.
4. **Resolución en la medición de la longitud de la fibra (δ_{rL}).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra asociada con la resolución en longitud, que se logra al modular a una determinada frecuencia y al medir a cierta resolución de fase, tomando en consideración el índice de grupo de la fibra óptica bajo prueba, tal y como se muestra en el método de cambio de fase para la medición de longitud en fibras ópticas [5.3].
5. **Incertidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** Esta fuente de incertidumbre está relacionada con la variación en longitud de onda que resulta de tomar mediciones a un determinado intervalo $\Delta\lambda$.
6. **Resolución en la medición de la longitud de onda ($\delta_{r\lambda}$).** Esta fuente de incertidumbre está asociada con la resolución en longitud de onda con la que cuenta el medidor en longitud de onda con el cual se realizan las mediciones.
7. **Influencia de la temperatura ambiental en la dispersión cromática (δ_{DispT}).** Esta fuente de incertidumbre se relaciona con el efecto que tiene la temperatura en el índice de refracción de la fibra óptica, la cual influye en las mediciones para determinar la dispersión cromática.

5.2.2 Cuantificación

Evaluación Tipo B

1. **Incertidumbre del retardo de grupo (τ).** Esta fuente de incertidumbre corresponde al valor de la incertidumbre estándar combinada con factor de cobertura ($k = 1$), obtenida al aplicar el modelo de la Ec. (5.1) para estimar dicha incertidumbre.
2. **Resolución en el valor del retardo de grupo ($\delta_{r\tau}$).** Esta fuente de incertidumbre se estima por medio de la Ec. (5.1) y se le asocia una distribución rectangular, obteniendo la siguiente incertidumbre estándar:

$$u(\delta_{r\tau}) = \frac{\Delta\phi_{res}}{360^\circ f_m \sqrt{12}}. \quad (5.16)$$

3. **Longitud de la fibra (L).** La incertidumbre de esta fuente se obtiene por medio del certificado de calibración en longitud de la fibra óptica, el cual reporta unas incertidumbres de:

$$u(L) = 2.5 \times 10^{-5} \quad (G.653), \quad (5.17)$$

$$u(L) = 2.5 \times 10^{-5} \quad (G.652). \quad (5.18)$$

4. **Resolución en la medición de la longitud de la fibra (δ_{rL}).** Esta fuente de incertidumbre se estima por medio de la ecuación utilizada en el método de cambio de fase para determinar la longitud de la fibra, y a la cual se le asocia una distribución rectangular, obteniendo la siguiente incertidumbre estándar:

$$u(\delta_{rL}) = \frac{c\Delta\phi}{360^\circ f_m n_g}. \quad (5.19)$$

5. **Incertidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** A esta fuente de incertidumbre se le asocia una distribución rectangular, en la que se introduce la variación en longitud onda que existe al utilizar un paso de 2.5 nm en el arreglo, tal y como se muestra en:

$$u(\Delta\lambda) = \frac{0.000\ 853}{\sqrt{12}} = 0.000\ 1. \quad (5.20)$$

6. **Resolución en la medición de la longitud de onda ($\delta_{r\lambda}$).** La resolución del medidor de longitud de onda es de 0.001 nm y se considera como una distribución rectangular, cuya incertidumbre estándar se determina por medio de:

$$u(\delta_{r\lambda}) = \frac{0.001}{\sqrt{12}} = 0.000\ 3. \quad (5.21)$$

7. **Influencia de la temperatura ambiental en la dispersión cromática (δ_{DispT}).** En este caso se considera el coeficiente de sensibilidad de $0.024\ 7\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ [5.4] y la estabilidad en temperatura ambiental de la cámara donde se encuentra la fibra de $0.01\ ^\circ\text{C}$, asociándole una distribución rectangular, como se muestra en:

$$u(\delta_{DispT}) = \frac{0.024\ 7 \times 0.01}{\sqrt{12}} = 0.028\ 5. \quad (5.22)$$

Tabla 5.3: Presupuesto de incertidumbre para la dispersión cromática a 1 548.75 nm, para la fibra óptica G.653.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (s·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)
Incertidumbre del retardo de grupo	2.614×10 ⁻¹⁴
Resolución en el valor del retardo de grupo	3.970×10 ⁻¹⁶
Longitud de la fibra	1.327×10 ⁻¹⁹
Resolución en la medición de la longitud de la fibra	1.091×10 ⁻²⁰
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	5.681×10 ⁻¹⁸
Resolución en la medición de la longitud de onda	6.189×10 ⁻¹⁸
Influencia de la temperatura en la dispersión cromática	3.822×10 ⁻¹⁸
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	2.614×10⁻¹⁴

5.2.3 Incertidumbre Combinada

Los coeficientes de sensibilidad que se obtuvieron para el modelo de la Ec. (5.15) son los siguientes:

$$c_{\Delta\tau(\lambda_i)} = \frac{1}{L \cdot \Delta\lambda}, \quad (5.23)$$

$$c_L = -\frac{\Delta\tau(\lambda_i)}{L^2 \cdot \Delta\lambda}, \quad (5.24)$$

$$c_{\Delta\lambda} = -\frac{\Delta\tau(\lambda_i)}{L \cdot \Delta\lambda^2}; \quad (5.25)$$

y con éstos se obtuvieron los presupuestos de incertidumbre para la dispersión cromática de las fibras ópticas de las bandas C y O, que se presentan en las Tablas 5.3 y 5.4, respectivamente.

5.3 Longitud de Onda de Cero Dispersión

5.3.1 Mensurando y Fuentes de Incertidumbre

Para la estimación de la incertidumbre de la longitud de onda de cero dispersión se consideró el modelo:

$$\lambda_0 = \lambda_0 + \delta_\lambda + \Delta\lambda + \delta_{\text{ajuste}} + \delta_T; \quad (5.26)$$

Tabla 5.4: Presupuesto de incertidumbre para la dispersión cromática a 1 311 nm, para la fibra óptica G.652.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, ($\text{s}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)
Incertidumbre del retardo de grupo	6.080×10^{-14}
Resolución en el valor del retardo de grupo	1.039×10^{-15}
Longitud de la fibra	1.821×10^{-19}
Resolución en la medición de la longitud de la fibra	4.678×10^{-20}
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	7.046×10^{-18}
Resolución en la medición de la longitud de onda	1.585×10^{-17}
Influencia de la temperatura en la dispersión cromática	7.828×10^{-18}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	6.081×10^{-14}

y se consideró que las fuentes de incertidumbre que influyen en su determinación, de acuerdo a la Ec. (5.26), son las siguientes:

1. **Reproducibilidad en el valor de la longitud de onda de cero dispersión (λ_0).** La reproducibilidad del valor estimado de la longitud de onda de cero dispersión se obtiene a través del valor promedio de las longitudes de onda de cero dispersión, obtenidas en cada una de las cuatro réplicas o repeticiones realizadas con el arreglo implementado.
2. **Incertidumbre en la lectura de la longitud de onda (δ_λ).** Esta fuente de incertidumbre se debe a la variación que hay en la longitud de onda al momento de seleccionar ésta en el láser sintonizable.
3. **Incertidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra asociada al error producido por realizar mediciones a un determinado intervalo en longitud de onda.
4. **Ajuste numérico (δ_{ajuste}).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra relacionada con la posición de la longitud de onda de cero dispersión en el intervalo de trabajo en donde se desea medir la dispersión cromática, ya que no siempre se tendrá esta longitud en el centro de este intervalo, lo cual da a lugar a un error sobre la función de ajuste en el retardo de grupo.
5. **Incertidumbre debida a la temperatura ambiental (δ_T).** Para esta fuente de

incertidumbre se hacen las mismas consideraciones que en el apartado siete de las fuentes de incertidumbre de la dispersión cromática.

5.3.2 Cuantificación

Evaluación Tipo A

1. **Reproducibilidad en el valor de la longitud de onda de cero dispersión (λ_0).** Para esta fuente de incertidumbre se consideró una distribución Gaussiana para los diferentes valores de la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos a partir de las cuatro réplicas o repeticiones realizadas con el arreglo montado. Su incertidumbre se obtiene con:

$$u(\lambda_0) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (5.27)$$

Evaluación Tipo B

2. **Incetidumbre en la lectura de la longitud de onda (δ_λ).** La contribución de esta fuente se estima por medio la Ec. (5.20).
3. **Incetidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** Esta incertidumbre se ha evaluado por medio de una función retardo, cuya longitud de onda de cero dispersión se encuentra en el centro de un intervalo en longitud de onda de 40 nm. Se han realizado dos ajustes por medio de la ecuación de Sellmeier de tres términos (ver Apéndice C) para dos pasos en longitud de onda, uno de 2.5 nm y otro de 5 nm, encontrando una contribución a la incertidumbre de:

$$u(\Delta\lambda) = 0.006 \text{ 1}. \quad (5.28)$$

4. **Ajuste numérico (δ_{ajuste}).** Para esta incertidumbre se ha evaluado la variación que existe en el ajuste al eliminar en primer lugar los primeros 5 nm de la función de retardo y en segundo lugar al eliminar los últimos 5 nm de la función de retardo de grupo experimental, al cual se le asocia una distribución rectangular, encontrando una incertidumbre de:

$$u(\delta_{ajuste}) = \frac{0.005 \text{ 3}}{\sqrt{12}} = 0.001 \text{ 5}. \quad (5.29)$$

5. **Incetidumbre debida a la temperatura ambiental (δ_T).** La cuantificación de esta fuente de incertidumbre se hace de mediante la Ec. (5.22).

Tabla 5.5: Presupuesto de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.653.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (nm)
Reproducibilidad en el valor de la longitud de onda de cero dispersión	1.952×10^{-2}
Incertidumbre en la lectura de la longitud de onda	2.650×10^{-4}
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	6.130×10^{-3}
Ajuste numérico	1.536×10^{-3}
Incertidumbre debida a la temperatura	7.130×10^{-5}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	2.051×10^{-2}

5.3.3 Incertidumbre Combinada

Como puede apreciarse en la Ec.(5.26), en este caso los coeficientes de sensibilidad son iguales a la unidad; y por tanto, los presupuestos de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión de las fibras ópticas de las bandas C y O se presentan en las Tablas 5.5 y 5.6, respectivamente.

5.4 Pendiente a la Longitud de Onda de Cero Dispersión

5.4.1 Mensurando y Fuentes de Incertidumbre

Para la estimación de la incertidumbre de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión se consideró el modelo:

$$S_0 = S_0 + \Delta\lambda + \delta_{\text{ajuste}}; \quad (5.30)$$

y que las fuentes de incertidumbre que influyen en la determinación de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión al utilizar la Ec. (5.30), son las siguientes:

1. **Reproducibilidad de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión (S_0).** La reproducibilidad del valor estimado de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión se obtiene a través del valor promedio de las pendientes a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidas en cada una de las cuatro réplicas o repeticiones realizadas con el arreglo establecido.

Tabla 5.6: Presupuesto de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.652.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (nm)
Reproducibilidad en el valor de la longitud de onda de cero dispersión	2.483×10^{-2}
Incertidumbre en la lectura de la longitud de onda	1.284×10^{-4}
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	1.792×10^{-2}
Ajuste numérico	4.789×10^{-3}
Incertidumbre debida a la temperatura	7.130×10^{-5}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	3.100×10^{-2}

2. **Incertidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra asociada al error producido por realizar mediciones a un determinado paso en longitud de onda y la influencia que tiene este paso en el valor de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión.
3. **Ajuste numérico (δ_{ajuste}).** Esta fuente de incertidumbre se encuentra relacionada con la variación en el valor de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión con respecto al ajuste realizado para el retardo de grupo experimental.

5.4.2 Cuantificación

Evaluación Tipo A

1. **Reproducibilidad de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión (S_0).** Para esta fuente de incertidumbre se consideró una distribución Gaussiana para los diferentes valores de la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión, obtenidos a partir de las cuatro réplicas realizadas. Su incertidumbre se obtiene con:

$$u(S_0) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (5.31)$$

Evaluación Tipo B

2. **Incertidumbre debida al paso en longitud de onda ($\Delta\lambda$).** La cuantificación de esta fuente de incertidumbre se hace de igual forma que lo estipulado para la longitud

Tabla 5.7: Presupuesto de incertidumbre para la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.653.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (ps·nm ⁻²)
Reproducibilidad de la pendiente a la Longitud de onda de cero dispersión	9.342×10^{-3}
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	3.636×10^{-3}
Ajuste numérico	4.461×10^{-3}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	1.097×10^{-2}

Tabla 5.8: Presupuesto de incertidumbre para la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión para la fibra óptica G.652.

Fuente de Incertidumbre	Contribución, (ps·nm ⁻²)
Reproducibilidad de la pendiente a la Longitud de onda de cero dispersión	3.618×10^{-4}
Incertidumbre debida al paso en longitud de onda	3.618×10^{-4}
Ajuste numérico	1.118×10^{-2}
Incertidumbre estándar combinada, ($k = 1$)	1.119×10^{-2}

de onda de cero dispersión, obteniendo:

$$u(\Delta\lambda) = 0.003 \text{ 6.} \quad (5.32)$$

3. **Ajuste numérico** (δ_{ajuste}). La cuantificación de esta fuente de incertidumbre se hace de igual forma que lo estipulado en el apartado cuatro de la cuantificación de la incertidumbre de la longitud de onda de cero dispersión, resultando en una incertidumbre de:

$$u(\delta_{ajuste}) = \frac{0.015 \text{ 5}}{\sqrt{12}} = 0.004 \text{ 5.} \quad (5.33)$$

5.4.3 Incertidumbre Combinada

Al igual que en el caso de la estimación de incertidumbre para la longitud de onda de cero dispersión, y de acuerdo a la Ec. (5.30), los coeficientes de sensibilidad también son iguales a

uno; por lo que los presupuestos de incertidumbre para la pendiente a la longitud de onda de cero dispersión, tanto para la fibra óptica de la banda C como para la de la banda O, se presenta en las Tablas 5.7 y 5.8, respectivamente.

Referencias

- [5.1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, OIML, IUPAC, IUPAP, “*Guide pour l’Expression de l’Incertitude de Mesure*”, ISO-BIPM, Geneva, Switzerland, (1995).
- [5.2] IEC 61746 Final Draft. “*Calibration of Optical Time Domain Reflectometers (OTDR’s)*”, Technical Report.
- [5.3] Subcommittee 86A, “*Optical Fibres - Part 1-22: Measurement Methods and Test Procedures - Length Measurement*”, IEC/CEI-60793-1-22:2001, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, (2001).
- [5.4] W. H. Hatton, M. Nishimura, “*Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in Single Mode Fibers*”, J. Lightwave Technol., vol. 4:1552-1555, (1986).

Conclusiones

Como resultado de la implementación del método de cambio de fase para la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas usadas para telecomunicaciones, particularmente en las bandas C y O, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se realizó un análisis de los métodos de medición de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo, descritos ampliamente en la bibliografía.

Como resultado de este análisis se seleccionó el método de modulación de cambio de fase, como el método base para realizar la medición de la dispersión cromática en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CENAM.

- Se implementó de la mejor forma posible el método de modulación de cambio de fase para la medición de la dispersión cromática; el cual utiliza una fuente sintonizable, un modulador de intensidad externo, un detector rápido y un medidor de fase.
- La exactitud que se obtiene con el método depende en gran medida del paso en longitud de onda utilizado en el intervalo de trabajo en longitud de onda, la frecuencia de modulación y de la exactitud con que cuenten los aparatos utilizados en el arreglo de medición, tanto para la selección de la longitud de onda en el láser sintonizable, como para los tiempos de respuesta del detector rápido y del analizador de redes.
- Se realizaron mediciones de la dispersión cromática para dos fibras ópticas monomodo, una con longitud de onda de cero dispersión nominal en 1 310 nm (descrita en ITU G.652) y otra con longitud de onda de cero dispersión nominal en 1 550 nm (descrita en ITU G.653), obteniendo buenos resultados en comparación con los datos que especifica el fabricante y la norma internacional aplicable.
- Los valores de dispersión cromática, retardo de grupo, longitud de onda de cero dispersión y pendiente de cero dispersión obtenidos, muestran una buena concordancia con los reportados para las fibras medidas, por otros laboratorios de metrología o por el fabricante.

- Se realizó una estimación de la incertidumbre de medición para la implementación de este método para la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodo, con el fin de determinar la exactitud lograda, lo que facilitará futuras comparaciones con laboratorios que realizan este tipo de mediciones.
- Las incertidumbres alcanzadas son adecuadas para las capacidades metrológicas con que cuenta actualmente el Laboratorio de Fibras Ópticas de CENAM, y competitivas con las que obtienen laboratorios de jerarquía metrológica similar. Estas incertidumbres podrán ser mejoradas si se desea, desarrollando mejores controles de temperatura ambiental y adquiriendo equipo de mayor exactitud.

Aspectos a Considerar en el Futuro

Para la implementación del método de cambio de fase se necesitan fibras ópticas de prueba con una longitud mayor a 1 km, por lo que sería conveniente poder evaluar la implementación de otro método, como lo es el método interferométrico, el cual requiere longitudes de fibras ópticas que van desde 1 m hasta los 10 m, permitiendo así la medición de la dispersión cromática en fibras ópticas con poca longitud.

Además del estudio de la dispersión cromática, es importante poder realizar de igual manera un estudio enfocado en la dispersión debida al modo de polarización, ya que éste es otro factor que limita la transmisión de datos en las fibras ópticas monomodo utilizadas actualmente en telecomunicaciones.

Es también conveniente explorar la posibilidad de medir dispersión cromática y por modos de polarización en otras ventanas de telecomunicaciones.

Apéndice A

Reflexión Interna Total

La propagación en una fibra óptica se realiza cuando un rayo de luz ingresa al núcleo de la fibra óptica y dentro de éste se producen sucesivas reflexiones en la superficie de separación entre su núcleo y su revestimiento.

La condición necesaria para que la fibra óptica pueda confinar la luz dentro del núcleo es que el índice de refracción del núcleo (n_1) sea mayor al índice de refracción del revestimiento (n_2), *i. e.* $n_1 > n_2$.

Para describir los mecanismos de propagación se utiliza la óptica geométrica, que considera a la luz como rayos; donde la reflexión ocurre en la frontera de dos materiales de índices de refracción diferentes.

Si se tiene un material con índice de refracción n distinto al del aire, la velocidad de propagación será ligeramente distinta a la que tiene en el vacío, c y estará dada por:

$$v = \frac{c}{n}; \quad (\text{A.1})$$

de donde se puede despejar para el índice de refracción n y se obtiene:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (\text{A.2})$$

donde v es la velocidad de la luz en un material específico.

Cuando un rayo incide en la frontera entre dos medios con diferentes índices de refracción, el rayo incidente será refractado con distinto ángulo, según la ley de refracción de Snell:

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2, \quad (\text{A.3})$$

que se representa en la Fig. A.1.

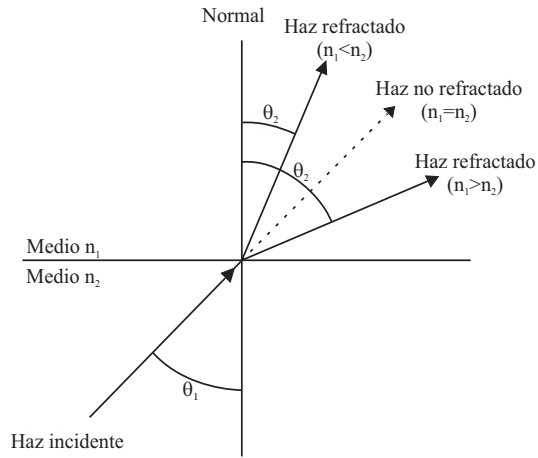


Figura A.1: Representación de la Ley de Snell por medio de rayos.

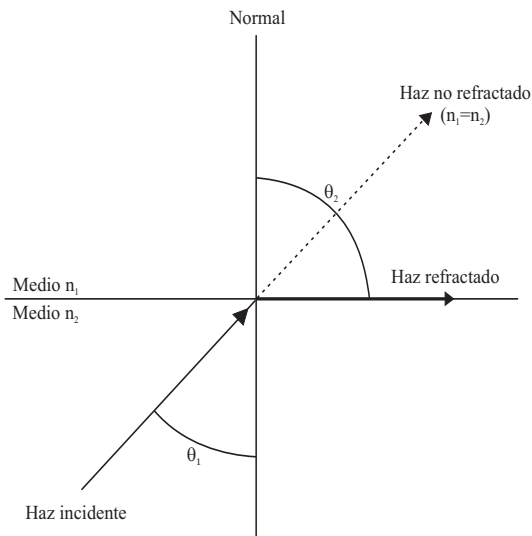


Figura A.2: Esquema del ángulo crítico, derivado por medio de la ley de Snell.

En la frontera, el haz incidente se refracta hacia la normal a la superficie de separación entre ambos medios, o lejos de ella, dependiendo de si n_1 es menor o mayor que n_2 . Esto implica que si un rayo ingresa de un medio menos denso (índice de refracción más bajo) a otro más denso (índice de refracción más alto) ($n_1 < n_2$), el rayo se refracta con un ángulo menor con respecto a la perpendicular de la frontera.

En el caso contrario, cuando un rayo incide de un medio más denso hacia otro menos denso, el rayo se refracta con un ángulo mayor con respecto a la perpendicular de la frontera.

A.1 Ángulo Crítico

Puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, el ángulo de incidencia denominado ángulo crítico θ_c , se presenta cuando el rayo refractado forma un ángulo de 90° con respecto a la normal a la superficie (ver Fig. A.2). Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados:

$$\begin{aligned}\theta_2 &= 90^\circ \\ \theta_1 &= \theta_c \\ \theta_c &= \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right).\end{aligned}\tag{A.4}$$

Para el caso en el que $\theta_1 > \theta_c$, ocurre lo que se conoce como reflexión interna total, y es la condición sobre la cual se basan las fibras ópticas para guiar la luz dentro del núcleo de la fibra óptica.

Apéndice B

Derivación de la Dispersión de Grupo

Para señales con un ancho espectral finito $\Delta\lambda$, el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud es:

$$\Delta\tau = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) \Delta\lambda; \quad (\text{B.1})$$

mientras que el ensanchamiento por unidad de longitud por unidad de ancho espectral es:

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right). \quad (\text{B.2})$$

En el límite infinitesimal de $\Delta\lambda$, se puede escribir $d\tau/d\lambda$ en lugar de $\Delta\tau\Delta\lambda^{-1}$. Haciendo uso de la relación $k = \omega c^{-1}$, se puede convertir $\Delta\tau\Delta\lambda^{-1}$ en varias formas, por ejemplo:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) = -\frac{1}{2\pi c} \cdot \frac{d}{d\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d\beta}{d\lambda} \right). \quad (\text{B.3})$$

Para fibras ópticas con guiado débil, la diferencia de índice dada en la Ec. (1.1) es aproximadamente:

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \quad (\text{B.4})$$

Diferenciando la Ec. (B.4) con respecto a la longitud de onda (λ), se encuentra que:

$$\frac{d\Delta}{d\lambda} = \frac{n_2 n_1' - n_1 n_2'}{n_2^2}, \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{d^2\Delta}{d\lambda^2} \approx \frac{n_2 n_1'' - n_1 n_2''}{n_2^2} - 2 \frac{n_2'}{n_2} \Delta', \quad (\text{B.6})$$

donde $n'_1 = dn_1/d\lambda$, $n'_2 = dn_2/d\lambda$, $n''_1 = d^2n_1/d\lambda^2$, $n''_2 = d^2n_2/d\lambda^2$ y $\Delta' = d\Delta/d\lambda$. Para fibras ópticas con guiado débil, $V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx kan_2\sqrt{2\Delta}$, por lo que:

$$\frac{dV}{d\lambda} = -\frac{V}{\lambda} + \frac{n'_2}{n_2} \cdot V + \frac{V\Delta'}{2\Delta}. \quad (\text{B.7})$$

De la definición del índice de refracción efectivo n_{eff} , se tiene que:

$$\beta = kn_{\text{eff}} \approx \frac{2\pi}{\lambda}n_2(1 + b\Delta); \quad (\text{B.8})$$

por lo que diferenciando β con respecto a λ , obtenemos:

$$\lambda^2 \frac{d\beta}{d\lambda} = -\beta\lambda \left(1 - \lambda \frac{n'_2}{n_2}\right) - 2\pi n_2 \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \left(1 - \lambda \frac{n'_2}{n_2}\right) + \pi \lambda n_2 \Delta' \left[b + \frac{d(Vb)}{dV}\right], \quad (\text{B.9})$$

$$-\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{d\beta}{d\lambda} = (n_2 - \lambda n'_2) + (n_2 - \lambda n'_2) \Delta \frac{d(Vb)}{dV} - \frac{1}{2} \lambda n_2 \Delta' \left[b + \frac{d(Vb)}{dV}\right]. \quad (\text{B.10})$$

Por último, al diferenciar la Ec. (B.10) por segunda vez, se obtiene:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{d\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d\beta}{d\lambda} \right) &= -\lambda n''_2 \left[1 + \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \right] + (n_2 - \lambda n'_2) \Delta' \frac{d(Vb)}{dV} \\ &+ (n_2 - \lambda n'_2) \Delta \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \left(-\frac{V}{\lambda} + \frac{n'_2}{n_2} V + \frac{V\Delta'}{2\Delta} \right) \\ &- \frac{1}{2} (n_2 - \lambda n'_2) \Delta' \left[b + \frac{d(Vb)}{dV} \right] \\ &- \frac{1}{2} \lambda n_2 \Delta' \left[\frac{db}{dV} + \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right] \left(-\frac{V}{\lambda} + \frac{n'_2}{n_2} V + \frac{V\Delta'}{2\Delta} \right) \\ &- \frac{1}{2} \lambda n_2 \left[b + \frac{d(Vb)}{dV} \right] \left(\frac{n_2 n''_1 - n_1 n''_2}{n_2^2} - 2 \frac{n'_2}{n_2} \Delta' \right). \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

En la Ec. (B.11) todos los términos que contienen la segunda derivada n''_1 y n''_2 son agrupados en un primer grupo, mientras que los términos que contienen $d^2(Vb)/dV^2$ y Δ' son agrupados en un segundo y tercer grupo [1]; por lo que la Ec. (B.11) se expresa como:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} \equiv D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) + D_p(\lambda), \quad (\text{B.12})$$

donde,

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c}n_2'' \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[b + \frac{d(bV)}{dV} \right] - \frac{\Delta}{2} \left[b - \frac{d(bV)}{dV} \right] \right\} - \frac{\lambda}{c}n_1'' \left\{ \frac{1}{2} \left[b + \frac{d(bV)}{dV} \right] \right\}, \quad (\text{B.13})$$

$$D_w(\lambda) = -\frac{n_2\Delta}{c\lambda} \left(1 - \frac{\lambda n_2'}{n_2} \right)^2 V \frac{d^2(bV)}{dV^2}, \quad (\text{B.14})$$

$$D_p(\lambda) = \frac{n_2\Delta'}{c} \left\{ \left(1 - \frac{\lambda n_2'}{n_2} + \frac{\lambda\Delta'}{4\Delta} \right) \left[V \frac{d^2(bV)}{dV^2} + \frac{d(bV)}{dV} - b \right] + \frac{\lambda n_2'}{n_2} \left(b + \frac{d(bV)}{dV} \right) \right\}. \quad (\text{B.15})$$

Referencias

- [1] W.A. Gambling, H. Matsumura, C.M. Ragdale, “*Mode Dispersion, Material Dispersion and Profile Dispersion in Graded-index Single-mode Fibers,*” IEE J. Microwaves, Optics Acoustics, Vol. 3, No. 6, pp.239-246, (1979).

Apéndice C

Método para el Ajuste de la Dispersión Cromática

Las mediciones obtenidas a partir de valores de retardo de grupo en función de la longitud de onda, permiten encontrar el valor de la dispersión cromática y su pendiente de dispersión por medio de la derivación de estos datos. La diferenciación es usualmente utilizada después de haber ajustado los datos por medio de un modelo matemático o un tipo de ajuste.

C.1 Definición de Ecuaciones y Coeficientes de Ajuste

La Tabla C.1 contiene una descripción general de los modelos matemáticos que son utilizados para el ajuste. La formulación polinómica es general y puede ser extendida a polinomios de orden mayor a través de los mismos principios, ocasionando que el ajuste permanezca estable.

La Tabla C.2 presenta las ecuaciones correspondientes a la pendiente de dispersión; mientras que la Tabla C.3 muestra las fórmulas para obtener la longitud de onda y la pendiente de cero dispersión para la fórmula de Sellmeier de tres términos y el polinomio de segundo orden.

Para el ajuste de tres términos de Sellmeier se puede utilizar como alternativa:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \lambda \left(1 - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^4} \right), \quad (\text{C.1})$$

para determinar el coeficiente de dispersión; mientras que para el ajuste del polinomio de segundo orden se puede utilizar como alternativa:

$$D(\lambda) = S_0(\lambda - \lambda_0). \quad (\text{C.2})$$

Tabla C.1: Definición de los tipos y coeficientes de ajuste; ecuaciones para el retardo de grupo y el coeficiente de dispersión.

Tipo de Ajuste	Retardo de Grupo, $\Delta\tau(\lambda)$	Coficiente de Dispersión, $D(\lambda)$
Sellmeier de tres términos	$A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}$	$2B\lambda - 2C\lambda^{-3}$
Sellmeier de cinco términos	$A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2} + D\lambda^4 + E\lambda^{-4}$	$2B\lambda - 2C\lambda^{-3} + 4D\lambda^3 - 4E\lambda^{-5}$
Polinomio de segundo orden	$A + B\lambda + C\lambda^2$	$B + 2C\lambda$
Polinomio de tercer orden	$A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3$	$B + 2C\lambda + 3D\lambda^2$
Polinomio de cuarto orden	$A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3 + E\lambda^4$	$B + 2C\lambda + 3D\lambda^2 + 4E\lambda^3$

Tabla C.2: Ecuaciones para la pendiente.

Tipo de Ajuste	Pendiente de la Dispersión, $S(\lambda)$
Sellmeier de tres términos	$2B + 6C\lambda^{-4}$
Sellmeier de cinco términos	$2B - 6C\lambda^{-4} + 12D\lambda^2 + 20E\lambda^{-6}$
Polinomio de segundo orden	$2C$
Polinomio de tercer orden	$2C + 6D\lambda$
Polinomio de cuarto orden	$2C + 6D\lambda + 12E\lambda^2$

Tabla C.3: Ecuaciones para la longitud de onda y pendiente de cero dispersión

Tipo de Ajuste	Longitud de Onda de Cero Dispersión, λ_0	Pendiente de Cero Dispersión, S_0
Sellmeier de tres términos	$(C/B)^{1/4}$	$8B$
Polinomio de segundo orden	$-B/(2C)$	$2C$

C.2 Procedimiento de Ajuste

Para un ajuste numérico robusto el eje de las abcisas (longitud de onda) debe ser convertido a valores con un intervalo reducido por medio de un cambio de coordenadas, antes de completar la regresión por mínimos cuadrados. Después de la regresión los parámetros de ajuste deben de ser convertidos a su escala original en longitud de onda, antes de completar cualquier derivación.

Una implementación adecuada de la regresión por mínimos cuadrados debe ser elegida para resolver el problema de ajuste. El método debe ser estable con respecto al ruido y otros errores introducidos durante la medición del retardo de grupo. Dependiendo de la fuente de entrada de los datos, las ecuaciones para el retardo de grupo son utilizadas.

Se debe tomar en consideración el incluir un número suficiente de puntos para el ajuste. Cuando el orden de ajuste y el número de puntos son comparables, el ajuste no conllevará a resultados precisos.

Si el ajuste se realiza para los datos de retardo de grupo, los datos para la dispersión cromática pueden ser calculados a partir de las ecuaciones de la Tabla C.1, utilizando los coeficientes encontrados a partir del ajuste. La extrapolación realizada a longitudes de onda fuera de la región de ajuste debe ser utilizada cuidadosamente, conforme el ajuste pueda tener un comportamiento no físico en los puntos fuera de esta región.

La pendiente de dispersión puede ser calculada a partir de las ecuaciones de la Tabla C.2, utilizando los coeficientes encontrados a partir del ajuste.

Anexo A

Fibra Óptica con Dispersión Desplazada Corning® SMF/DSTM CPC6

Especificaciones Ópticas[1]

Atenuación

Atenuación vs Longitud de Onda		
Intervalo de Trabajo, (nm)	Longitud de Onda de Referencia, λ , (nm)	Incremento Máximo, α , (dB·km ⁻¹)
1 525 - 1 575	1 550	0.05

Dispersión

- Longitud de onda de cero dispersión (λ_0): $1\ 535\ \text{nm} \leq \lambda_0 \leq 1\ 565\ \text{nm}$
- Pendiente a la longitud de onda de cero dispersión (S_0): $\leq 0.085\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$
- Dispersión Total $\leq 2.7\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, en el intervalo de trabajo de 1 525 nm a 1 575 nm

Cálculo de la Dispersión
Dispersión= $D(\lambda) = S_0(\lambda - \lambda_0)$ [ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹], $1\ 500\ \text{nm} \leq \lambda \leq 1\ 600\ \text{nm}$

Atenuación a 1 310 nm:
0.38 dB·km⁻¹

Índice de grupo efectivo (N_{eff}):
1.471 8 a 1 310 nm
1.471 1 a 1 550 nm

Apertura Numérica:
0.17

Parámetro de Resistencia a Fatiga (n_d):
20

**Longitud de onda
de cero dispersión (λ_0):**
1 550 nm

**Fuerza de la tira
del recubrimiento:**
Mojada: 0.6 lb (2.7 N)

**Pendiente a la longitud de onda
de cero dispersión (S_0):**
0.075 ps·nm⁻²·km⁻¹

Referencias

- [1] Corning Incorporated, “*Corning® SMF/DSTM CPC6 Single-mode Dispersion-shifted Optical Fiber*”, Product Information PI1037, Corning Incorporated, New York, USA, (1998).

Anexo B

Fibra Óptica Corning® SMF-28e®

Especificaciones Ópticas[1]

Atenuación

Atenuación vs Longitud de Onda		
Intervalo de Trabajo, (nm)	Longitud de Onda de Referencia, λ , (nm)	Incremento Máximo, α , (dB·km ⁻¹)
1 285 - 1 330	1 310	0.03
1 525 - 1 575	1 550	0.02

Dispersión

- Longitud de onda de cero dispersión (λ_0): $1\,302\text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1\,322\text{ nm}$
- Pendiente a la longitud de onda de cero dispersión (S_0): $\leq 0.089\text{ ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$

Cálculo de la Dispersión
Dispersión= $D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, $1\,200\text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,625\text{ nm}$

Diferencia de Índice de Refracción: 0.36 %	Índice de grupo efectivo(N_{eff}): 1.467 7 a 1 310 nm 1.468 2 a 1 550 nm
Apertura Numérica: 0.14	Parámetro de Resistencia a Fatiga (N_d): 20
Longitud de onda de cero dispersión (λ_0): 1 313 nm	Fuerza de la tira del recubrimiento: Mojada: 0.6 lb (3 N)
Pendiente a la longitud de onda de cero dispersión (S_0): 0.086 ps·nm ⁻² ·km ⁻¹	

Referencias

[1] Corning Incorporated, “*Corning® SMF-28e® Optical Fiber*”, Corning Incorporated, New York, USA, (2005).