



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

G.650.2

(06/2002)

SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN,
SISTEMAS Y REDES DIGITALES

Características de los medios de transmisión – Cables de
fibra óptica

**Definiciones y métodos de prueba de los
atributos estadísticos y no lineales de fibras y
cables monomodo**

Recomendación UIT-T G.650.2

RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE G
SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
CARACTERÍSTICAS GENERALES COMUNES A TODOS LOS SISTEMAS ANALÓGICOS DE PORTADORAS	G.200–G.299
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES DE PORTADORAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.300–G.399
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES EN RADIOENLACES O POR SATÉLITE E INTERCONEXIÓN CON LOS SISTEMAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.400–G.449
COORDINACIÓN DE LA RADIOTELEFONÍA Y LA TELEFONÍA EN LÍNEA	G.450–G.499
EQUIPOS DE PRUEBAS	G.500–G.599
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.600–G.699
Generalidades	G.600–G.609
Cables de pares simétricos	G.610–G.619
Cables terrestres de pares coaxiales	G.620–G.629
Cables submarinos	G.630–G.649
Cables de fibra óptica	G.650–G.659
Características de los componentes y los subsistemas ópticos	G.660–G.699
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.700–G.799
REDES DIGITALES	G.800–G.899
SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DIGITALES DE LÍNEA	G.900–G.999
CALIDAD DE SERVICIO Y DE DE TRANSMISIÓN	G.1000–G.1999
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.6000–G.6999
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.7000–G.7999
REDES DIGITALES	G.8000–G.8999

Para más información, véase la Lista de Recomendaciones del UIT-T.

Recomendación UIT-T G.650.2

Definiciones y métodos de prueba de los atributos estadísticos y no lineales de fibras y cables monomodo

Resumen

Esta Recomendación contiene definiciones de los parámetros estadísticos y no lineales de fibras y cables monomodo. También contiene métodos de prueba de referencia y otros métodos de prueba posibles para la caracterización de dichos parámetros.

Historia

- 1993 Se suprimen las definiciones y los métodos de prueba de las Recomendaciones sobre fibras ópticas monomodo, como por ejemplo de la Rec. UIT-T G.652, que se utilizan para producir la versión inicial de la Rec. UIT-T G.650.
- 1997 La segunda versión de la Rec. UIT-T G.650 añade definiciones y métodos de prueba para la dispersión por modo de polarización, así como los apéndices I, II y III. También se añade la determinación mejorada de la longitud de onda de corte (ahora 5.3.1.3.4).
- 2000 La tercera versión estableció métodos de prueba de referencia y alternativos para la dispersión por modo de polarización, se modificaron las definiciones y los métodos de prueba para el error de concentricidad del núcleo (3.4 y 5.2), y se añadió la cláusula 5.1.4 y los apéndices IV, V y VI.
- 2002 A fin de facilitar el mantenimiento, la Rec. UIT-T G.650 se dividió en varias Recomendaciones con un contenido más limitado. La Rec. UIT-T G.650.1 contiene definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos de fibras ópticas monomodo.

Orígenes

La Recomendación UIT-T G.650.2, revisada por la Comisión de Estudio 15 (2001-2004) del UIT-T, fue aprobada por el procedimiento de la Resolución 1 de la AMNT el 29 de junio de 2002.

PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB.

© UIT 2002

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

ÍNDICE

		Página
1	Alcance	1
2	Referencias	1
2.1	Referencias normativas	1
2.2	Referencias informativas	1
3	Términos y definiciones	2
3.1	Definiciones generales.....	2
3.1.1	Dispersión por modo de polarización (PMD, <i>polarization mode dispersion</i>)	2
3.2	Tipos de métodos de prueba	4
4	Abreviaturas y acrónimos	4
5	Métodos de prueba.....	5
5.1	Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización	5
5.1.1	Método de prueba de referencia: Técnica de evaluación de parámetros de Stokes	5
5.1.2	Primera alternativa del método de prueba: método del estado de polarización (SOP)	11
5.1.3	Segunda alternativa de método de prueba: Técnica interferométrica	14
5.1.4	Técnica del analizador fijo	19
5.2	Métodos de prueba para atributos no lineales	28
Apéndice I – Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma.....		29
Apéndice II – Atributos no lineales		31
II.1	Consideraciones básicas	31
II.2	Área efectiva (A_{eff})	31
II.3	Factor de corrección k	32
II.4	Coefficiente no lineal (n_2/A_{eff}).....	35
II.5	Dispersión de Brillouin estimulada	35
II.5.1	Descripción del efecto	35
II.5.2	Estimación del umbral de SBS en las fibras monomodo	36
II.6	Otros efectos	39
Apéndice III – Métodos de prueba del área efectiva (A_{eff}).....		39
III.1	Técnica de exploración del campo lejano (FFS)	39
III.1.1	Generalidades	39
III.1.2	Aparato de prueba.....	39
III.1.3	Procedimiento de medición	40
III.1.4	Presentación de resultados.....	42
III.2	Técnica de apertura variable (VA, <i>variable aperture</i>)	42

	Página
III.2.1 Generalidades	42
III.2.2 Aparato de prueba.....	42
III.2.3 Procedimiento de medición	44
III.2.4 Presentación de resultados.....	46
III.3 Técnica de exploración del campo cercano (NFS, <i>near-field scan</i>).....	46
III.3.1 Generalidades	46
III.3.2 Aparato de pruebas	47
III.3.3 Procedimiento de medición	47
III.3.4 Presentación de los resultados	48

Recomendación UIT-T G.650.2

Definiciones y métodos de prueba de los atributos estadísticos y no lineales de fibras y cables monomodo

1 Alcance

Esta Recomendación contiene definiciones y métodos de prueba adecuados principalmente para las mediciones de fabricación de los atributos estadísticos y no lineales de fibras ópticas y cables monomodo descritos en las Recomendaciones UIT-T G.652, G.653, G.654 y G.655. En general, las definiciones y los métodos de prueba aquí descritos no son apropiados para las fibras multimodo que son objeto de la Rec. UIT-T G.651. Algunos de los métodos de prueba, cuando se indique especialmente, también se podrán utilizar para caracterizar componentes ópticos discretos, como los que se describen en la Rec. UIT-T G.671. La Rec. UIT-T G.650.1 contiene definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos.

2 Referencias

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes.

2.1 Referencias normativas

- [1] Recomendación UIT-T G.652 (2000), *Características de un cable de fibra óptica monomodo.*
- [2] Recomendación UIT-T G.653 (2000), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada.*
- [3] Recomendación UIT-T G.654 (2002), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*
- [4] Recomendación UIT-T G.655 (2000), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada no nula.*
- [5] Recomendación UIT-T G.650.1 (2002), *Definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos de fibras y cables monomodo.*

2.2 Referencias informativas

- [6] Recomendación UIT-T G.671 (2002), *Características de transmisión de los componentes y subsistemas ópticos.*
- [7] Recomendación UIT-T G.663 (2000), *Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*

3 Términos y definiciones

3.1 Definiciones generales

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

3.1.1 Dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*)

3.1.1.1 el fenómeno de la PMD: La dispersión por modo de polarización es un tiempo de retardo de grupo diferencial (DGD, *differential group delay*) entre dos modos ortogonalmente polarizados, que causa la dispersión de los impulsos en los sistemas digitales y distorsiones en los sistemas analógicos.

NOTA 1 – En las fibras simétricas circulares ideales, los dos modos de polarización se propagan con la misma velocidad. Sin embargo, las fibras reales no pueden ser perfectamente circulares y pueden sufrir esfuerzos locales; por consiguiente, la luz que se propaga se divide en dos modos de polarización locales que viajan a velocidades diferentes. Estas características de asimetría varían aleatoriamente a lo largo de la fibra y en el tiempo, lo cual produce un comportamiento estadístico de la PMD. Puede deducirse de las estadísticas un valor "máximo" del DGD.

NOTA 2 – Para una fibra determinada, instalada arbitrariamente, en un momento determinado y a una frecuencia óptica determinada, siempre existen dos estados de polarización denominados estados de polarización principales (PSP, véase 3.1.1.2). La dispersión de impulsos debida a la PMD desaparece si sólo es excitado un PSP. Por el contrario, la máxima dispersión de impulsos debida a la PMD se produce cuando ambos PSP son excitados por igual, y corresponde a la diferencia de los retardos de grupo asociados con los dos PSP.

3.1.1.2 estados de polarización principales (PSP, *principal states of polarization*): Si la fibra óptica se utiliza a una longitud de onda mayor que la longitud de onda de corte en un régimen cuasimonocromático, los PSP de salida son los dos estados de polarización de salida ortogonales para los cuales las polarizaciones de salida no varían cuando se modifica ligeramente la frecuencia óptica. Los correspondientes estados de polarización de entrada ortogonales son los PSP de entrada.

NOTA 1 – La birrefringencia local cambia a lo largo de la fibra, y el PSP depende del largo de fibra (al contrario que en las fibras de alta birrefringencia, denominadas fibras hi-bi).

NOTA 2 – Los PSP son vectores complejos aleatorios que dependen del tiempo y la frecuencia óptica. Sin embargo, según la definición, existe una pequeña gama de frecuencias (anchura de banda de PSP) en la cual pueden considerarse prácticamente constantes.

NOTA 3 – Si una señal tiene una anchura de banda mayor que la de los PSP, aparecen efectos PMD de segundo orden. Pueden implicar una despolarización del campo de salida, junto con un efecto de dispersión cromática adicional.

3.1.1.3 retardo de grupo diferencial ($|\delta\tau(\nu)| = \text{ps}$): El retardo de grupo diferencial (DGD) es la diferencia de tiempo en los retardos de grupo de los PSP.

NOTA – El DGD entre dos modos es dependiente de la longitud de onda y puede variar en el tiempo debido a las condiciones ambientales. Son típicas las variaciones de orden de magnitud uno. La distribución estadística de los retardos de grupos diferenciales viene determinada por la longitud media de acoplamiento de modos de polarización, h la birrefringencia modal media, y el grado de coherencia de la fuente. Para un cable de fibra óptica estándar de longitud L , tal que $L \gg h$, como suele ocurrir en la práctica, se produce un fuerte acoplamiento entre los modos de polarización. En dicho caso, la distribución de probabilidades de los DGD es una distribución de Maxwell.

3.1.1.4 retardo de la dispersión por nodo de polarización: Se considera que las tres definiciones siguientes de retardo de PMD son equivalentes dentro de los límites de reproducibilidad de la medición en todos los casos prácticos.

El retardo P_s del segundo momento de PMD se define como dos veces la desviación media cuadrática (2σ) de la distribución de intensidad luminosa dependiente del tiempo $I(t)$ a la salida de la fibra, sin la contribución de dispersión cromática, cuando se inyecta un impulso corto en la fibra, es decir:

$$P_s = 2 \left(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} - \left(\frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3-1)$$

t representa el tiempo de llegada a la salida de la fibra.

NOTA 1 – En los casos prácticos, la anchura del impulso inyectado y el ensanchamiento debido a la dispersión cromática deben desconvolucionarse para obtener P_s . Para más detalles, véase el método de la prueba interferométrica de la PMD en 5.1.3.

El retardo de grupo diferencial medio P_m es el retardo de grupo diferencial $\delta\tau(\nu)$ entre los estados de polarización principales, promediados en la gama de frecuencias ópticas (ν_1, ν_2):

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu) \nu d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (3-2)$$

NOTA 2 – En general, la promediación en la gama de temperaturas, de tiempo o de perturbaciones mecánicas es una alternativa aceptable a la promediación en la gama de frecuencias.

El retardo de grupo diferencial cuadrático medio P_r se define como:

$$P_r = \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

3.1.1.5 Coeficiente de PMD: Se distinguirán dos casos:

– Acoplamiento de modos débil (fibras cortas):

$$PMD_c [ps/km] = P_s / L, P_m / L, \text{ o } P_r / L \quad (3-4)$$

– Acoplamiento de modos fuerte (fibras largas):

$$PMD_c [ps/\sqrt{km}] = P_s / \sqrt{L}, P_m / \sqrt{L}, \text{ o } P_r / \sqrt{L} \quad (3-5)$$

NOTA – El acoplamiento de modos fuerte suele observarse casi siempre en cables instalados de más de 2 km de longitud. En condiciones normales, los retardos de grupo diferenciales son funciones aleatorias de la longitud de onda óptica, del tiempo, y varían aleatoriamente de una fibra a otra. Por tanto, en la mayoría de los casos, el coeficiente de PMD ha de calcularse utilizando la fórmula de la raíz cuadrada (3-5).

En las fibras de alta birrefringencia no se observa una distribución estadística de los retardos de grupo diferenciales porque hay un acoplamiento de modos casi nulo o muy débil. Los retardos de grupo diferenciales suelen ser constantes.

Sin embargo, en algunos casos se observa un acoplamiento intermedio en los cables instalados. Se está estudiando una clasificación exacta.

Para estimar el impacto en la calidad de funcionamiento del sistema, tiene que establecerse si los retardos de grupo diferenciales son constantes o están estadísticamente distribuidos.

Los valores instantáneos de los retardos de grupo diferenciales limitan la capacidad de transmisión de los sistemas digitales. La derivada del retardo de grupo diferencial con respecto a la longitud de onda limita la relación señal/ruido en los sistemas analógicos. Por tanto, la distribución estadística de los retardos de grupo diferenciales (en función del tiempo y/o de la longitud de onda) desempeña un papel importante en la predicción de la calidad de funcionamiento del sistema.

3.2 Tipos de métodos de prueba

3.2.1 método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*): Método por el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica, de una manera que se ajusta estrictamente a la definición de esta característica, y que permite obtener resultados precisos, reproducibles y asimilables a la utilización práctica.

3.2.2 método de prueba alternativo (ATM, *alternative test method*): Método por el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica, de una manera que se ajusta a la definición de esta característica, y que permite obtener resultados reproducibles y asimilables al método de prueba de referencia y a la utilización práctica.

4 Abreviaturas y acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes siglas.

ATM	Método de prueba alternativo (<i>alternative test method</i>)
DGD	Retardo de grupo diferencial (<i>differential group delay</i>)
DWDM	Multiplexación por división de longitud de onda densa (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
ECL	Láser de cavidad externa (<i>external cavity laser</i>)
FWHM	Anchura espectral entre puntos de amplitud mitad (<i>full width at half maximum</i>)
GPa	GigaPascal
LD	Diodo láser (<i>laser diode</i>)
LED	Diodo fotoemisor (<i>light emitting diode</i>)
MFD	Diámetro del campo modal (<i>mode field diameter</i>)
NFP	Diagrama de campo próximo (<i>near-field pattern</i>)
OTDR	Reflectómetro óptico en el ámbito temporal (<i>optical time domain reflectometer</i>)
PMD	Dispersión por modo de polarización (<i>polarization mode dispersion</i>)
PS	Pantalla esférica de Poincaré (<i>Poincaré sphere</i>)
PSP	Estado de polarización principal (<i>principal state of polarization</i>)
RTM	Método de prueba de referencia (<i>reference test method</i>)
SOP	Estado de polarización (<i>state of polarization</i>)
TBD	Por determinar (<i>to be determined</i>)
WDM	Multiplexación por división de longitud de onda (<i>wavelength division multiplexing</i>)

5 Métodos de prueba

En esta parte se indican en general, para cada parámetro, tanto el método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*) como uno o varios métodos de prueba alternativos (ATM, *alternative test method*), entendiéndose que tanto el RTM como los ATM pueden resultar adecuados para los fines normales de aceptación de productos. Sin embargo, si al emplear un ATM surgiese cualquier discrepancia, se recomienda emplear el RTM para obtener los resultados de medición definitivos.

NOTA – El aparato y el procedimiento indicados abarcan solamente las características básicas esenciales de los métodos de prueba. Se supone que la instrumentación detallada incorporará todas las medidas necesarias para garantizar la estabilidad, la eliminación del ruido, la relación señal/ruido, etc.

5.1 Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización

5.1.1 Método de prueba de referencia: Técnica de evaluación de parámetros de Stokes

5.1.1.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*) de las fibras ópticas monomodo. Se determina el cambio de estado de polarización (SOP, *state of polarization*) de salida con la longitud de onda. Este cambio puede caracterizarse mediante el Eigenanálisis de la matriz de Jones (JME, *Jones Matrix Eigenanalysis*) o la rotación del vector SOP en la pantalla esférica de Poincaré (PS, *Poincaré sphere*). Puede aplicarse tanto a secciones de fibra cortas o largas, independientemente del nivel de acoplamiento del modo de polarización. En algunas circunstancias, pueden necesitarse mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria. Este método se limita a longitudes de onda mayores o iguales que aquella a la que la fibra es efectivamente monomodo.

Para el caso en que exista un fuerte acoplamiento de modos, está en estudio un análisis más completo del método de la esfera de Poincaré.

Cuando se miden fibras en movimiento (por ejemplo, fibras en OPGW), tal vez sea más apropiado utilizar el método interferométrico que la función de resolución de discrepancias del método de prueba de referencia (RTM).

5.1.1.2 Aparato de prueba

Véase en la figura 1 un diagrama esquemático de los principales componentes del sistema de medición típico.

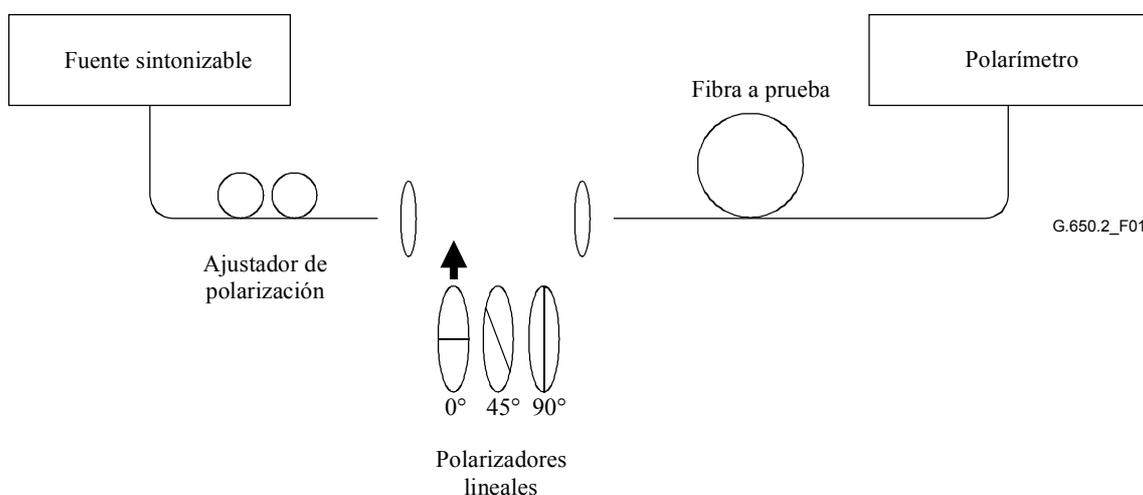


Figura 1/G.650.2 – Diagrama esquemático del equipo (típico)

5.1.1.2.1 Fuente luminosa

Se utiliza un láser unilínea o una fuente de banda estrecha que sea sintonizable en toda la gama de longitudes de onda de medición deseada. La distribución espectral será suficientemente estrecha para que la luz que emerge de la fibra a prueba permanezca polarizada bajo todas las condiciones de la medición. Se prefiere un grado de polarización (DOP, *degree of polarization*) del 90% o mayor, aunque pueden efectuarse mediciones menos precisas con valores de sólo el 25%. Para un determinado valor del retardo de grupo diferencial $\Delta\tau$, el menor grado de polarización que puede resultar viene dado por:

$$DOP = 100e^{-\frac{1}{4\ln 2} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_0^2} \right)^2} \quad (5-1)$$

suponiendo un espectro gaussiano de anchura $\Delta\lambda_{FWHM}$ centrada en λ_0 . DOP se expresa como porcentaje.

5.1.1.2.2 Ajustador de polarización

Sigue al láser un ajustador de polarización, que se fija para proporcionar a los polarizadores luz con polarización aproximadamente circular, de manera que los polarizadores nunca crucen la polarización con su luz de entrada. Ajustar la polarización como sigue. Fijar la longitud de onda del láser sintonizable al centro de la gama a medir. Insertar cada uno de los tres polarizadores en el haz y efectuar tres mediciones de potencia correspondientes a la salida de los polarizadores. Ajustar la polarización de la fuente mediante el ajustador de polarización de manera que las tres potencias queden aproximadamente en una gama de 3 dB entre sí. En una versión de haz abierto de la configuración, una placa de ondas puede efectuar el ajuste de polarización.

5.1.1.2.3 Polarizadores

Se disponen tres polarizadores lineales en ángulos relativos de aproximadamente 45 grados, que serán insertados sucesivamente en el haz luminoso. Se conocerán los ángulos relativos reales.

5.1.1.2.4 Dispositivo óptico de entrada

Puede emplearse un sistema de lente óptica o un rabillo de fibra monomodo para excitar la fibra a prueba.

5.1.1.2.5 Rabillo de fibra

Si se utilizan rabillos de fibra, deben evitarse los efectos de interferencia debidos a las reflexiones, lo cual puede exigir materiales de adaptación de índice o cortes angulados. Los rabillos serán monomodo.

5.1.1.2.6 Sistema de lente óptica

Si se utiliza un sistema de lente óptica, se utilizarán medios adecuados, tales como mordazas de vacío, se utilizarán para sujetar establemente el extremo de entrada de la fibra.

5.1.1.2.7 Supresor de modos de revestimiento

Suprimir cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra a prueba. La funda de la fibra la suprime casi siempre; en otro caso, emplear un dispositivo que elimine la potencia de modos de revestimiento.

5.1.1.2.8 Dispositivo óptico de salida

Acoplar toda la potencia emitida por la fibra de prueba al polarímetro. Un sistema de lente óptica, un empalme a tope a un rabillo de fibra monomodo, o un acoplamiento de adaptación de índice efectuado directamente al sistema detector son ejemplos de medios que pueden utilizarse.

5.1.1.2.9 Polarímetro

Usar un polarímetro para medir los tres estados de polarización de salida correspondientes a la inserción de cada uno de los tres polarizadores. La gama de longitudes de onda del polarímetro incluirá las longitudes de onda producidas por la fuente luminosa.

5.1.1.3 Procedimiento de medición

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra óptica monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y de los rabillos a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición. La estabilidad de temperatura del dispositivo de prueba puede observarse siguiendo el estado de polarización de salida de la fibra de prueba en una pantalla esférica de Poincaré. En un periodo de tiempo correspondiente a un par adyacente de mediciones de la matriz de Jones, la variación de la polarización de salida debe ser pequeña con relación a la variación producida por un incremento de longitud de onda.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente de PMD no es relevante.

Si fuera importante minimizar el acoplamiento adicional de modos será necesario soportar de alguna forma la fibra no cableada (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm), con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 15 g).

Pueden aplicarse condiciones de fibra alternativas (por ejemplo, una bobina de transporte de fibras) en caso de que se haya demostrado que se obtienen resultados comparables.

Acoplar la fuente luminosa a los polarizadores mediante el ajustador de polarización.

Acoplar la salida de los polarizadores a la entrada de la fibra a prueba.

Acoplar la salida de la fibra a prueba a la entrada del polarímetro.

Seleccionar el intervalo de longitudes de onda $\Delta\lambda$ en el cual han de efectuarse las mediciones de la matriz de Jones. El máximo valor admisible de $\Delta\lambda$ (alrededor de λ_0) es fijado por el requisito:

$$\Delta\tau_{\text{máx}}\Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (5-2)$$

donde $\Delta\tau_{\text{máx}}$ es el máximo retardo de grupo diferencial (DGD) esperado dentro de la gama de longitudes de onda de medición. Por ejemplo, el producto del máximo DGD y del intervalo de longitud de onda debe ser inferior a 4 ps.nm a 1550 nm y también inferior a 2,8 ps.nm a 1300 nm. Este requisito asegura que de una longitud de onda de prueba a la siguiente, el estado de polarización de salida gira menos de 180 grados en torno al eje de estados principales de la pantalla esférica de Poincaré. Si no puede efectuarse una estimación aproximada de $\Delta\tau_{\text{máx}}$, efectuar una serie de mediciones de muestra en la gama de longitudes de onda, en la que cada medición utilice un par poco espaciado de longitudes de onda apropiado a la anchura espectral y un paso de sintonización mínimo de la fuente óptica. Multiplicar el máximo DGD medido de este modo por un factor de seguridad de tres, sustituir $\Delta\tau_{\text{máx}}$ por este valor en la expresión anterior y calcular el valor de $\Delta\lambda$ a utilizar en la medición real. Si se cree que el intervalo de longitudes de onda utilizado para una medición era excesivamente largo, la medición puede repetirse con un intervalo de longitudes de onda menor. Si la forma de la curva de DGD en función de la longitud de onda y el DGD medio son prácticamente invariables, el intervalo de longitudes de onda original era satisfactorio.

Reunir los datos de medición. Insertar cada uno de los polarizadores a las longitudes de ondas seleccionadas y registrar los parámetros de Stokes correspondientes procedentes del polarímetro.

5.1.1.4 Cálculos o interpretación del resultado

Existen dos formas de analizar los parámetros de Stokes (JME o PS) medidos según se indica en 5.1.1.3.

5.1.1.4.1 Eigenanálisis de la matriz de Jones

5.1.1.4.1.1 Cálculos

A partir de los parámetros de Stokes, calcular la matriz de Jones de respuesta a cada longitud de onda. Para cada intervalo de longitud de onda, calcular el producto de la matriz de Jones $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega)$ a la frecuencia óptica superior y la matriz de Jones inversa $\mathbf{T}^{-1}(\omega)$ a la frecuencia óptica inferior. La frecuencia óptica angular ω se expresa en radianes por segundo y está relacionada con la frecuencia óptica ν por $\omega = 2\pi\nu$. Calcular el DGD $\Delta\tau$ para el intervalo de longitudes de onda considerado mediante la expresión siguiente:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (5-3)$$

donde ρ_1 y ρ_2 son los valores propios complejos de $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega) \mathbf{T}^{-1}(\omega)$ y Arg designa la función argumento, es decir, $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$. Para fines de análisis de datos, cada valor de DGD se toma para que represente el retardo de grupo diferencial en el punto central del intervalo de longitudes de onda correspondiente. La serie de valores de DGD obtenidos a partir de una serie de intervalos de longitudes de onda a través de una gama de longitudes de onda constituye una sola medición.

5.1.1.4.1.2 Representación del DGD en función de la longitud de onda

Los datos pueden representarse en formato x-y con el DGD en el eje vertical y la longitud de onda en el eje horizontal, como se muestra en la figura 2. Los datos también pueden representarse en un histograma, como se muestra en la figura 3.

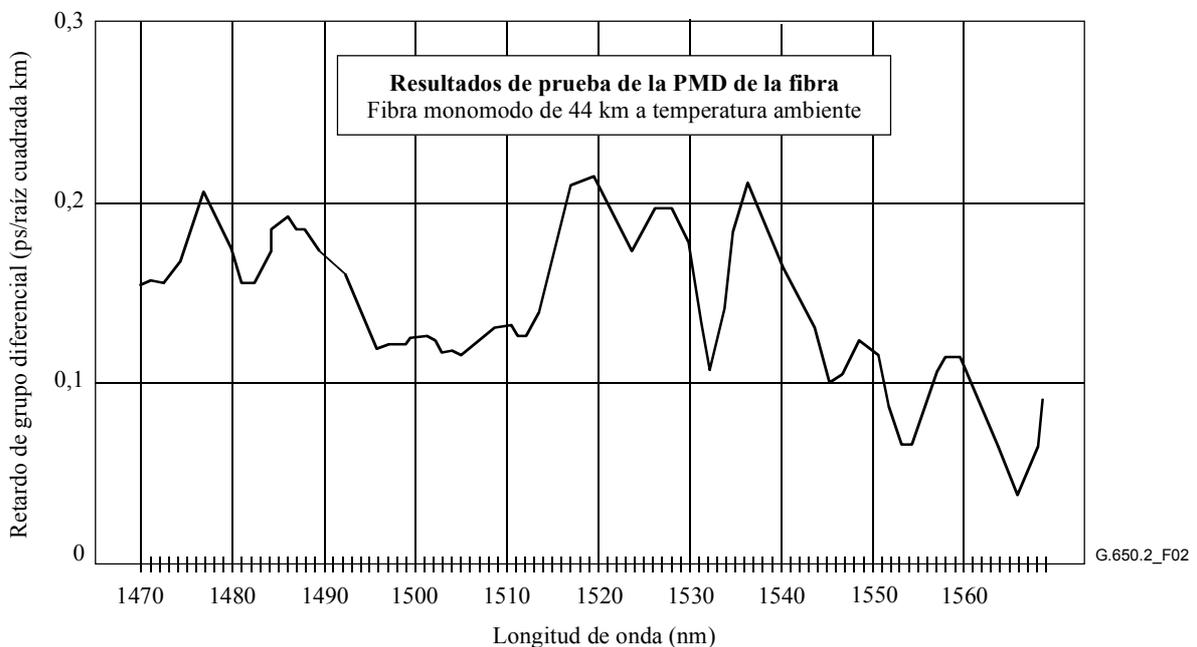
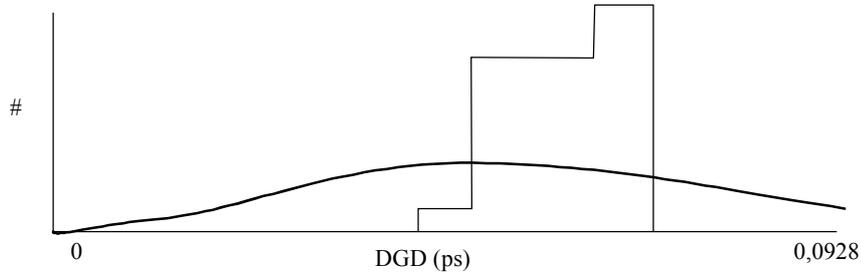
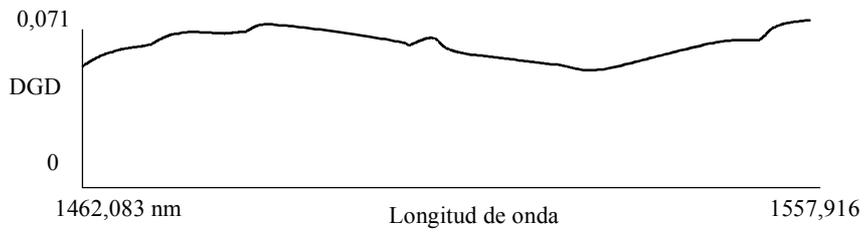
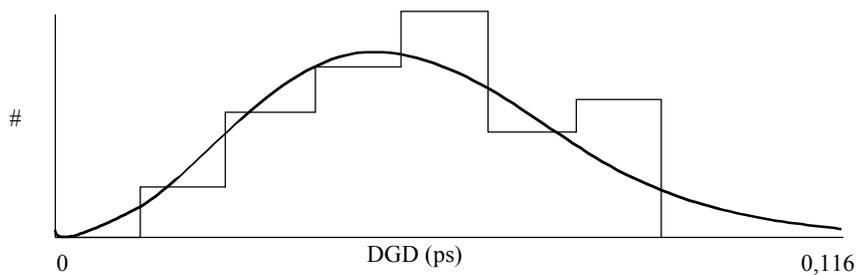
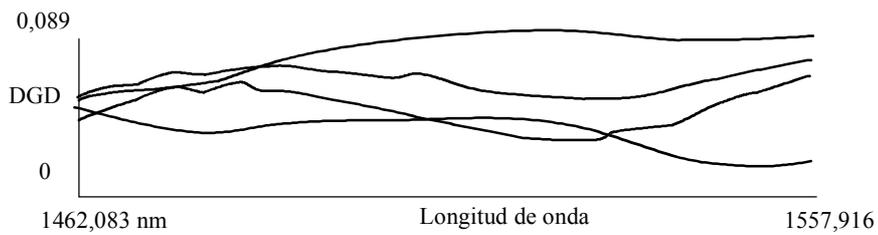


Figura 2/G.650.2 – DGD medido de una fibra monomodo de 44 km



a) Medición única en 24 intervalos de una fibra bobinada



G.650.2_F03

b) Cuatro mediciones en 24 intervalos de la misma bobina realizada a diferentes temperaturas del horno

Se superpone a cada histograma una curva de Maxwell. Las curvas del DGD medido en función de la longitud de onda se muestran a modo de referencia

Figura 3/G.650.2 – Ejemplos de datos de DGD en forma de histograma

5.1.1.4.1.3 DGD medio

El valor de PMD esperado $\langle \Delta\tau \rangle_\lambda$ de una sola medición es simplemente el promedio de los valores de medición de DGD correspondientes a los intervalos de longitud de onda. Si se efectúan múltiples mediciones en diferentes condiciones para aumentar el tamaño de la muestra, se utiliza el promedio conjunto.

5.1.1.4.1.4 Coeficiente de PMD

La PMD puede expresarse como un coeficiente de PMD de fibra corta o larga, dependiendo del tipo de acoplamiento de modos presentado por la muestra de fibra. En ausencia de acoplamiento de modos, utilizar el coeficiente de "pequeña longitud" de la ecuación (3-4). Para fibras con acoplamiento de modos aleatorio, utilícese el coeficiente de "gran longitud" de la ecuación (3-5).

Si la desviación típica de $\Delta\tau$ en la gama de longitudes de onda de medición es menor que 1/10 de la media, se considera que la fibra a prueba presenta acoplamiento de modos despreciable (un dispositivo "determinístico") y la PMD puede expresarse por el coeficiente PMD de "pequeña longitud" $\langle \Delta\tau \rangle / L$.

5.1.1.4.2 Análisis de la pantalla esférica de Poincaré (PS)

a) La traza de la pantalla esférica de Poincaré que describe la evolución del estado de polarización (SOP) con la longitud de onda se reconstruirá a partir de los parámetros de Stokes medidos (S_0, S_1, S_2 y S_3). S_0, S_1, S_2 y S_3 corresponden a la potencia óptica total, el SOP lineal de $\theta = 0^\circ$, el SOP lineal de $\theta = 45^\circ$ y el SOP circular derecho, respectivamente. En la figura 4, (o) y (●) son arcos de SOP de valores medidos debidos a la PMD en función de la longitud de onda λ . Aquí, P_{a-a} es el estado de polarización principal (PSP, *principal state of polarization*).

La traza se analizará trozo a trozo, considerando los intervalos de longitud de onda (que pueden incluir más de dos pasos de longitud de onda), de manera que se mantengan las hipótesis que aseguran la existencia de PSP bien determinados. El eje del PSP local en la pantalla esférica de Poincaré y el ángulo de rotación correspondiente $\Delta\Phi$ causado por la variación de longitud de onda considerada $\Delta\lambda$ se determinan a continuación por sencillas consideraciones geométricas. Un posible procedimiento podría ser el análisis de la traza de la pantalla esférica de Poincaré considerando los puntos medidos tres a tres y encontrando el punto de intersección de los ejes de los segmentos identificados por los dos pares de puntos. A partir de este punto, es posible calcular el valor de $\Delta\Phi$ por medio de relaciones trigonométricas.

La $\delta\tau$ de DGD o PMD viene dada por:

$$\delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\Phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \quad (5-4)$$

donde $\Delta\Phi$, Δf y c son la diferencia de fase (arco del vector de Stokes en la pantalla esférica de Poincaré), la diferencia de frecuencia, y la velocidad de la luz en el espacio libre, respectivamente, y λ_1 y λ_n son las longitudes de onda inicial y final de $\Delta\lambda$, respectivamente.

- b) El DGD (en ps) se calculará en función de la longitud de onda. Los datos también pueden representarse en forma de histograma, representando la distribución de la frecuencia de aparición de los valores de DGD medidos.
- c) El valor medio de los DGD medidos, $\langle \delta\tau \rangle_\lambda$ se calculará en la gama de longitudes de onda considerada. Para aumentar el tamaño de la muestra, pueden efectuarse múltiples mediciones.

- d) Los coeficientes de PMD se calcularán mediante una normalización adecuada del valor medio medido de la DGD $\langle \delta\tau \rangle_\lambda$ según la longitud L (en km) de la fibra probada, que suele darse en unidades de raíz cuadrada de kilómetro.

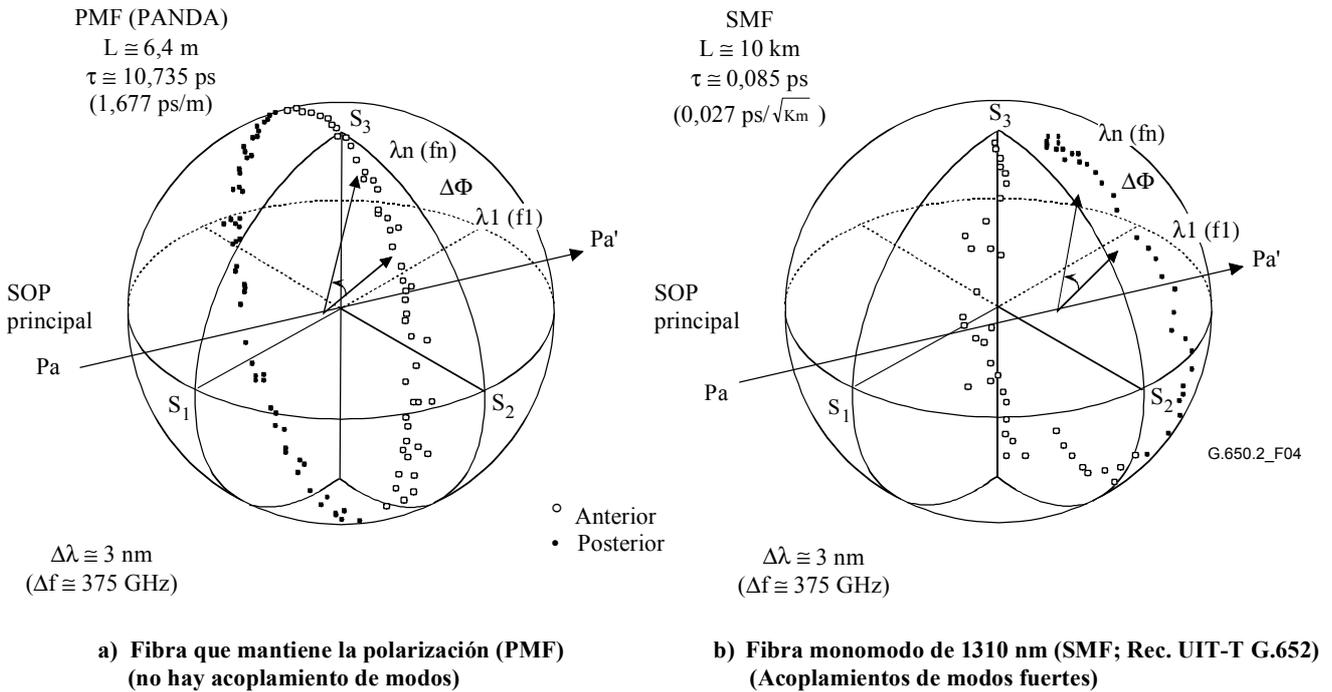


Figura 4/G.650.2 – Representación por el método de la pantalla esférica de Poincaré de dos ejemplos de mediciones de la PMD

5.1.1.5 Presentación de los resultados

- Identificación de la muestra medida.
- Longitud de prueba.
- Gama de longitudes de onda sobre las cuales se realizaron las mediciones, tamaño del paso de longitud de onda y número de puntos de muestra.
- Configuración física de la fibra o muestra de cable.
- Tipo de modo de acoplamiento (nulo, semialeatorio, o aleatorio).
- Método de análisis (JME o PS).
- PMD en ps. Si se conoce el ángulo del acoplamiento modal, el coeficiente PMD puede darse en ps/km (acoplamiento modal nulo), o en ps/km^{1/2} (acoplamiento modal aleatorio).
- Si el PMD medio fue determinado a partir de mediciones repetidas de la muestra, se registra el número de mediciones realizadas.

5.1.2 Primera alternativa del método de prueba: método del estado de polarización (SOP)

5.1.2.1 Generalidades

Este método se limita a la región de longitudes de onda del funcionamiento monomodo real de la fibra. Puede aplicarse a fibras cortas y largas, independientemente del grado de acoplamiento de modos de polarización.

La base del método es que en caso de variación de la frecuencia óptica de la luz inyectada, el estado de polarización a la salida de la fibra, representado en la pantalla esférica de Poincaré en el espacio de los parámetros de Stokes gira en torno al eje coincidiendo con el sentido de los PSP a una velocidad que depende del retardo de PMD: a mayor retardo, más rápida es la rotación. Por tanto,

midiendo el ángulo de rotación $\Delta\theta$ del punto representativo de la pantalla esférica de Poincaré correspondiente a la variación de la frecuencia angular $\Delta\omega$, el retardo PMD, $\delta\tau$, se puede determinar así:

$$\delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (5-5)$$

Debe señalarse que cuando se excita uno de los PSP de entrada, el correspondiente estado de polarización (SOP) a la salida de la fibra permanece invariable por definición y no se detecta ninguna rotación en la pantalla esférica de Poincaré.

La técnica proporciona directamente los retardos de grupo diferenciales (DGD, *differential group delays*) entre los estados de polarización principales de la fibra probada en función de la longitud de onda o del tiempo. La PMD se obtiene mediante promediación adecuada en el tiempo o en la longitud de onda, o en ambos. El método es exacto para dar información completa sobre las estadísticas de los DGD.

5.1.2.2 Aparatos de prueba

En la figura 5 se muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba. La técnica consiste en medir el estado de polarización de salida de la fibra probada a cierto número de longitudes de onda a lo largo de una determinada gama espectral por inyección en la fibra probada de luz con un estado de polarización fijo.

5.1.2.2.1 Fuente óptica

Se requiere un láser unilínea estable, sintonizable en la gama de longitudes de onda de medición. La anchura espectral del láser debe ser suficientemente pequeña para garantizar que no habrá despolarización de la señal debido a la PMD de la fibra probada.

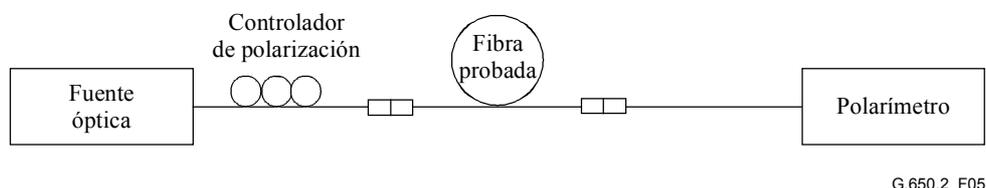


Figura 5/G.650.2 – Esquema del aparato para la medición de la PMD por análisis del estado de polarización

5.1.2.2.2 Controlador de polarización

Se colocará un controlador de polarización entre la fuente óptica y la fibra probada.

5.1.2.2.3 Polarímetro

Se utilizará un polarímetro para medir los parámetros de Stokes en función de la longitud de onda a la salida de la fibra probada.

5.1.2.2.4 Muestras

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición. Se emplearán condiciones ambiente normalizadas. En el caso de fibras y cables instalados, pueden utilizarse las condiciones de instalación reinantes.

Si fuera importante minimizar el acoplamiento adicional de modos, será necesario soportar de alguna forma la fibra no cableada (normalmente en un carrete que tenga un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm) con una tensión de la fibra prácticamente nula (arrollamiento holgado).

Pueden aplicarse condiciones de fibras alternativas (por ejemplo, una bobina de transporte de fibras), siempre que se haya demostrado que se obtienen resultados comparables.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente PMD no es relevante.

5.1.2.3 Procedimiento de medición

5.1.2.3.1 Medición

- a) La luz que sale de la fuente óptica se pasa a través del controlador de polarización y se acopla a la fibra probada. Si fuera necesario, se ajustará el controlador de polarización para optimizar las condiciones para la determinación del ángulo de rotación en la pantalla esférica de Poincaré. En el caso de trayectos en fibra, las fibras deben mantenerse estacionarias durante las siguientes mediciones.
- b) La salida de la fibra probada se acopla a la entrada del polarímetro.
- c) Seleccionar la gama de longitudes de onda en la cual ha de efectuarse la medición.
- d) Seleccionar el paso de longitud de onda $\Delta\lambda$ (en nm) al que han de medirse los parámetros de Stokes. Para evitar que el estado de polarización de salida (PSP) gire más de 180° en torno al eje de los PSP en la pantalla esférica de Poincaré, entre dos longitudes de onda de prueba, debe cumplirse el requisito $\Delta\tau_{\text{máx}}\Delta\lambda \leq 4 \text{ ps.nm}$, donde $\Delta\tau_{\text{máx}}$ (en ps) es el máximo DGD esperado en la fibra probada.
- e) Los valores medidos de los parámetros de Stokes a los valores de longitud de onda seleccionados se registran de manera adecuada para el análisis descrito en las subcláusulas siguientes.

5.1.2.3.2 Cálculo o interpretación de resultados

La fluctuación de polarización medida mediante el analizador de Stokes (o el analizador por rotación) puede transformarse en la curva de SOP en función de la longitud de onda (frecuencia);

El SOP se expresa como:

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (5-6)$$

donde:

$$\eta = \tan \left[0,5 \tan^{-1} \left\{ S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right\} \right] \quad (5-7)$$

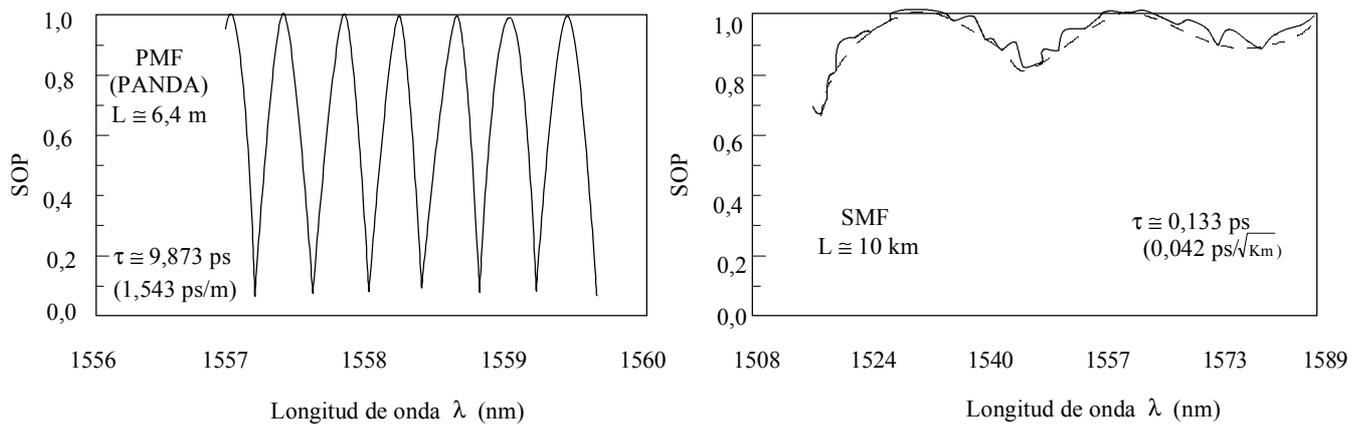
Aquí, η es la elipticidad de la polarización, y S_1 , S_2 y S_3 son los parámetros de Stokes.

En la figura 6, la distancia de cresta a cresta (o extremo) de las curvas SOP es equivalente a la diferencia de fase de π .

La $\delta\tau$ de DGD o PMD viene dada por:

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta\lambda} \quad (5-8)$$

donde N representa los números de extremo a extremo de las curvas de SOP.



a) Fibra que mantiene la polarización (PMF)
(no hay acoplamiento de modos)

b) Fibra monomodo de 1310 nm (SMF; Rec. UIT-T G.652)
(acoplamiento de modos fuerte)

G.650.2_F06

Figura 6/G.650.2 – Representación por el método del estado de polarización (SOP) de dos ejemplos de mediciones de la PMD

5.1.2.4 Presentación de los resultados

- Configuración de prueba, algoritmos de procesamiento.
- Gama de longitudes de onda, paso de longitud de onda, número de puntos muestreados.
- Temperatura de la muestra y condiciones ambientales.
- Identificación y longitud de la fibra.
- Condiciones de instalación de la fibra.
- Indicación de exactitud y la repetibilidad.
- Representación de exactitud y repetibilidad.
- Histograma de los DGD medidos en función de la longitud de onda (si es necesario).
- DGD medio.
- Coefficiente de PMD.

5.1.3 Segunda alternativa de método de prueba: Técnica interferométrica

5.1.3.1 Generalidades

Este método de prueba consiste en un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización media de las fibras y cables ópticos monomodo.

El valor medido representa el retardo de PMD (véase la definición de PMD) en la gama de longitudes de onda de medición, que suele ser de 60 a 80 nanómetros en la ventana de 1310 nm o de 1550 nm, según las necesidades del usuario.

La PMD se determina a partir de la función de autocorrelación o de transcorrelación del campo electromagnético emergente en un extremo de la fibra cuando es iluminada por una fuente de banda ancha en el otro extremo. En el caso del instrumento de tipo autocorrelación, el interferograma tiene una cresta de coherencia central correspondiente a la autocorrelación de la fuente óptica.

La ventaja principal de este método es que el tiempo de medición es muy corto y el equipo puede utilizarse fácilmente en funcionamiento real.

La conocida técnica espectroscópica de la transformada de Fourier garantiza la dinámica y la estabilidad.

Debe tratarse de una fibra monomodo en la gama de longitudes de onda medida.

5.1.3.2 Aparato de prueba

Son posibles diferentes implementaciones. El interferómetro puede ser del tipo trayecto aéreo o del tipo fibra, puede ser del tipo Michelson o Mach-Zehnder, y puede estar situado en la fuente o en el extremo receptor del dispositivo probado. Se incluyen ejemplos en las figuras 7, 8 y 9.

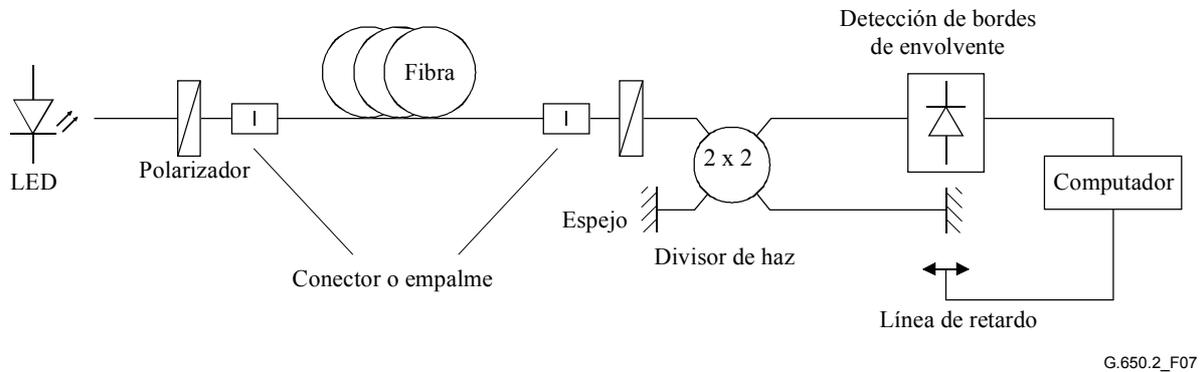


Figura 7/G.650.2 – Técnica interferométrica utilizando un interferómetro de Michelson con acoplador de fibras

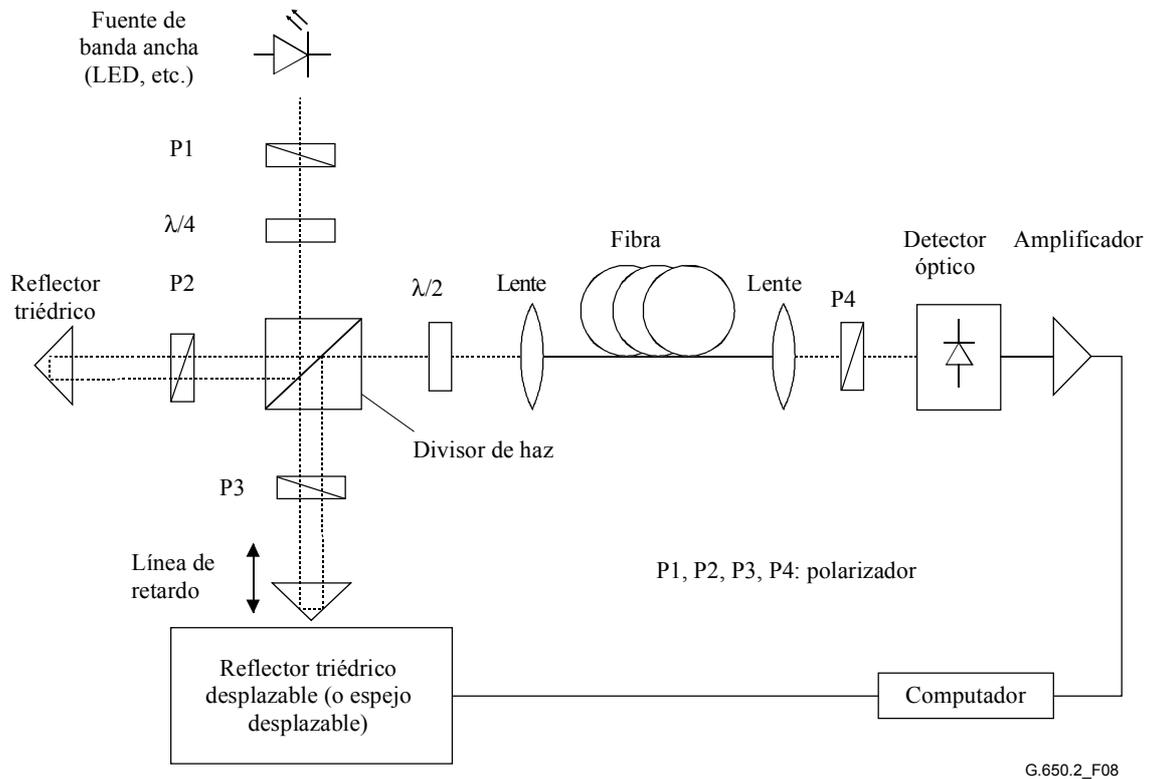
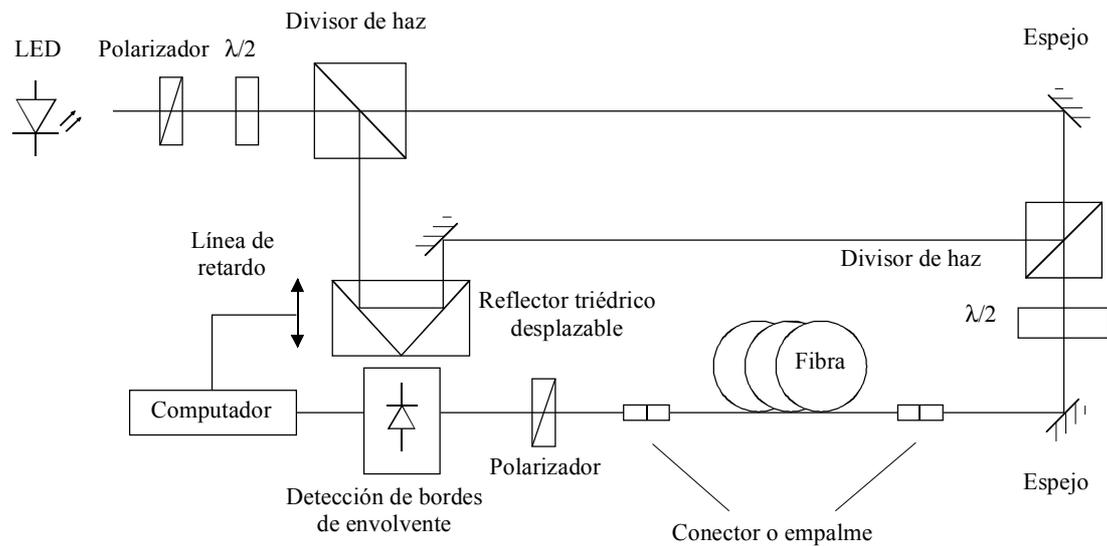


Figura 8/G.650.2 – Técnica interferométrica utilizando un interferómetro de Michelson con trayecto aéreo



G.650.2_F09

Figura 9/G.650.2 – Técnica interferométrica utilizando un interferómetro de tipo Mach-Zehnder con un trayecto aéreo

NOTA – En un interferograma de autocorrelación hay una cresta de autocorrelación central cuando el interferómetro está equilibrado [por ejemplo, figura 10 a), b)]. Cuando los efectos de polarización de los dos brazos del interferómetro hacen desaparecer la cresta central [por ejemplo, figura 10 c), d)], se obtienen interferogramas de correlación.

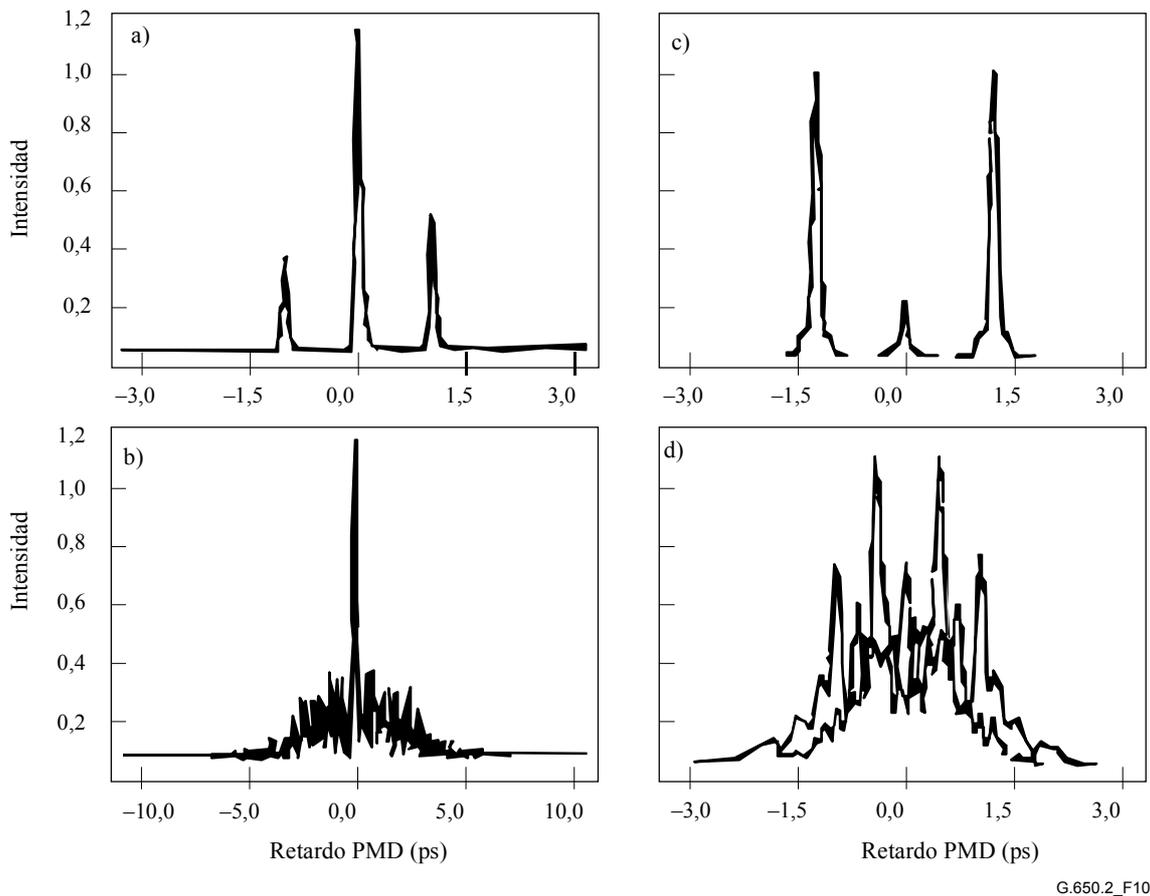


Figura 10/G.650.2 – Ejemplo de diagrama de bordes obtenido con el instrumento de autocorrelación (a, b) y el instrumento tipo de transcorrelación (c, d) para un acoplamiento de modos de polarización bajo (parte superior) y alto (parte inferior)

5.1.3.2.1 Fuente óptica

Se utilizará una fuente de espectro ancho polarizada, tal como un diodo fotoemisor seguido por un polarizador. La longitud de onda central de la fuente luminosa estará dentro de la ventana de 1310 nm y/o de 1550 nm. Un valor típico de su anchura espectral de amplitud mitad es de unos 60 nm. La forma espectral será aproximadamente gaussiana, sin rizados que pudieran influenciar la función de autocorrelación de la luz emergente.

5.1.3.2.2 Polarizador

Es necesaria una polarización en toda la gama de longitudes de onda de la fuente.

5.1.3.2.3 Divisor de haz

El divisor de haz del interferómetro se utiliza para dividir la luz polarizada incidente en dos componentes que se propagan en los brazos del interferómetro. El divisor puede ser un acoplador de fibra óptica o un divisor de haz de reflector triédrico.

5.1.3.2.4 Detector

La luz que emerge de la fibra probada se acopla a un fotodetector cuya relación señal/ruido es adecuada para la medición. El sistema de medición puede incluir detección síncrona mediante un troceador/amplificador sincronizado o técnicas comparables.

5.1.3.2.5 Muestras

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante en toda la medición. Se aplicarán condiciones ambiente normalizadas. En el caso de fibras y cables instalados, pueden aplicarse las condiciones de instalación reinantes.

Si fuera importante minimizar el acoplamiento adicional de modos, será necesario soportar de alguna forma la fibra no cableada (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm) con una tensión de la fibra prácticamente nula (arrollamiento holgado).

Pueden utilizarse otras condiciones de fibra (por ejemplo, una bobina de transporte de fibras) siempre que se haya demostrado que se obtienen resultados comparables.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba puede también efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente de PMD no es relevante.

5.1.3.2.6 Procesamiento de los datos

Para el análisis del diagrama de interferencia se utilizará un computador con un soporte lógico adecuado.

5.1.3.3 Procedimiento de medición

Un extremo de la fibra a prueba se aplica a la salida polarizada de la fuente luminosa polarizada. El otro extremo se acopla a la entrada del interferómetro como se muestra en la figura 7 o figura 8, o al detector a través de las lentes y polarizadores que se muestran en la figura 9. Esto puede efectuarse mediante conectores de fibra normalizados, empalmes, o mediante un sistema de alineación de fibras. Si se utiliza este último, un aceite de adaptación de índice evita reflexiones.

La potencia de salida óptica de la fuente luminosa se ajusta a un valor de referencia característico del sistema de detección utilizado. Para obtener un contraste de bordes suficiente, la potencia óptica en ambos brazos debe ser casi idéntica.

Hacer la primera lectura desplazando el espejo del brazo del interferómetro y registrando la intensidad de la luz. A partir del diagrama de bordes obtenido para un estado de polarización seleccionado, puede calcularse el retardo de PMD como se describe a continuación. En la figura 10 se muestra un ejemplo típico del diagrama marginal para un acoplamiento de modos de polarización bajo o alto.

En caso de acoplamiento insuficiente de modos de polarización o en caso de baja PMD, se recomienda repetir la medición para diferentes estados de polarización o modular el estado de polarización durante la medición para obtener un resultado que sea un promedio de todos los estados de polarización.

5.1.3.4 Determinación de la dispersión por modo de polarización

5.1.3.4.1 Acoplamiento de modos débil

En el caso de débil acoplamiento de modos, el retardo de PMD se determina a partir de la separación de las dos crestas de coherencia de satélite, cada una retardada con respecto al centro por el retardo de grupo diferencial del dispositivo a prueba. En este caso, el retardo de grupo diferencial (DGD) es equivalente al retardo de PMD.

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta L}{c} \quad (5-9)$$

donde ΔL es el trayecto móvil de la línea de retardo óptico y c la velocidad de la luz en el espacio libre.

5.1.3.4.2 Acoplamiento de modos fuerte

En el caso de fuerte acoplamiento de modos, la determinación del retardo de PMD se basa en la anchura del interferograma del diagrama de bordes. El retardo de PMD, $\Delta\tau$, se determina a partir del parámetro de anchura, σ , de la curva gaussiana que se ajusta al interferograma de acuerdo con:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}}\sigma \quad (5-10)$$

NOTA – σ es la desviación típica de la curva gaussiana.

Véase en el apéndice I un ejemplo de algoritmo para determinar el retardo de PMD $\Delta\tau$ a partir de un interferograma. Muchas veces se demuestra que la relación entre σ_ϵ y σ es un valor homogéneo, que permite una sustitución alternativa. Son posibles otros algoritmos, por ejemplo, los basados en la integración acumulativa.

Para el algoritmo del apéndice I, la gama de medición típica es 0,1-100 ps. Otros algoritmos pueden permitir la ampliación de esta gama de medición.

5.1.3.5 Calibración del equipo

El equipo se calibra verificando la mecánica de la línea de retardo con una fibra de birrefringencia alta y con un retardo conocido de PMD. También se puede utilizar una "fibra de oro" con PMD conocida.

5.1.3.6 Presentación de los resultados

- a) Fecha.
- b) Identificación de la fibra.
- c) Tipo de fibra.
- d) Largo de fibra.
- e) Configuración de la prueba, incluido tipo de fuente, longitud de onda y anchura espectral de amplitud mitad.
- f) Técnica de inyección.
- g) Técnica de detección de bordes.
- h) Representación en la gama explorada con diagrama de bordes (sólo si el tipo de acoplamiento de modos no es aleatorio).
- i) Instalación de la fibra y condiciones ambientales (radio, tensión mecánica, temperatura, etc.).
- j) Tipo de acoplamiento de modos (aleatorio, semialeatorio o determinístico).
- k) Retardo PMD en ps y coeficiente de PMD. Si se conoce el grado de acoplamiento de modos, el coeficiente puede darse en ps/km o ps/ $\sqrt{\text{km}}$.
- l) Otras condiciones especiales.

5.1.4 Técnica del analizador fijo

5.1.4.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización (PMD) de las fibras ópticas monomodo. Produce un solo valor de medición que representa la PMD en la gama de longitudes de onda de medición, que suele ser de unos pocos centenares de nanómetros. El método puede aplicarse a fibras cortas y largas en los límites de acoplamiento de modo de polarización nulo y fuerte. En algunos casos será necesario hacer mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria con este método. El procedimiento se

limita a longitudes de onda iguales o superiores al valor en el que la fibra es efectivamente monomodo.

5.1.4.2 Aparato de prueba

Véase en la figura 11 un diagrama esquemático de los principales componentes de un sistema de medición típico.

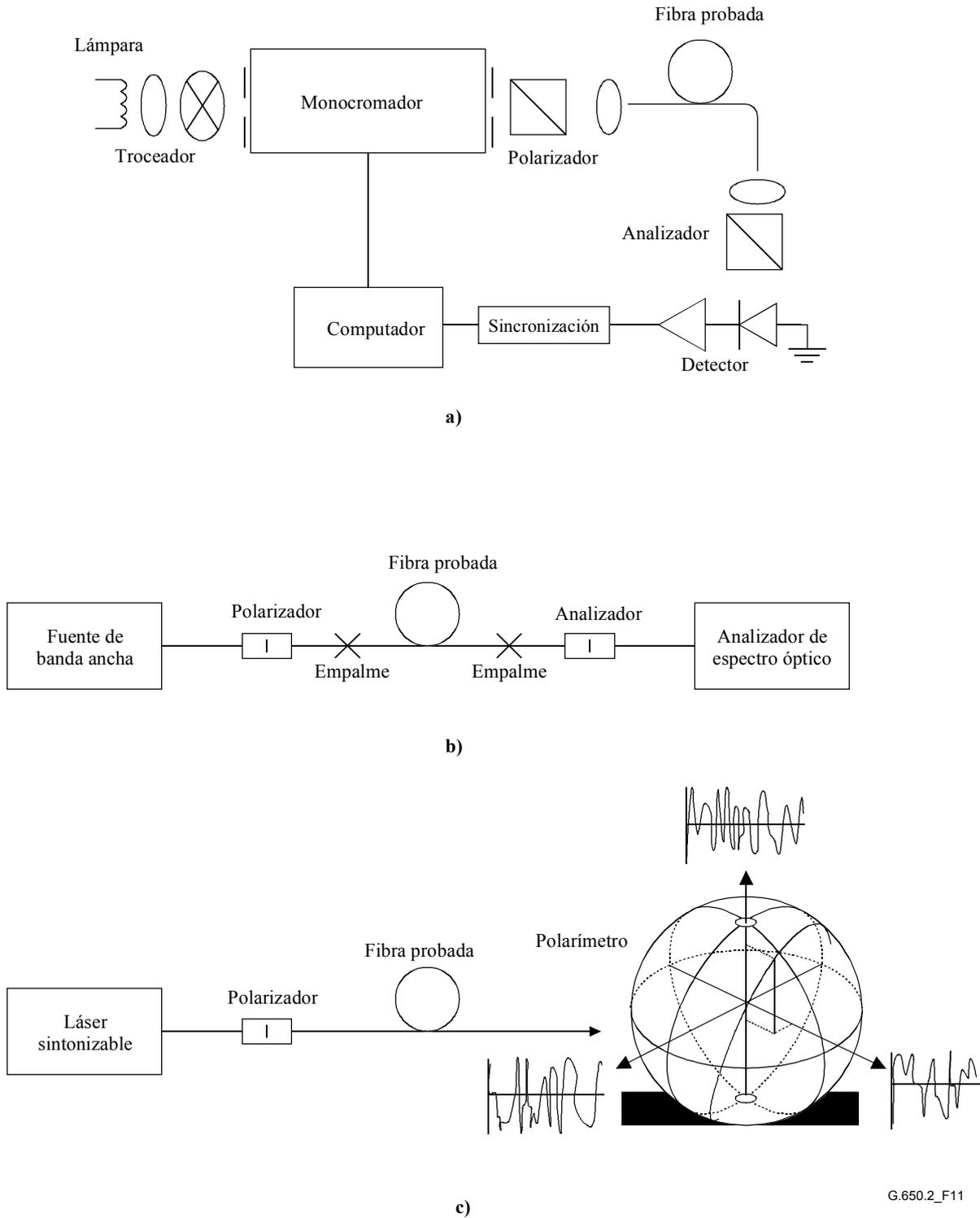


Figura 11/G.650.2 – Diagrama esquemático del equipo (típico)

5.1.4.2.1 Fuente luminosa

Utilizar una fuente luminosa que emita radiación en las longitudes de onda de medición deseadas, tal como una lámpara de banda ancha, uno o más diodos fotoemisores, o uno o más láseres sintonizables. Debe garantizarse la estabilidad de intensidad y distribución espectral de la fuente en un periodo de tiempo suficientemente largo para permitir la medición.

5.1.4.2.2 Monocromador

Obtener una determinada serie de longitudes de onda de prueba filtrando la fuente luminosa con un monocromador, como en la figura 11 a), o utilizando un analizador de espectro óptico como detector, como en la figura 11 b). Este filtrado no es necesario cuando la fuente es un láser sintonizable [véase la figura 11 c)]. La distribución espectral debe ser suficientemente estrecha para evitar una gran despolarización de la señal bajo la influencia de la PMD de la fibra a prueba (véanse 5.1.4.4.1.4 y 5.1.4.4.2.8).

5.1.4.2.3 Dispositivo óptico de entrada

Puede emplearse un sistema de lente óptica o un rabillo de fibra monomodo para excitar la fibra a prueba. La potencia acoplada a la fibra será estable mientras dure la prueba. Si se utilizan rabillos de fibra, deben evitarse efectos de interferencia debidos a reflexiones, lo cual puede exigir materiales de adaptación de índice o cortes angulados. Los rabillos de fibra serán monomodo.

Si se utiliza un sistema de lente óptica, se utilizarán algunos medios adecuados, tales como mordazas de vacío, para soportar establemente el extremo de entrada de la fibra.

5.1.4.2.4 Supresor de modos de revestimiento

Suprimir cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra en prueba. La funda de la fibra la suprime casi siempre; en otro caso, emplear un dispositivo que elimine la potencia de modos de revestimiento.

5.1.4.2.5 Dispositivo óptico de salida

Toda la potencia emitida por la fibra a prueba debe acoplarse a la zona activa del sistema de detección (véase la figura 11). Ejemplos de medios que pueden utilizarse son un sistema de lente óptica, un empalme a tope a un rabillo de fibra monomodo, o un acoplamiento fibra a fibra con adaptación de índice.

5.1.4.2.6 Detección de señales

Para la detección de señales, utilizar un detector óptico que sea lineal y estable en la gama de intensidades y de tiempos de medición que se encuentran al efectuar la medición. Un sistema típico podría incluir detección síncrona mediante un troceador/amplificador sincronizado, un medidor de potencia óptica, un analizador de espectro óptico, o un polarímetro. Para utilizar toda la gama espectral de la fuente, el sistema de detección debe tener una gama de longitudes de onda que incluya las longitudes de onda producidas por la fuente luminosa.

5.1.4.2.7 Polarizador y analizador

El polarizador a la entrada de la fibra (figura 11) sólo se necesita si el haz de inyección no está ya polarizado (normalmente es suficiente una relación de extinción de 3 dB). La orientación angular de los polarizadores no es crítica, pero debe permanecer fija durante toda la medición. Con un acoplamiento de modos débil, el ajuste de orientación del polarizador puede ayudar a maximizar la amplitud de las oscilaciones de la figura 12 a). Otra posibilidad de conseguirlo es por rotación de la fibra o fibras en los empalmes o conectores.

El analizador no es necesario cuando se utiliza un polarímetro para la detección de las señales [figura 11 c)].

5.1.4.3 Procedimiento de medición

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra óptica monomodo que puede o no estar cableada. Debe fijarse la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente de PMD no es relevante.

La estabilidad de temperatura del dispositivo de prueba puede observarse midiendo la potencia de salida de la fibra a una longitud de onda fija, con el analizador de salida en su sitio. En el periodo de tiempo correspondiente a una medición completa típica, la variación de la potencia de salida debe ser pequeña con relación a las variaciones producidas por un incremento de longitud de onda.

Si fuera importante minimizar el acoplamiento de modos adicional, será necesario soportar de alguna forma la fibra no cableada (normalmente en un carrete que tenga un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm) con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 15 g).

Pueden aplicarse condiciones de fibra alternativas (por ejemplo, una bobina de transporte de fibras), siempre que se haya demostrado que se obtienen resultados comparables.

Acoplar el extremo de entrada de la fibra a la fuente luminosa. Acoplar la radiación de salida de la fibra a prueba al sistema de detección.

Haciendo ajustes apropiados en el monocromador, en el analizador de espectro óptico, o en el láser sintonizable, inyectar sucesivamente cada longitud de onda de prueba designada λ en la fibra. La elección de las longitudes de onda depende de la gama de exploración de longitudes de onda designada y también del método de análisis (véanse 5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2).

Registrar la señal de salida correspondiente para cada longitud de onda. Este proceso se realizará sin cambiar las condiciones de inyección y del detector. Llamar $P_A(\lambda)$ a la potencia recibida, donde A denota la presencia del analizador.

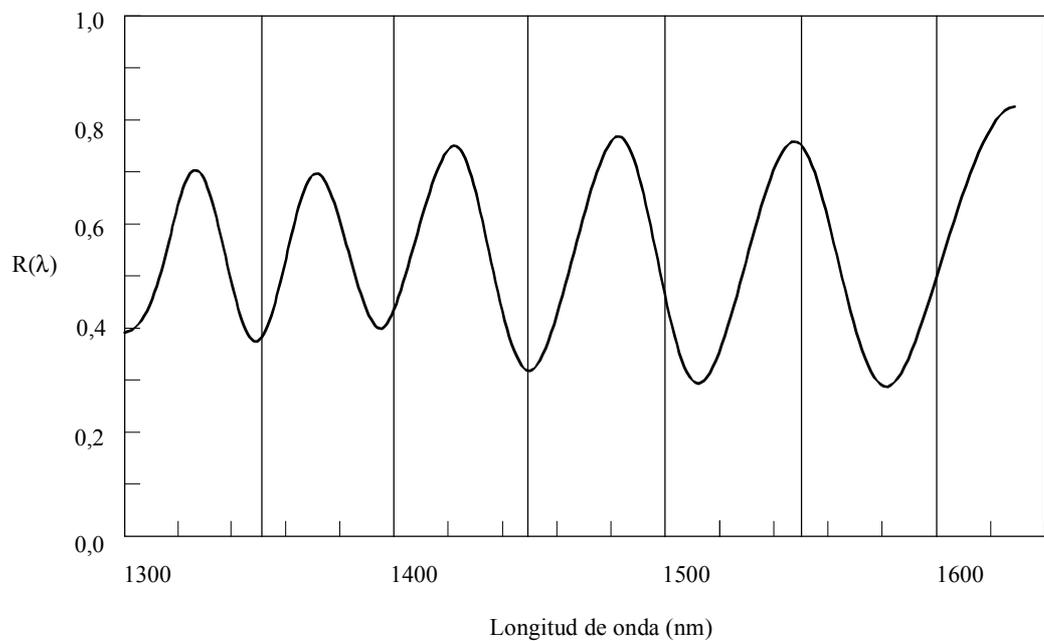
Suprimir el analizador del haz y repetir la exploración del monocromador. Llamar $P_{TOT}(\lambda)$ a esta potencia recibida. Esta última potencia puede utilizarse para eliminar la dependencia espectral de los componentes del sistema de medición y la pérdida de la fibra a prueba. En la figura 12 se muestran representaciones típicas de la relación:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)} \quad (5-11)$$

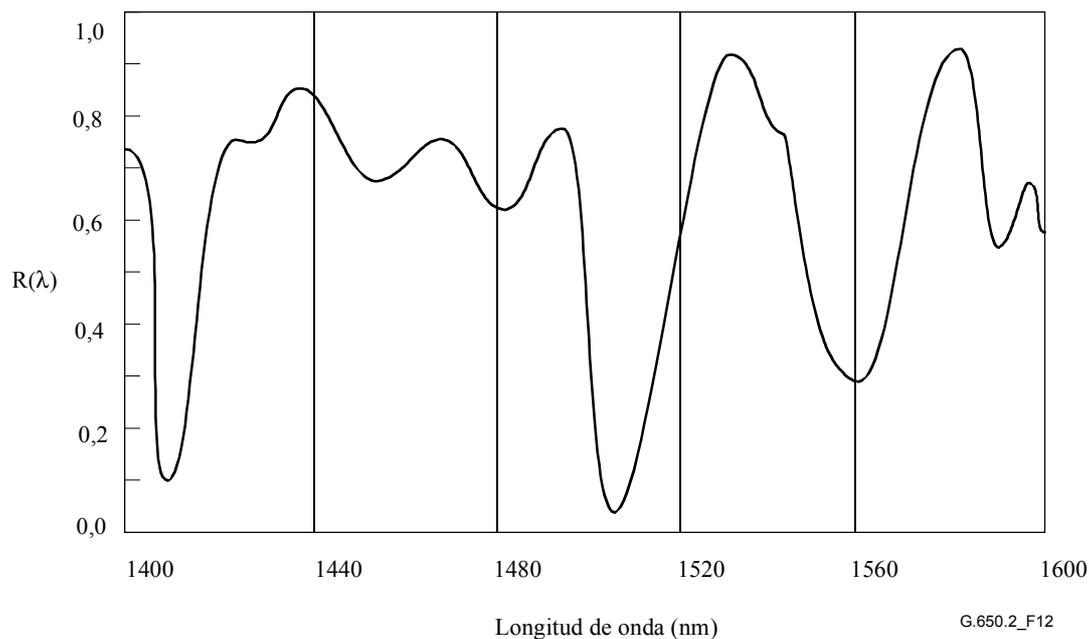
Un procedimiento alternativo es dejar en su sitio el analizador, pero girarlo 90° con respecto a la orientación utilizada más arriba. Si la potencia recibida es $P_{ROT}(\lambda)$, entonces:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{ROT}(\lambda)} \quad (5-12)$$

Si se utiliza un polarímetro como elemento de detección, se miden los parámetros de Stokes normalizados en función de la longitud de onda. Las tres funciones espectrales son independientes de la potencia recibida y son analizados por los mismos métodos aplicados a $R(\lambda)$ (véanse 5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2). Cada parámetro de Stokes normalizado produce entonces un valor de $\langle \Delta\tau \rangle$.



a) Acoplamiento de modos débil



b) Acoplamiento de modos fuerte

Figura 12/G.650.2 – Datos típicos obtenidos al medir la PMD

5.1.4.4 Cálculos o interpretación de los resultados

Se utilizará uno de los dos métodos siguientes (5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2) para calcular la PMD a partir de los datos de medición.

5.1.4.4.1 Cómputo de extremos

5.1.4.4.1.1 PMD

$R(\lambda)$ debe obtenerse a intervalos de longitud de onda uniformemente espaciados. E es el número de extremos dentro de la ventana $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$. Otra posibilidad es elegir λ_1 y λ_2 para que coincidan con extremos, en cuyo caso E es el número de extremos (incluidos los situados en λ_1 y λ_2) menos uno.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k E \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-13)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, k es un factor de acoplamiento de modos igual a 1,0 en ausencia de acoplamiento de modos [el régimen de la ecuación (3-4)], y 0,82 es el límite del acoplamiento de modos fuerte [el régimen de la ecuación (3-5)].

Si se utiliza un polarímetro como elemento de detección, tomar como valor final de $\langle \Delta\tau \rangle$ el promedio de los valores obtenidos de las tres respuestas de parámetros de Stokes normalizados. En la ecuación (3-4) ó (3-5) se puede utilizar el valor de $\langle \Delta\tau \rangle$ proporcionado por la ecuación (5-13), o el promedio de los tres valores de $\langle \Delta\tau \rangle$ derivado de la detección polarimétrica (el que sea apropiado para la muestra considerada) a fin de calcular el coeficiente de PMD. El valor resultante debe considerarse como un promedio en la gama de longitudes de onda $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

5.1.4.4.1.2 Exactitud

La máxima exactitud se obtiene haciendo $(\lambda_2 - \lambda_1)$ suficientemente grande para asegurar que $E \gg 1$, lo cual es especialmente importante cuando hay un acoplamiento de modos fuerte [figura 12 b)] y menos en otros casos [figura 12 a)]. Los valores de E entre 7 y 40 son típicos. En los valores más bajos hay un alto porcentaje de incertidumbres en E y en la PMD. En el extremo superior de la gama, el ensanchamiento instrumental puede dar lugar a que no se resuelvan algunas crestas adyacentes.

Idealmente, la ventana de exploración debe estar centrada en la longitud de onda de uso de la fibra, y suficientemente ancha para asegurar que E es superior a 10, aproximadamente, para el máximo valor de PMD de interés (donde se da la condición de aceptación/rechazo).

5.1.4.4.1.3 Identificación de crestas

La identificación de extremos en $R(\lambda)$ puede ser más difícil en presencia de ruido y/o fuerte acoplamiento de modos. Esto puede verse en el ejemplo de la figura 12 b). Un algoritmo con las siguientes características puede ayudar a identificar extremos:

- 1) Un polinomio es ajustado a varios puntos adyacentes de $R(\lambda)$ para obtener una curva suavizada.
- 2) Un extremo se define como un punto en el que la derivada con respecto a la longitud de onda de esta curva suavizada cambia de signo.

Si es necesario puede incorporarse en el algoritmo de identificación de crestas una mayor seguridad.

5.1.4.4.1.4 Resolución espectral

Para asegurar que todas las características del espectro óptico se resuelvan adecuadamente, la resolución espectral $\Delta\lambda$ debe satisfacer:

$$\Delta\lambda / \lambda < (8\nu\Delta\tau)^{-1} \quad (5-14)$$

donde ν es la frecuencia óptica. $\Delta\lambda$ es la anchura espectral instrumental, o el tamaño del paso de longitud de onda, tomándose el mayor de estos valores. Para una λ próxima a 1550 nm, la ecuación (5-14) reduce la condición de que $\Delta\lambda$ (nm) debe ser menor que el inverso de $\Delta\tau$ (ps).

5.1.4.4.2 Análisis de Fourier

5.1.4.4.2.1 Sinopsis

En este método para obtener la PMD se utiliza un análisis de Fourier de $R(\lambda)$, normalmente expresado en el dominio de la frecuencia óptica, ν . La transformada de Fourier transforma estos datos en el dominio de la frecuencia óptica al dominio del tiempo. La transformada de Fourier arroja información directa sobre la distribución de los tiempos de llegada de la luz $\delta\tau$. Estos datos son procesados posteriormente en la forma indicada más adelante para obtener la PMD esperada, $\langle\Delta\tau\rangle$, para la fibra a prueba. Este método es aplicable a fibras con acoplamiento de modos débil o fuerte (véanse 5.1.4.4.2.4 y 5.1.4.4.2.5, respectivamente).

5.1.4.4.2.2 Preprocesamiento de datos y transformación de Fourier

Para utilizar este método, la transformada de Fourier exige normalmente intervalos iguales de frecuencia óptica, de manera que los datos $R(\lambda)$ se recogen (como se indica en 5.1.4.3) a valores λ tales que formen intervalos iguales en el dominio de la frecuencia óptica. Otra posibilidad es ajustar los datos tomados en intervalos iguales de λ (por ejemplo, utilizando un ajuste de ranura cúbica) y utilizarse interpolación para generar estos puntos, o utilizarse técnicas espectrales más avanzadas. En cada caso, la relación $R(\lambda)$ a cada valor de λ utilizado se calcula mediante las ecuaciones (5-11) o (5-12), según convenga.

Puede efectuarse relleno de ceros o interpolación de datos y eliminación de niveles de corriente continua en los datos de la relación, $R(\lambda)$. También puede utilizarse la ventanización de los datos como un paso de condición previa antes de la transformada de Fourier. La transformación Fourier se lleva ahora a cabo, para producir la distribución de datos de amplitud $P(\delta\tau)$ para cada valor de $\delta\tau$.

5.1.4.4.2.3 Ajuste de los datos de la transformada

Los datos de la transformada de Fourier cuando $\delta\tau$ es cero tienen poca significación, ya que, a menos que se eliminen cuidadosamente los componentes de corriente continua de $R(\lambda)$, pueden deberse parcialmente a la pérdida de inserción del analizador, por ejemplo. Cuando no se elimina el nivel de corriente continua, se evitan generalmente (no se utilizan) hasta dos puntos de datos en cualesquiera cálculos posteriores. Se define una variable, j , a fin de que la "primera anotación válida" por encima de $\delta\tau$ que se incluya en los cálculos corresponda a $j = 0$.

A fin de suprimir el ruido de medición de los cálculos posteriores, $P(\delta\tau)$ se compara con un nivel umbral T_1 , típicamente fijado al 200% del nivel de ruido cuadrático medio del sistema de detección. Ahora es necesario determinar si la fibra tiene un acoplamiento de modos débil o fuerte.

Si se ve que los primeros X puntos válidos de $P(\delta\tau)$ están todos por debajo de T_1 , esto indica que $P(\delta\tau)$ debe tener características con puntas discretas propias de las fibras con acoplamiento débil. El valor de X es igual a 3, a menos que se utilice relleno de ceros en el análisis de Fourier. En ese caso, el valor de X puede determinarse a partir de $3 * (\text{número de puntos de datos originales}) / (\text{longitud total de la formación que sigue al relleno de ceros})$. Utilícese 5.1.4.4.2.4 para calcular PMD. Si no ocurre así, se procede a calcular PMD utilizando 5.1.4.4.2.5 ó 5.1.4.4.2.6.

5.1.4.4.2.4 Cálculo de PMD en las fibras con débil acoplamiento de modos

Para una fibra débilmente acoplada (por ejemplo, una fibra de alta birrefringencia) o para un componente birrefringente, $R(\lambda)$ se asemeja a una onda sinusoidal fluctuante [figura 12 a)]. La transformación de Fourier dará una salida $P(\delta\tau)$ con una punta discreta en una posición correspondiente al tiempo relativo de llegada del impulso, $\delta\tau$, cuyo centroide es el valor de PMD $\langle\Delta\tau\rangle$.

Para definir el centroide de punta $\langle \Delta\tau \rangle$, en la siguiente ecuación se utilizan los puntos en los que $P(\delta\tau)$ rebasa un segundo nivel umbral predeterminado T_2 , típicamente fijado al 200% del nivel de ruido cuadrático medio del sistema de detección:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (5-15)$$

donde $M' + 1$ es el número de puntos de datos de P dentro de la punta, que rebasan T_2 . $\langle \Delta\tau \rangle$ en la ecuación (5-15) suele consignarse en picosegundos. Si el dispositivo a prueba es una fibra de longitud L , el coeficiente de PMD puede calcularse utilizando la ecuación (3-4). Si no se detecta ninguna punta (es decir, $M' = 0$), PMD es cero. Pueden comunicarse otros parámetros tales como el valor cuadrático medio de anchura de la punta y/o el valor de cresta de la punta.

Si el dispositivo a prueba contiene uno o más elementos birrefringentes, se generará más de una punta. Para un número n de fibras/dispositivos concatenados, se obtendrán $2^{(n-1)}$ puntas.

5.1.4.4.2.5 Cálculo de la PMD para fibras con fuerte acoplamiento de modos

En los casos de fuerte acoplamiento de modos, $R(\lambda)$ adopta una forma de onda compleja similar a la de la figura 12 b), cuyas características exactas se basan en las estadísticas reales del proceso de acoplamiento dentro de la fibra o del cable. Los datos al aplicar la transformada de Fourier adoptan ahora una distribución $P(\delta\tau)$ que representa la autocorrelación de la distribución de probabilidades de tiempos de llegada de los impulsos luminosos, $(\delta\tau)$, en la fibra.

Contando a partir de $j = 0$, determinar el primer punto de P superior a T_1 , y que va seguido al menos por X puntos de datos inferiores a T_1 . Este punto representa el último punto significativo en (es decir, el "extremo" de) la distribución $P(\delta\tau)$, para una fibra con fuerte acoplamiento de modos, que no es sustancialmente afectada por el ruido de medición. El valor $\delta\tau$ para este punto se designa $\delta\tau_{\text{last}}$ y el valor de j a $\delta\tau_{\text{last}}$ se designa M'' . Esta fibra tiene un fuerte acoplamiento de modos. La raíz cuadrada del segundo momento, σ_R , de esta distribución define la PMD $\langle \Delta\tau \rangle$ de la fibra, y viene dada por:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (5-16)$$

El valor de $\langle \Delta\tau \rangle$ dado por la ecuación (5-16), suele consignarse en picosegundos. En la figura 13 se muestra un ejemplo de la salida de la transformada de Fourier obtenida en una fibra de 25 km con un fuerte acoplamiento de modos.

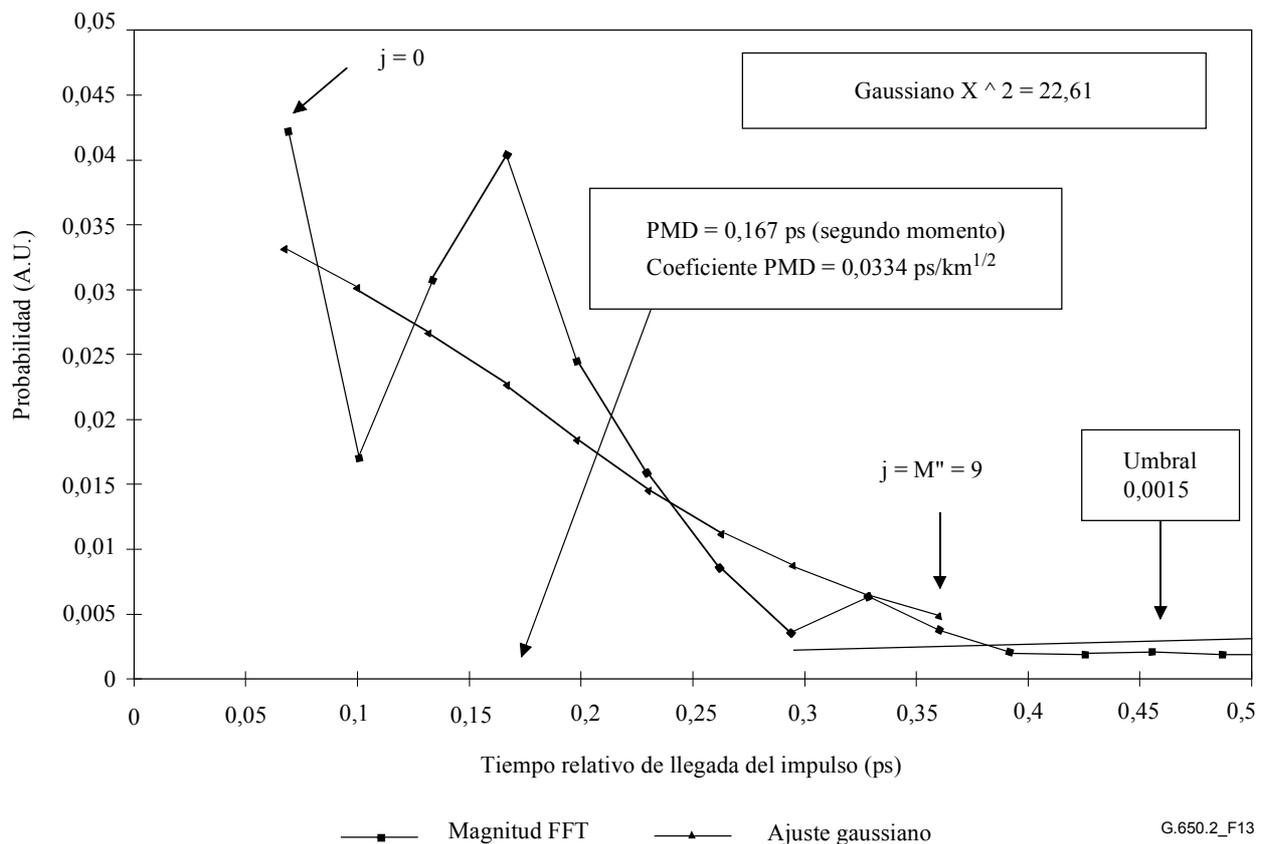


Figura 13/G.650.2 – La PMD por el análisis de Fourier

5.1.4.4.2.6 Cálculo de la PMD para sistemas de fibra con acoplamiento mixto

Puede haber casos en los que fibra/componentes con acoplamiento débil y fibras con acoplamiento fuerte estén concatenados para formar el sistema a prueba. En este caso, puede necesitarse la determinación del centroide (véase 5.1.4.4.2.4) y la obtención del segundo momento (véase 5.1.4.4.2.5). Adviértase que las puntas de $P(\delta\tau)$ sólo pueden determinarse más allá de la $\delta\tau_{last}$ calculada.

5.1.4.4.2.7 Gama espectral

Si se trata de fibras fuertemente acopladas, debe utilizarse una gama espectral suficiente para formar el conjunto espectral (promedio) con la precisión necesaria. La incertidumbre estadística puede minimizarse utilizando la máxima gama espectral posible (por ejemplo, al menos 200 nm). La precisión requerida, y por tanto la gama espectral, deben especificarse antes de la medición. La máxima gama utilizable está limitada por la longitud de onda de corte de la fibra (1270 nm o inferior) en el extremo corto (λ_1) o por la caída de respuesta del detector en el extremo alto (λ_2) (por ejemplo, 1700 nm).

Además, si los valores de $\delta\tau$ son muy bajos, los periodos en $R(\lambda)$ serán muy largos, y la gama espectral λ_1 a λ_2 , debe comprender al menos dos "ciclos" completos. La gama espectral cubierta define el menor valor de $\delta\tau$ que puede resolverse en $P(\delta\tau)$, $\delta\tau_{min}$:

$$\delta\tau_{min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-17)$$

donde el factor 2 se introduce para tener en cuenta el hecho de que generalmente se ignoran dos puntos de datos de P en cero y adyacentes a cero (véase 5.1.4.4.2.3). Por ejemplo, para $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm, $\delta\tau_{min} = 0,033$ ps.

Si se trata de fibras de alta PMD débilmente acopladas con datos de relación $R(\lambda)$ parecidos a los de la figura 12 a), puede hacerse menos riguroso el requisito de promediación espectral arriba descrito, y reducirse la gama espectral [por ejemplo, $(\lambda_2 - \lambda_1) \sim 30$ nm] a fin de permitir examinar la variación de la PMD con la longitud de onda.

5.1.4.4.2.8 Tamaño del paso de longitud de onda y resolución espectral

Para asegurar que todas las características (frecuencias) en $R(\lambda)$ se resuelvan adecuadamente, el tamaño del paso del monocromador, expresado en el dominio de la frecuencia óptica ($\Delta\nu$) debe ser dos veces menor que la "frecuencia de oscilación" correspondiente a la máxima $\delta\tau$ medida (condición de Nyquist):

$$\delta\tau_{\max} = 1/(2 \cdot \Delta\nu) \quad (5-18)$$

Si de la transformada de Fourier se desprende que existe energía considerable cerca de $\delta\tau_{\max}$ [es decir, que parece haber "superposición" en $R(\lambda)$], será necesario reducir el tamaño del paso $\Delta\nu$ (si es posible) y repetir la medición.

La anchura espectral del monocromador (resolución) expresada en unidades de frecuencia óptica es generalmente igual o inferior al menor valor de $\Delta\nu$ a utilizar (correspondiente al mayor valor $\delta\tau$ a medir).

Por ejemplo, para $\delta\tau_{\max} = 1,34$ ps, es típica una anchura espectral del monocromador de 3 nm a 1550 nm ($\Delta\nu = 374$ GHz).

5.1.4.5 Presentación de los resultados

- a) Identificación de la fibra y/o el cable medido/a.
- b) Largo de prueba.
- c) Dispersión por modo de polarización (normalmente picosegundos). Si el grado de acoplamiento de modos es conocido, el coeficiente de PMD puede darse en ps/km (acoplamiento de modos despreciable) o ps/km^{1/2} (acoplamiento de modos fuerte).
- d) La gama de longitudes de onda en la que se efectuó la medición, y el tamaño del paso de longitud de onda o de frecuencia.
- e) La configuración física de la muestra de fibra o de cable.
- f) Tipo de acoplamiento de modos, por ejemplo, determinístico, semialeatorio o aleatorio.
- g) Cuando se ha obtenido una PMD media a partir de mediciones repetidas de la muestra, registrar el número de mediciones efectuadas.

5.2 Métodos de prueba para atributos no lineales

(Queda en estudio).

Apéndice I¹

Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma

En este apéndice se presenta un método para determinar el retardo PMD a partir de un interferograma con una cresta de autocorrelación en el centro como se muestra en la figura I.1.

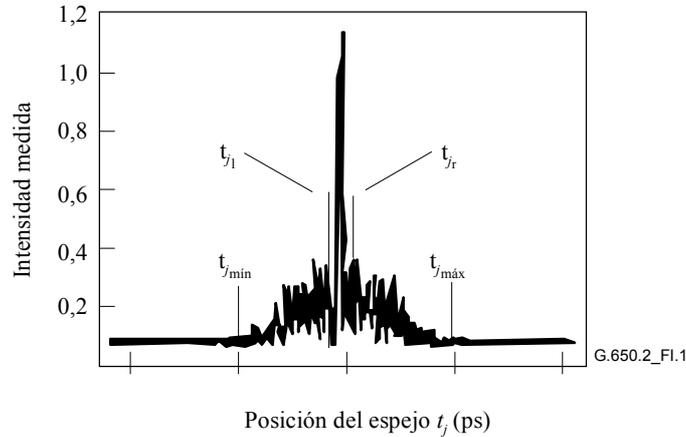


Figura I.1/G.650.2 – Parámetros para el análisis del interferograma

\tilde{I}_j designa la intensidad medida del interferograma en posiciones crecientes t_j , $j = 1 \dots N$ con $[t_j] = \text{ps}$.

Paso 1 – Cálculo de la intensidad cero \tilde{I}_0 y el ruido de amplitud Na

Definición: N_5 : = alrededor de (5 N/100)

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j})}{2N_5} \quad (\text{I-1})$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2)}{2N_5} \quad (\text{I-2})$$

$$Na = \sqrt{X_2 - \tilde{I}_0^2} \quad (\text{I-3})$$

Paso 2 – Definición de la intensidad desplazada I_j

$$I_j := \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 > 4Na \quad (\text{I-4})$$

$$I_j := 0 \quad \text{si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \leq 4Na \quad (\text{I-5})$$

¹ Éste es el apéndice II de la Rec. UIT-T G.650 (2000).

Paso 3 – Cálculo del centro C del interferograma

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N t_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (\text{I-6})$$

Paso 4 – Eliminación de la cresta de autocorrelación central

Definición: j_l : = el mayor índice j tal que $C - t_j > \tau_c$ (I-7)

j_r : = el menor índice j tal que $t_j - C > \tau_c$ (I-8)

donde τ_c es el tiempo de coherencia de la fuente.

NOTA 1 – Para interferogramas de transcorrelación, se aplicará la siguiente definición:

$$j_r := j_l + 1 \quad (\text{I-9})$$

Paso 5 – Cálculo del segundo momento S del interferograma

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^N I_j}} \right\} \quad (\text{I-10})$$

Paso 6 – Truncar el interferograma

Poner j_{\min} al mayor índice j tal que $C - t_j > 2S$ (I-11)

Poner j_{\max} al menor índice j tal que $t_j - C > 2S$ (I-12)

Paso 7 – Cálculo del segundo momento σ_ε del interferograma truncado

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j}} \right\} \quad (\text{I-13})$$

Paso 8 – Cálculo del σ de la función gaussiana $e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}}$ de manera que

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} \right\} \quad (\text{I-14})$$

Paso 9 – Determinación del retardo de PMD $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (\text{I-15})$$

NOTA 2 – Si los interferogramas se miden correctamente, puede demostrarse que $\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{3}{4}}$.

Apéndice II

Atributos no lineales

II.1 Consideraciones básicas

Las interacciones no lineales entre la señal y el medio de transmisión de fibra de sílice empiezan a aparecer a medida que las potencias de la señal óptica aumentan para obtener largos de tramo más grandes a altas velocidades binarias. Por consiguiente, el comportamiento no lineal de la fibra ha surgido como una consideración importante en los sistemas de alta capacidad y en las rutas largas sin regeneración. Estas no linealidades pueden clasificarse generalmente como efectos de dispersión (dispersión Brillouin estimulada y dispersión Raman estimulada) o efectos relacionados con el efecto Kerr, es decir, la dependencia del índice de refracción con respecto a la intensidad (automodulación de fase, transmoción de fase, inestabilidad de la modulación, formación de solitones y mezclado de cuatro ondas). En la gravedad de estos efectos no lineales influyen una variedad de parámetros, entre ellos las características de dispersión de la fibra, el área efectiva de la fibra, el número y la separación de los canales en los sistemas multicanal, la longitud total del sistema sin regeneración, el grado de uniformidad longitudinal de las características de la fibra, así como la intensidad de la señal y la anchura espectral de la fuente.

II.2 Área efectiva (A_{eff})

El área efectiva es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica que afectarán a la calidad de transmisión de los sistemas de fibra óptica, especialmente en los sistemas de larga distancia con amplificación óptica.

El área efectiva A_{eff} se define como sigue:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[\int_0^\infty I(r) r dr \right]}{\int_0^\infty I(r)^2 r dr} \quad (\text{II-1})$$

donde $I(r)$ es la distribución de intensidad de campo del modo fundamental de la fibra para el radio r . La integración de la ecuación (II-1) se efectúa en toda la superficie transversal de la fibra. Por ejemplo, si hacemos una aproximación gaussiana tal que:

$$I(r) = \exp\left(-2r^2 / W^2\right) \quad (\text{II-2})$$

donde $2w$ es el diámetro del campo modal (MFD), la ecuación (II-1) puede integrarse analíticamente dando:

$$A_{\text{eff}} = \pi w^2 \quad (\text{II-3})$$

La aproximación gaussiana es exacta para fibras de índice en escalón G.652 [1] y G.654 [3] cerca del corte LP₁₁, pero para fibras G.652 y G.654 a longitudes de onda mucho mayores, y en el caso de fibras con dispersión desplazada G.653 [2], A_{eff} no puede estimarse con exactitud a partir de la ecuación (II-3).

Una relación más general, pero empírica, entre A_{eff} y w es²:

$$A_{eff} = k\pi w^2 \quad (II-4)$$

donde k es un factor de corrección.

II.3 Factor de corrección k

En el experimento, el diámetro del campo modal (MFD, *mode field diameter*) se midió por el método de prueba de apertura variable. A partir del diagrama de campo lejano (FFP, *far-field pattern*) de la potencia óptica de salida $P(r)$, fue posible calcular el diagrama de campo próximo (NFP, *near-field pattern*) utilizando una transformación de Hankel inversa. A_{eff} se obtiene entonces del NFP utilizando la ecuación (II-1).

El factor de corrección k de la ecuación (II-4) depende de la longitud de onda y de los parámetros de la fibra tales como perfiles de índice de refracción, MFD y longitud de onda de dispersión nula.

En la figura II.1 se muestran algunos ejemplos de relación entre la longitud de onda medida, el MFD y A_{eff} para fibras G.652 y G.653 en las regiones de longitud de onda 1200-1600 nm. Los ejemplos de la figura II.2 muestran la relación de la longitud de onda medida y calculada, MFD, A_{eff} y el factor de corrección k para fibras G.652, G.653 y G.654 en la misma región de longitud de onda.

En el cuadro II.1 se resumen las posibles gamas de valores del factor de corrección k para estos ejemplos.

Para otros diseños de fibra destinados a aplicaciones de fibras ópticas submarinas y de multiplexación por división en longitud de onda (WDM), la relación de A_{eff} con w puede variar, y debe determinarse mediante la ecuación (II-1).

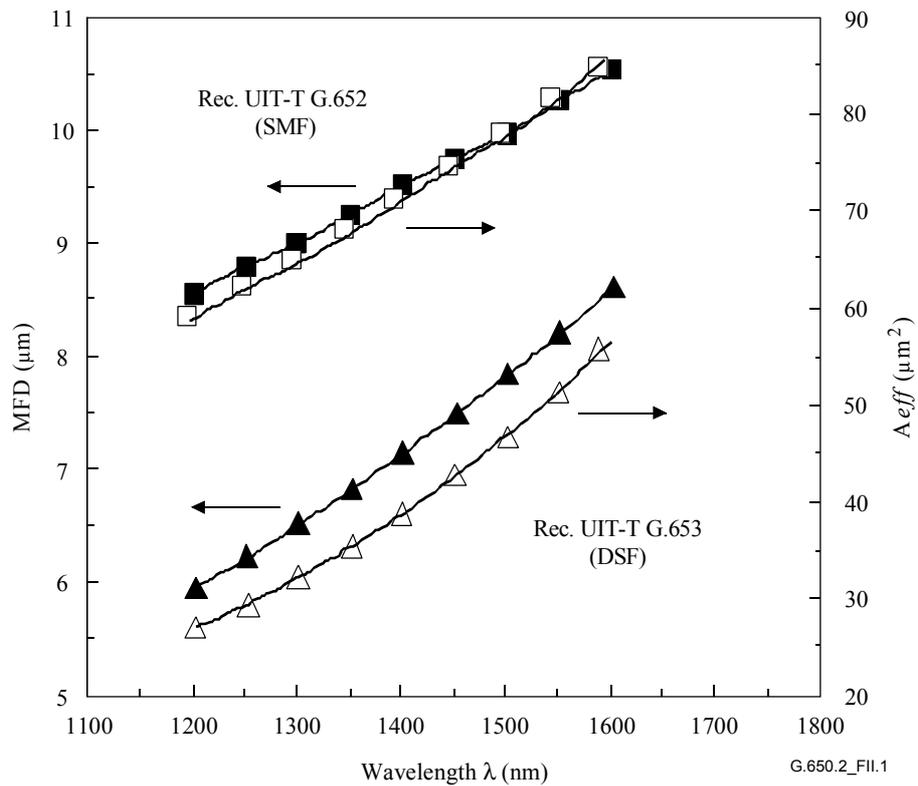
La figura II.3 muestra la relación entre la longitud de onda y A_{eff} para fibras G.653 (DSF) y G.655 (NZ-DSF) en la región de longitud de onda de 1520-1580 nm para aplicaciones WDM.

Se determinó que el valor medio y la desviación típica de k eran aproximadamente $0,953 \pm 0,005$ para fibras G.653 y $1,09 \pm 0,070$ para fibras G.655.

Cuadro II.1/G.650.2 – Resumen del factor de corrección k de A_{eff} y MFD (= 2W) de fibras G.652, G.653 y G.654 en base a los ejemplos de la figura II.2

Tipos de fibra	Longitud de onda λ	
	~ 1310 nm	~ 1550 nm
Rec. UIT-T G.652	0,970 ~ 0,980 (nota)	0,960 ~ 0,970
Rec. UIT-T G.654	...	0,975 ~ 0,985 (nota)
Rec. UIT-T G.653	0,940 ~ 0,950	0,950 ~ 0,960 (nota)
NOTA – Región de longitud de onda óptima.		

² NAMIHIRA (Y.), Relationship between non-linear effective area and mode field diameter for dispersion shifted fibres, *Electron. Lett.*, Vol. 30, N.º 3 págs. 262-263, 1994.



MFD A_{eff}
 ■ □ Rec. UIT-T G.652 (SMF) [Índice en escalón]
 ▲ △ Rec. UIT-T G.653 (DSF) [Índice no escalonado]

Figura II.1/G.650.2 – Ejemplo de dependencia entre la longitud de onda medida, A_{eff} y MFD ($= 2W$) para fibras G.652 y G.653

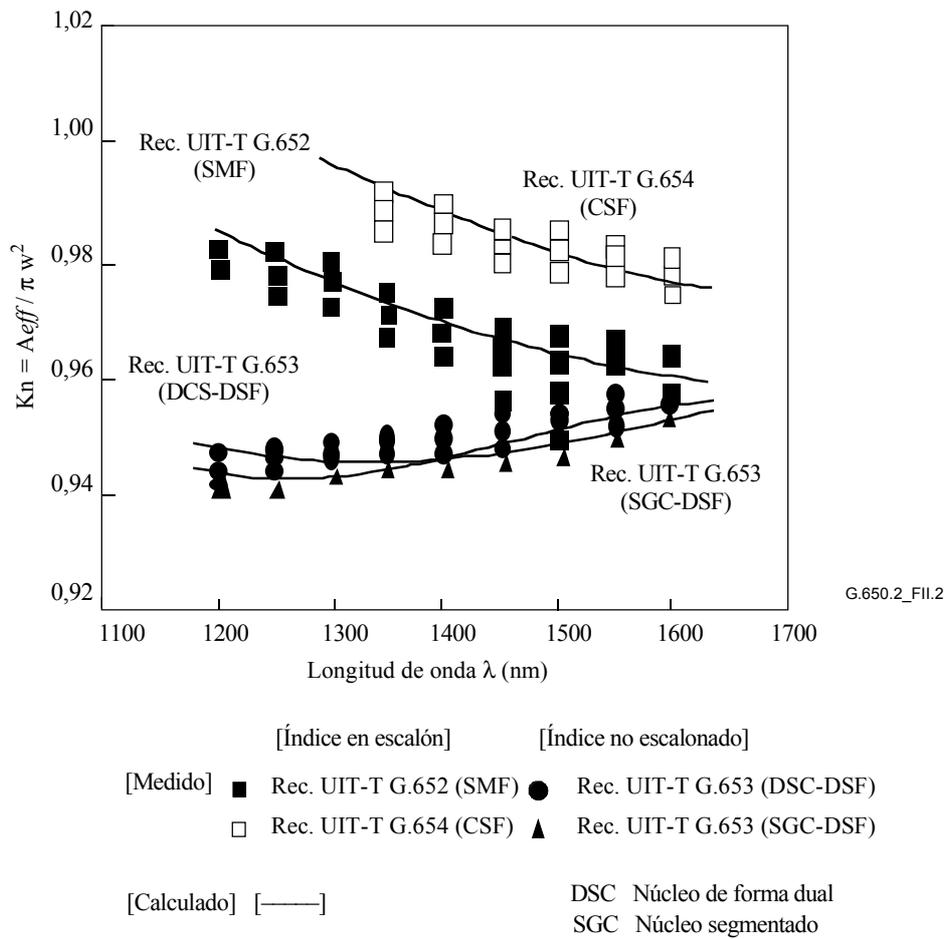


Figura II.2/G.650.2 – Ejemplo de dependencia entre la longitud de onda medida y calculada, y el factor de corrección k para fibras G.652, G.653 y G.654

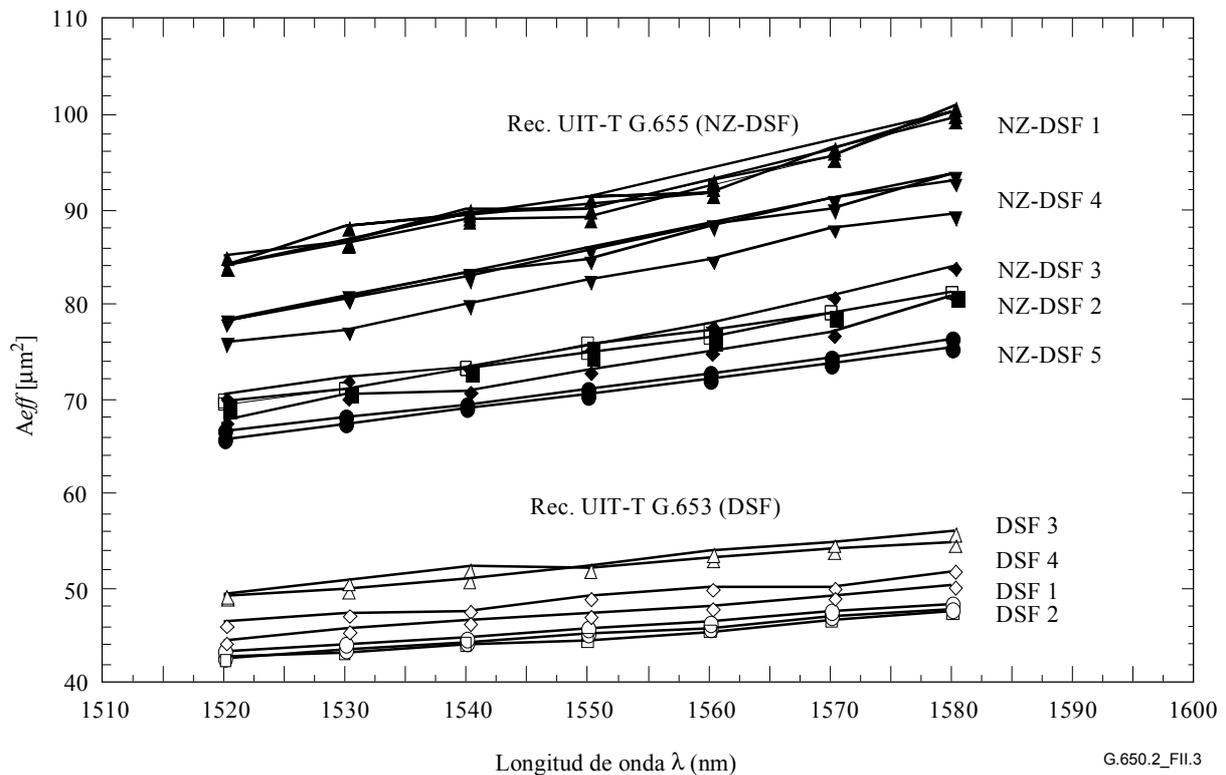


Figura II.3/G.650.2 – Ejemplo de dependencia entre la λ medida y A_{eff} para fibras G.653 y G.655

II.4 Coeficiente no lineal (n_2/A_{eff})

Con campos particularmente intensos, el índice de refracción de las fibras ópticas depende de la intensidad óptica dentro de las fibras, y puede expresarse como:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (\text{II-5})$$

donde n es el índice de refracción, n_0 la parte lineal del índice de refracción, n_2 el índice de refracción no lineal, e I la intensidad óptica dentro de las fibras.

El coeficiente no lineal se define como n_2/A_{eff} . Este coeficiente desempeña un papel importante al evaluar la degradación de la calidad de funcionamiento del sistema debido a las no linealidades cuando se utilizan sistemas de alta densidad de potencia.

Se estudian métodos para medir el coeficiente no lineal.

II.5 Dispersión de Brillouin estimulada

II.5.1 Descripción del efecto

En un sistema con modulación de intensidad y basado en una fuente de anchura espectral reducida, se transfiere una potencia óptica considerable de la señal de propagación progresiva a una señal de propagación regresiva cuando se sobrepasa el umbral de dispersión de Brillouin estimulada (SBS, *stimulated Brillouin scattering*). En la SBS, la luz con propagación progresiva se dispersa debido a los fonones acústicos. La adaptación de fase (o conservación de la cantidad de movimiento) dicta que la luz dispersada viaja preferentemente en sentido regresivo. La luz dispersada sufre desplazamiento descendente o desplazamiento de Brillouin en aproximadamente 11 GHz a 1550 nm.

II.5.2 Estimación del umbral de SBS en las fibras monomodo

II.5.2.1 Umbral de SBS

En general, el umbral de SBS se expresa como:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B} \quad (\text{II-6})$$

donde se supone que se utiliza una bomba de Lorentz y una anchura espectral de Brillouin, y g designa el coeficiente de ganancia de Brillouin (unidades de longitud/potencia), y A_{eff} es el área efectiva. K es una constante ($1 \leq K \leq 2$) determinada por el grado de libertad del estado de polarización. $\Delta\nu_B$ y $\Delta\nu_p$ representan la anchura de banda de Brillouin y la anchura espectral de la luz de bombeo (MHz) respectivamente. L_{eff} designa la longitud efectiva definida como:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (\text{II-7})$$

donde α es el coeficiente de atenuación y L es la longitud de la fibra.

El umbral de SBS, P_{th} , depende de la anchura espectral, $\Delta\nu_p$, de la luz de bombeo. Cuando $\frac{\Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \ll 1$, P_{th} alcanza su valor mínimo, que define la máxima potencia de entrada en régimen

permanente, P_m , en ausencia de una anchura espectral de bombeo más grande u otros esquemas de modulación. La potencia de entrada máxima se puede determinar así:

$$P_m = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \quad (\text{II-8})$$

NOTA 1 – La potencia de entrada máxima real de un sistema de transmisión puede ser aumentada por diversos esquemas de modulación de los que se informa en la documentación disponible.

NOTA 2 – P_{th} y P_m requieren ambos una estimación del coeficiente de ganancia, g , que debe determinarse experimentalmente y, opcionalmente, caracterizarse como una función del diámetro del campo modal para un determinado diseño de fibra.

II.5.2.2 Configuración experimental para medir el umbral SBS

En la figura II.4 se muestra una configuración para medir el umbral SBS. La bomba de 1,32 μm es un láser unifrecuencia de Nd:YAG bombeado por diodo láser con una anchura espectral de unos 5 kHz. La bomba de 1,55 μm es un diodo láser con realimentación distribuida monomodo (DFB LD, *distributed feedback laser diode*) con una anchura espectral de 200 kHz. La luz de onda continua (CW, *continuous wave*) procedente de la fuente DFB se amplificó con un amplificador de fibra dopada con erbio. Las anchuras espectrales de las luces de bombeo se consideran despreciables comparadas con $\Delta\nu_B$ (20 a 100 MHz). La luz de bombeo CW es inyectada en la fibra de prueba mediante un acoplador de fibra con una relación de derivación de 1,9. Las potencias luminosas transmitidas y retrodispersadas de entrada son supervisadas por medidores de potencia.

En la figura II.5 se muestra un ejemplo de la potencia transmitida y retrodispersada a 1,32 μm en función de la potencia de entrada en una fibra G.654 [3]. La potencia transmitida deja de crecer y la potencia retrodispersada aumenta rápidamente a medida que la potencia de entrada alcanza un cierto nivel de potencia. El umbral de SBS se define como la potencia de bombeo de entrada que produce una potencia de Stokes retrodispersada igual a la potencia de bombeo transmitida (véase la figura II.5). En el cuadro II.2 se resumen los parámetros de la fibra y los umbrales de SBS para diversos tipos de fibra.

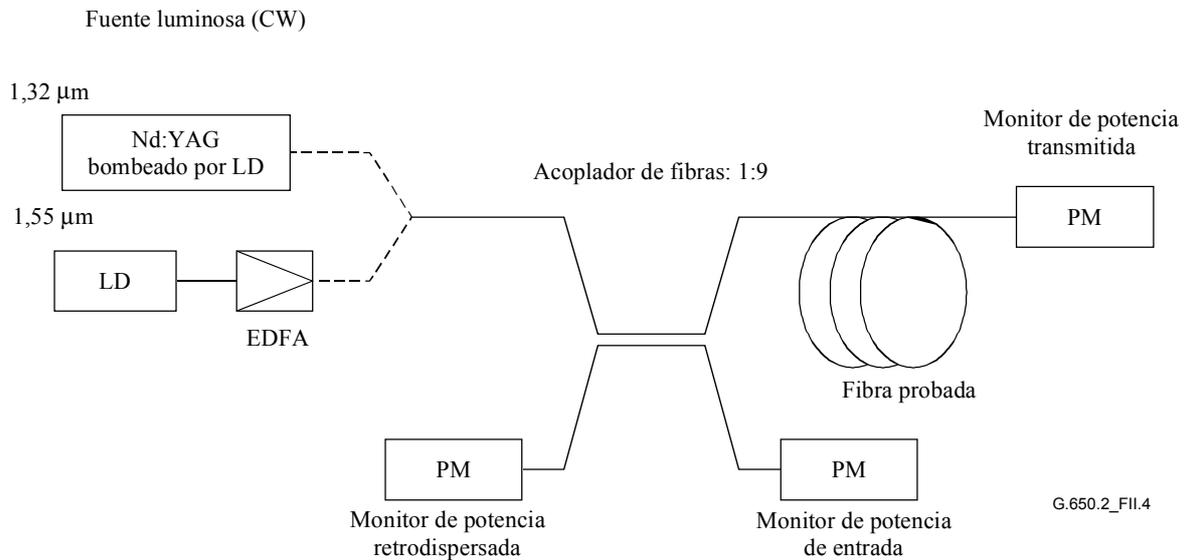


Figura II.4/G.650.2 – Configuración experimental

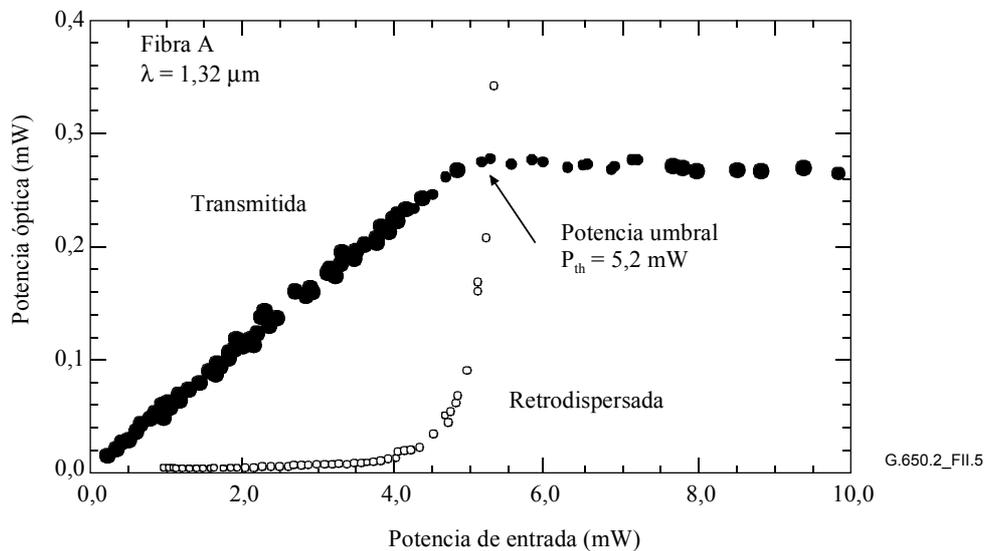


Figura II.5/G.650.2 – Potencia transmitida y retrodispersada en función de la potencia de entrada

Las potencias umbral en el cuadro II.2 sólo son válidas para las fibras sometidas a prueba en las condiciones de prueba descritas. En la utilización normal de los sistemas de transmisión se pueden aplicar valores considerablemente más elevados.

Cuadro II.2/G.650.2 – Parámetros de la fibra a prueba

Fibra		A	B	C	D	E	F	G
Tipo de fibra		Rec. UIT-T G.654	Rec. UIT-T G.652	Rec. UIT-T G.653				
Longitud L (km)		41,3	32,0	20,2	25,2	24,1	21,6	30,0
Pérdida (dB/km)	1320 nm	0,302	0,322	0,360	0,360	0,360	0,362	0,364
	1550 nm	0,172	0,194	0,200	0,200	0,200	0,200	0,209
MFD (μm)	1320 nm	9,1	9,8	6,3	6,5	6,3	6,7	6,2
	1550 nm	10,1	10,9	7,8	8,1	7,8	8,3	7,6
Cambio de desplazamiento de frecuencia de Brillouin (MHz)		1	1,5	1,5	–	–	–	6,0
Potencia umbral (mW)	1320 nm	5,2	6,4	3,3	3,4	2,9	3,6	4,1
	1550 nm	4,2	5,3	3,9	3,7	3,3	4,4	4,0

II.5.2.3 Estimación del umbral de SBS

En la figura II.6 se muestra la relación entre el umbral de SBS y $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$ de las fibras a prueba. Se observa que hay una relación lineal entre el umbral SBS y $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$. El umbral de SBS puede estimarse por la siguiente ecuación:

$$P_{th} = 0.11 \left[\frac{A_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}} \right] \quad (\text{II-9})$$

donde A_{eff} se expresa en μm^2 , L_{eff} en km, y P_{th} en mW.

La ecuación (II-9) se puede expresar de otra forma utilizando una longitud de fibra L, un diámetro del campo modal $2W$ y un coeficiente de atenuación α , como sigue:

$$P_{th} = 0.11 \left[k\pi \left(\frac{2W}{2} \right)^2 \frac{\alpha}{1 - \exp(-\alpha L)} \right] \quad (\text{II-10})$$

En este caso, k es un factor de corrección que relaciona el diámetro del campo modal con A_{eff} para un determinado diseño de fibra y longitud de onda.

NOTA – Si el desplazamiento de frecuencia de Brillouin cambia en más de varios MHz a lo largo de la fibra, P_{th} será mayor que el valor indicado por la ecuación (II-9).

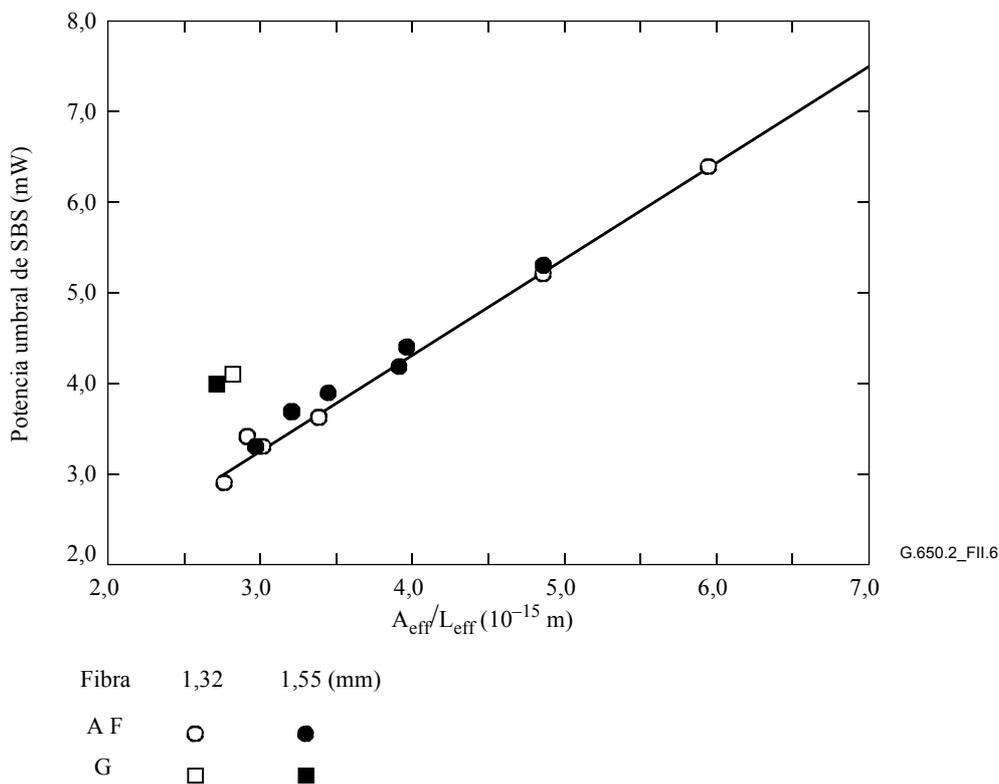


Figura II.6/G.650.2 – Relación entre el umbral de SBS y $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$

II.6 Otros efectos

Para una descripción de otros efectos ópticos no lineales (mezclado de cuatro ondas, inestabilidad de modulación, automodulación de fase, transmodulación de fase, solitones, y dispersión de Raman estimulada), véase el apéndice II/G.663.

Apéndice III

Métodos de prueba del área efectiva (A_{eff})

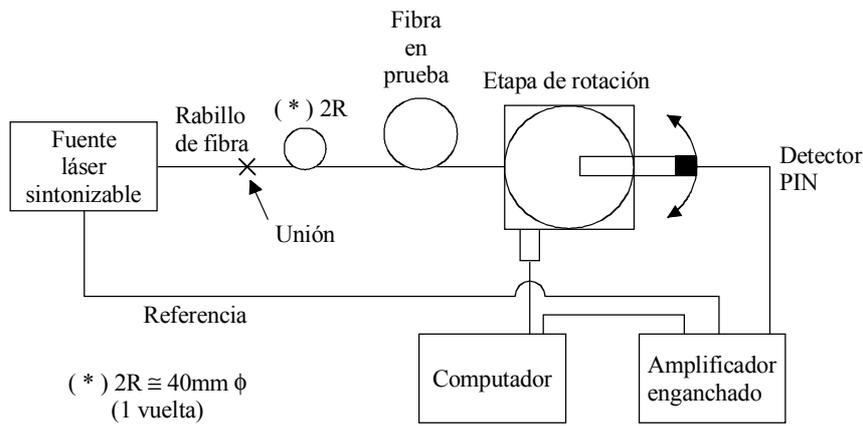
III.1 Técnica de exploración del campo lejano (FFS)

III.1.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras ópticas monomodo se determina mediante la técnica de exploración del campo lejano (FFS).

III.1.2 Aparato de prueba

En la figura III.1 se muestra un diagrama esquemático de la configuración de la prueba para la exploración de campo lejano (FFS, *far-field scan*).



G.650.2_FIII.1

Figura III.1/G.650.2 – Configuración típica de la exploración de campo lejano (FFS)

III.1.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.1.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.1.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.1.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.1.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.1.2.6 Aparato de exploración (como en 5.1.1.2.6/G.650.1)

III.1.2.7 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.1.2.8 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.1.2.9 Adquisición de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.1.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe alinearse con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe alinearse con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante la ecuación (III-1).

III.1.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración, se mide el grado de amplificación de los dispositivos ópticos de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones se conocen de antemano con la precisión necesaria. Se registra este grado de amplificación.

III.1.3.2 Cálculos

III.1.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

1) Superponer los datos de la potencia de radiación de campo lejano:

Sea $P(\theta_i)$ la potencia medida en función de la posición angular θ_i (radianes) indexada en función de i . La curva de potencia resultante, $P_f(\theta_i)$, para $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\text{máx}}$ es la siguiente :

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_{-i})}{2} \quad (\text{III-1})$$

- 2) Calcular el diagrama de intensidad de campo cercano:

Se utiliza un método numérico de integración adecuado para el cálculo de las partes componentes de la ecuación (III-1). La ecuación (III-2) es un ejemplo. Cualquier otro método de integración deberá tener al menos la misma precisión.

Calcular los valores de campo cercano para una gama de valores de los radios, r_j que van desde cero hasta un valor suficientemente grande (la intensidad calculada para el caso de radio máximo debe ser inferior a 0,01% de la intensidad máxima).

$$I(r_j) = \left[\sum_0^n P_f^{1/2}(\theta_1) J_0 \left(\frac{2\pi r_j \text{sen}(\theta_i)}{\lambda} \right) \text{sen}(2\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (\text{III-2})$$

donde $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$.

- 3) Calcular las integrales de la ecuación (III-2):

Utilizar un método de integración numérico adecuado para calcular las integrales de la ecuación (III-2). La ecuación (III-3) es un ejemplo. Cualquier otro método de integración deberá tener al menos la misma exactitud.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{III-3})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{III-4})$$

donde $\Delta r = r_1 - r_0$, y m es el número de posiciones medidas.

- 4) Terminar el cálculo:

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{III-5})$$

En la figura III.2 se muestra un ejemplo de datos de potencia de campo lejano medido.

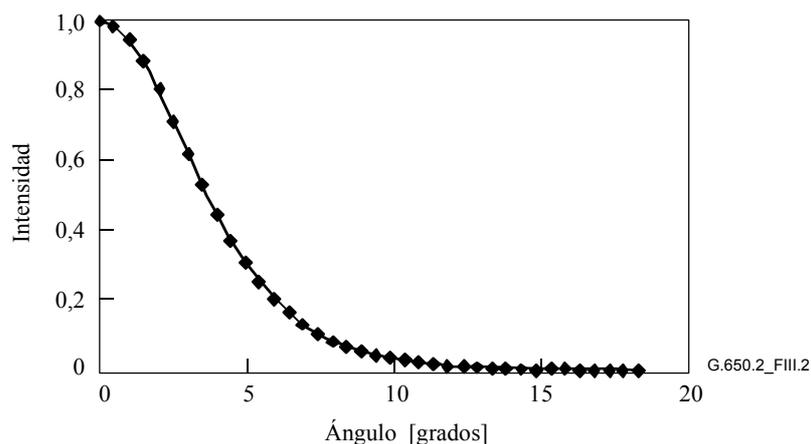


Figura III.2/G.650.2 – Ejemplo de datos de potencia de campo lejano medido

III.1.4 Presentación de resultados

Se presenta la siguiente información detallada:

- a) Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción de la disposición de apertura empleada (incluida la apertura numérica, NA).
- b) Condiciones de la inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Tipo y dimensiones del detector.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- h) Indicación de la precisión y de repetibilidad.
- i) Área efectiva (A_{eff}).
- j) Representación gráfica de $A_{\text{eff}}(\lambda)$ (si se requiere).

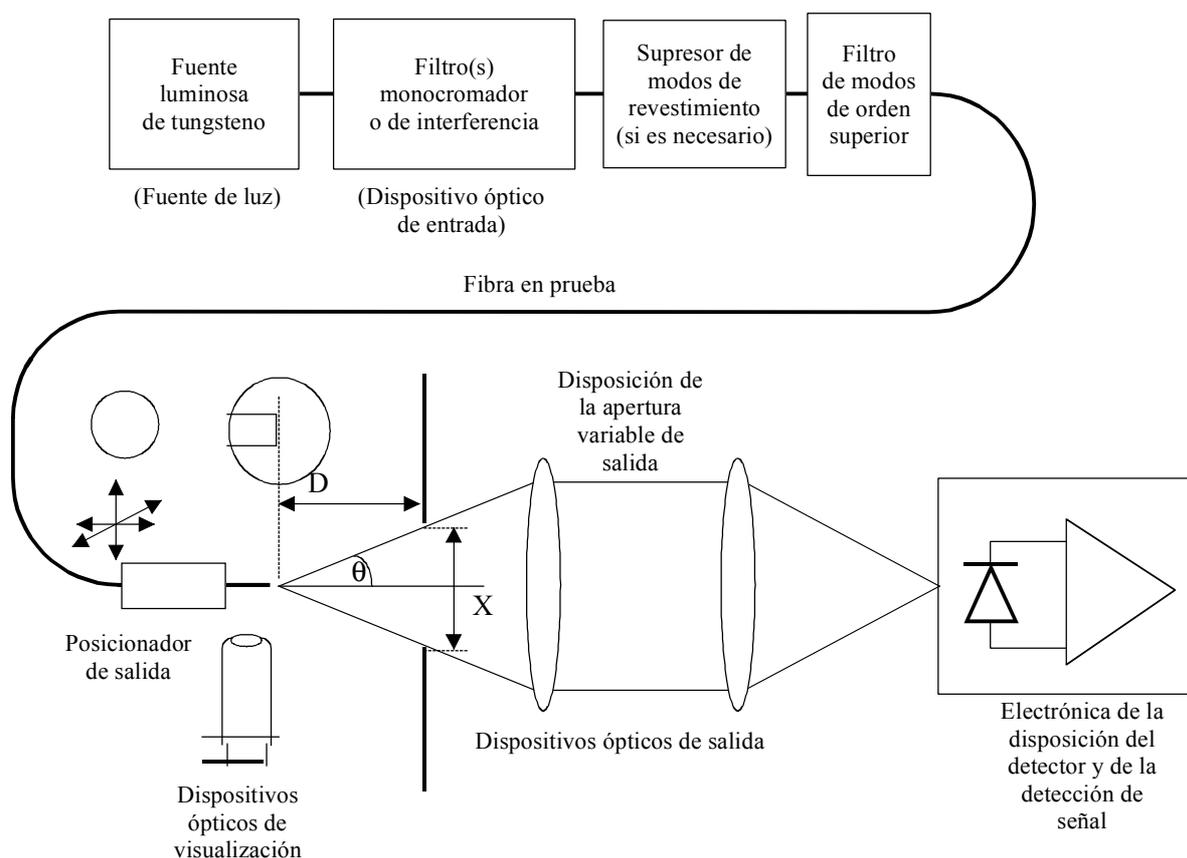
III.2 Técnica de apertura variable (VA, *variable aperture*)

III.2.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras monomodo se determina mediante la técnica de medición por apertura variable (VA) en el campo lejano.

III.2.2 Aparato de prueba

En la figura III.3 se muestra un diagrama esquemático de configuración de prueba en la que se aplica la técnica de apertura variable.



G.650.2_FIII.3

Figura III.3/G.650.2 – Configuración típica aplicada a la técnica de apertura variable

III.2.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.2.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.2.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.2.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.2.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.2.2.6 Aparato de apertura

Se debe utilizar un mecanismo con un mínimo de doce aparatos que abarquen la gama de ángulos mitad de las aperturas numéricas comprendidas entre 0,02 y 0,25 (0,4 para fibras del tipo Rec. UIT-T G.653). La luz transmitida por la apertura se recoge y se enfoca sobre el detector.

NOTA – La apertura numérica (NA) del dispositivo óptico colector debe ser suficientemente grande como para no afectar al resultado de las medidas.

III.2.2.7 Disposición de la apertura variable de salida

A una distancia D al menos $100 w^2/\lambda$ del extremo de la fibra se coloca un dispositivo de aperturas de transmisión redondas de varios tamaños (como una rueda de apertura), que se utiliza para variar la potencia obtenida del diagrama de radiación a la salida de la fibra. Normalmente se utilizan de 12 a 20 aperturas y se sitúan aproximadamente a 20-50 mm del extremo de la fibra. La máxima apertura numérica de la prueba debe ser 0,40. Las aperturas se centran en relación con el diagrama de salida de la fibra a fin de reducir la sensibilidad angular en el extremo de la fibra.

Como parte de la configuración (tal como se muestra en la figura III.4), se mide y se registra la distancia longitudinal D entre la posición del extremo de salida de la fibra y el plano de apertura, así como los diámetros X_i de cada apertura. Se determina el ángulo mitad subtendido de cada apertura de la rueda y se registran dichos valores θ_i , ($i = 1$ a n en orden de aperturas de tamaño creciente) para ser utilizados en cálculos ulteriores. Dichos valores son independientes de la longitud de onda de prueba.

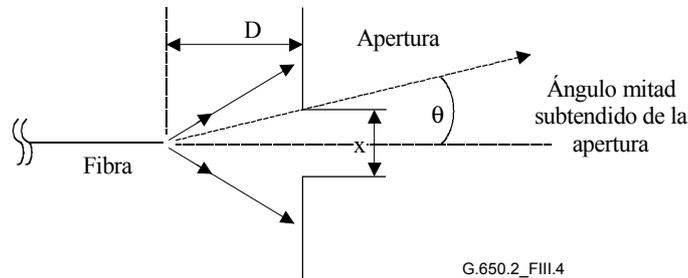


Figura III.4/G.650.2 – Configuración del aparato de apertura

III.2.2.8 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.2.2.9 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.2.2.10 Adquisición de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.2.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe coincidir con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe coincidir con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante las ecuaciones (III-6) a (III-10).

III.2.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración del equipo, se mide el grado de amplificación del dispositivo óptico de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones son conocidas de antemano con la precisión necesaria. Se registra el grado de amplificación.

III.2.3.2 Cálculos

III.2.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

La técnica de apertura variable (VA) permite medir la potencia total normalizada $f(\theta)$ que pasa a través de una determinada apertura, tal como se muestra en la figura III.3, que subtendiendo un ángulo de campo lejano θ en la fibra. Estos valores de potencia son equivalentes a una integración de la distribución de potencia del campo lejano $F^2(\theta)$. Ello se representa mediante la ecuación (III-6).

$$f(\theta) = \int_0^{\theta} F^2(\theta) \text{sen}(\theta) d\theta \quad (\text{III-6})$$

En la figura III.5 se representa gráficamente la potencia normalizada transmitida a través de las aperturas en función del ángulo θ .

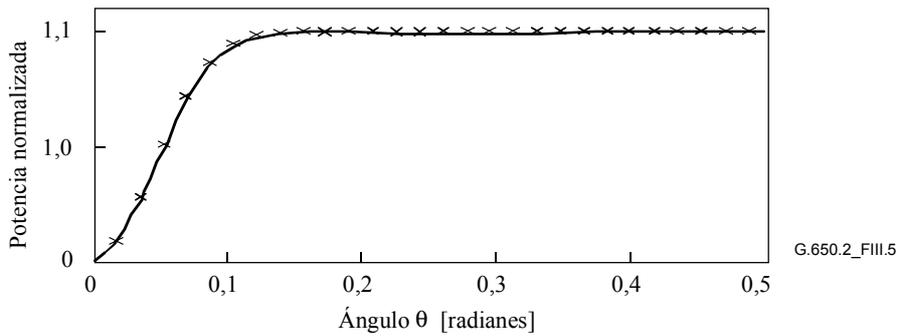


Figura III.5/G.650.2 – Representación de la apertura variable medida

Una función de cuarto grado se ajusta bien a los datos de apertura de campo lejano;

$$f(\theta) = A\theta^4 + B\theta^3 + C\theta^2 + D\theta^1 + E \quad \text{(III-7)}$$

El área efectiva, A_{eff} , se calcula a partir de la distribución de potencia de campo cercano $I(r)$ expresada en función del radio r . Para calcularla se deben diferenciar los datos de potencia integrada, $f(\theta)$, para obtener la distribución de potencia de campo lejano $F^2(\theta)$.

$$F^2(\theta) = \frac{df(\theta)}{d(\theta)} \cdot \frac{1}{\text{sen}\theta} \quad \text{(III-8)}$$

En la figura III.6 se representa la distribución de potencia de campo lejano calculada.

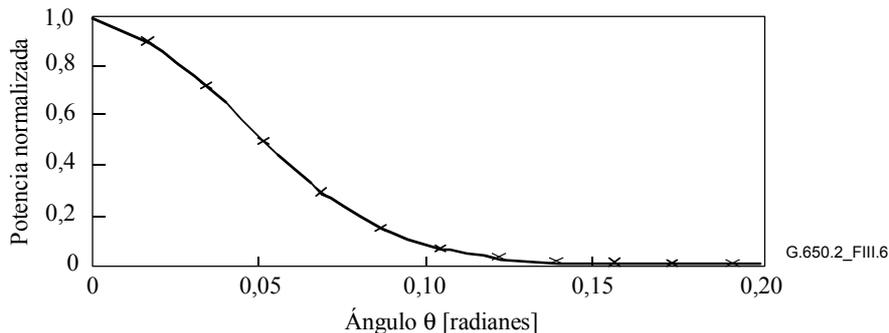


Figura III.6/G.650.2 – Representación de la distribución de la potencia de campo lejano

A partir de la distribución de la potencia de campo lejano $F^2(\theta)$ es posible calcular la distribución de potencia de campo cercano $I(r)$ expresada en función del radio r , utilizando la transformada de Hankel inversa:

$$I(r) = \left[\int_0^\infty \sqrt{F^2(\theta)} \cdot J_0\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \text{sen}2\theta d\theta \right]^2 \quad \text{(III-9)}$$

En la figura III.7 se representa la distribución de campo cercano, $I(r)$ en función del radio r .

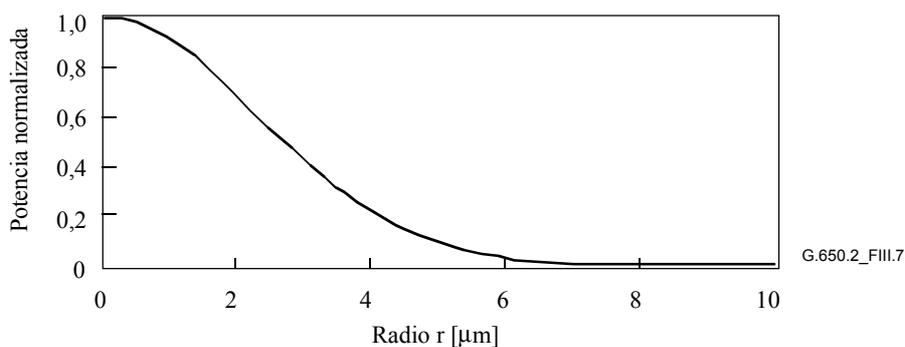


Figura III.7/G.650.2 – Representación de la distribución de potencia de campo cercano

El área efectiva (A_{eff}) se calcula a partir de la distribución de campo cercano $I(r)$ mediante la ecuación (III-10).

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \cdot \frac{\left[\int_0^{\infty} I(r) \cdot r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 \cdot r dr} \quad (\text{III-10})$$

III.2.4 Presentación de resultados

Se debe presentar la siguiente información:

- a) Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción del montaje empleado para la apertura (incluida la apertura numérica).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Tipo y dimensiones del detector.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando ello sea necesario).
- h) Indicación de la precisión y de repetibilidad.
- i) Área efectiva (A_{eff}).
- j) Gráfico de $A_{\text{eff}}(\lambda)$ (si se requiere).

III.3 Técnica de exploración del campo cercano (NFS, *near-field scan*)

III.3.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras monomodo se calcula mediante la técnica de medida de exploración del campo cercano (NFS).

III.3.2 Aparato de pruebas

III.3.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.3.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.3.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.3.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.3.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.3.2.6 Aparato de exploración (como en 5.1.3.2.6/G.650.1)

III 3.2.7 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.3.2.8 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.3.2.9 Registro de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.3.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe coincidir con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe coincidir con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante las ecuaciones (III-11) a (III-15).

III.3.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración del equipo, se mide el grado de amplificación del dispositivo óptico de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones son conocidas de antemano con la precisión necesaria. Se registra el grado de amplificación.

III.3.3.2 Cálculos

III.3.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

1) Se calcula el centroide:

Para una determinada sección del diagrama de campo cercano (NFC) de dimensiones máximas, cuyos valores de posición vienen dados por r y los valores de intensidad por $I(r_i)$, la posición del centroide r_c , viene dada por:

$$r_c = \frac{\sum r_i I(r_j)}{\sum I(r_i)} \quad (\text{III-11})$$

2) Calcular el perfil de intensidad por superposición:

Se vuelven a indexar los datos de posición y de intensidad alrededor de la posición r_c de tal forma que las posiciones por encima tengan valores de índice mayores de cero y las posiciones por debajo tengan valores de índice menores de cero. El índice máximo viene dado por n . El perfil de intensidad por superposición es:

$$I_f(r_i) = \{I(r_i) + I(r_{-i})\} / 2 \quad (\text{III-12})$$

3) Calcular las integrales de la ecuación (III-12):

Utilizar un método de integración numérica adecuado para calcular las integrales de la ecuación (III-12). A continuación se presenta un ejemplo. Cualquier otro método de integración debe ser al menos tan preciso como éste.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{III-13})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{III-14})$$

donde $\Delta r = r_1 - r_0$

4) Terminar el cálculo:

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{III-15})$$

En la figura III.7 se presenta un ejemplo de diagrama de campo cercano calculado.

III.3.4 Presentación de los resultados

Se debe presentar la información siguiente:

- a) Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción del montaje empleado para la apertura (incluida la apertura numérica).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Tipo y dimensiones del detector.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- h) Indicación de la precisión y de repetibilidad.
- i) Área efectiva (A_{eff}).
- j) Gráfico de $A_{eff}(\lambda)$ (si se requiere).

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie B	Medios de expresión: definiciones, símbolos, clasificación
Serie C	Estadísticas generales de telecomunicaciones
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedios
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	RGT y mantenimiento de redes: sistemas de transmisión, circuitos telefónicos, telegrafía, facsímil y circuitos arrendados internacionales
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos y comunicación entre sistemas abiertos
Serie Y	Infraestructura mundial de la información y aspectos del protocolo Internet
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación