



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

**UIT-T**

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

**G.650**

(04/97)

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

Características de los medios de transmisión – Cables de  
fibra óptica

---

**Definición y métodos de prueba de los  
parámetros pertinentes de las fibras monomodo**

Recomendación UIT-T G.650

(Anteriormente Recomendación del CCITT)

---

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

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
<b>SISTEMAS INTERNACIONALES ANALÓGICOS DE PORTADORAS</b>	
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
<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN</b>	
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
<b>Cables de fibra óptica</b>	<b>G.650–G.659</b>
Características de los componentes y los subsistemas ópticos	G.660–G.699
<b>SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DIGITAL</b>	
EQUIPOS TERMINALES	G.700–G.799
REDES DIGITALES	G.800–G.899
SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DIGITALES DE LÍNEA	G.900–G.999

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

## **RECOMENDACIÓN UIT-T G.650**

### **DEFINICIÓN Y MÉTODOS DE PRUEBA DE LOS PARÁMETROS PERTINENTES DE LAS FIBRAS MONOMODO**

#### **Orígenes**

La Recomendación UIT-T G.650, ha sido revisada por la Comisión de Estudio 15 (1997-2000) del UIT-T y fue aprobada por el procedimiento de la Resolución N.º 1 de la CMNT el 8 de abril de 1997.

## 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 Conferencia Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (CMNT), 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 N.º 1 de la CMNT.

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 ha recibido/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 1997

Es propiedad. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o utilizarse, de ninguna forma o por ningún medio, sea éste electrónico o mecánico, de fotocopia o de microfilm, sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

# ÍNDICE

## Página

1	Definición y métodos de prueba de los parámetros pertinentes de las fibras monomodo .....	1
1.1	Definiciones generales .....	1
1.1.1	perfil de índice de refracción .....	1
1.1.2	método de prueba de referencia (RTM, <i>reference test method</i> ) .....	1
1.1.3	método de prueba alternativo (ATM, <i>alternative test method</i> ).....	1
1.1.4	supresor de modos de revestimiento.....	1
1.1.5	filtro de modos.....	1
1.2	Características mecánicas .....	1
1.2.1	recubrimiento primario .....	1
1.2.2	recubrimiento secundario.....	1
1.2.3	nivel de prueba de resistencia mecánica.....	1
1.2.4	parámetro de corrosión por tensión .....	2
1.3	Características del campo modal .....	2
1.3.1	campo modal.....	2
1.3.2	diámetro del campo modal (MFD, <i>mode field diameter</i> ) .....	2
1.3.3	centro del campo modal.....	2
1.3.4	error de concentricidad del campo modal.....	2
1.3.5	no circularidad del campo modal.....	3
1.4	Características del revestimiento .....	3
1.4.1	revestimiento .....	3
1.4.2	centro del revestimiento.....	3
1.4.3	diámetro del revestimiento .....	3
1.4.4	desviación del diámetro de la superficie del revestimiento.....	3
1.4.5	campo de tolerancia del revestimiento .....	3
1.4.6	no circularidad del revestimiento.....	3
1.5	Definiciones relativas a la dispersión cromática.....	3
1.5.1	dispersión cromática .....	3
1.5.2	coeficiente de dispersión cromática.....	3
1.5.3	pendiente de dispersión nula.....	4
1.5.4	longitud de onda de dispersión nula .....	4
1.5.5	desplazamiento de la longitud de onda de la fuente .....	4
1.5.6	desplazamiento de la dispersión .....	4
1.6	Otras características .....	4
1.6.1	longitud de onda de corte.....	4
1.6.2	atenuación.....	5
1.6.3	Dispersión por modo de polarización (PMD, <i>polarization mode dispersion</i> )	6

2	Métodos de prueba para las fibras monomodo .....	8
2.1	Métodos de prueba para el diámetro del campo modal .....	8
2.1.1	Método de prueba de referencia: Exploración de campo lejano.....	8
2.1.2	Primer método de prueba alternativo: Técnica de apertura variable .....	11
2.1.3	Segundo método de prueba alternativo: Exploración de campo próximo.....	12
2.2	Métodos de prueba para el diámetro del revestimiento, el error de concentricidad del campo modal y la no circularidad del revestimiento .....	13
2.2.1	Método de prueba de referencia: Técnica del campo próximo transmitido ..	13
2.2.2	Primer método de prueba alternativo: Técnica del campo próximo refractado .....	16
2.2.3	Segundo método de prueba alternativo: Técnica de visión lateral .....	18
2.2.4	Tercer método de prueba alternativo: Técnica de imagen del campo próximo transmitido .....	21
2.3	Métodos de prueba para la longitud de onda de corte.....	23
2.3.1	Método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte ( $\lambda_c$ ) de la fibra con recubrimiento primario y método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte ( $\lambda_{cj}$ ) de los cables puente: Técnica de la potencia transmitida .....	23
2.3.2	Método de prueba alternativo para $\lambda_c$ : Técnica del mandril dividido .....	28
2.3.3	Método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte de fibra cableada ( $\lambda_{cc}$ ): Técnica de la potencia transmitida .....	29
2.3.4	Método de prueba alternativo para la longitud de onda de corte ( $\lambda_{cc}$ ) de la fibra cableada.....	31
2.4	Métodos de prueba para la atenuación.....	32
2.4.1	Método de prueba de referencia: Técnica de la fibra cortada.....	32
2.4.2	Primer método de prueba alternativo: Técnica de retroesparcimiento .....	35
2.4.3	Segundo método de prueba alternativo: Técnica de la pérdida de inserción.	38
2.5	Métodos de prueba para la dispersión cromática.....	42
2.5.1	Método de prueba de referencia: Técnica del desplazamiento de fase.....	42
2.5.2	Primer método de prueba alternativo: Técnica interferométrica .....	46
2.5.3	Segundo método de prueba alternativo: Técnica de retardo de los impulsos	50
2.6	Métodos de prueba mecánica de recepción.....	52
2.6.1	Método de prueba de referencia: Tensión longitudinal .....	52
2.7	Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización.....	57
2.7.1	Técnica de autoanálisis de la matriz de Jones .....	57
2.7.2	Técnica del analizador fijo.....	62
2.7.3	Método de prueba: Técnica interferométrica.....	71
2.7.4	Método del estado de polarización principal (PSP).....	76

	<b>Página</b>
Apéndice I – Métodos de interpolación de longitud de onda de corte.....	81
I.1 Método del error negativo limitado .....	81
I.2 Método de los mínimos cuadrados .....	83
Apéndice II – Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma.....	83
Apéndice III – Atributos no lineales .....	85
III.1 Consideraciones básicas.....	85
III.2 Area efectiva ( $A_{\text{eff}}$ ).....	86
III.3 Factor de corrección k.....	86
III.4 Coeficiente no lineal ( $n_2/A_{\text{eff}}$ ) .....	88
III.5 Dispersión de Brillouin estimulada.....	89
III.5.1 Descripción del efecto .....	89
III.5.2 Estimación del umbral de SBS en las fibras monomodo.....	89
III.6 Otros efectos .....	92



## Recomendación G.650

# DEFINICIÓN Y MÉTODOS DE PRUEBA DE LOS PARÁMETROS PERTINENTES DE LAS FIBRAS MONOMODO

(revisada en 1997)

## 1 Definición y métodos de prueba de los parámetros pertinentes de las fibras monomodo

### 1.1 Definiciones generales

#### 1.1.1 perfil de índice de refracción

Índice de refracción a lo largo de un diámetro de la fibra.

#### 1.1.2 método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*)

Método en el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica de una manera estrictamente de acuerdo con la definición de esta característica y dan resultados precisos, reproducibles y que pueden relacionarse con el uso práctico.

#### 1.1.3 método de prueba alternativo (ATM, *alternative test method*)

Método en el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica de una manera acorde con la definición de esta característica y da resultados reproducibles que pueden relacionarse con los del método de prueba de referencia y con el uso práctico.

#### 1.1.4 supresor de modos de revestimiento

Dispositivo que favorece la conversión de los modos de revestimiento en modos de radiación.

#### 1.1.5 filtro de modos

Dispositivo diseñado para aceptar o rechazar un modo o unos modos determinados.

### 1.2 Características mecánicas

#### 1.2.1 recubrimiento primario

Una o más capas de material de recubrimiento de protección aplicadas al revestimiento de la fibra durante el proceso de estirado o después para preservar la integridad de la superficie del revestimiento y proporcionar una cantidad mínima de protección requerida (por ejemplo, un recubrimiento de protección de 250  $\mu\text{m}$ ).

#### 1.2.2 recubrimiento secundario

Una o más capas de material de recubrimiento aplicadas sobre una o más fibras con recubrimiento primario para dar una protección adicional necesaria o disponer las fibras juntas en una estructura particular (por ejemplo, un recubrimiento "tampón" de 900  $\mu\text{m}$ , "envoltura apretada" o un recubrimiento de cinta).

#### 1.2.3 nivel de prueba de resistencia mecánica

Valor especificado de resistencia a la tracción o de deformación a la que se somete un largo completo de fibra durante un breve periodo de tiempo especificado. Esto se hace normalmente de manera secuencial en todo el largo de la fibra.

### 1.2.4 parámetro de corrosión por tensión

El parámetro  $n$  de corrosión por tensión (susceptibilidad) es un coeficiente adimensional relacionado empíricamente con la dependencia del crecimiento de las grietas respecto a la tensión aplicada. Depende de la temperatura ambiente, de la humedad y de otras condiciones ambientales.

Para este parámetro puede darse un valor estático y un valor dinámico.

El valor estático  $n_s$  es el valor, con signo menos, de la pendiente del gráfico en coordenadas doblemente logarítmicas de la fatiga estática, representada por la relación entre tiempo de fallo y tensión aplicada.

El valor dinámico es  $n_d$ , siendo  $1/(n_d + 1)$  la pendiente del gráfico en coordenadas doblemente logarítmicas de la fatiga dinámica, representada por la relación entre tensión de fallo y tasa de tensión aplicada.

NOTA –  $n$  no tiene por qué ser un valor entero.

## 1.3 Características del campo modal

### 1.3.1 campo modal

El campo modal es la distribución de campo monomodal del modo LP<sub>01</sub> que produce una distribución de intensidad espacial en la fibra.

### 1.3.2 diámetro del campo modal (MFD, *mode field diameter*)

El diámetro del campo modal (MFD)  $2w$  representa una medida del alcance transversal de la intensidad de campo electromagnético del modo en una sección transversal, y se define a partir de la distribución de intensidad de campo lejano  $F^2(\theta)$ , siendo  $\theta$  el ángulo de campo lejano, mediante la siguiente ecuación:

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin^3\theta \cos\theta d\theta} \right]^{1/2} \quad (1-1)$$

### 1.3.3 centro del campo modal

El centro del campo modal es la posición del centroide de la distribución espacial de intensidad en la fibra.

NOTA 1 – El centroide está situado en  $r_c$ , y es la integral normalizada del vector de posición  $r$ , ponderada según la intensidad:

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA} \quad (1-2)$$

NOTA 2 – La correspondencia entre la posición del centroide que se ha definido y la posición del máximo de la distribución espacial de intensidad queda en estudio.

### 1.3.4 error de concentricidad del campo modal

Distancia entre el centro del campo modal y el centro de la superficie del revestimiento.

### **1.3.5 no circularidad del campo modal**

Como normalmente no es necesario medir la no circularidad del campo modal para fines de aceptación (como se indica en 1.4.1 de las Recomendaciones G.652, G.653 y G.654), no es necesaria en este contexto una definición de la no circularidad del campo modal.

## **1.4 Características del revestimiento**

### **1.4.1 revestimiento**

Región más externa de índice de refracción constante en la sección transversal de la fibra.

### **1.4.2 centro del revestimiento**

En una sección transversal de la fibra óptica, centro del círculo que mejor corresponde al límite exterior del revestimiento.

NOTA – Debe especificarse el método de mejor ajuste. Un método posible se describe en el apéndice I a la sección I del anexo B/G.651.

### **1.4.3 diámetro del revestimiento**

Diámetro del círculo que define el centro del revestimiento.

### **1.4.4 desviación del diámetro de la superficie del revestimiento**

Diferencia entre los valores real y nominal del diámetro del revestimiento.

### **1.4.5 campo de tolerancia del revestimiento**

En una sección transversal de la fibra óptica, región entre el círculo que circunscribe el límite exterior del revestimiento y el mayor círculo, concéntrico con el primero, que corresponde al límite exterior del revestimiento. Ambos círculos tendrán el mismo centro que el revestimiento.

### **1.4.6 no circularidad del revestimiento**

Diferencia entre los diámetros de los dos círculos definidos por el campo de tolerancia del revestimiento, dividida por el diámetro nominal del revestimiento.

## **1.5 Definiciones relativas a la dispersión cromática**

### **1.5.1 dispersión cromática**

Diseminación de un impulso luminoso en una fibra óptica por las diferentes velocidades de grupo de las diferentes longitudes de onda que componen el espectro de la fuente.

NOTA – La dispersión cromática puede deberse a una o más de las siguientes contribuciones: dispersión debida al material, dispersión debida al guionondas, dispersión debida al perfil de índice.

### **1.5.2 coeficiente de dispersión cromática**

Variación del retardo de un impulso luminoso en una unidad de longitud de fibra causada por una unidad de variación de longitud de onda. Suele expresarse en ps/(nm · km).

NOTA – La duración de un impulso luminoso por unidad de anchura espectral de la fuente después de haber atravesado una unidad de longitud de fibra es igual al coeficiente de dispersión cromática, si se dan los siguientes requisitos previos:

- 1) la fuente tiene un amplio espectro;
- 2) la duración del impulso a la entrada de la fibra es breve comparada con la de la salida; la longitud de onda es diferente de la longitud de onda de dispersión nula.

### 1.5.3 pendiente de dispersión nula

Pendiente del coeficiente de dispersión cromática en función de la curva de longitud de onda a la longitud de onda de dispersión nula.

### 1.5.4 longitud de onda de dispersión nula

Longitud de onda a la que desaparece la dispersión cromática.

### 1.5.5 desplazamiento de la longitud de onda de la fuente

Sólo para las fibras de la Recomendación G.653.

Diferencia absoluta entre la longitud de onda de trabajo de la fuente y 1550 nm.

### 1.5.6 desplazamiento de la dispersión

Sólo para las fibras de la Recomendación G.653.

Desplazamiento absoluto de la longitud de onda de dispersión nula con respecto a 1550 nm.

## 1.6 Otras características

### 1.6.1 longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte teórica es la longitud de onda más pequeña a la que puede propagarse un modo único en una fibra monomodo. Este parámetro puede calcularse a partir del perfil del índice de refracción de la fibra. A longitudes de onda inferiores a la longitud de onda de corte teórica, se propagan varios modos, y la fibra ya no es monomodo, sino multimodo.

En las fibras ópticas, el cambio de comportamiento multimodo a monomodo no se produce a una longitud de onda aislada, sino de forma suave a lo largo de una gama de longitudes de onda. Por consiguiente, para determinar la calidad de funcionamiento de la fibra en una red de telecomunicaciones, la longitud de onda de corte teórica es menos útil que la longitud de onda umbral real para la calidad de funcionamiento monomodo cuando la fibra está en funcionamiento. De esta forma, se introducirá un parámetro más efectivo denominado longitud de onda de corte para especificaciones de fibra monomodo, que se define a continuación:

La longitud de onda de corte se define como la longitud de onda mayor que aquella para la cual la relación entre la potencia total, incluida la de los modos de orden superior inyectados, y la potencia del modo fundamental disminuye a menos de 0,1 dB. Con arreglo a esta definición, el modo de segundo orden (LP<sub>11</sub>) sufre 19,3 dB más atenuación que el modo fundamental (LP<sub>01</sub>) cuando los modos están excitados por igual.

Debido a que la longitud de onda de corte depende de la longitud y flexiones de la fibra, así como de su condición de deformación, el valor resultante de la longitud de onda de corte depende de si la fibra medida está configurada en una condición cableada instalada, o de si la fibra es corta y no está cableada. Por consiguiente, hay tres tipos de longitud de onda de corte definidos: **longitud de onda de corte del cable, longitud de onda de corte de la fibra, y longitud de onda de corte del cable puente.**

**Longitud de onda de corte del cable  $\lambda_{cc}$**  – La longitud de onda de corte de un cable se mide antes de la instalación en un largo de cable de 22 m prácticamente recto preparado descubriendo 1 m de fibra con recubrimiento primario, donde en cada uno de los extremos descubierto se incorpora un bucle de 40 mm de radio. Alternativamente, este parámetro puede medirse en 22 m de fibra no cableada con recubrimiento primario holgadamente constreñida en bucles de radio > 140 mm, incorporando un bucle de 40 mm de radio en cada extremo.

Pueden utilizarse configuraciones alternativas si se demuestra que los resultados empíricos son equivalentes dentro de 10 nm, o bien son mayores que los obtenidos con las configuraciones de muestra. Por ejemplo, dos bucles de 40 mm de radio en un largo de 2 metros de fibra no cableada satisfacen el criterio equivalente en algunos diseños de fibra y de cable.

**Longitud de onda de corte de la fibra  $\lambda_c$**  – La longitud de onda de corte de una fibra se mide en una fibra con recubrimiento primario no cableada en la siguiente configuración: 2 metros, con un bucle de 140 mm de radio (o equivalente, por ejemplo, mandrel dividido) holgadamente constreñido, manteniendo el resto de la fibra prácticamente recto.

**Longitud de onda de corte del cable puente  $\lambda_{cj}$**  – La longitud de onda de corte de un cable puente se mide en un cable puente en la siguiente configuración: 2 metros, con un bucle de x mm de radio<sup>1</sup> (o equivalente, por ejemplo, mandrel dividido), manteniendo el resto del cable puente recto.

A fin de evitar aumentos no deseados del ruido y de la dispersión, la longitud de onda de corte  $\lambda_{cc}$  de la menor longitud de cable (incluidos los largos de reparación, si los hubiere) debe ser inferior al menor valor previsto de la longitud de onda del sistema,  $\lambda_s$ :

$$\lambda_{cc} < \lambda_s \quad (1-3)$$

Con esto se asegura que cada sección de cable individual sea suficientemente monomodal. En todo empalme que no sea perfecto se producirá alguna potencia de un modo de orden superior ( $LP_{11}$ ) y, normalmente, las fibras monomodo permiten la propagación de este modo en una distancia corta (de unos cuantos metros, según las condiciones de instalación). En consecuencia, hay que especificar una distancia mínima entre las uniones (o empalmes), a fin de que la fibra sea lo suficientemente larga para atenuar el modo  $LP_{11}$  antes de que éste llegue a la unión siguiente. Si se cumple la desigualdad (1-3) para la sección de cable más corta, se cumplirá automáticamente para todas las secciones de cables de mayor longitud, y el sistema tendrá un comportamiento monomodal cualquiera que sea la longitud de la sección elemental de cable.

La longitud de onda de corte de la fibra y el diámetro del campo modal pueden combinarse para estimar una sensibilidad a la flexión de la fibra. Una elevada longitud de onda de corte y un pequeño diámetro del campo modal producen una fibra más resistente a la flexión, lo cual explica por qué es deseable a menudo especificar valores superiores de la longitud de onda de corte  $\lambda_c$ , aun si el límite superior de este parámetro supera la longitud de onda de trabajo. Todas las técnicas de instalación prácticas y diseños de cable asegurarán una longitud de onda de corte del cable por debajo de la longitud de onda de trabajo.

Dado que la especificación de la longitud de onda de corte del cable,  $\lambda_{cc}$ , es una forma más directa de asegurar el funcionamiento de un cable monomodo, se prefiere especificar esto a especificar la longitud de onda de corte de la fibra,  $\lambda_c$ . Sin embargo, cuando las circunstancias no permiten la pronta especificación de  $\lambda_{cc}$ , (por ejemplo, en un cable de una sola fibra, tales como rabillos de fibra, puentes o cables que hay que instalar de una manera considerablemente diferente que en el método de prueba de referencia (RTM de la  $\lambda_{cc}$ ), especificando luego un límite superior de  $\lambda_{cj}$  o  $\lambda_c$  si así conviene. Esta opción se trata en las Recomendaciones G.652, G.653, G.654 y G.655.

## 1.6.2 atenuación

La atenuación  $A(\lambda)$  a una longitud de onda  $\lambda$  entre dos secciones (1 y 2) transversales de una fibra, separadas por una distancia  $L$ , se define como sigue:

---

<sup>1</sup> Algunas Administraciones especifican un radio x de 76 mm.

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (\text{dB}) \quad (1-4)$$

donde  $P_1(\lambda)$  es la potencia óptica que atraviesa la sección transversal 1, y  $P_2(\lambda)$  la potencia óptica que atraviesa la sección transversal 2 a la longitud de onda  $\lambda$ .

Para una fibra uniforme, es posible definir una atenuación por unidad de longitud o un coeficiente de atenuación:

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad (\text{dB/ unidad de longitud}) \quad (1-5)$$

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

#### 1.6.3.1 el fenómeno de la PMD

La dispersión por modo de polarización es un tiempo de retardo del grupo diferencial (DGD, *differential group delay time*) 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 dada arbitrariamente instalada en un momento dado y a una frecuencia óptica determinada, existen siempre dos estados de polarización, denominados estados de polarización principales (PSP, véase 1.6.3.2) de manera que la dispersión de impulsos debida a la PMD se desvanece, 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.

#### 1.6.3.2 estados de polarización principales (PSP, *principal states of polarization*)

Cuando se hace trabajar una fibra óptica 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 con los cuales las polarizaciones de salida no varían cuando se varía 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, la 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.

#### 1.6.3.3 retardo de grupo diferencial ( $[\delta\tau(v)] = \text{ps}$ )

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 un orden de magnitud. 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 de modos entre los modos de polarización. En dicho caso, la distribución de probabilidades de los DGD es una distribución maxweliana.

#### 1.6.3.4 retardo de PMD

Se cree que la equivalencia de las tres siguientes definiciones de retardo de PMD se halla dentro de los límites de reproducibilidad de la medición en todos los casos prácticos.

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

$$P_s = 2 \left( \langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} = 2 \left( \frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} - \left( \frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (1-6)$$

$t$  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 2.7.3.

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 ( $\nu_1, \nu_2$ ):

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu) c \nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (1-7)$$

NOTA 2 – La promediación a lo largo de la temperatura, del tiempo, o de las perturbaciones mecánicas es generalmente una alternativa aceptable a la promediación a lo largo de la frecuencia.

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

$$P_r = \left( \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

#### 1.6.3.5 Coeficiente de PMD

Se distinguirán dos casos:

– Acoplamiento de modos débil (fibras cortas):

$$PMD_c [ps / km] = P_s / L, P_m / L, \text{ o } P_r / L \quad (1-9)$$

– Acoplamiento de modos fuerte (fibras largas):

$$PMD_c [ps/\sqrt{km}] = P_s/\sqrt{L}, P_m/\sqrt{L}, \text{ o } P_r/\sqrt{L} \quad (1-10)$$

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 1-10.

Las fibras de alta birrefringencia no muestran 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 unos pocos casos intermedios puede observarse acoplamiento en los cables instalados. Hay en estudio 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.

## **2 Métodos de prueba para las fibras monomodo**

En esta parte se indican en general, para cada parámetro, tanto el método de prueba de referencia (RTM) como uno o varios métodos de prueba alternativos (ATM), 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 asegurar la estabilidad, la eliminación del ruido, la relación señal/ruido, etc.

### **2.1 Métodos de prueba para el diámetro del campo modal**

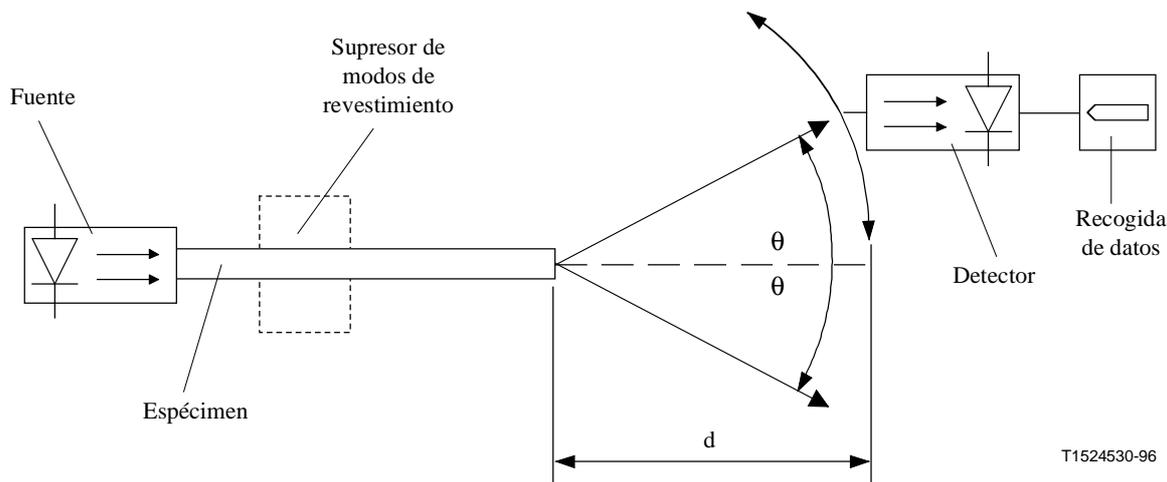
#### **2.1.1 Método de prueba de referencia: Exploración de campo lejano**

##### **2.1.1.1 Generalidades**

El diámetro del campo modal se determina a partir de la distribución de intensidad de campo lejano  $F^2(\theta)$ , de acuerdo con la definición que aparece en 1.3.2. Los límites de integración presentados son 0 y  $\pi/2$ , pero se entiende que esta notación implica la truncación de las integrales en el límite del argumento creciente. Aunque el máximo valor físico del argumento  $\theta$  es  $\pi/2$ , los integrandos se aproximan rápidamente a cero antes de alcanzarse este valor. El error relativo en la determinación del diámetro del campo modal, introducido por esta truncación, se trata en 2.1.1.2.6.

##### **2.1.1.2 Aparato de prueba**

En la figura 1 se presenta un diagrama esquemático del aparato de prueba.



**Figura 1/G.650 – Configuración de prueba típica de la exploración de campo lejano**

#### 2.1.1.2.1 Fuente luminosa

La fuente luminosa será estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Las características espectrales de la fuente deben elegirse de manera que se excluya el funcionamiento multimodo. La anchura espectral entre puntos de amplitud mitad (FWHM, *full width half maximum*) no será superior a 10 nm.

#### 2.1.1.2.2 Modulación

Suele modularse la fuente luminosa para mejorar la relación señal/ruido en el receptor. De adoptarse este procedimiento, el detector debe conectarse a un sistema de procesamiento de señales sincronizado con la frecuencia de modulación de la fuente. La característica de sensibilidad del sistema de detección debe ser prácticamente lineal.

#### 2.1.1.2.3 Condiciones de inyección

Las condiciones de inyección empleadas deben ser suficientes para excitar el modo fundamental ( $LP_{01}$ ). Por ejemplo, podrían ser técnicas de inyección adecuadas:

- la unión con una fibra;
- la inyección con un sistema óptico adecuado.

Se tendrá cuidado de que no se propaguen modos de orden superior. A tal fin puede que haga falta introducir un bucle de radio adecuado u otro filtro de modos para suprimir los modos de orden superior.

#### 2.1.1.2.4 Supresores de modos de revestimiento

Se tomarán precauciones para evitar la propagación y detección de modos de revestimiento.

#### 2.1.1.2.5 Espécimen

El espécimen será un tramo corto de la fibra óptica a medir. Se retirará el recubrimiento primario de la sección de la fibra inserta en el supresor de modos, si se utiliza. Los extremos de la fibra estarán limpios, lisos y perpendiculares a los ejes de la fibra. Se recomienda que las caras terminales estén limpias y sean planas y perpendiculares a los ejes de la fibra, con una tolerancia de  $1^\circ$ .

#### **2.1.1.2.6 Aparato de exploración**

Se utilizará un mecanismo para explorar la distribución de intensidad de campo lejano (por ejemplo, un fotodetector de exploración con abertura de micro-orificio o un fotodetector de exploración con extremo de tallo de fibra). El detector debe estar al menos a 10 milímetros del extremo de la fibra y la superficie activa del detector no debe subtender un ángulo demasiado grande en el campo lejano. Esto puede conseguirse colocando el detector a una distancia del extremo de fibra superior a  $40wb/\lambda$ , donde  $2w$  es el diámetro del campo modal previsto de la fibra que ha de medirse y  $b$  es el diámetro de la superficie activa del detector.

La gama dinámica mínima de la medición debe ser de 50 dB, lo que corresponde a un semiángulo de exploración máximo de  $20^\circ$  y  $25^\circ$ , o superior, para las fibras conformes a las Recomendaciones G.652 y G.653, respectivamente.

NOTA 1 – La reducción de las necesidades de gama dinámica (o del semiángulo de exploración máximo) puede producir errores. Por ejemplo, si se restringen los valores de las fibras de la Recomendación G.652 a 30 dB y  $12,5^\circ$ , y los valores de las fibras de la Recomendación G.653 a 40 dB y  $20^\circ$ , en la determinación del MFD puede aparecer un error relativo superior al 1%.

NOTA 2 – Para las fibras de la Recomendación G.654 cabe hacer las mismas consideraciones que para las fibras de la Recomendación G.652.

#### **2.1.1.2.7 Detector**

Se utilizará un detector adecuado, que debe tener una característica de sensibilidad lineal.

#### **2.1.1.2.8 Amplificador**

Se utilizará un amplificador para poder aumentar el nivel de señal.

#### **2.1.1.2.9 Recogida de datos**

El nivel de señal medido se registrará y procesará con arreglo a la técnica utilizada.

#### **2.1.1.3 Procedimiento de medición**

El extremo de inyección de la fibra se alinearán con el haz de inyección, y el extremo de salida de la fibra se alinearán con el dispositivo de salida apropiado.

Debe seguirse el siguiente procedimiento: haciendo una exploración del detector en pasos fijos no superiores a  $0,5^\circ$  se mide la distribución de intensidad en campo lejano,  $F^2(\theta)$ , y se calcula el diámetro del campo modal por la ecuación 1-1.

#### **2.1.1.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba, gama dinámica del sistema de medición, algoritmos de procesamiento, y una descripción de los dispositivos de exploración utilizados (incluido el ángulo de exploración).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral de la fuente entre puntos de amplitud mitad 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 es necesario).
- h) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- i) Diámetro del campo modal.

## 2.1.2 Primer método de prueba alternativo: Técnica de apertura variable

### 2.1.2.1 Generalidades

El diámetro del campo modal se determina a partir de la función de transmisión de potencia complementaria,  $a(x)$ , (donde  $x = D \cdot \tan \theta$  es el radio de apertura y  $D$  la distancia entre la apertura y la fibra):

$$2w = (\lambda / \pi D) \left[ \int_0^{\infty} a(x) \frac{x}{(x^2 + D^2)^2} dx \right]^{-1/2} \quad (2-1)$$

La equivalencia matemática de las ecuaciones 1-1 y 2-1 es válida en la aproximación de pequeños ángulos  $\theta$ . En esta aproximación, la ecuación 2-1 puede obtenerse de la ecuación 1-1 por integración.

### 2.1.2.2 Aparato de prueba

2.1.2.2.1 Fuente luminosa (igual que 2.1.1.2.1)

2.1.2.2.2 Modulación (igual que 2.1.1.2.2)

2.1.2.2.3 Condiciones de inyección (igual que 2.1.1.2.3)

2.1.2.2.4 Supresor de modo de revestimiento (igual que 2.1.1.2.4)

2.1.2.2.5 Espécimen (igual que 2.1.1.2.5)

### 2.1.2.2.6 Aparato de apertura

Debe utilizarse un mecanismo que comprenda al menos 12 aperturas que cubran la gama de semiángulos de apertura numérica de 0,02 a 0,25 (0,4 en el caso de las fibras consideradas en la Recomendación G.653). La señal luminosa transmitida por la apertura es captada y enfocada hacia el detector.

NOTA – La apertura numérica (NA, *numerical aperture*) de los dispositivos ópticos de captación debe ser lo suficientemente elevada para no afectar los resultados de la medición.

2.1.2.2.7 Detector (igual que 2.1.1.2.7)

2.1.2.2.8 Amplificador (igual que 2.1.1.2.8)

2.1.2.2.9 Recogida de datos (igual que 2.1.1.2.9)

### 2.1.2.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra deberá alinearse con el haz de inyección y el extremo de salida de la fibra se alineará con el dispositivo de salida apropiado.

Debe aplicarse el siguiente procedimiento: se mide la potencia transmitida por cada apertura,  $P(x)$ , determinándose la función de transmisión de apertura complementaria mediante la siguiente fórmula:

$$a(x) = 1 - \frac{P(x)}{P_{\text{máx}}} \quad (2-2)$$

donde  $P_{\text{máx}}$  es la potencia transmitida por la mayor apertura y  $x$  es el radio de la apertura. El diámetro del campo modal se calcula a partir de la ecuación 2-1.

#### 2.1.2.4 Presentación de los resultados

Se indicarán los siguientes pormenores:

- a) configuración de prueba, gama dinámica del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y descripción del conjunto de apertura utilizado (incluyendo la apertura numérica);
- b) condiciones de inyección;
- c) longitud de onda y anchura espectral de la fuente entre puntos de amplitud mitad 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 exactitud y repetibilidad;
- i) diámetro del campo modal.

#### 2.1.3 Segundo método de prueba alternativo: Exploración de campo próximo

##### 2.1.3.1 Generalidades

El diámetro del campo modal se determina a partir de la distribución de intensidad de campo próximo  $f^2(r)$  (siendo  $r$  la coordenada radial):

$$2w = 2 \left[ \frac{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r \left[ \frac{df(r)}{dr} \right]^2 dr} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

La equivalencia matemática de las ecuaciones 1-1 y 2-3 es válida en la aproximación de pequeños ángulos  $\theta$ . En esta aproximación, el campo próximo  $f(r)$  y el campo lejano  $F(\theta)$  forman un par de Hankel. Por medio de la transformada de Hankel es posible pasar de la ecuación 1-1 a la ecuación 2-3 y a la inversa.

##### 2.1.3.2 Aparato de prueba

2.1.3.2.1 Fuente luminosa (igual que 2.1.1.2.1)

2.1.3.2.2 Modulación (igual que 2.1.1.2.2)

2.1.3.2.3 Condiciones de inyección (igual que 2.1.1.2.3)

2.1.3.2.4 Supresores de modos de revestimiento (igual que 2.1.1.2.4)

2.1.3.2.5 Espécimen (igual que 2.1.1.2.5)

##### 2.1.3.2.6 Aparato de exploración

Se empleará un dispositivo óptico de ampliación (por ejemplo, un objetivo de microscopio) para agrandar y enfocar una imagen del campo próximo de la fibra en el plano de un detector de

exploración (por ejemplo, un fotodetector de exploración con una abertura de micro-orificio y un fotodetector de rabillo de exploración). La apertura numérica y la ampliación se seleccionarán de manera compatible con la resolución espacial deseada. Para la calibración, el aumento del dispositivo óptico debe haberse medido explorando la longitud de un espécimen cuyas dimensiones son conocidas independientemente con suficiente exactitud.

**2.1.3.2.7 Detector** (igual que 2.1.1.2.7)

**2.1.3.2.8 Amplificador** (igual que 2.1.1.2.8)

**2.1.3.2.9 Recogida de datos** (igual que 2.1.1.2.9)

### **2.1.3.3 Procedimiento de medición**

El extremo de inyección de la fibra se alinearán con el haz de inyección y el extremo de salida de la fibra se alinearán con el dispositivo de salida apropiado.

Debe aplicarse el siguiente procedimiento: el campo próximo de la fibra es ampliado por el dispositivo óptico de aumento y enfocado en el plano del detector. El enfoque se efectuará con la máxima exactitud a fin de reducir los errores dimensionales debidos a la exploración de una imagen desenfocada. Se explora la distribución de intensidad de campo próximo,  $f^2(r)$  y se calcula el diámetro del campo modal por la ecuación 2-3. Otra posibilidad sería transformar la distribución de intensidad de campo próximo  $f^2(r)$  en el dominio del campo lejano utilizando una transformada de Hankel y el campo transformado resultante  $F^2(\theta)$  puede utilizarse para calcular el diámetro del campo modal por la ecuación 1-1.

NOTA – Discriminación entre la coordenada radial  $r$  en la cara extrema de la fibra y la coordenada radial  $M_r$  del detector de exploración en el plano de imagen, siendo  $M$  el aumento.

### **2.1.3.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba, gama dinámica del sistema de medición, algoritmo de procesamiento y descripción del dispositivo de exploración utilizado (incluida la apertura numérica).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral de la fuente entre puntos de amplitud mitad de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Ampliación del aparato.
- g) Tipo y dimensiones del detector.
- h) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- i) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- j) Diámetro del campo modal.

## **2.2 Métodos de prueba para el diámetro del revestimiento, el error de concentricidad del campo modal y la no circularidad del revestimiento**

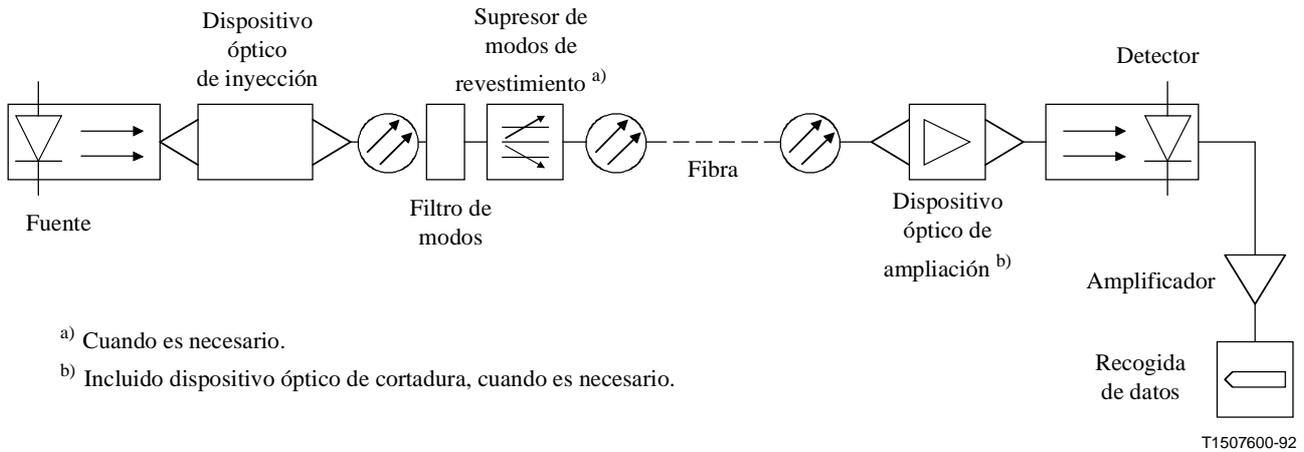
### **2.2.1 Método de prueba de referencia: Técnica del campo próximo transmitido**

#### **2.2.1.1 Generalidades**

Los parámetros geométricos se determinan a partir de la distribución de intensidad de campo próximo, de acuerdo con las definiciones dadas en 1.3.4, 1.4.3 y 1.4.6.

### 2.2.1.2 Aparato de prueba

La figura 2 muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba.



**Figura 2/G.650 – Configuración de prueba típica de la técnica de campo próximo transmitido**

#### 2.2.1.2.1 Fuente luminosa

Para iluminar el núcleo se utilizará una fuente luminosa de longitud de onda nominal de 1310 nm ó 1550 nm, para las fibras de que tratan la Recomendación G.652 o las Recomendaciones G.653 y G.654, respectivamente. Dicha fuente será ajustable en intensidad y estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Las características espectrales de esta fuente deben elegirse de manera que se excluya el funcionamiento multimodo. Si es necesario, puede utilizarse una segunda fuente luminosa de características similares para iluminar el revestimiento. Las características espectrales de la segunda fuente luminosa no deben causar desenfoco de la imagen.

#### 2.2.1.2.2 Condiciones de inyección

El dispositivo óptico de inyección, que se dispondrá de modo que cubra completamente la fibra, enfocará un haz de luz sobre el extremo de entrada plano de la fibra.

#### 2.2.1.2.3 Filtro de modos

En la medición es necesario garantizar el funcionamiento monomodo en la longitud de onda de medición. En estos casos puede ser necesario introducir una curvatura para eliminar el modo  $LP_{11}$ .

#### 2.2.1.2.4 Supresor de modos de revestimiento

Se empleará un supresor de modos de revestimiento adecuado para eliminar la potencia óptica que se propaga por el revestimiento. Cuando se miden solamente las características geométricas del revestimiento, el supresor de modos de revestimiento no estará presente.

#### 2.2.1.2.5 Espécimen

El espécimen consistirá en un tramo corto de la fibra óptica a medir. Los extremos de la fibra estarán limpios y lisos, y perpendiculares al eje de la fibra.

#### **2.2.1.2.6 Dispositivo óptico de ampliación**

El dispositivo óptico de ampliación consistirá en un sistema óptico (por ejemplo, un objetivo de microscopio) que amplía el campo próximo de salida del espécimen, y lo enfoca sobre el plano del detector de exploración. La apertura numérica, y por ende el poder de resolución del dispositivo óptico, será compatible con la exactitud de medición requerida y no inferior a 0,3. La ampliación se elegirá de modo que sea compatible con la resolución espacial deseada y se registrará.

#### **2.2.1.2.7 Detector**

Se utilizará un detector apropiado que proporcione la intensidad punto a punto del diagrama (o diagramas) de campo próximo transmitido. Por ejemplo, podrá utilizarse cualquiera de las siguientes técnicas:

- a) fotodetector de exploración con abertura de micro-orificio;
- b) espejo de exploración con abertura de micro-orificio fijo y fotodetector;
- c) vidicon de exploración, dispositivos acoplados por carga u otros dispositivos de reconocimiento de diagrama/intensidad.

El detector tendrá un comportamiento lineal (o será linealizado) en la gama de intensidades encontrada.

#### **2.2.1.2.8 Amplificador**

Se utilizará un amplificador para aumentar el nivel de la señal. Su anchura de banda se escogerá según el tipo de exploración utilizado. Cuando se explora el extremo de salida de la fibra con sistemas mecánicos u ópticos, suele modularse la fuente óptica. Cuando se adopta este procedimiento, el amplificador deberá estar asociado a la frecuencia de modulación de la fuente.

#### **2.2.1.2.9 Recogida de datos**

La distribución de intensidad medida puede registrarse y presentarse en forma adecuada, con arreglo a la técnica de exploración y los requisitos de especificación.

### **2.2.1.3 Procedimiento de medición**

#### **2.2.1.3.1 Calibración del equipo**

Para la calibración del equipo, la ampliación del dispositivo óptico se medirá explorando la imagen de un espécimen cuyas dimensiones se conozcan ya con exactitud suficiente.

Se registrará esta ampliación.

#### **2.2.1.3.2 Medición**

El extremo de inyección de la fibra se alineará con el haz de inyección, y el extremo de salida de la fibra se alineará con el eje óptico del dispositivo óptico de ampliación. Para las mediciones de campo próximo, la imagen (o imágenes) enfocada del extremo de salida de la fibra será explorada por el detector de acuerdo con los requisitos de especificación. El enfoque se efectuará con la máxima exactitud, a fin de reducir los errores de dimensión debidos a la exploración de una imagen desenfocada. Después se calculan los parámetros geométricos deseados de acuerdo con las definiciones.

Se están estudiando algoritmos para la definición de bordes y el cálculo de parámetros geométricos.

#### **2.2.1.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba, con indicación de la técnica de exploración utilizada.

- b) Condiciones de inyección.
- c) Características espectrales de la fuente (o fuentes).
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de filtro de modos (en su caso).
- f) Ampliación del dispositivo óptico.
- g) Tipo y dimensiones del detector de exploración.
- h) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- i) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- j) Parámetros dimensionales resultantes, como diámetros del revestimiento, no circularidades del revestimiento, error de concentricidad del campo modal, etc.

## 2.2.2 Primer método de prueba alternativo: Técnica del campo próximo refractado

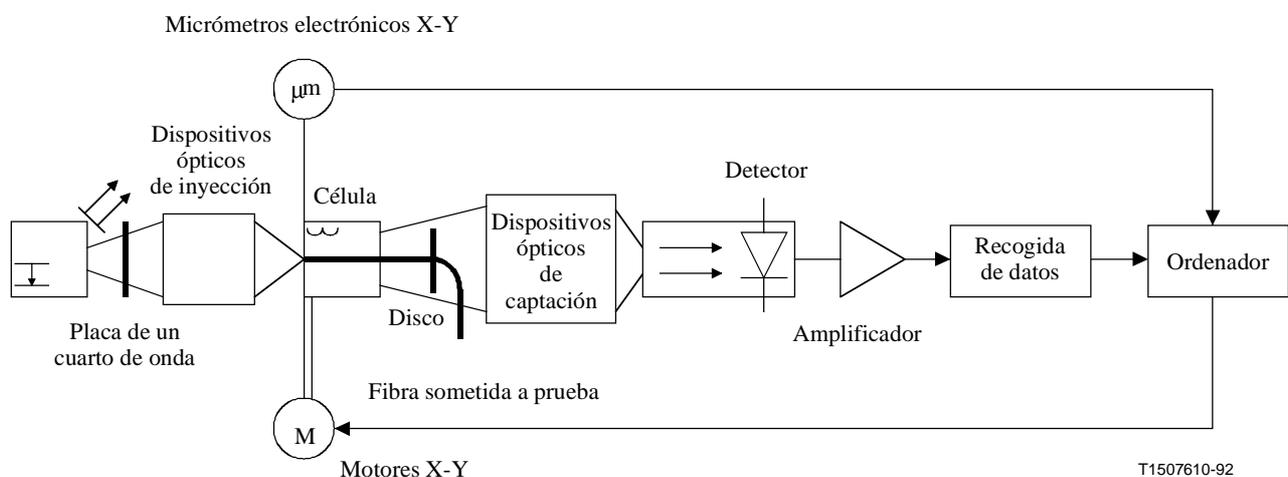
### 2.2.2.1 Generalidades

La medición del campo próximo refractado da directamente la distribución del índice de refracción en toda la sección transversal de la fibra (núcleo y revestimiento). Las características geométricas de la fibra pueden obtenerse a partir de la distribución del índice de refracción, utilizando los algoritmos adecuados.

### 2.2.2.2 Aparato de prueba

En la figura 3 se muestra un diagrama esquemático de la medición. La técnica consiste en la exploración de un punto luminoso enfocado a través del extremo de la fibra. El dispositivo óptico de inyección se dispone de forma que desborde la apertura numérica de la fibra. El extremo de la fibra se sumerge en un fluido de índice ligeramente superior al del revestimiento. Parte de la luz es guiada por la fibra y el resto aparece como un cono hueco fuera de la fibra. Se coloca un disco sobre el eje del núcleo para asegurarse de que sólo llegue al detector la luz refractada.

La resolución óptica, y por tanto la posibilidad de resolver detalles de la geometría de la fibra, depende del tamaño del punto luminoso enfocado. Ésta depende de la apertura numérica de la lente de enfoque y del tamaño del disco. Sin embargo, la posición de los rasgos más acusados puede resolverse con una exactitud mucho mayor que ésta, según el tamaño del escalón en los sistemas motores por pasos, o según la exactitud del control de posición en los sistemas analógicos.



**Figura 3/G.650 – Configuración de prueba típica de la técnica de campo próximo refractado**

#### **2.2.2.2.1 Fuente**

Se necesita un láser estable, tal como un láser HeNe, con una potencia de 1 milivatio aproximadamente en el modo TEM<sub>00</sub>.

Se introduce una placa de un cuarto de onda para cambiar la polarización del haz de línea circular, pues la reflectividad de la luz en una interfaz aire-vidrio depende mucho del ángulo y de la polarización.

#### **2.2.2.2.2 Condiciones de inyección**

El dispositivo óptico de inyección, que se dispone de forma que desborde la apertura numérica de la fibra, enfoca un haz luminoso sobre el extremo plano de la fibra. El eje óptico del haz luminoso no debe estar a más de 1° del eje de la fibra. La resolución del equipo la determina el tamaño del punto enfocado, que debe ser lo más pequeño posible para hacer máxima la resolución, por ejemplo, inferior a 1,0 μm. El equipo permite la exploración del punto enfocado a lo largo del diámetro de la fibra.

#### **2.2.2.2.3 Célula**

La célula debe contener un fluido con un índice de refracción ligeramente mayor que el del revestimiento de la fibra. La posición de la célula será controlada por motores X-Y activados por el ordenador y detectada por micrómetros X-Y.

#### **2.2.2.2.4 Detección**

La luz refractada se capta mediante dispositivos ópticos adecuados y se lleva al detector de cualquier manera conveniente, pero debe captarse toda la luz refractada. Puede determinarse por cálculo el tamaño necesario del disco y su posición a lo largo del eje central.

#### **2.2.2.2.5 Recogida de datos**

La distribución de intensidad medida puede registrarse, procesarse y presentarse de forma adecuada, de acuerdo con la técnica de exploración y con los requisitos de especificación. Se utilizará un ordenador para activar los motores X-Y para registrar la posición X-Y de la célula y los correspondientes niveles de potencia y para procesar los datos medidos.

#### **2.2.2.3 Procedimiento**

Véase el diagrama esquemático del aparato de prueba (figura 3).

##### **2.2.2.3.1 Preparación de la fibra sometida a prueba**

Se requiere un largo de fibra de 2 m aproximadamente.

Se quita el recubrimiento primario de la fibra en la sección sumergida en la célula de fluido.

Los extremos de la fibra deben estar limpios y tener una superficie suave, y hallarse en posición perpendicular al eje de la fibra.

##### **2.2.2.3.2 Calibración del equipo**

El equipo se calibra con la fibra fuera de la célula de fluido. Durante la medición, el ángulo del cono luminoso varía según el índice de refracción visto en el punto de entrada a la fibra (de ahí la variación de la potencia que atraviesa el disco). Una vez sacada la fibra y conocidos el índice del fluido y el espesor de la célula, puede simularse este cambio del ángulo desplazando el disco a lo largo del eje óptico. Desplazando el disco a cierto número de posiciones determinadas de antemano puede trazarse a escala el perfil en función de índice relativo. El índice absoluto sólo puede

determinarse si se conoce con exactitud el índice del revestimiento o del líquido a la longitud de onda y a la temperatura en que se efectúa la medición.

Pueden seguirse procedimientos de calibración más adecuados utilizando una varilla fina de índice de refracción conocido y constante o una fibra multimodo y multipasos, cuando los diferentes valores de índices de refracción son conocidos con mucha exactitud. Esta última técnica también puede emplearse para comprobar la linealidad del aparato. A este respecto, quizá también resulte útil controlar la temperatura del fluido en la célula de fluido.

#### **2.2.2.3.3 Exploración de barrido**

El extremo de inyección de la fibra que debe medirse se introduce en la célula fluida y, al mismo tiempo, se centra el haz láser y se enfoca en la cara externa de la fibra.

El disco se centra en el cono de salida. Los modos refractados que atraviesan el disco se recogen y se enfocan sobre el detector.

El punto de láser enfocado se explora a través de la sección cruzada de la fibra, obteniéndose directamente una distribución bidimensional del índice de refracción de la fibra. A partir de esta distribución se calculan las características geométricas.

#### **2.2.2.3.4 Características geométricas**

Una vez efectuada la exploración de barrido del índice de refracción, se obtiene el contorno del núcleo tomando los puntos de la interfaz núcleo-revestimiento de índice de refracción coincidente con el valor medio entre los índices de refracción promediados del núcleo y del revestimiento, respectivamente. El contorno de revestimiento se determina de manera similar, pero en la interfaz del fluido que coincide con el índice del revestimiento. Se efectuará un análisis de geometría coherente con los términos de la cláusula 1, comenzando a partir de los datos de contorno del núcleo y del revestimiento. El error de concentricidad del campo de modos se calculará mediante el error de concentricidad núcleo/revestimiento.

#### **2.2.2.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba e indicación de la técnica de exploración utilizada.
- b) Identificación de la fibra.
- c) Diámetro del revestimiento.
- d) Error de concentricidad del campo de modos.
- e) No circularidad del revestimiento.
- f) Diámetro del núcleo (si es necesario).
- g) Exploración de barrido a través de la totalidad de la fibra (si es necesario).
- h) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- i) Temperatura de la célula y condiciones ambientales (si es necesario).

### **2.2.3 Segundo método de prueba alternativo: Técnica de visión lateral**

#### **2.2.3.1 Generalidades**

El método de visión lateral se aplica a las fibras monomodo para determinar los parámetros geométricos [error de concentricidad de campo modal (MFCE, *mode field concentricity error*), diámetro del revestimiento y no circularidad del revestimiento] midiendo la distribución de intensidades de la luz que se refracta dentro de la fibra. La técnica de visión lateral mide realmente el error de concentricidad del núcleo, pero generalmente es una buena aproximación del MFCE.

### 2.2.3.2 Aparato de prueba

La figura 4 muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba.

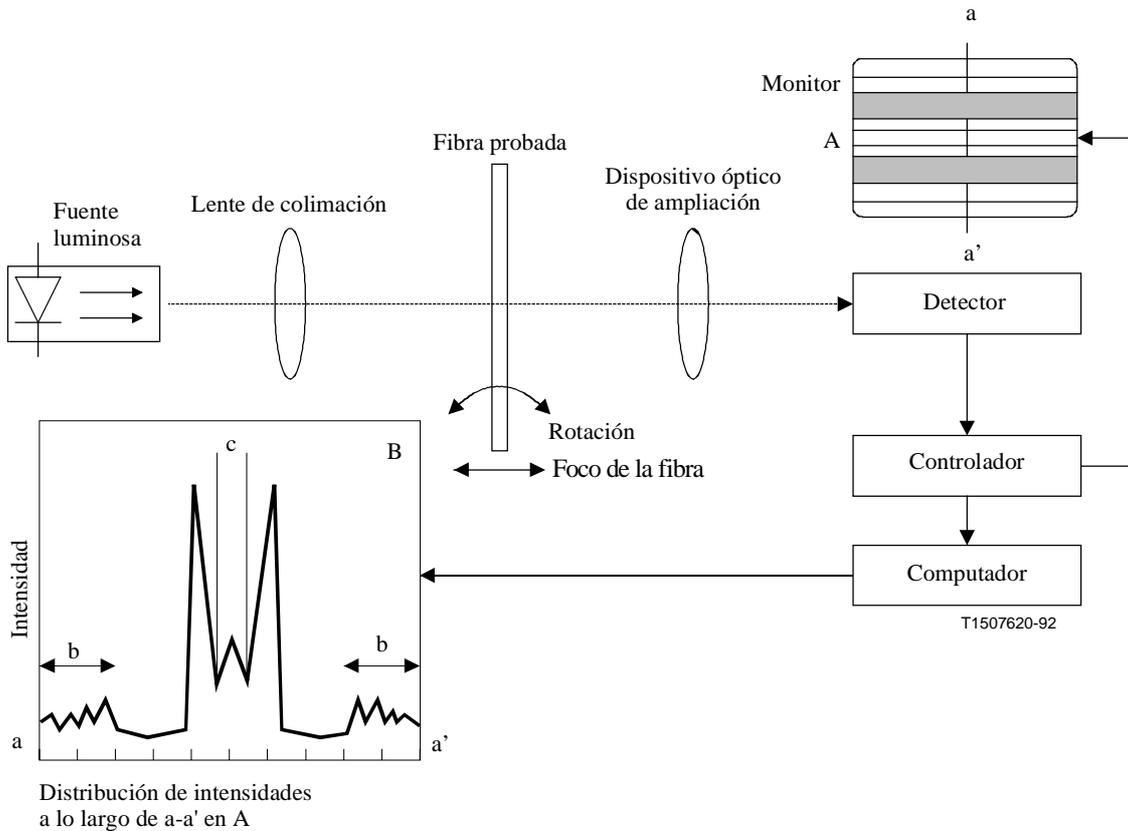


Figura 4/G.650 – Diagrama esquemático del sistema de medición de visión lateral

#### 2.2.3.2.1 Fuente luminosa

La luz emitida será colimada, ajustable en intensidad y estable en posición de intensidad y longitud de onda durante un periodo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Puede utilizarse una fuente luminosa estable y de gran intensidad, tal como un diodo fotoemisor (LED, *light emitting diode*).

#### 2.2.3.2.2 Espécimen

El espécimen a medir será un tramo corto de la fibra monomodo. Se retirará el recubrimiento primario de la fibra de la sección observada de la misma. La superficie de la fibra se mantendrá limpia durante la medición.

#### 2.2.3.2.3 Dispositivo óptico de ampliación

El dispositivo óptico de ampliación consistirá en un sistema óptico (por ejemplo, un objetivo de microscopio) que amplía la distribución de intensidad de la luz refractada dentro de la fibra sobre el plano de detector de exploración. El plano de observación se dispondrá a una distancia fija delante del eje de la fibra. La ampliación se elegirá de modo que sea compatible con la resolución espacial deseada, y se registrará.

#### 2.2.3.2.4 Detector

Se utilizará un detector apropiado para determinar la distribución de intensidad ampliada en el plano de observación a lo largo de la línea perpendicular al eje de la fibra. Puede utilizarse un vidicon o un dispositivo acoplado por carga en la gama de medición requerida. La resolución del detector será compatible con la resolución espacial deseada.

#### 2.2.3.2.5 Procesamiento de los datos

Se utilizará un computador con soporte lógico apropiado para el análisis de las distribuciones de intensidad.

#### 2.2.3.3 Procedimiento de medición

##### 2.2.3.3.1 Calibración del equipo

Para la calibración del equipo, la ampliación del dispositivo óptico se medirá explorando la longitud de un espécimen cuyas dimensiones se conozcan ya con exactitud suficiente. Se registrará esta ampliación.

##### 2.2.3.3.2 Medición

La fibra a prueba se fija en el portamuestras y se pone en el sistema de medición. Se ajusta la fibra de manera que su eje sea perpendicular al eje óptico del sistema de medición.

Se registran las distribuciones de intensidad en el plano de observación a lo largo de la línea perpendicular a la fibra (a-a' en A, en la figura 4) (presentadas como B) para diferentes direcciones de observación, girando la fibra en torno a su eje mientras se mantiene constante la distancia entre el eje de la fibra y el plano de observación. El diámetro del revestimiento y la posición central de la fibra se determinan analizando la simetría de la distribución de intensidad radial en la imagen ampliada (presentada como b en B). La posición central del núcleo se determina analizando la distribución de intensidades de la luz convergida (presentada como c). La distancia entre la posición central de la fibra y la del núcleo corresponde al valor observado nominal del MFCE.

Como se muestra en la figura 5, ajustando la función sinusoidal a los valores experimentales obtenidos del MFCE representado en función del ángulo de rotación, el MFCE real se calcula como el producto de la máxima amplitud de la función sinusoidal y el factor de ampliación con respecto al efecto lente debido a la estructura cilíndrica de la fibra. El diámetro del revestimiento se evalúa como valor promediado de los diámetros medidos de la fibra para cada ángulo de rotación, que dan lugar a valores de los diámetros máximo y mínimo para determinar el valor de la no circularidad del revestimiento con arreglo a la definición.

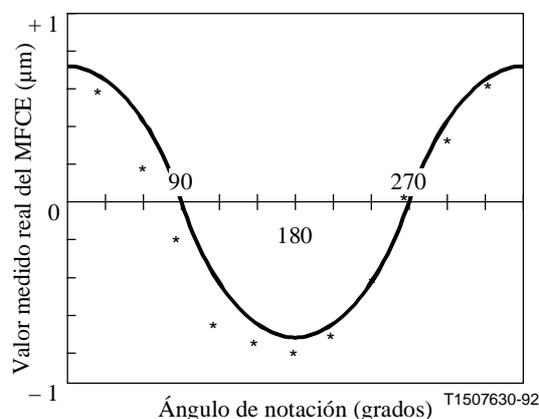


Figura 5/G.650 – Valor medido del MFCE en función del ángulo de rotación

#### 2.2.3.4 Presentación de los resultados

- Configuración de prueba.
- Identificación de la fibra.
- Características espectrales de la fuente.
- Indicación de repetibilidad y exactitud.
- Representación del MFCE en función del ángulo de rotación.
- MFCE, diámetro del revestimiento y no circularidad del revestimiento.
- Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

#### 2.2.4 Tercer método de prueba alternativo: Técnica de imagen del campo próximo transmitido

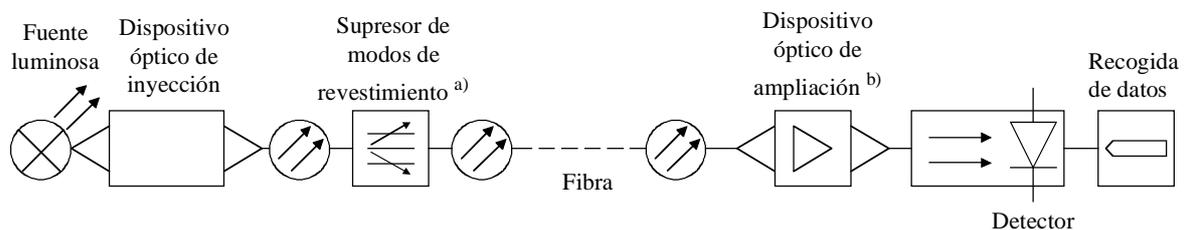
##### 2.2.4.1 Generalidades

La técnica de imagen del campo próximo transmitido se utilizará para la medición de las características geométricas de las fibras ópticas monomodo. Dichas mediciones se realizan en forma consecuente con las definiciones pertinentes.

La medición se basa en el análisis de la imagen (o imágenes) ampliada del extremo de salida de la fibra a prueba.

##### 2.2.4.2 Aparato de prueba

La figura 6 muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba.



a) Cuando es necesario.

b) Incluye dispositivo óptico de recorte de imágenes, cuando es necesario.

T1507640-92

Figura 6/G.650 – Configuración típica de la técnica de imagen del campo próximo transmitido

##### 2.2.4.2.1 Fuente luminosa

La fuente luminosa para iluminar el núcleo será ajustable en intensidad y estable en posición e intensidad durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Si es necesario, puede utilizarse una segunda fuente luminosa de características similares para iluminar el revestimiento. Las características espectrales de la segunda fuente luminosa no deben causar desenfoque de la imagen.

##### 2.2.4.2.2 Condiciones de inyección

El dispositivo óptico de inyección, que se dispondrá de modo que cubra completamente la fibra, enfocará el haz de luz sobre el extremo de entrada plano de la fibra.

### **2.2.4.2.3 Supresor de modos de revestimiento**

Se utilizará un supresor de modos de revestimiento adecuado para eliminar la potencia óptica que se propaga por el revestimiento. Cuando se miden solamente las características geométricas del revestimiento, el supresor de modos de revestimiento no estará presente.

### **2.2.4.2.4 Espécimen**

El espécimen será un tramo corto de la fibra óptica a medir. Los extremos de la fibra han de estar limpios y lisos, y perpendiculares al eje de la fibra.

### **2.2.4.2.5 Dispositivo óptico de ampliación**

El dispositivo óptico de ampliación consistirá en un sistema óptico (por ejemplo, un objetivo de microscopio) que amplía el campo de salida del espécimen. La apertura numérica, y por ende el poder de resolución del dispositivo óptico, será compatible con la exactitud de medición requerida y no inferior a 0,3. La ampliación se elegirá de modo que sea compatible con la resolución espacial deseada, y se registrará.

En los dispositivos ópticos de ampliación podrían utilizarse técnicas de recorte de imágenes para conseguir mediciones exactas.

### **2.2.4.2.6 Detección**

Se examinará y/o analizará la imagen de la fibra. Por ejemplo, podrá utilizarse cualquiera de las siguientes técnicas:

- a) recorte de imágenes;
- b) análisis de escala de grises de una imagen electrónicamente registrada.

### **2.2.4.2.7 Recogida de datos**

Los datos pueden registrarse, procesarse y presentarse en forma adecuada, con arreglo a la técnica de exploración y los requisitos de especificación.

## **2.2.4.3 Procedimiento de medición**

### **2.2.4.3.1 Calibración del equipo**

Para la calibración del equipo, la ampliación del dispositivo óptico se medirá explorando la imagen de un espécimen cuyas dimensiones se conozcan ya con exactitud suficiente. Se registrará esta ampliación.

### **2.2.4.3.2 Medición**

El extremo de inyección de la fibra se alinearán con el haz de inyección, y el extremo de salida de la fibra se alinearán con el eje óptico del dispositivo óptico de ampliación. Para las mediciones de campo próximo, la imagen (o imágenes) enfocada del extremo de salida de la fibra será explorada por el detector de acuerdo con los requisitos de especificación. Deben minimizarse los errores de desenfoque, a fin de reducir los errores de dimensión en las mediciones. Después se calculan los parámetros geométricos deseados.

### **2.2.4.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba, con indicación de la técnica utilizada.
- b) Condiciones de inyección.
- c) Características espectrales de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.

- e) Ampliación del dispositivo óptico.
- f) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando es necesario).
- g) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- h) Parámetros dimensionales resultantes, tales como diámetro del revestimiento, no circularidades del revestimiento, error de concentricidad del campo modal, etc.

### **2.3 Métodos de prueba para la longitud de onda de corte**

#### **2.3.1 Método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte ( $\lambda_c$ ) de la fibra con recubrimiento primario y método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte ( $\lambda_{cj}$ ) de los cables puente: Técnica de la potencia transmitida**

##### **2.3.1.1 Generalidades**

La medición de la longitud de onda de corte de fibras monomodo tiene por objeto asegurar un funcionamiento monomodo eficaz por encima de una longitud de onda especificada.

La técnica de la potencia transmitida utiliza la variación con la longitud de onda de la potencia transmitida de un tramo corto de la fibra que se prueba, en condiciones definidas, comparada con una potencia transmitida de referencia. Hay dos formas posibles de obtener esta potencia de referencia:

- a) la fibra de prueba con un bucle de radio más pequeño; o
- b) un tramo corto (1 a 2 m) de fibra multimodo.

NOTA – La presencia de un recubrimiento primario en la fibra no afecta normalmente a la longitud de onda de corte. Sin embargo, la presencia de un recubrimiento secundario puede provocar una longitud de onda de corte notablemente más corta que la de la fibra que sólo tiene un recubrimiento primario.

La medición puede realizarse sobre una fibra con recubrimiento secundario si dicho recubrimiento se ha examinado y se ha confirmado que no afecta de manera significativa a la longitud de onda de corte, y además se ha aplicado adecuadamente.

##### **2.3.1.2 Aparato de prueba**

###### **2.3.1.2.1 Fuente luminosa**

Se utilizará una fuente luminosa de anchura espectral a amplitud mitad que no exceda de 10 nm (FWHM), estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicarse el procedimiento de medición completo.

###### **2.3.1.2.2 Modulación**

Suele modularse la fuente luminosa para mejorar la relación señal/ruido en el receptor. De adoptarse este procedimiento, el detector debe conectarse a un sistema de procesamiento de señales sincronizado con la frecuencia de modulación de la fuente. El sistema de detección debe ser prácticamente lineal.

###### **2.3.1.2.3 Condiciones de inyección**

Las condiciones de inyección deben usarse de tal forma que exciten de una manera prácticamente uniforme los modos LP<sub>01</sub> y LP<sub>11</sub>. Por ejemplo, podrían ser técnicas de inyección adecuadas:

- a) la unión con una fibra multimodo; o
- b) la inyección con una mancha luminosa suficientemente ancha (dispositivo óptico de gran apertura numérica).

#### 2.3.1.2.4 Supresor de modos de revestimiento

El supresor de modos de revestimiento es un dispositivo que favorece la conversión de modos de revestimiento en modos de radiación; como resultado, los modos propagados por el revestimiento son suprimidos de la fibra. Debe tenerse cuidado para evitar que se afecte a la propagación del modo LP<sub>11</sub>.

#### 2.3.1.2.5 Detector óptico

Se utilizará un detector adecuado que intercepte toda la radiación que emerge de la fibra. La respuesta espectral debe ser compatible con las características espectrales de la fuente. El detector debe ser uniforme y tener sensibilidad lineal.

### 2.3.1.3 Procedimiento de medición

#### 2.3.1.3.1 Muestra de prueba normalizada

La medición se efectuará con un largo de fibra de 2 m. La fibra se inserta en el equipo de prueba y se flexiona para formar un bucle poco apretado. El bucle dará la vuelta completa a un círculo de 140 mm de radio. El resto de la fibra estará prácticamente libre de tensiones externas. Aunque se admiten algunas curvaturas ocasionales de mayor radio, no deben introducir cambios significativos en el resultado de la medición. Se registrará la potencia de salida  $P_1(\lambda)$  en función de  $\lambda$  en una gama suficientemente amplia alrededor de la longitud de onda de corte esperada.

#### 2.3.1.3.2 Transmisión a través de la muestra de referencia

Puede utilizarse el método a) o el b).

- a) Utilizando la muestra de prueba, y manteniendo fijas las condiciones de inyección, se mide una potencia pequeña de salida  $P_2(\lambda)$  en la misma gama de longitudes de onda con un bucle al menos de radio suficientemente o en la muestra de prueba para filtrar el modo LP<sub>11</sub>. Un valor típico del radio para este bucle es 30 mm.
- b) Con un tramo corto (1-2 m) de fibra multimodo, se mide una potencia de salida  $P_3(\lambda)$  en la misma gama de longitudes de onda.

NOTA – La presencia de modos de fuga puede producir rizado en el espectro de transmisión de la fibra multimodo de referencia, lo que afecta al resultado de la medición. A fin de reducir este efecto, la inyección de la luz puede limitarse de modo que sólo comprenda el 70% del diámetro del núcleo y la apertura numérica de la fibra multimodo; otra posibilidad consiste en utilizar un filtro de modo adecuado.

#### 2.3.1.3.3 Cálculos

La atenuación espectral del espécimen de prueba, con relación a la potencia de referencia, es:

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_c(\lambda)} \quad (2-4)$$

donde  $i = 2$  ó  $3$  para el método a) o b) respectivamente.

Suponiendo una representación en línea recta de la región de longitud de onda superior, la desviación de los modos de orden superior con respecto al modo fundamental es:

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - (A_u + B_u \lambda) \quad (2-5)$$

$A_u$  y  $B_u$  se determinan de manera que  $(A_u + B_u \lambda)$  represente la parte de la curva de atenuación espectral a longitudes de onda por encima de la región en la que la atenuación de los modos de orden superior se acelera (región de transición). En el método a),  $A_u$  y  $B_u$  pueden fijarse a cero. Véanse las figuras 7a y 8a.

NOTA – En el método a), el pequeño bucle forma un filtro de modo que elimina todos los modos, con excepción del fundamental, que se propagan a longitudes de onda superiores a una longitud de onda situada a unas cuantas decenas de nm por debajo de la longitud de onda de corte  $\lambda_c$ . A longitudes de onda de más de unas centenas de nm por encima de  $\lambda_c$ , el bucle puede producir una gran atenuación del modo fundamental.  $a(\lambda)$  es igual a la relación logarítmica entre la potencia total que emerge de la muestra, incluida la del modo LP<sub>11</sub>, y la potencia del modo fundamental. Cuando los modos son excitados uniformemente de acuerdo con 2.3.1.2.3,  $a(\lambda)$  da también la atenuación del modo LP<sub>11</sub>  $A(\lambda)$  en dB, en la muestra que se prueba:

$$A(\lambda) = 10 \log \left[ \left( \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - 1 \right) / 2 \right] \quad (2-6)$$

#### 2.3.1.3.4 Determinación de la longitud de onda de corte

En la región de transición, la potencia de modo de orden superior se reduce al aumentar la longitud de onda. La longitud de onda de la fibra,  $\lambda_c$  se define como la longitud de onda a la que la potencia de modo de orden superior con respecto a la potencia de modo fundamental,  $\Delta a(\lambda)$ , se ha reducido a 0,1 dB.

Las figuras 7b y 8b ilustran las "jorobas" que a veces aparecen cerca de la longitud de onda de corte. En ausencia de jorobas (véanse las figuras 7a y 8a), la determinación exacta de  $\lambda_c$  puede conseguirse sin algoritmos. Opcionalmente, para mejorar la precisión, pueden utilizarse algoritmos de ajuste basados en las siguientes ecuaciones cuando aparecen jorobas. El apéndice I contiene ejemplos de tales algoritmos.

$$\gamma(\lambda) = 10 \log \left[ -\frac{10}{A} \log \left( \frac{10^{\Delta a(\lambda)/10} - 1}{\rho} \right) \right] \quad (2-7)$$

$$A = 10 \log [\rho / (10^{0,01} - 1)] \quad (2-8)$$

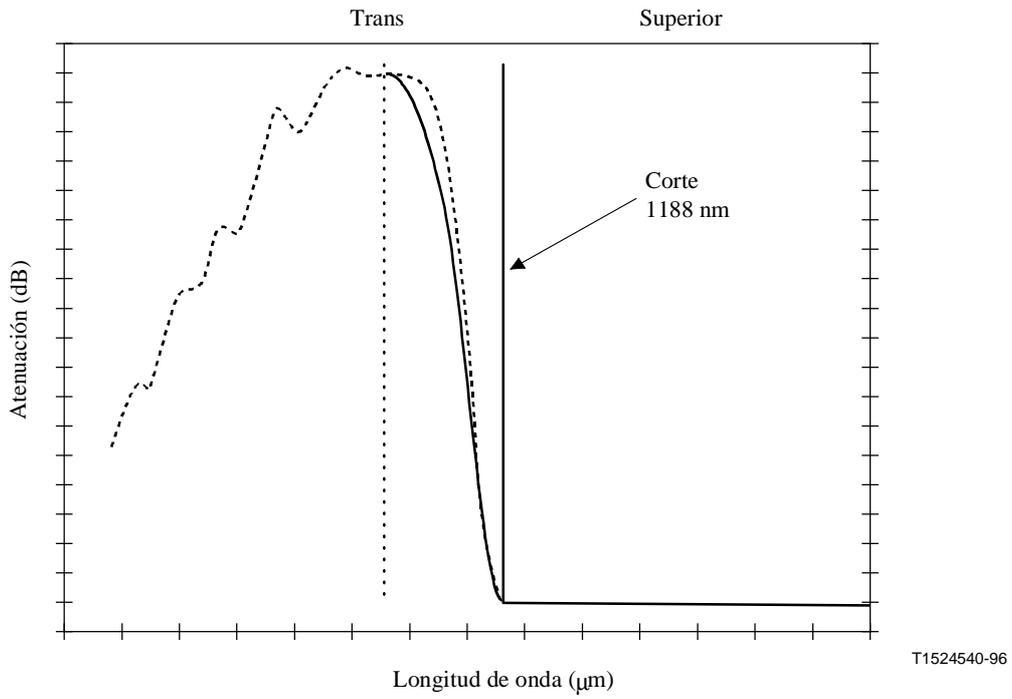
A menos que se indique otra cosa,  $\rho = 2$ . (2-9)

Cuando los coeficientes de:

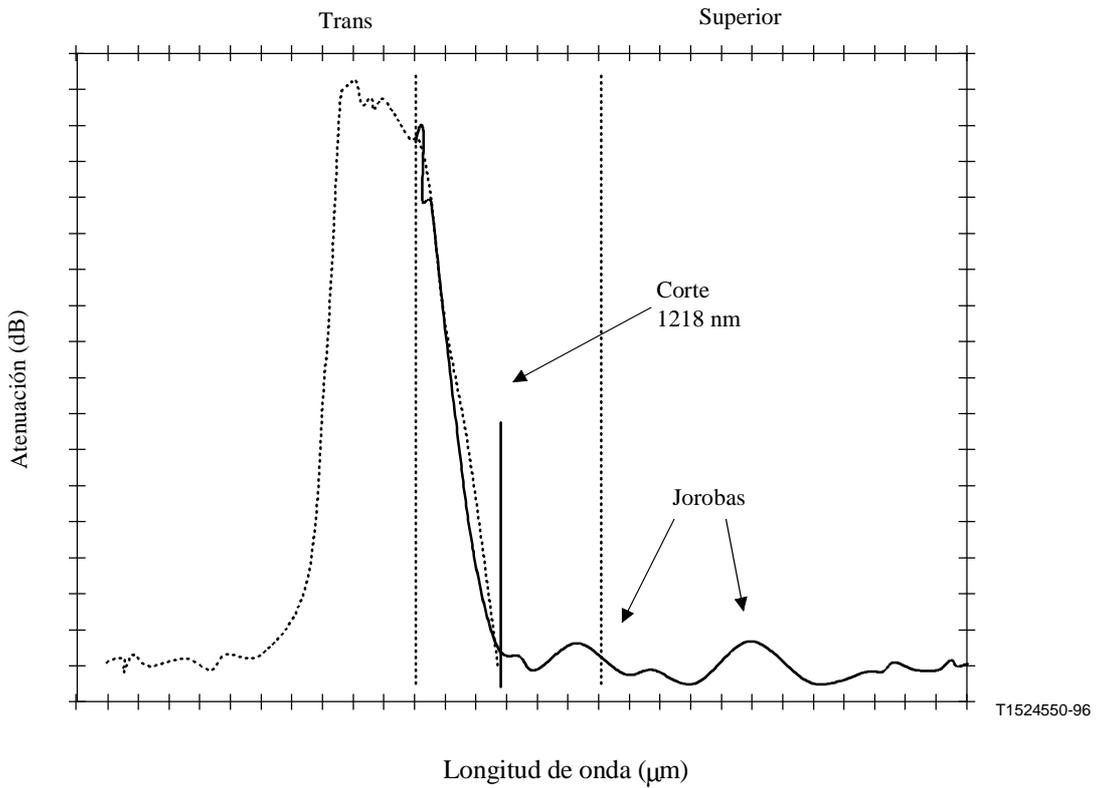
$$A_t + B_t \lambda = -Y(\lambda) \quad (2-10)$$

se determinan para longitudes de onda de la región de transición:

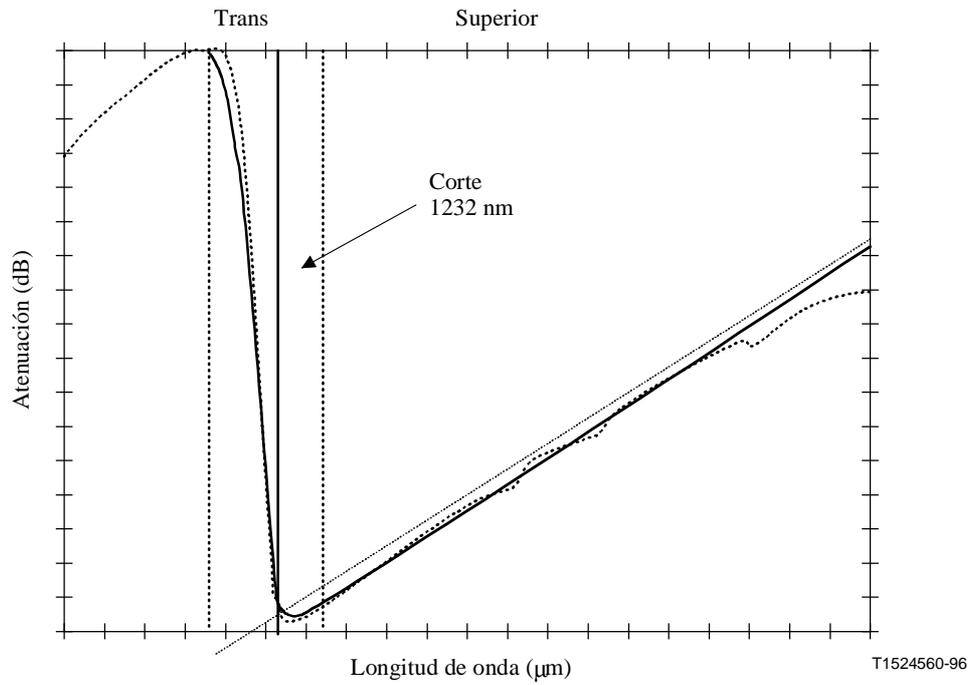
$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t} \quad (2-11)$$



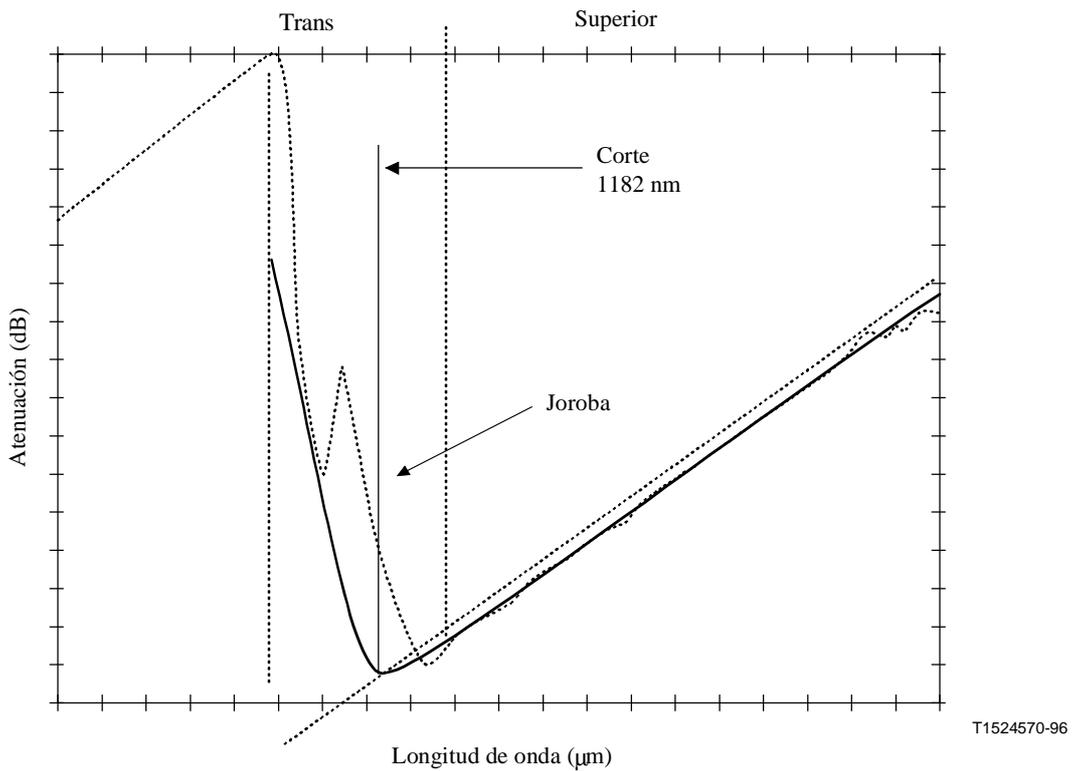
**Figura 7a/G.650 – Representación de la longitud de onda de corte de referencia monomodo**



**Figura 7b/G.650 – Representación de la longitud de onda de corte de referencia monomodo con jorobas**



**Figura 8a/G.650 – Representación de la longitud de onda de corte de referencia multimodo**



**Figura 8b/G.650 – Representación de la longitud de onda de corte de referencia monomodo con joroba**

NOTA – Según la definición, la atenuación de modo  $LP_{11}$  en la muestra sometida a prueba es 19,3 dB a la longitud de onda de corte.

#### **2.3.1.4 Longitud de onda de corte del cable puente**

La longitud de onda de corte del cable puente se mide utilizando los aparatos, procedimientos, y cálculos de la longitud de onda de corte, con las siguientes excepciones:

- 1) El cable puente se mide con los recubrimientos secundarios que se utilizan en las aplicaciones.
- 2) Se especifica un radio de curvatura de X mm.

NOTA – Algunas Administraciones especifican un radio X de 76 mm.

#### **2.3.1.5 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba.
- b) Condición de inyección.
- c) Tipo de muestra de referencia.
- d) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).
- e) Identificación de la fibra.
- f) Gama de longitudes de onda de medición.
- g) Longitud de onda de corte.
- h) Representación de  $a(\lambda)$  (si es necesario).
- i) Tipo de medición, es decir, longitud de onda de corte o longitud de onda de corte del cable puente.
- j) Radio de curvatura (para la longitud de onda de corte del cable puente solamente).
- k) Método de interpolación (si se utiliza).

### **2.3.2 Método de prueba alternativo para $\lambda_c$ : Técnica del mandril dividido**

#### **2.3.2.1 Generalidades** (igual que 2.3.1.1)

#### **2.3.2.2 Aparato de prueba**

##### **2.3.2.2.1 Fuente luminosa** (igual que 2.3.1.2.1)

##### **2.3.2.2.2 Modulación** (igual que 2.3.1.2.2)

##### **2.3.2.2.3 Condiciones de inyección** (igual que 2.3.1.2.3)

##### **2.3.2.2.4 Supresor de modos de revestimiento** (igual que 2.3.1.2.4)

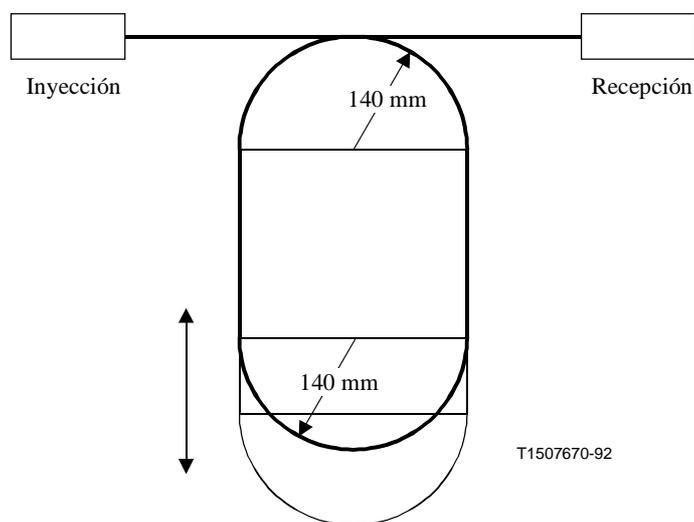
##### **2.3.2.2.5 Detector óptico** (igual que 2.3.1.2.5)

#### **2.3.2.3 Procedimiento de medición**

##### **2.3.2.3.1 Muestra de prueba normalizada**

La medición se efectuará con un largo de fibra de 2 m. La fibra se inserta en el equipo de prueba y se curva para formar un bucle poco apretado. El bucle contendrá una vuelta completa (360 grados) compuesta por dos arcos (180 grados cada uno) de 140 mm de radio unidos por tangentes. El resto de la fibra estará prácticamente libre de tensiones externas. Aunque se admiten algunas curvaturas ocasionales de mayor radio, no deben introducir cambios significativos en el resultado de la medición. Se registrará la potencia de salida,  $P_1(\lambda)$ , en función de  $\lambda$  en una gama suficientemente amplia alrededor de la longitud de onda de corte esperada.

Como se ve en la figura 9, el mandril semicircular inferior se desplaza para eliminar cualquier holgura del bucle de fibra, sin que haya que desplazar el dispositivo óptico de inyección o recepción y sin aplicar a la muestra de fibra ninguna tensión mecánica significativa.



**Figura 9/G.650 – Instalación de la fibra: Longitud de onda de corte por la técnica del mandril dividido**

**2.3.2.3.2 Transmisión a través de la muestra de referencia** (igual que 2.3.1.3.2)

**2.3.2.3.3 Cálculos** (igual que 2.3.1.3.3)

**2.3.2.3.4 Determinación de la longitud de onda de corte** (igual que 2.3.1.3.4)

**2.3.2.4 Presentación de los resultados** (igual que 2.3.1.5)

**2.3.3 Método de prueba de referencia para la longitud de onda de corte de fibra cableada ( $\lambda_{cc}$ ): Técnica de la potencia transmitida**

**2.3.3.1 Generalidades**

Esta medición de la longitud de onda de corte, que se efectúa en fibras monomodo cableadas en condiciones de instalación que simulan las longitudes de cable mínimas de la planta externa, tiene por objeto asegurar un funcionamiento monomodo eficaz por encima de una longitud de onda especificada.

La técnica de la potencia transmitida utiliza la variación con la longitud de onda de la potencia transmitida del cable de fibra sometido a prueba, en condiciones definidas, por comparación con una potencia transmitida de referencia. Hay dos formas posibles de obtener esa potencia de referencia:

- la fibra cableada de prueba con un bucle de radio más pequeño;
- un tramo corto (1 a 2 metros) de fibra multimodo.

### 2.3.3.2 Aparato de prueba

#### 2.3.3.2.1 Fuente luminosa (igual que 2.3.1.2.1)

#### 2.3.3.2.2 Modulación (igual que 2.3.1.2.2)

#### 2.3.3.2.3 Condiciones de inyección (igual que 2.3.1.2.3)

#### 2.3.3.2.4 Supresor de modos de revestimiento (igual que 2.3.1.2.4)

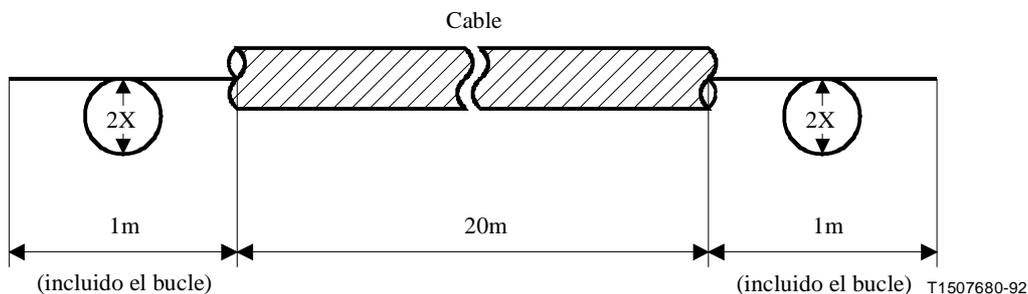
#### 2.3.3.2.5 Detector óptico (igual que 2.3.1.2.5)

### 2.3.3.3 Procedimiento de medición

#### 2.3.3.3.1 Muestra de prueba normalizada

La medición se efectuará con un tramo de fibra monomodo en cable. Se preparará un tramo de cable de 22 m, dejando expuesto en cada extremo 1 m de fibra no cableada, y los 20 m restantes de cable se tenderán sin ninguna curvatura que pueda afectar el valor de la medición. Para simular los efectos de un organizador de empalmes, se hará un bucle de  $X = 40$  mm de radio en cada tramo de fibra no cableada (véase la figura 10). La fibra no cableada se instala con el recubrimiento secundario (si está presente) intacto. Aunque se admiten algunas curvaturas ocasionales de mayor radio en la fibra o el cable, no deben introducir cambios significativos en las mediciones. Se registrará la potencia de salida  $P_1(\lambda)$  en función de  $\lambda$  en una gama suficientemente amplia alrededor de la longitud de onda de corte esperada.

NOTA – Los bucles tienen por objeto simular las condiciones de instalación.



**Figura 10/G.650 – Condición de instalación para la medición de la longitud de onda de corte de una fibra cableada**

#### 2.3.3.3.2 Transmisión por la muestra de referencia (igual que 2.3.1.3.2)

#### 2.3.3.3.3 Cálculos

La relación logarítmica entre las potencias transmitidas  $P_1(\lambda)$  y  $P_i(\lambda)$  se calcula por la expresión

$$R(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (2-11 \text{ bis})$$

donde  $i = 2$  ó  $3$  para el método a) o b), respectivamente.

#### 2.3.3.3.4 Determinación de la longitud de onda de corte de la fibra cableada

Los cálculos y el método para determinar la longitud de onda de corte del cable,  $\lambda_{cc}$  son los mismos que para la longitud de onda de corte de la fibra. Véanse 2.3.1.3.3 y 2.3.1.3.4.

#### **2.3.3.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba.
- b) Condición de inyección.
- c) Tipo de muestra de referencia.
- d) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).
- e) Identificación de la fibra y del cable.
- f) Gama de longitudes de onda de medición.
- g) Longitud de onda de corte de la fibra cableada, y representación gráfica de  $R(\lambda)$  (si es necesario).
- h) Representación gráfica de  $R(\lambda)$  (si es necesario).

#### **2.3.4 Método de prueba alternativo para la longitud de onda de corte ( $\lambda_{cc}$ ) de la fibra cableada**

##### **2.3.4.1 Generalidades**

La medición de la longitud de onda de corte se lleva a cabo en fibras monomodo sin cablear en unas condiciones de instalación que aseguran que los resultados para  $\lambda_{cc}$  son coherentes con los resultados obtenidos en las mediciones llevadas a cabo en fibras cableadas.

Este método utiliza la variación en la longitud de onda de la potencia transmitida sobre un tramo corto de la fibra sometida a prueba, en condiciones definidas, por comparación con una potencia transmitida de referencia. Hay dos formas posibles de obtener esa potencia de referencia:

- a) la fibra de prueba con un bucle de radio más pequeño; o
- b) un tramo corto (1 a 2 m) de fibra multimodo.

##### **2.3.4.2 Aparato de prueba**

###### **2.3.4.2.1 Fuente luminosa** (igual que 2.3.1.2.1)

###### **2.3.4.2.2 Modulación** (igual que 2.3.1.2.2)

###### **2.3.4.2.3 Condiciones de inyección** (igual que 2.3.1.2.3)

###### **2.3.4.2.4 Supresor de modos de revestimiento** (igual que 2.3.1.2.4)

###### **2.3.4.2.5 Detector óptico** (igual que 2.3.1.2.5)

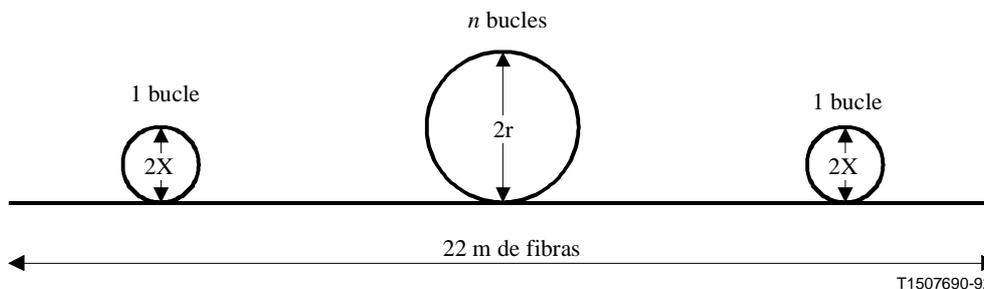
##### **2.3.4.3 Procedimiento de medición**

###### **2.3.4.3.1 Muestra de prueba normalizada**

La medición se efectuará con un tramo de fibra monomodo sin cablear. La fibra no cableada se instala con el recubrimiento secundario (si está presente) intacto. Se inserta un tramo de fibra de 22 m en el aparato de prueba; los 20 m internos se flexionan para formar bucles no sometidos a tensión de un radio  $r \geq 140$  mm.

En cada extremo de la fibra se crea un bucle de  $X = 40$  mm de radio (véase la figura 11). Se registrará la potencia de salida  $P_1(\lambda)$  en función de  $\lambda$  en una gama suficientemente amplia alrededor de la longitud de onda de corte prevista,  $\lambda_{cc}$ .

NOTA – Los bucles tienen por objeto simular las condiciones de instalación.



**Figura 11/G.650 – Condición de instalación para la medición de  $\lambda_{cc}$  en fibras sin cablear**

**2.3.4.3.2 Transmisión por la muestra de referencia** (igual que 2.3.1.3.2)

**2.3.4.3.3 Cálculos** (igual que 2.3.1.3.3)

**2.3.4.3.4 Determinación de la longitud de onda de corte de la fibra cableada** (igual que 2.3.3.3.4)

**2.3.4.4 Presentación de los resultados**

Igual que 2.3.3.4 y además:

i) valor de  $r$ .

## **2.4 Métodos de prueba para la atenuación**

Las pruebas de atenuación están destinadas a proporcionar un medio por el cual pueda asignarse un cierto valor de atenuación a un largo de fibra, de modo que los valores de atenuación individuales puedan sumarse para determinar la atenuación total de un largo concatenado.

NOTA – Los valores de atenuación especificados para largos de fabricación deben medirse a temperatura ambiente (es decir, a un único valor de la gama de 10° C a 35° C).

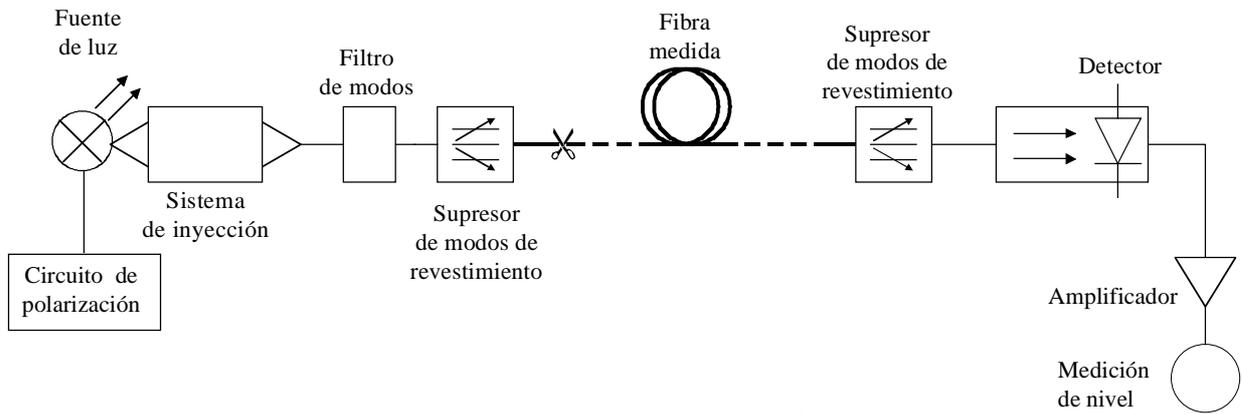
### **2.4.1 Método de prueba de referencia: Técnica de la fibra cortada**

#### **2.4.1.1 Generalidades**

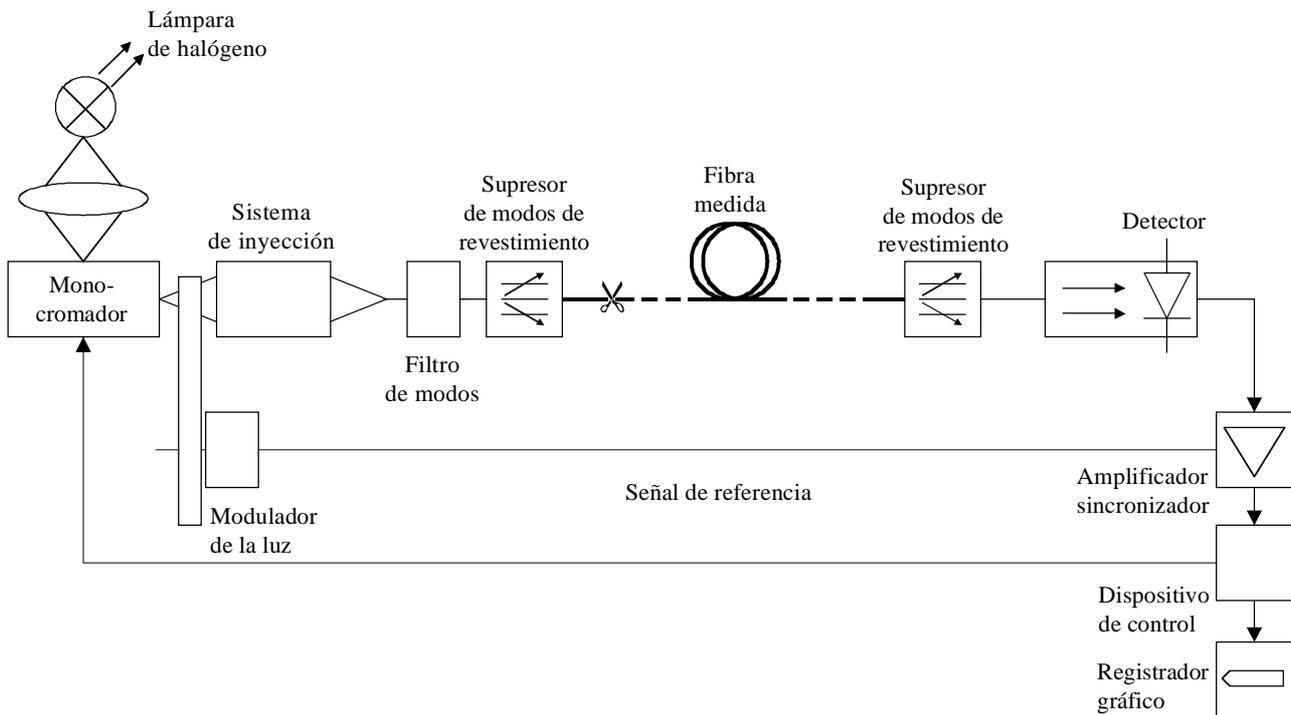
La técnica de la fibra cortada es una aplicación directa de esta definición, en la cual los niveles de potencia  $P_1$  y  $P_2$  se miden en dos puntos de la fibra sin modificar las condiciones de entrada.  $P_2$  es la potencia que sale del extremo lejano de la fibra y  $P_1$  la potencia que sale de un punto próximo a la entrada después del punto de corte de la fibra.

#### **2.4.1.2 Aparato de prueba**

Las mediciones pueden efectuarse a una o más longitudes de onda puntuales, o bien puede requerirse una respuesta espectral en una gama de longitudes de onda. La figura 12 presenta como ejemplos diagramas de equipos de prueba adecuados para obtener una medición de atenuación o para medir el espectro de atenuación, respectivamente.



a) Montaje del equipo de prueba para realizar una medición de atenuación



b) Montaje del equipo de prueba utilizado para medir el espectro de atenuación

T1507700-92

**Figura 12/G.650 – Técnica de la fibra cortada**

#### 2.4.1.2.1 Fuente óptica

Se utilizará una fuente de radiación apropiada, como una lámpara, un láser o un diodo fotoemisor. La elección de la fuente depende del tipo de medición. La fuente ha de ser estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. La anchura espectral a amplitud mitad se especificará de modo que la anchura de raya sea estrecha en relación con cualquiera de las características de atenuación espectral de la fibra.

#### 2.4.1.2.2 Modulación

Suele modularse la fuente luminosa para mejorar la relación señal/ruido en el receptor. De adoptarse este procedimiento, el detector debe conectarse a un sistema de procesamiento de señales

sincronizado con la frecuencia de modulación de la fuente luminosa. La sensibilidad del sistema de detección debe ser prácticamente lineal.

#### **2.4.1.2.3 Condiciones de inyección**

Las condiciones de inyección empleadas deben ser suficientes para excitar el modo fundamental. Por ejemplo, podrían ser técnicas de inyección adecuadas:

- a) la unión con una fibra;
- b) la inyección con un sistema óptico apropiado.

#### **2.4.1.2.4 Filtro de modos**

Se tendrá cuidado de que no se propaguen modos de orden superior por el largo de corte. A tal fin puede que haga falta introducir una curvatura para suprimir los modos de orden superior.

#### **2.4.1.2.5 Supresor de modos de revestimiento**

El supresor de modos de revestimiento es un dispositivo que favorece la conversión de modos de revestimiento en modos de radiación; como resultado, los modos de revestimiento son suprimidos de la fibra.

#### **2.4.1.2.6 Detector óptico**

Se utilizará un detector adecuado que intercepte toda la radiación que emerge de la fibra. La respuesta espectral debe ser compatible con las características espectrales de la fuente. El detector debe ser uniforme y tener una característica de sensibilidad lineal.

### **2.4.1.3 Procedimiento de medición**

#### **2.4.1.3.1 Preparación de la fibra que ha de probarse**

Los extremos de la fibra estarán muy limpios y lisos, y serán perpendiculares al eje de la fibra. Las mediciones en fibras que no forman parte de cables deberán efectuarse con la fibra suelta en el tambor, para que la superficie de éste no produzca efectos de microflexión.

#### **2.4.1.3.2 Procedimiento**

- 1) La fibra que ha de probarse se coloca en la configuración de prueba. Se registra la potencia de salida  $P_2$ .
- 2) Manteniendo fijas las condiciones de inyección, se corta la fibra a la longitud de corte escogida (por ejemplo, a 2 m del punto de inyección). Si es necesario utilizar un supresor de modos de revestimiento, se reajusta este dispositivo y se registra la potencia de salida  $P_1$  del tramo de fibra cortada.
- 3) La atenuación de la fibra entre los puntos en que se han medido  $P_1$  y  $P_2$  puede calcularse a partir de las ecuaciones definitorias 1-4 y 1-5, utilizando los valores hallados de  $P_1$  y  $P_2$ .

#### **2.4.1.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba, incluido tipo de fuente, longitud de onda y anchura espectral de amplitud mitad.
- b) Identificación de la fibra.
- c) Longitud de la muestra.
- d) Atenuación de la muestra, en dB.
- e) Coeficiente de atenuación, en dB/km.
- f) Indicación de exactitud y repetibilidad.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

## **2.4.2 Primer método de prueba alternativo: Técnica de retroesparcimiento**

### **2.4.2.1 Generalidades**

Se describe un método de prueba del coeficiente de atenuación de una fibra óptica monomodo basado en mediciones de retroesparcimiento bidireccionales. Esta técnica puede también aplicarse para comprobar la uniformidad de la atenuación, la continuidad óptica, las discontinuidades físicas, las pérdidas en el empalme y la longitud de la fibra.

Pueden adoptarse mediciones de retroesparcimiento unidireccionales en determinados casos, por ejemplo, verificación de la variación de la pendiente de retroesparcimiento en las fibras cableadas.

Los procedimientos para la calibración del equipo de retroesparcimiento figuran en el Documento XXXX de la CEI.

### **2.4.2.2 Aparato de prueba**

#### **2.4.2.2.1 Consideraciones generales**

El nivel de señal de la señal óptica retroesparcida será normalmente pequeño y próximo al nivel de ruido. A fin de mejorar la relación señal/ruido y la gama de medición dinámica suele por tanto utilizarse una fuente luminosa de alta potencia en relación con el procesamiento de la señal detectada. Además, puede requerirse el ajuste de la anchura de los impulsos con el fin de obtener un compromiso entre la resolución y la gama dinámica.

Asimismo, se tendrá cuidado de que no se propaguen modos de orden superior.

En la figura 13 a) se muestra un ejemplo del equipo.

#### **2.4.2.2.2 Fuente óptica**

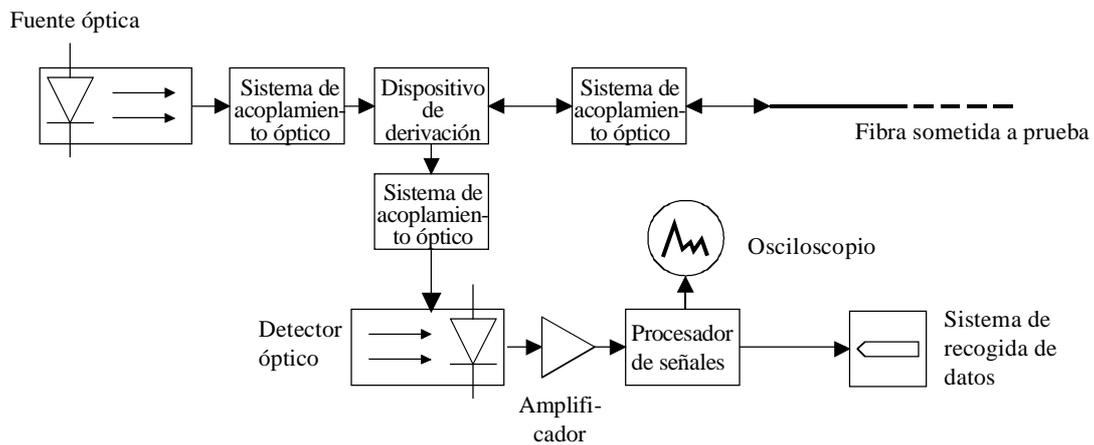
Utilizar una fuente óptica de alta potencia de longitudes de onda adecuadas y regístrense. La anchura de los impulsos y la frecuencia de repetición deben ser consecuentes con la resolución deseada y la longitud de la fibra.

#### **2.4.2.2.3 Sistema de acoplamiento óptico**

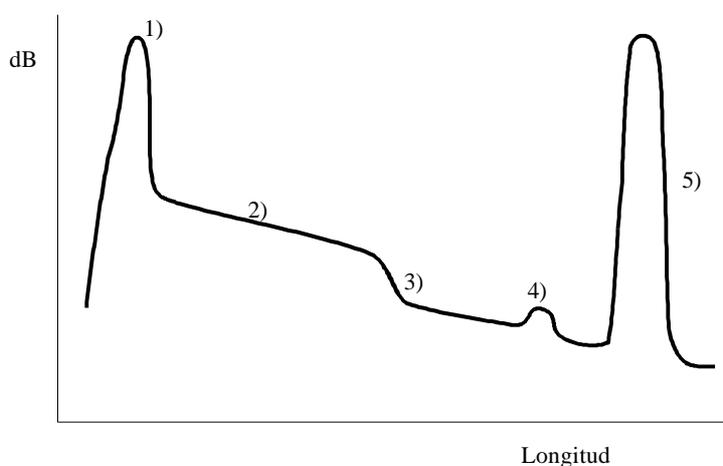
Se utilizará un sistema óptico para un acoplamiento eficaz del haz a la fibra probada, al dispositivo de derivación o al detector óptico. Pueden añadirse diversos dispositivos, tales como materiales de adaptación de índices, para reducir las reflexiones de Fresnel.

#### **2.4.2.2.4 Dispositivo de derivación**

Es necesario un dispositivo de derivación para acoplar la radiación de la fuente a la fibra y la radiación retroesparcida al detector, aunque evitando un acoplamiento fuente-detector directo. Evitar el uso de dispositivos con propiedades dependientes de la polarización.



a) Esquema del aparato



b) Ejemplo de curva de pérdida de retroesparcimiento bidireccional

T1524580-96

**Figura 13/G.650 – Técnica de retroesparcimiento**

#### 2.4.2.2.5 Detector óptico

Se utilizará un detector a fin de interceptar la máxima potencia retroesparcida posible. La respuesta del detector será compatible con los niveles y longitudes de onda de la señal detectada. Para las mediciones de atenuación, la respuesta del detector será prácticamente lineal.

#### 2.4.2.2.6 Amplificador

Un amplificador apropiado seguirá al detector óptico, de modo que el nivel de señal sea el adecuado para el procesamiento de la misma. La anchura de banda de amplificador constituirá un compromiso entre la resolución temporal y la reducción del ruido.

#### 2.4.2.2.7 Procesador de la señal

Se requiere un procesador de la señal para mejorar la relación señal/ruido, para calcular la curva de atenuación a partir de las dos curvas de pérdida de retroesparcimiento unidireccional y para proporcionar una respuesta logarítmica en el sistema de detección. Pueden conectarse al procesador de la señal un osciloscopio para la observación directa de la traza de retroesparcimiento y un sistema de recogida de datos para almacenar los resultados de medición.

#### 2.4.2.2.8 Supresor de modos de revestimiento

Véase 2.4.1.2.5.

#### 2.4.2.2.9 Configuración de la muestra de fibra

La medición puede efectuarse con la fibra en un cierto número de configuraciones (por ejemplo, como fibra cableada, en un carrete de transporte adecuado o como requiera el método de prueba de referencia).

#### 2.4.2.3 Procedimiento de medición

- a) Alinear la fibra probada con el sistema de acoplamiento óptico.
- b) Medir dos curvas de pérdida por retroesparcimiento unidireccional, una desde cada extremo de la fibra. La figura 13 b) muestra un ejemplo de dicha curva unidireccional. Cada curva de pérdida por retroesparcimiento es analizada por el procesador de la señal y se registra en una escala logarítmica, evitando las partes situadas en los dos extremos de las curvas, debido a las reflexiones de los dispositivos de acoplamiento y de derivación y las causadas por los extremos de la fibra [véanse las partes 1 y 5 de la figura 13 b)].
- c) Evaluar la longitud,  $L_f$ , de la fibra desde el intervalo de tiempo comprendido entre los dos extremos de la curva de pérdida por retroesparcimiento,  $T_f$ , y el índice de retardo de grupo,  $N$  de la fibra, como sigue:  $L_f = c \cdot T_f / N$  (siendo  $c$  la velocidad de la luz en el espacio libre).
- d) Obtener la curva de pérdida por retroesparcimiento bidireccional utilizando las dos curvas de pérdida por retroesparcimiento unidireccional medida y registrada, según el procedimiento descrito a continuación:

Sean  $a(x)$  y  $b(z)$  las funciones que describen las dos curvas de pérdida por retroesparcimiento bidireccional en dB, siendo  $x$  y  $z$  las distancias desde los extremos de la fibra más próximas al lugar de inyección respectivo. La curva de pérdida por retroesparcimiento bidireccional viene dada por:

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (2-12)$$

- e) Obtener el coeficiente de atenuación de extremo a extremo de la fibra según el procedimiento descrito a continuación:

El coeficiente de atenuación,  $A(x_0, x_1)$  para un segmento de fibra definido por las posiciones extremas  $x_0$  y  $x_1$  (con  $x_0 < x_1$ ) viene dado por:

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (2-13)$$

Esta expresión puede evaluarse por ajuste lineal de mínimos cuadrados de los datos entre  $x_0$  y  $x_1$ .

El coeficiente de atenuación de extremo a extremo de la fibra se determina del mismo modo que en la ecuación 2-13 con los puntos de datos lo más próximo posible a las posiciones extremas. Sin embargo, estos puntos deben hallarse fuera del área de la zona muerta y del área de reflexión de extremo [véase la figura 13 b), áreas 1) y 5)].

#### 2.4.2.4 Presentación de los resultados

- a) Configuración de prueba.
- b) Clase de procesamiento de señales utilizado.

- c) Fecha de la prueba.
- d) Identificación y longitud del espécimen de prueba.
- e) Anchura de los impulsos.
- f) Longitud(es) de onda de prueba.
- g) Coeficiente de atenuación de extremo a extremo de la fibra en dB/km.
- h) Curva de pérdida por retroesparcimiento bidireccional.

NOTA – Las mediciones de retroesparcimiento unidireccionales se obtienen con la función  $a(x)$  solamente. El análisis completo de las curvas de pérdida por retroesparcimiento unidireccional registradas [figura 13 b)] muestra que, independientemente de las mediciones de atenuación, pueden supervisarse muchos fenómenos utilizando la técnica del retroesparcimiento, entre ellos:

- 1) reflexión originada por los dispositivos de derivación y de acoplamiento en el extremo de entrada de la fibra;
- 2) zona de pendiente de retroesparcimiento invariante;
- 3) discontinuidad debida a defecto local, empalme o acoplamiento;
- 4) variación de la pendiente de retroesparcimiento con la longitud;
- 5) fluctuación en el extremo de salida de la fibra;
- 6) variación de la atenuación, por ejemplo con la temperatura.

### **2.4.3 Segundo método de prueba alternativo: Técnica de la pérdida de inserción**

#### **2.4.3.1 Generalidades**

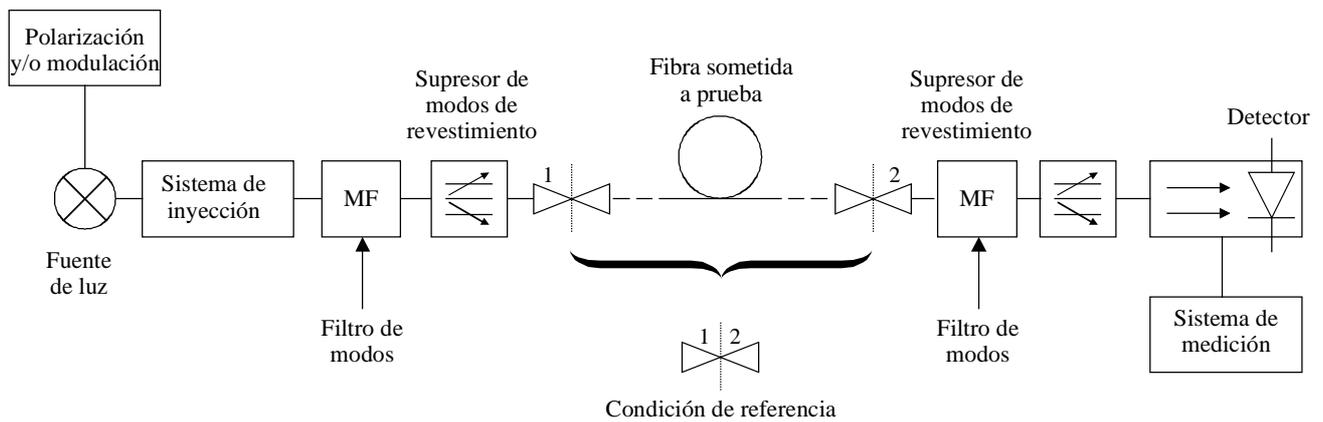
La técnica de la pérdida de inserción consiste en evaluar la pérdida de potencia debida a la inserción de la fibra sometida a prueba entre un sistema de inyección y un sistema de recepción previamente interconectados (condición de referencia). Las potencias  $P_1$  y  $P_2$  se evalúan así de una forma menos directa que con el método de la fibra cortada. Por tanto, el método no está destinado a su empleo con largos de fabricación de fibras y cables.

La técnica de la pérdida de inserción es menos exacta que la de la fibra cortada, pero presenta la ventaja de no ser destructiva para la fibra sometida a prueba ni para los semiconectores posiblemente fijados en ambos extremos, por lo que es particularmente apta en condiciones de funcionamiento real, destinándose sobre todo a su empleo con tramos de cable conectorizados.

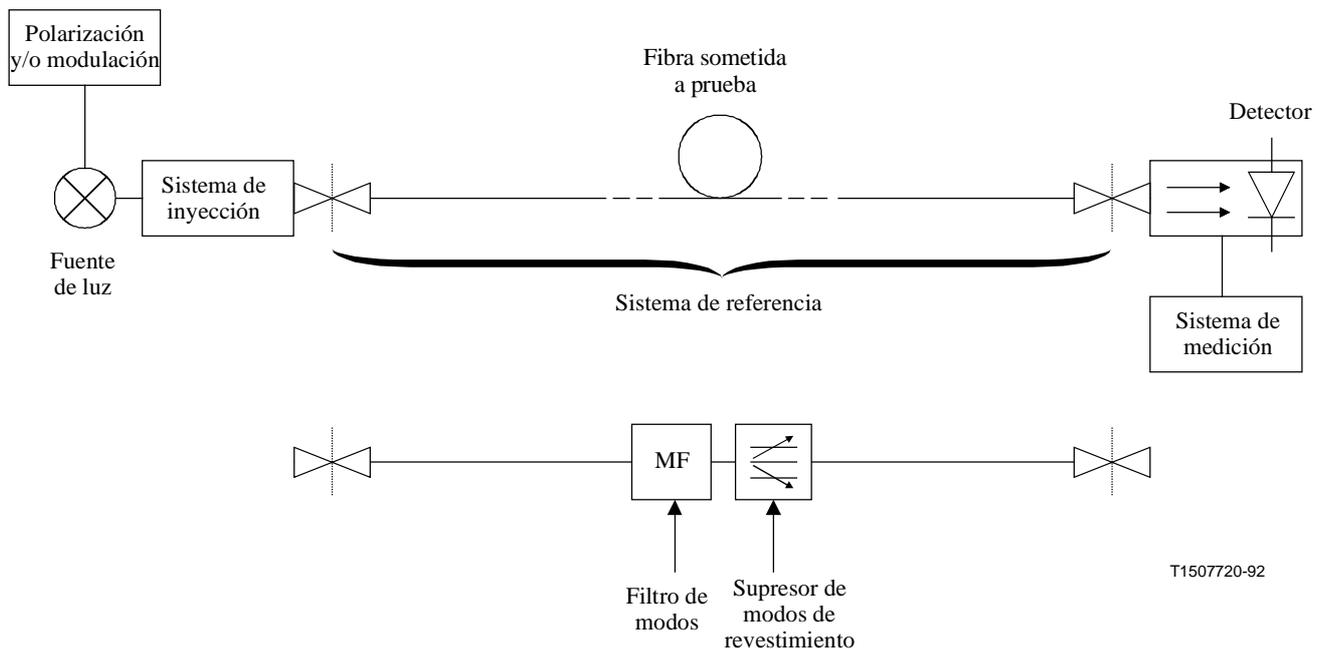
Se considerarán dos opciones en esta técnica (véase la figura 14), que difieren en la naturaleza de los sistemas de inyección y recepción, como se indica más adelante. Son posibles condiciones de medición intermedias entre las de la opción a) y la opción b), que se tratan en la nota 2 de 2.4.3.3.2.

En la opción a), la calidad de los semiconectores posiblemente fijados en la fibra sometida a prueba (y, en general, la calidad de los dispositivos de interconexión utilizados) influye en los resultados; en la opción b), esta influencia es casi nula.

En consecuencia, la opción b) es por lo general más exacta y más adecuada cuando sólo se necesita la atenuación efectiva de la fibra. Por el contrario, cuando la sección de fibra sometida a prueba dispone de semiconectores y ha de ponerse en cascada con otros elementos, los resultados de la opción a) son más significativos ya que tienen en cuenta la desviación de los semiconectores con respecto a la pérdida nominal.



Opción a)



Opción b)

Figura 14/G.650 – Técnica de la pérdida de inserción

### 2.4.3.2 Aparato de prueba

En la figura 14 se muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba. Las mediciones pueden efectuarse a una o más longitudes de onda, o bien puede requerirse una respuesta espectral en una gama de longitudes de onda.

#### 2.4.3.2.1 Fuente óptica

Se utilizará un fuente de radiación apropiada, de intensidad estable, como una lámpara, un láser o un diodo fotoemisor. Si se emplea una fuente de amplio espectro, deberá ir seguida de un dispositivo de selección de longitud de onda (o bien insertarse este dispositivo antes del detector). En cualquier caso se conocerá la longitud de onda nominal de la fuente (teniendo en cuenta, posiblemente, el dispositivo de selección de longitud de onda).

La anchura espectral a amplitud mitad debe ser estrecha en relación con cualquiera de las características de atenuación espectral de la fibra.

#### **2.4.3.2.2 Modulación**

Véase 2.4.1.2.2.

#### **2.4.3.2.3 Condiciones de inyección**

##### **Para la opción a)**

La fuente se acopla a un tramo corto de fibra monomodo que tiene las mismas características nominales que la fibra sometida a prueba y que dispone de un filtro de modos y un supresor de modos de revestimiento (véase más adelante).

La citada fibra monomodo se acopla a la fibra que ha de probarse con un dispositivo de acoplamiento muy preciso, para minimizar las pérdidas de acoplamiento y garantizar unos resultados significativos. Si la fibra sometida a prueba dispone de un semiconector, se fijará a la fibra de inyección un semiconector compatible de alta calidad.

##### **Para la opción b)**

La fuente se acopla mediante un sistema óptico adecuado a la fibra sometida a prueba, de manera que el punto luminoso inyectado en la cara extrema de entrada de la fibra tenga una intensidad de campo próximo y de campo lejano casi uniforme, dentro del diámetro del campo modal y la intensidad de campo lejano de la fibra a prueba.

El sistema puede utilizar lentes y un posicionador de fibra; otra posibilidad es inyectar la luz en una fibra multimodo de índice en escalón que se conecta a la fibra sometida a prueba.

Esto se efectúa con cualquier dispositivo de acoplamiento o semiconector compatible con los que terminan la fibra objeto de prueba.

#### **2.4.3.2.4 Sistema de referencia [opción b) únicamente]**

Este sistema está formado por un tramo corto de fibra monomodo que tiene las mismas características nominales que la fibra sometida a prueba. La fibra dispone de un filtro de modos y un supresor de modos de revestimiento; ninguno de ambos dispositivos introducirá pérdida alguna en el modo fundamental.

#### **2.4.3.2.5 Filtro de modos**

El filtro de modos permitirá la propagación a lo largo de la fibra del modo fundamental únicamente. Puede implementarse por ejemplo mediante una curvatura adecuada de la fibra.

#### **2.4.3.2.6 Supresor de modos de revestimiento**

Debe emplearse un supresor de modos de revestimiento que favorezca la conversión de modos de revestimiento en modos de radiación. Este dispositivo no es necesario si la propia fibra no permite la propagación de modos de revestimiento.

#### **2.4.3.2.7 Detección óptica**

La respuesta espectral del detector óptico será compatible con las características espectrales de la fuente. Debe tener características de sensibilidad lineales.

##### **Para la opción a)**

El detector se conecta a una fibra monomodo que tiene las mismas características nominales que la fibra sometida a prueba. La fibra debe disponer de un filtro de modos y de un supresor de modos de revestimiento.

Para el acoplamiento con la fibra a prueba, es aplicable lo indicado en 2.4.3.2.3, opción a).

### Para la opción b)

El extremo de la fibra sometida a prueba se posiciona delante del detector.

Se utilizará un detector adecuado que intercepte toda la radiación que emerge de la fibra. El detector debe ser espacialmente uniforme.

Otra posibilidad es conectar el detector a una fibra multimodo de índice en escalón. Esta fibra se acopla a la fibra sometida a prueba mediante un dispositivo de acoplamiento cualquiera o un semiconector compatible con los que terminan la fibra a prueba.

### 2.4.3.3 Procedimiento de medición

#### 2.4.3.3.1 Preparación de la fibra que ha de probarse

Véase 2.4.1.3.1.

Si la fibra dispone de conectores, es necesario un procedimiento de limpieza adecuado.

#### 2.4.3.3.2 Procedimiento

- 1) Una vez seleccionada la longitud de onda de medición, se mide primero la potencia  $P_1$  de la siguiente manera:

#### Para la opción a)

Se conecta la fibra del sistema de inyección a la fibra del sistema de recepción. Se registra la potencia recibida  $P_1$ .

#### Para la opción b)

Se conecta el sistema de referencia entre los sistemas de inyección y recepción. Se registra la potencia recibida  $P_1$ .

- 2) A continuación se conecta la fibra objeto de prueba entre los sistemas de inyección y de recepción. Se registra entonces la potencia  $P_2$  recibida.
- 3) Finalmente se calcula la atenuación  $A$  de la sección de fibra de la siguiente manera:

#### Para la opción a)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \text{ (dB)} \quad (2-14a)$$

donde  $C_r$ ,  $C_1$  y  $C_2$  son las pérdidas medias nominales (en dB) de las conexiones en las condiciones de referencia, a la entrada de la fibra objeto de prueba y a su salida, respectivamente.

#### Para la opción b)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (2-14b)$$

NOTA 1 – Al utilizar la opción b) se supone que la fibra sometida a prueba no permite la propagación al extremo receptor de modos distintos del fundamental.

NOTA 2 – También son posibles las mediciones de atenuación de la fibra con un montaje de prueba mixto, que utilice un sistema de inyección como el de la opción a) y un sistema de recepción como el de la opción b), o viceversa.

El procedimiento de medición de  $P_1$  es similar en ambos casos al reseñado anteriormente para la opción a); no se precisa sistema de referencia y el sistema de inyección se conecta directamente al sistema de recepción.

La atenuación de la sección de fibra puede calcularse en los dos casos de la siguiente manera:

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - C_a \quad (\text{dB}) \quad (2-15)$$

donde  $C_a$  es la pérdida media nominal (en dB) de la conexión entre la fibra sometida a prueba y la parte del montaje de prueba (de lanzamiento o recepción) perteneciente a la opción a).

NOTA 3 – La capacidad intrínseca de la opción a) para evaluar el comportamiento de los semiconectores no implica su utilización siempre que se requiera esta evaluación.

Hay en utilización posibilidades alternativas, aun en un extremo en el que se requiere evaluación de semiconectores, una opción b) montaje con conexión previa de un cordón monomodo a las fibras sometidas a prueba. La pérdida nominal del conector fibracordón debe sustraerse de la pérdida medida.

El aparato de prueba que ha de utilizarse en la práctica debe elegirse de manera que minimice las fuentes de error, teniendo en cuenta la instrumentación disponible y los dispositivos de conexión. El empleo de un montaje híbrido (a-lanzamiento, b-recepción) más un cordón en el extremo receptor suele ser la mejor solución cuando han de evaluarse ambos semiconectores.

#### **2.4.3.4 Presentación de los resultados**

- a) Disposición del montaje de prueba, incluido tipo de fuente, longitud de onda de la fuente, anchura espectral (FWHM) utilizada en la medición y el tipo de opción [a) o b)].
- b) Identificación de la fibra.
- c) Longitud de la sección de fibra y condiciones de extremo (presencia de semiconductores).
- d) Atenuación de las secciones expresada en dB.
- e) Coeficiente de atenuación expresado en dB/km.
- f) Indicación de exactitud y repetibilidad (la repetibilidad de la pérdida de conexión se tendrá adecuadamente en cuenta).
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

## **2.5 Métodos de prueba para la dispersión cromática**

### **2.5.1 Método de prueba de referencia: Técnica del desplazamiento de fase**

#### **2.5.1.1 Generalidades**

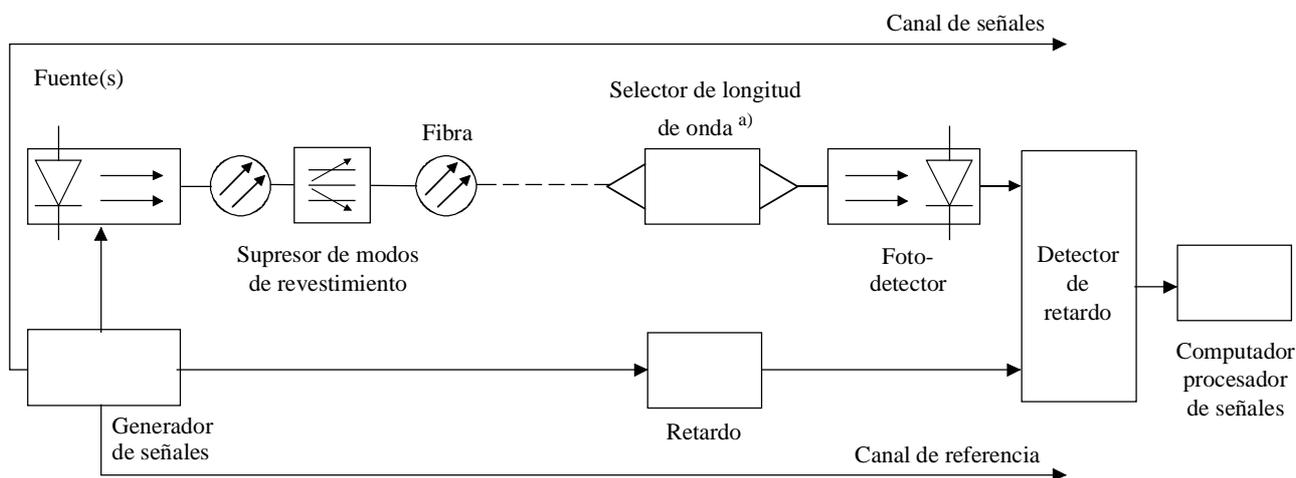
El coeficiente de dispersión cromática de la fibra se obtiene de la medición del retardo de grupo relativo experimentado por las diversas longitudes de onda durante la propagación a través de un largo de fibra conocido.

El retardo de grupo puede medirse en el dominio de la frecuencia detectando, grabando y procesando el desplazamiento de fase de una señal moduladora sinusoidal.

La dispersión cromática puede medirse a una longitud de onda fija o en una gama de longitudes de onda.

#### **2.5.1.2 Aparato de prueba**

La figura 15 muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba.



T1524590-96

a) Cuando sea necesario.

**Figura 15/G.650 – Montaje típico del aparato de prueba**

### 2.5.1.2.1 Fuente óptica

La fuente óptica será estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Pueden utilizarse diodos láser [formaciones de diodos láser (LD-array, *laser diode array*)], diodos láser sintonizables por longitud de onda (WTL, *wavelength tunable laser*) [por ejemplo, un láser de cavidad externa (ECL, *external cavity laser*)], diodos fotoemisores o fuentes de banda ancha (por ejemplo, un láser Nd:YAG con una fibra Raman), según la gama de longitudes de onda de la medición.

En todo caso, la señal moduladora deberá ser tal que garantice una resolución temporal suficiente en la medición del retardo de grupo.

### 2.5.1.2.2 Selección de longitud de onda

Se utiliza un selector y la supervisión de longitud de onda para seleccionar y supervisar la longitud de onda a la cual ha de medirse el retardo de grupo. Como selector de longitud de onda puede utilizarse un conmutador óptico, un monocromador, dispositivos dispersivos, filtros ópticos, acopladores ópticos, conectores, etc., según el tipo de fuentes de luz y el montaje de medición. La selección puede efectuarse conmutando señales eléctricas de excitación de las fuentes de luz para diferentes longitudes de onda.

La supervisión de longitud de onda puede efectuarse con un acoplador de fibras ópticas y un medidor de longitud de onda. El selector y el monitor de longitud de onda pueden utilizarse en el extremo de entrada o en el extremo de salida de la fibra medida.

Si se efectúa un ajuste matemático (como en las ecuaciones 2-16, 2-18 o 2-20) en los datos, al menos un punto de datos debe hallarse dentro de 100 nm de  $\lambda_0$ .

### 2.5.1.2.3 Detector

La luz que sale de la fibra medida, de la fibra de referencia, o del divisor óptico, u otro dispositivo equivalente, se acopla a un fotodetector cuya relación señal o ruido y resolución temporal son adecuadas para la medición. El detector va seguido de un amplificador de bajo ruido, si es necesario.

#### 2.5.1.2.4 Canal de referencia

El canal de referencia puede consistir en una línea de señales eléctricas o en una línea de señales ópticas. En este canal puede insertarse un generador de retardo de tiempo. En ciertos casos puede utilizarse la propia fibra probada como línea del canal de referencia.

#### 2.5.1.2.5 Detector de retardo

El detector de retardo medirá el desplazamiento de fase entre la señal de referencia y la señal de canal. Podrá utilizarse un voltímetro vectorial.

#### 2.5.1.2.6 Procesador de señales

Puede añadirse un procesador de señales para reducir el ruido y/o la fluctuación de fase de la forma de onda medida. En caso necesario, puede utilizarse un computador digital para control del equipo, recogida de datos y evaluación numérica de éstos.

#### 2.5.1.3 Procedimiento de medición

La fibra a prueba se acopla adecuadamente a la fuente y al detector mediante un selector de longitud de onda, un divisor óptico, etc. Si es necesario, puede realizarse una calibración del retardo cromático de la fuente. Debe lograrse un compromiso adecuado entre la resolución de longitud de onda y el nivel de la señal. A menos que la fibra sometida a prueba sea utilizada también como línea del canal de referencia, la temperatura de la fibra debe ser suficientemente estable durante la medición.

El desplazamiento de fase entre la señal de referencia y la señal de canal en la longitud de onda de trabajo debe medirse con el detector de retardo. Se utiliza un procesamiento de datos apropiado al tipo de modulación a fin de obtener el coeficiente de dispersión cromática en la longitud de onda de trabajo. En caso necesario, puede realizarse una exploración espectral del retardo de grupo de función de la longitud de onda; puede completarse una curva de ajuste a partir de los valores medidos.

El retardo de tiempo de grupo se deducirá del correspondiente desplazamiento de fase  $\phi$  mediante la relación  $\tau = \phi/(2\pi f)$ , siendo  $f$  la frecuencia de modulación.

##### 2.5.1.3.1 Fibras tratadas en la Recomendación G.652

Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán por la expresión de Sellmeier de tres términos:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (2-16)$$

donde  $\tau_0$  es el retardo relativo mínimo a la longitud de onda de dispersión nula  $\lambda_0$ . El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión de Sellmeier diferenciada:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right) \quad (2-17)$$

$S_0$  es la pendiente de dispersión nula, es decir, el valor de la pendiente de dispersión  $S(\lambda) = dD/d\lambda$  a la longitud de onda  $\lambda_0$ .

NOTA 1 – Estas ecuaciones de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$  son suficientemente exactas en la gama 1270-1340 nm, pero menos en la región de 1550 nm. Como la dispersión en esta última región es grande, la menor exactitud puede ser aceptable; si así no fuera, puede mejorarse incluyendo datos de la región de 1550 nm cuando se realice el ajuste. Debe señalarse no obstante que esto puede reducir la exactitud en la región de 1310 nm.

NOTA 2 – Otra posibilidad es medir directamente el coeficiente de dispersión cromática, por ejemplo, por un método de desplazamiento de fase diferencial. En este caso, la ecuación de Sellmeier 2-17 diferenciada debe ajustarse directamente al coeficiente de dispersión para determinar  $\lambda_0$  y  $S_0$ .

### 2.5.1.3.2 Fibras tratadas en la Recomendación G.653

Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán por la expresión cuadrática:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (2-18)$$

donde  $\tau_0$  es el retardo relativo mínimo a la longitud de onda de dispersión nula  $\lambda_0$ . El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática diferenciada:

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)S_0 \quad (2-19)$$

$S_0$  es la pendiente de dispersión nula (uniforme), es decir, el valor de la pendiente de dispersión  $S(\lambda) = dD/d\lambda$  a la longitud de onda  $\lambda_0$ .

NOTA 1 – Estas ecuaciones de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$  son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No pueden emplearse en la región de 1310 nm.

NOTA 2 – Otra posibilidad es medir directamente el coeficiente de dispersión cromática, por ejemplo, por un método de desplazamiento de fase diferencial. En este caso, debe ajustarse directamente una línea recta (2-19) al coeficiente de dispersión para determinar  $\lambda_0$  y  $S_0$ .

### 2.5.1.3.3 Fibras tratadas en la Recomendación G.654

El retardo de grupo medido por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustará por la expresión cuadrática:

$$\tau(\lambda) = \tau_{1550} + (S_{1550} / 2)(\lambda - 1550)^2 + D_{1550}(\lambda - 1550) \quad (2-20)$$

donde  $\tau_{1550}$  es el retardo de grupo relativo a la longitud de onda  $\lambda = 1550$  nm. El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática diferenciada:

$$D(\lambda) = S_{1550}(\lambda - 1550) + D_{1550} \quad (2-21)$$

donde  $S_{1550}$  es la pendiente de dispersión (uniforme) para una longitud de onda de 1550 nm, es decir, el valor de la pendiente de dispersión  $S_{1550}(\lambda) = dD/d\lambda$  para  $\lambda = 1550$  nm.  $D_{1550}$  designa los valores de dispersión a  $\lambda = 1550$  nm.

NOTA 1 – Estas ecuaciones de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$  son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No son aplicables en la región de 1310 nm.

NOTA 2 – Otra posibilidad es medir directamente el coeficiente de dispersión cromática, por ejemplo, por el método de desplazamiento de fase diferencial. En este caso, se ajustará directamente una línea recta (2-21) al coeficiente de dispersión para determinar  $S_{1550}$  y  $D_{1550}$ .

### 2.5.1.4 Presentación de los resultados

- a) Configuración de prueba.
- b) Tipo de modulación utilizada.
- c) Características de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Características del selector de longitud de onda (si existe).
- f) Tipo de fotodetector.

- g) Características del detector de retardo.
- h) Valores de la longitud de onda de dispersión nula y la pendiente de dispersión nula para fibras tratadas por las Recomendaciones G.652 y G.653 o los valores del coeficiente de dispersión cromática y de la pendiente de dispersión a  $\lambda = 1550$  nm para fibras tratadas por la Recomendación G.654.
- i) Procedimiento de ajuste de los datos de retardo relativo con la gama de longitudes de onda utilizada.
- j) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

## 2.5.2 Primer método de prueba alternativo: Técnica interferométrica

### 2.5.2.1 Generalidades

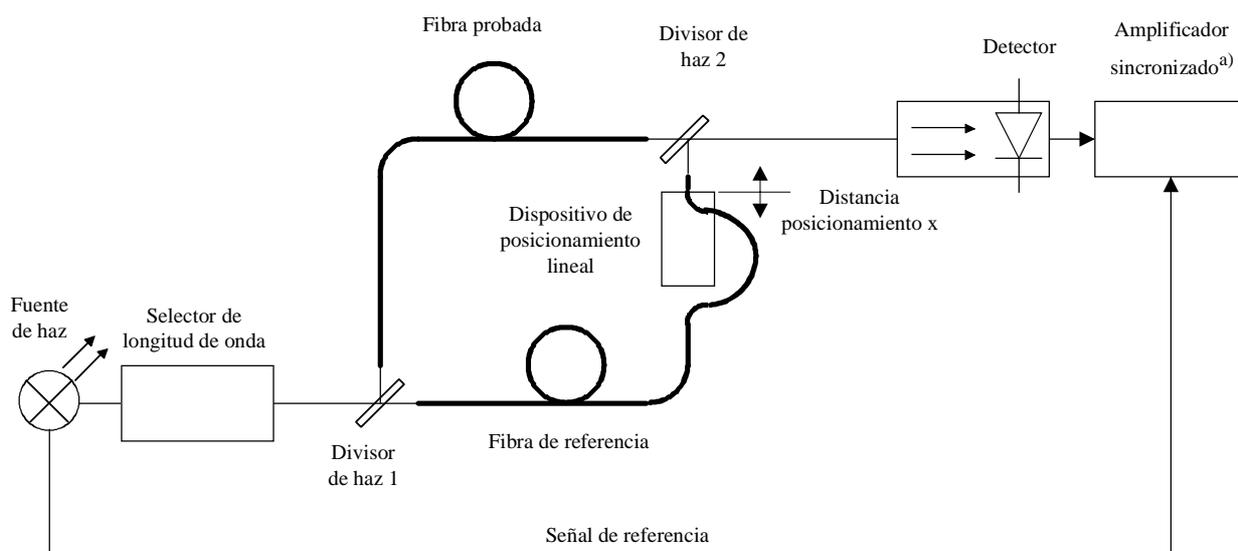
El método de la prueba interferométrica permite medir la dispersión cromática utilizando un tramo corto de fibra (de varios metros). Este método ofrece la posibilidad de medir la homogeneidad longitudinal de la dispersión cromática de las fibras ópticas. Permite además medir el efecto de influencias generales o locales, tales como los cambios de temperatura y las pérdidas por microflexión, sobre la dispersión cromática.

Según el principio de medición interferométrica, el retardo dependiente de la longitud de onda entre la muestra probada y el trayecto de referencia se mide con un interferómetro Mach-Zehnder. El trayecto de referencia puede hallarse en un trayecto aéreo o en una fibra monomodo con un retardo de grupo espectral conocido.

Debe señalarse que la extrapolación de los valores de dispersión cromática obtenidos mediante la prueba interferométrica con fibras de pocos metros de longitud, a largas secciones de fibras, presupone la homogeneidad longitudinal de la fibra. Esta hipótesis puede no ser aplicable en todos los casos.

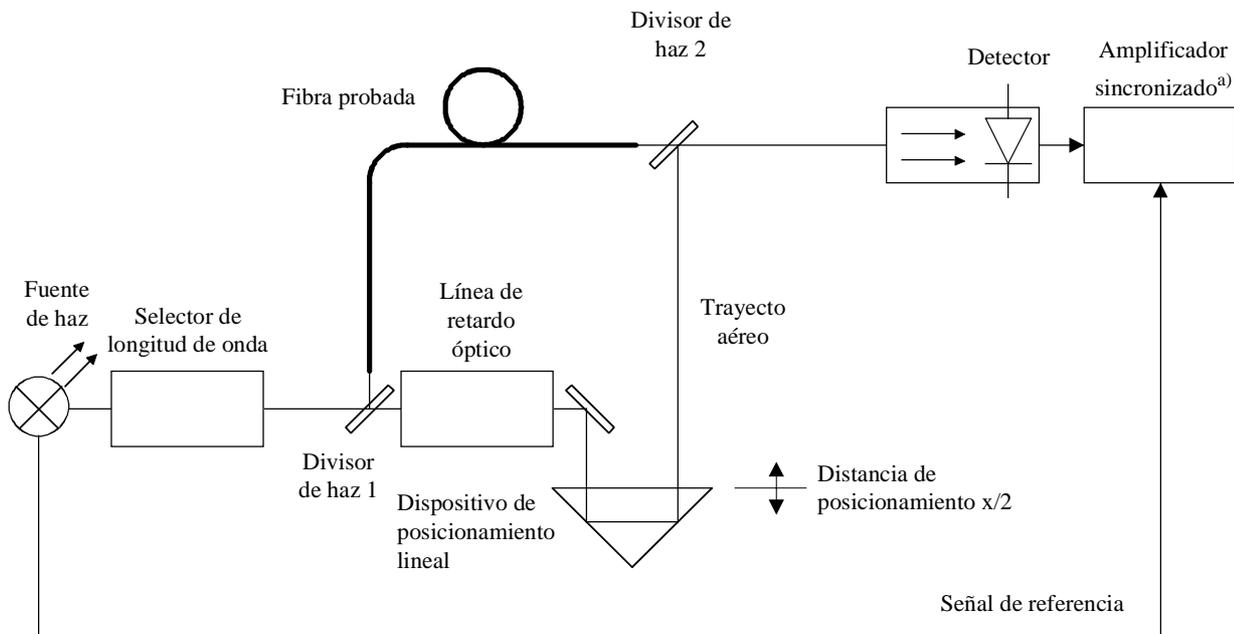
### 2.5.2.2 Aparato de prueba

Las figuras 16 y 17 muestran diagramas esquemáticos del aparato de prueba en los cuales el trayecto de referencia está constituido por una fibra óptica y un trayecto aéreo, respectivamente.



a) Cuando sea necesario.

**Figura 16/G.650 – Diagrama esquemático del montaje de medición con la fibra de referencia**



a) Cuando sea necesario.

**Figura 17/G.650 – Diagrama esquemático del montaje de medición con la referencia de trayecto aéreo**

### 2.5.2.2.1 Fuente óptica

La fuente será estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. La fuente debe ser adecuada, por ejemplo, un láser YAG con fibra Raman o una lámpara y una fuente óptica de diodo fotoemisor, etc. Para la aplicación de técnicas de amplificación sincronizada, basta con una fuente luminosa para modulación a baja frecuencia (50 a 500 Hz).

### 2.5.2.2.2 Selector de longitud de onda

Se utiliza un selector de longitud de onda para seleccionar la longitud de onda a la cual se mide el retardo del grupo. Puede utilizarse un monocromador, un filtro de interferencia óptica u otro selector de longitud de onda, según el tipo de fuentes ópticas y los sistemas de medición. El selector de longitud de onda puede utilizarse en el extremo de entrada o en el de salida de la fibra probada.

La anchura espectral de las fuentes ópticas debe ser limitada por la exactitud de medición de la dispersión y es de unos 2 a 10 nm.

Si se efectúa un ajuste matemático (como en las ecuaciones 2-16, 2-18 o 2-20) en los datos, al menos un punto de datos debe hallarse dentro de 100 nm de  $\lambda_0$ .

### 2.5.2.2.3 Detector óptico

El detector óptico debe tener suficiente sensibilidad en la gama de longitudes de onda a la que debe determinarse la dispersión cromática. Si es necesario, podría mejorarse la señal recibida, por ejemplo con un circuito de transimpedancia.

### 2.5.2.2.4 Equipo de prueba

Para registrar los diagramas de interferencia puede utilizarse un amplificador sincronizado. Para equilibrar la longitud óptica de los dos trayectos del interferómetro se utiliza un dispositivo de

posicionamiento lineal en el trayecto de referencia. En cuanto al posicionamiento del dispositivo, es importante asegurarse de su exactitud, uniformidad y estabilidad de movimiento lineal. La variación de la longitud debe hallarse en la gama de 20 a 100 mm, con una exactitud de unos 2  $\mu\text{m}$ .

#### 2.5.2.2.5 Espécimen

Como espécimen para la prueba pueden utilizarse fibras monomodo no cableadas y cableadas. La longitud del espécimen debe hallarse en la gama de 1 a 10 m, con una exactitud de  $\pm 1$  mm. La preparación de las caras extremas de las fibras debe realizarse con cierto cuidado.

#### 2.5.2.2.6 Procesamiento de los datos

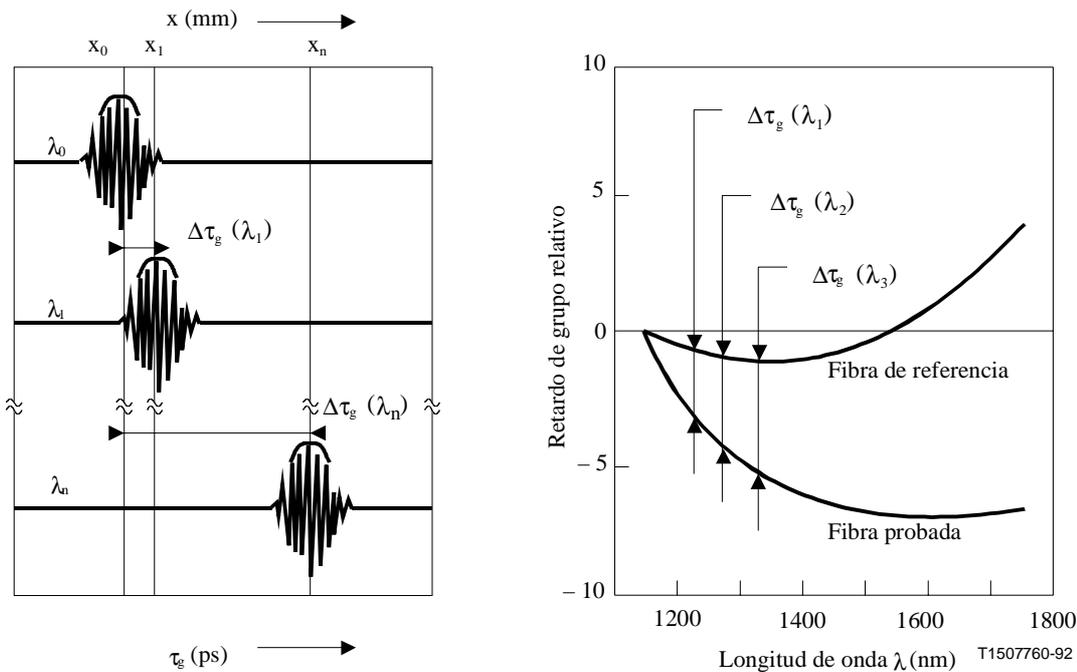
Para el análisis de los diagramas de interferencia debe utilizarse un computador con soporte lógico adecuado.

#### 2.5.2.3 Procedimiento de medición

- 1) La fibra probada se dispone en el montaje de medición (figuras 16 y 17). El posicionamiento de las caras extremas de la fibra se efectúa con dispositivos de microposicionamiento tridimensional, optimizando la potencia óptica recibida por el detector. No son posibles errores debidos a modos de revestimiento.
- 2) La determinación del retardo de grupo se efectúa equilibrando las longitudes ópticas de los dos trayectos del interferómetro con un dispositivo de posicionamiento lineal en el trayecto de referencia, para diferentes longitudes de onda. La diferencia entre la posición  $x_i$  del máximo del diagrama de interferencia para la longitud de onda  $\lambda_i$  y la posición  $x_0$  para la longitud de onda  $\lambda_0$  (figura 18) determina la diferencia de retardo de grupo  $\Delta\tau_g(\lambda_i)$  entre el trayecto de referencia y el trayecto de prueba, por la siguiente expresión:

$$\Delta\tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (2-22)$$

donde  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío. El retardo de grupo de la muestra medida se calcula sumando el valor  $\Delta\tau_g(\lambda_i)$  y el retardo de grupo espectral del trayecto de referencia. Dividiendo esta suma por el largo de fibra probado se obtiene el retardo de grupo por unidad de longitud  $\tau(\lambda)$  de la fibra probada.



**Figura 18/G.650 – Determinación del retardo de grupo espectral**

### 2.5.2.3.1 Fibras tratadas en la Recomendación G.652

Con los distintos valores de retardo de grupo de la fibra sometida a prueba puede obtenerse una curva de interpolación. Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán a la curva representada por la expresión de Sellmeier de tres términos 2-16.

El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión de Sellmeier diferenciada 2-17.

NOTA – Las ecuaciones 2-16 y 2-17 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1270-1340 nm, pero menos en la región de 1550 nm. Como la dispersión en esta última región es grande, la menor exactitud puede ser aceptable. Si así no fuera, puede mejorarse incluyendo datos de la región de 1550 nm cuando se realice el ajuste. Debe señalarse no obstante que esto puede reducir la exactitud en la región de 1310 nm.

### 2.5.2.3.2 Fibras tratadas en la Recomendación G.653

Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán a la curva representada por la expresión cuadrática 2-18. El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática diferenciada 2-19.

NOTA – Las ecuaciones 2-18 y 2-19 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No pueden utilizarse en la región de 1310 nm.

### 2.5.2.3.3 Fibras tratadas en la Recomendación G.654

El retardo de grupo medido por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustará por la expresión cuadrática 2-20. El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática diferenciada 2-21.

NOTA – Las ecuaciones 2-20 y 2-21 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No pueden utilizarse en la región de 1310 nm.

#### **2.5.2.4 Presentación de los resultados**

- a) Configuración de prueba.
- b) Características de la fuente.
- c) Identificación y longitud de la fibra.
- d) Características del selector de longitud de onda (si existe).
- e) Tipo del fotodetector.
- f) Valores de la longitud de onda de dispersión nula y la pendiente de dispersión nula para fibras tratadas por las Recomendaciones G.652 y G.653 o los valores del coeficiente de dispersión cromática y de la pendiente de dispersión a  $\lambda = 1550$  nm para fibras tratadas por la Recomendación G.654.
- g) Procedimiento de ajuste para los datos del retardo relativo, con indicación de la gama de longitudes de onda utilizada.
- h) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

#### **2.5.3 Segundo método de prueba alternativo: Técnica de retardo de los impulsos**

##### **2.5.3.1 Generalidades**

El coeficiente de dispersión cromática de la fibra se obtiene de la medición del retardo de grupo relativo experimentado por las diversas longitudes de onda durante la propagación a través de un largo de fibra conocido.

El retardo de grupo se mide en el dominio del tiempo, detectando, grabando y procesando el retardo experimentado por los impulsos en diversas longitudes de onda.

La dispersión cromática puede medirse a una longitud de onda fija o en una gama de longitudes de onda.

##### **2.5.3.2 Aparato de prueba**

La figura 15 muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba.

###### **2.5.3.2.1 Fuente óptica**

La fuente óptica será estable en posición, intensidad y longitud de onda durante un periodo de tiempo suficientemente largo para aplicar el procedimiento de medición completo. Pueden utilizarse diodos láser {formaciones de diodos láser (LD-array)}, diodos láser sintonizables por longitud de onda (WTL) {por ejemplo, un láser de cavidad externa (ECL)}, fuentes de banda ancha (por ejemplo, un láser Nd:YAG con una fibra Raman), según la gama de longitudes de onda de la medición.

En todo caso, la señal moduladora deberá ser tal que garantice una resolución temporal suficiente en la medición del retardo de grupo.

###### **2.5.3.2.2 Selección de longitud de onda**

Se utiliza el selector y la supervisión de longitud de onda para seleccionar y supervisar la longitud de onda a la cual ha de medirse el retardo de grupo. Como selector de longitud de onda puede utilizarse un conmutador óptico, un monocromador, dispositivos dispersivos, filtros ópticos, acopladores ópticos, conectores, etc., según el tipo de fuentes de luz y el montaje de medición. La selección puede efectuarse conmutando señales eléctricas de excitación de las fuentes de luz para diferentes longitudes de onda.

La supervisión de longitud de onda puede efectuarse con un acoplador de fibras ópticas y un medidor de longitud de onda. El selector y el monitor de longitud de onda pueden utilizarse en el extremo de entrada o en el extremo de salida de la fibra medida.

Si se efectúa un ajuste matemático (como en las ecuaciones 2-16, 2-18 o 2-20) en los datos, al menos un punto de datos debe hallarse dentro de 100 nm de  $\lambda_0$ .

#### **2.5.3.2.3 Detector**

La luz que sale de la fibra medida, de la fibra de referencia, o del divisor óptico, u otro dispositivo equivalente, se acopla a un fotodetector cuya relación señal o ruido y resolución temporal son adecuadas para la medición. El detector va seguido de un amplificador de bajo ruido, si es necesario.

#### **2.5.3.2.4 Canal de referencia**

El canal de referencia puede consistir en una línea de señales eléctricas o en una línea de señales ópticas. En este canal puede insertarse un generador de retardo de tiempo. En ciertos casos puede utilizarse la propia fibra probada como línea del canal de referencia.

#### **2.5.3.2.5 Detector de retardo**

El detector de retardo medirá el desplazamiento de fase entre la señal de canal. Podrá utilizarse un osciloscopio de alta velocidad o un osciloscopio de muestreo.

#### **2.5.3.2.6 Procesador de señales**

Puede añadirse un procesador de señales para reducir el ruido y/o la fluctuación de fase de la forma de onda medida. En caso necesario, puede utilizarse un computador digital para control del equipo, recogida de datos y evaluación numérica de éstos.

### **2.5.3.3 Procedimiento de medición**

La fibra a prueba se acopla adecuadamente a la fuente y al detector mediante un selector de longitud de onda, un divisor óptico, etc. Si es necesario, puede realizarse una calibración del retardo cromático de la fuente. Debe lograrse un compromiso adecuado entre la resolución de longitud de onda y el nivel de la señal. A menos que la fibra sometida a prueba sea utilizada también como línea del canal de referencia, la temperatura de la fibra debe ser suficientemente estable durante la medición.

El retardo de tiempo entre la señal de referencia y la señal de canal en la longitud de onda de trabajo deben medirse con el detector de retardo. Se utiliza un procesamiento de datos apropiado al tipo de modulación a fin de obtener el coeficiente de dispersión cromática en la longitud de onda de trabajo. En caso necesario, puede realizarse una exploración espectral del retardo de grupo de función de la longitud de onda; puede completarse una curva de ajuste a partir de los valores medidos.

#### **2.5.3.3.1 Fibras tratadas en la Recomendación G.652**

Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán por la expresión de Sellmeier de tres términos 2-16.

El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión de Sellmeier diferenciada 2-17.

NOTA – Las ecuaciones 2-16 y 2-17 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1270-1340 nm, pero menos en la región de 1550 nm. Como la dispersión en esta última región es grande, la menor exactitud puede ser aceptable; si así no fuera, puede mejorarse incluyendo datos de la región de 1550 nm cuando se realice el ajuste. Debe señalarse no obstante que esto puede reducir la exactitud en la región de 1310 nm.

### 2.5.3.3.2 Fibras tratadas en la Recomendación G.653

Los valores medidos del retardo de grupo por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustarán por la expresión cuadrática 2-18. El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática diferenciada 2-19.

NOTA – Las ecuaciones 2-18 y 2-19 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No pueden emplearse en la región de 1310 nm.

### 2.5.3.3.3 Fibras tratadas en la Recomendación G.654

El retardo de grupo medido por unidad de longitud de la fibra en función de la longitud de onda se ajustará por la expresión cuadrática 2-20. El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$  puede determinarse por la expresión cuadrática 2-21.

NOTA – Las ecuaciones 2-20 y 2-21 de  $\tau(\lambda)$  y  $D(\lambda)$ , respectivamente, son suficientemente exactas en la gama 1500-1600 nm. No son aplicables en la región de 1310 nm.

### 2.5.3.4 Presentación de los resultados

- a) Configuración de prueba.
- b) Tipo de modulación utilizada.
- c) Características de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Características del selector de longitud de onda (si existe).
- f) Tipo de fotodetector.
- g) Características del detector de retardo.
- h) Valores de la longitud de onda de dispersión nula y la pendiente de dispersión nula para fibras tratadas por las Recomendaciones G.652 y G.653 o los valores del coeficiente de dispersión cromática y de la pendiente de dispersión a  $\lambda = 1550$  nm para fibras tratadas por la Recomendación G.654.
- i) Procedimiento de ajuste de los datos de retardo relativo con la gama de longitudes de onda utilizada.
- j) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (si es necesario).

## 2.6 Métodos de prueba mecánica de recepción

### 2.6.1 Método de prueba de referencia: Tensión longitudinal

#### 2.6.1.1 Generalidades

- a) Este método de prueba describe procedimientos en los que se aplican brevemente cargas de tracción a la totalidad de un largo continuo de fibra. El largo inicial puede fraccionarse en varios largos más cortos, considerándose que cada uno de los largos de menor longitud ha pasado la prueba mecánica de recepción.
- b) En el almacenamiento y en la prueba mecánica se emplean condiciones ambientales normalizadas:  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  y  $50 \pm 20\%$  de humedad relativa. El tiempo de almacenamiento antes de la prueba mecánica queda en estudio.
- c) La medición puede basarse en la tensión mecánica  $\sigma$  o en la deformación  $\epsilon$ . Están relacionadas por:

$$\sigma = E(1 + c\epsilon)\epsilon \quad (2-23)$$

donde  $E$  es el módulo de Young con tensión nula y  $c$  es un parámetro (normalmente, entre 3 y 6). La determinación de los parámetros  $E$  y  $c$ , si se precisan, queda en estudio.

d) La tensión mecánica de la fibra se calcula mediante la tensión  $T$  de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{(1-F)T}{\pi a^2} \quad (2-24)$$

donde  $2a$  es el diámetro de la fibra de cristal (125  $\mu\text{m}$ ) y  $F$  es la fracción de la tensión soportada por el recubrimiento.  $F$  viene dada por:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi a^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j} \quad (2-25)$$

$n$  es el número de capas de recubrimiento

$E_j$  es el módulo de la  $j$ -ésima capa de recubrimiento

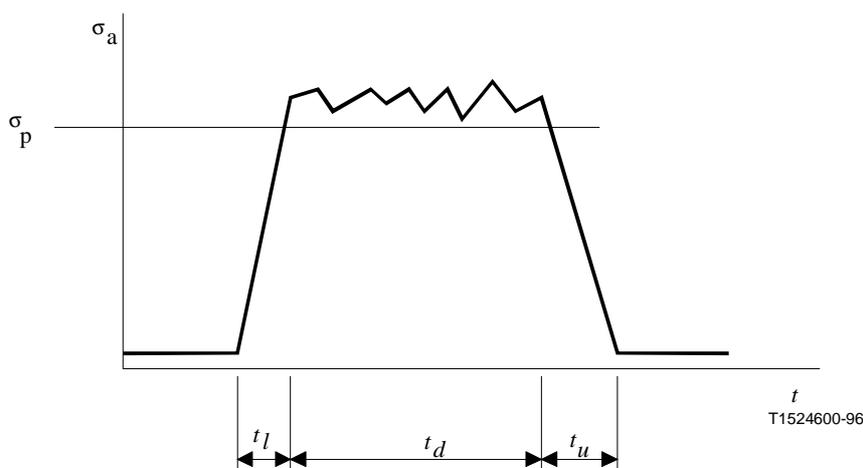
$A_j$  es el área de la sección de corte de la  $j$ -ésima capa de recubrimiento

$E_g$  es el módulo de la fibra de cristal

NOTA – Los módulos de recubrimiento suelen ser caracterizados por los fabricantes.

### 2.6.1.1.1 Parámetros de la prueba mecánica de recepción

- a) La tensión mecánica de prueba,  $\sigma_p$ , se especifica para controlar la resistencia mecánica de las secciones supervivientes de la fibra. En la figura 19 se ilustra la tensión mecánica aplicada durante la prueba mecánica de recepción,  $\sigma_a$ . Se muestran también los tiempos de carga y descarga,  $t_l$  y  $t_u$ , y el tiempo de aplicación de la misma,  $t_d$ . La carga de tracción se aplicará durante el tiempo más breve posible, pero suficientemente grande para asegurar que el vidrio experimente la tensión mecánica de prueba.
- b) La tensión mecánica aplicada rebasará todas las veces la tensión mecánica de prueba. Se controlará el tiempo de descarga para que sea menor que algún valor máximo a convenir entre el usuario y el fabricante para controlar el daño de descarga.



**Figura 19/G.650 – Tensión mecánica  $\sigma$  en función del tiempo  $t$ , durante la prueba mecánica de recepción**

## 2.6.1.2 Aparato de prueba

### 2.6.1.2.1 Requisitos del procedimiento de funcionamiento

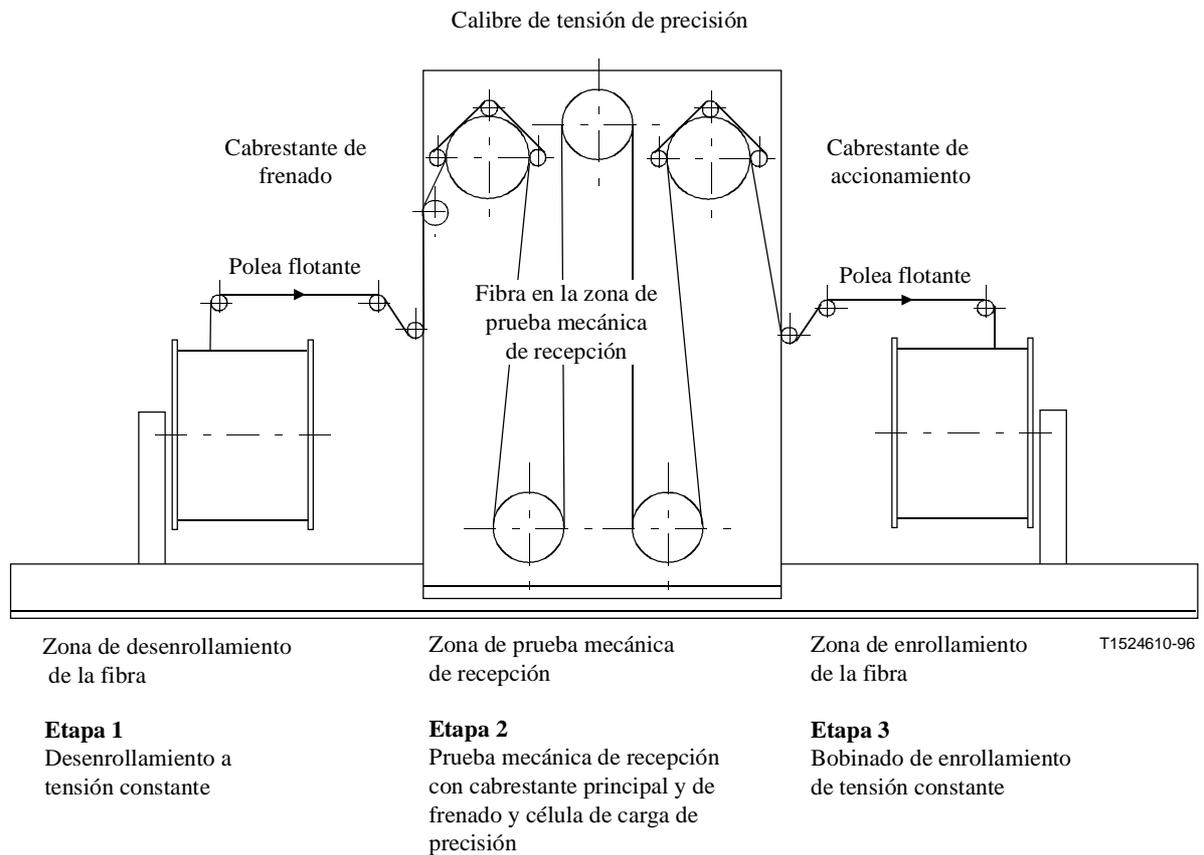
- a) En las zonas de desenrollamiento y de arrollamiento, la fibra se mantiene a una tensión mecánica de valor reducido que, normalmente, no excede del 10% de la tensión de prueba (véase la figura 19).
- b) En la zona de carga, la tensión mecánica de la fibra pasa rápidamente de un valor bajo de tensión mecánica a la plena tensión mecánica de prueba. El tiempo de carga es  $t_c$ .
- c) En la zona de prueba de recepción, la tensión mecánica de prueba aplicada,  $\sigma_a$ , se mantiene a valores mayores que la tensión mecánica de prueba especificada,  $\sigma_p$ .
- d) En la zona de descarga, la tensión mecánica de la fibra cae desde la tensión aplicada a un valor de tensión bajo. El tiempo de descarga es  $t_d$ .
- e) Se controla el tiempo de descarga para que sea menor que un valor máximo a convenir por el usuario y el fabricante. Puede variarse cambiando la velocidad de actuación o mediante un diseño adecuado del cabrestante de sujeción.
- f) Los cabrestantes y otras poleas de apoyo serán diseñadas y se harán funcionar de manera que asegure que no produzcan daño excesivo. Los cabrestantes de sujeción serán capaces de mantener la tensión mecánica aplicada sin producir daño adicional debido al deslizamiento.

### 2.6.1.2.2 Máquinas de prueba mecánica de recepción

- a) *Máquina de cabrestantes frenados* (figura 20)

La fibra es desenrollada con baja tensión constante. También el rebobinado después de la prueba mecánica de recepción se efectúa con tensión constante. Los niveles de las tensiones de desenrollamiento y arrollamiento son ajustables.

La carga de prueba mecánica de recepción se aplica a la fibra entre los cabrestantes de frenado y de accionamiento creando una diferencia de velocidad entre los cabrestantes. Se utilizan dos correas para evitar el deslizamiento en los cabrestantes. El calibre de tensión de alta precisión mide la carga en la fibra y controla la diferencia de velocidad para conseguir la carga de prueba mecánica de recepción requerida. El nivel de carga y la velocidad de funcionamiento del equipo pueden fijarse independientemente.

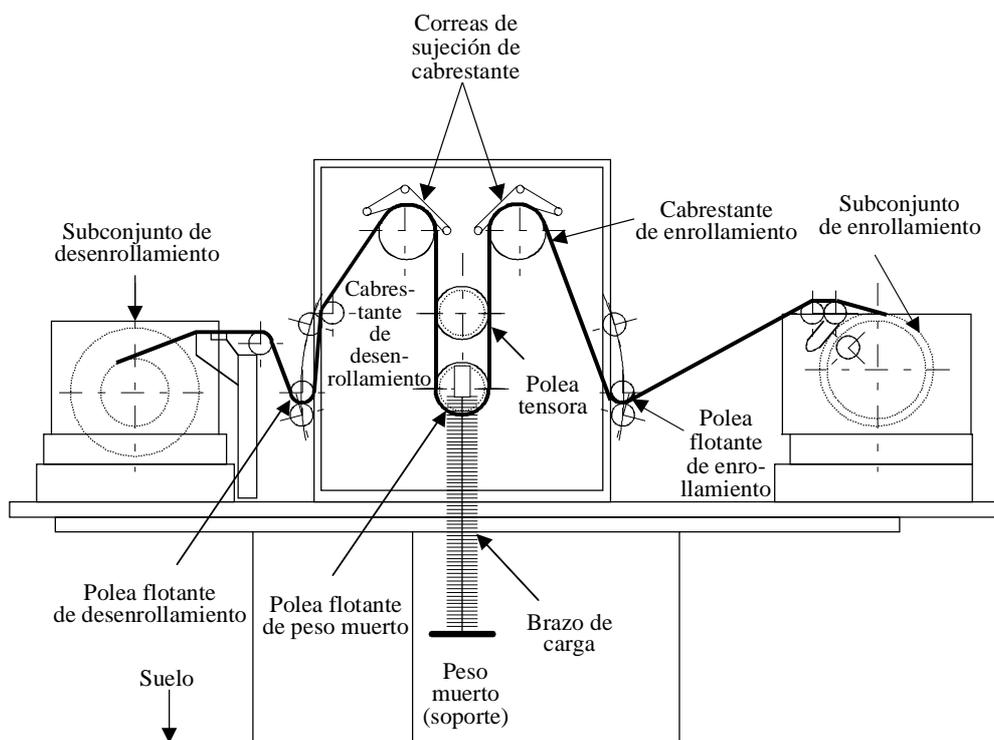


**Figura 20/G.650 – Configuración típica de una máquina de prueba mecánica de recepción de cabrestantes frenados**

b) *Máquina de peso muerto* (figura 21)

Las poleas flotantes de desenrollamiento y enrollamiento son lo bastante ligeras como para guiar la fibra con una tensión mínima. Los cabrestantes de desenrollamiento y enrollamiento están sincronizados entre sí. Las bandas de sujeción de los cabrestantes evitan que se produzcan deslizamientos en los mismos, sin añadir tensión adicional a la fibra o dañar sus recubrimientos.

Un brazo de carga y un peso muerto que reposa sobre una placa se fijan al eje de la polea flotante de peso muerto, para proporcionar la tensión mecánica de prueba de la fibra. Una polea tensora facultativa proporciona un mayor largo de calibre de la fibra, si se necesita.



T1507790-92

**Figura 21/G.650 – Máquina de prueba mecánica de recepción de peso muerto**

### 2.6.1.3 Procedimiento de medición

#### 2.6.1.3.1 Muestra

- La muestra de prueba será un largo total de fibra óptica menos secciones cortas en los extremos, en las que no pueden cumplirse todos los requisitos, por ejemplo, no puede cumplirse el máximo tiempo de descarga. Este margen de longitud de extremo, que suele ser menor que 50 m, será presentado.
- El fallo de la fibra después de la prueba mecánica se evidenciará por su rotura total. Los métodos de examen incluyen una inspección visual y mediciones OTDR. Una vez eliminadas las zonas rotas, se considera que los largos de fibra supervivientes han pasado el procedimiento de prueba mecánica de recepción.

#### 2.6.1.3.2 Cálculo

Si la máquina está calibrada en tensión, el esfuerzo mecánico se calcula mediante la ecuación 2-24. La deformación puede obtenerse mediante la ecuación 2-23.

#### 2.6.1.4 Presentación de los resultados

- Descripción general del aparato.
- Identificación de la fibra.
- Tensión mecánica de prueba aplicada media.
- Máximo tiempo de descarga.
- Tiempo de aplicación.
- Margen de longitud de extremo.

## 2.7 Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización

### 2.7.1 Técnica de autoanálisis de la matriz de Jones

#### 2.7.1.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización (PMD) de las fibras ópticas monomodo. El resultado de medición se obtiene a partir de una serie única de mediciones de la matriz de Jones realizadas a intervalos a través de una gama de longitudes de onda. El método puede aplicarse a fibras cortas y largas, independientemente del grado de acoplamiento de modos de polarización. En algunas circunstancias, pueden necesitarse mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria. Este método se limita a longitudes de ondas mayores e iguales que aquélla a la que la fibra es efectivamente monomodo.

#### 2.7.1.2 Aparato de prueba

Véase en la figura 22 un diagrama esquemático de los componentes clave en un sistema de medición típico.

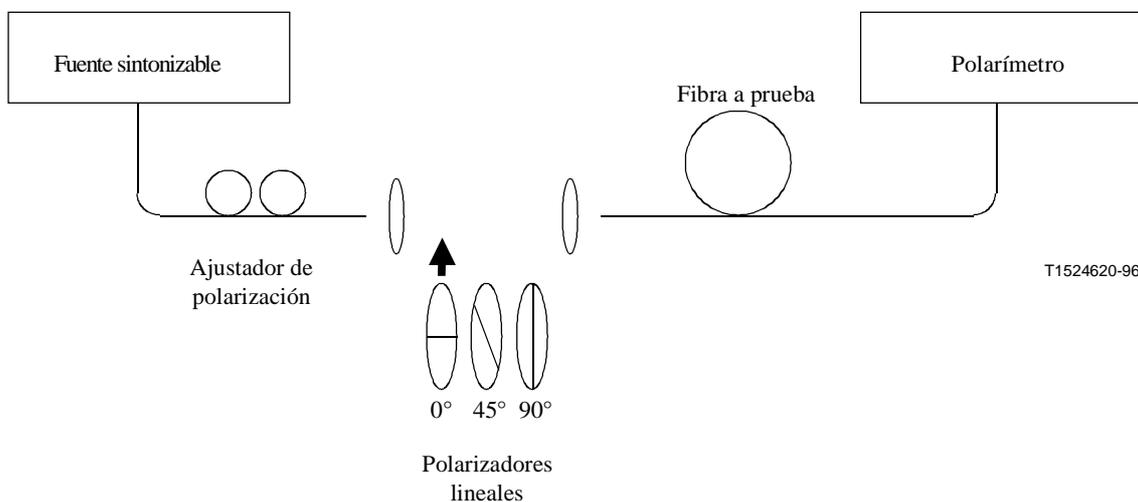


Figura 22/G.650 – Diagrama esquemático del equipo (típico)

#### 2.7.1.2.1 Fuente luminosa

Utilizar 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 con valores de sólo el 25% con precisión reducida. Para un determinado valor del retardo de grupo diferencial  $\Delta\tau$ , el menor grado de polarización que puede resultar viene dado por:

$$DOP = 100e^{-\frac{1}{4\ln 2} \left( \frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_0^2} \right)^2} \quad (2-26)$$

suponiendo un espectro gaussiano de anchura  $\Delta\lambda_{FWHM}$  centrada en  $\lambda_0$ . DOP se expresa como porcentaje.

#### **2.7.1.2.2 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.

#### **2.7.1.2.3 Polarizadores**

Se disponen tres polarizadores lineales en ángulos relativos de aproximadamente 45 grados para su inserción por turno en el haz luminoso. Se conocerán los ángulos relativos reales.

#### **2.7.1.2.4 Dispositivo óptico de entrada**

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

#### **2.7.1.2.5 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.

#### **2.7.1.2.6 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.

#### **2.7.1.2.7 Supresor de modos de revestimiento**

Suprimir cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra a prueba. En la mayoría de las circunstancias, el revestimiento de la fibra efectuará esta función; en otro caso, emplear un dispositivo que extraiga la potencia de modos de revestimiento.

#### **2.7.1.2.8 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.

#### **2.7.1.2.9 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.

#### **2.7.1.3 Procedimiento de medición**

La muestra de prueba será un largo conocido 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.

Cuando es importante minimizar el acoplamiento adicional de modos, la fibra no cableada se sustentará de alguna manera (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  $\lambda_0$ ) es fijado por el requisito:

$$\Delta\tau_{\text{máx}} \Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (2-27)$$

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 permanecerá menor que 4 ps.nm a 1550 nm y menor que 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 esfera 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. A las longitudes de ondas seleccionadas, insertar cada uno de los polarizadores y registrar los parámetros de Stokes correspondientes procedentes del polarímetro.

#### 2.7.1.4 Cálculos o interpretación del resultado

##### 2.7.1.4.1 Cálculos

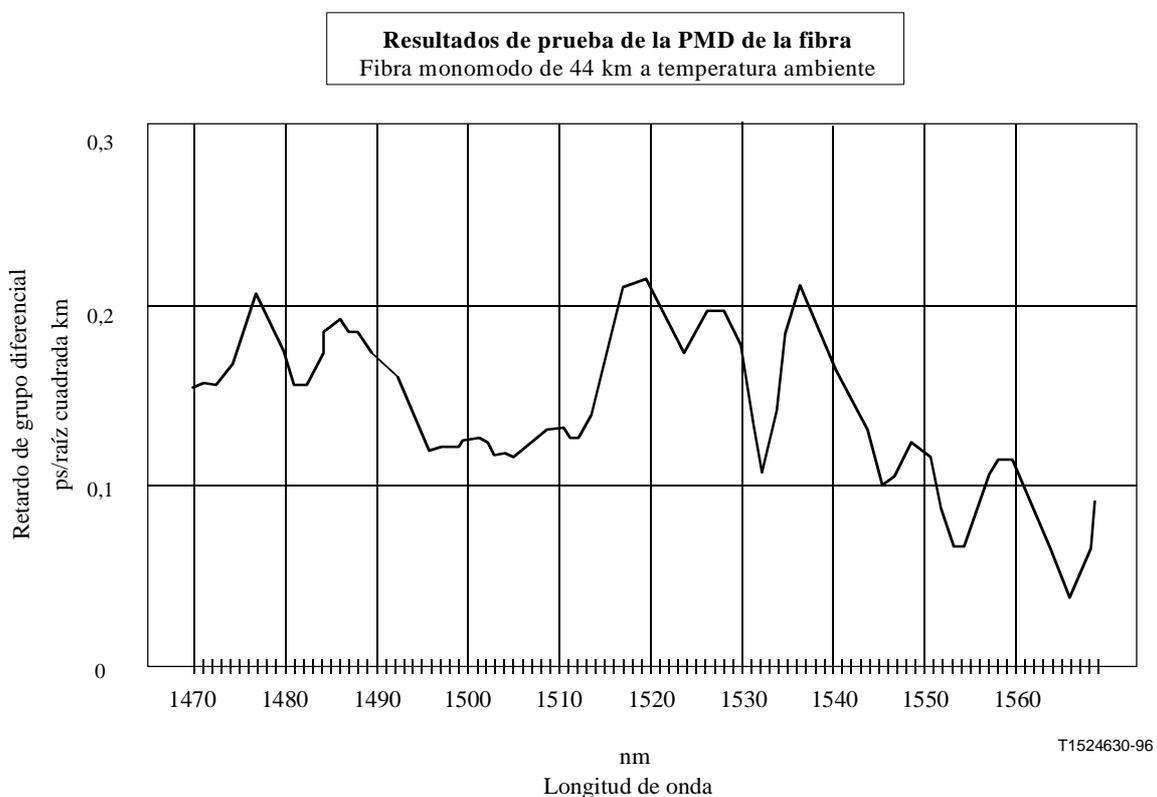
A partir de los parámetros de Stokes, calcular la matriz de Jones de respuesta a cada longitud de onda. Para cada intervalo de longitud de onda, calcular el producto de la matriz de Jones  $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega)$  a la frecuencia óptica superior y la matriz de Jones inversa  $\mathbf{T}^{-1}(\omega)$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

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (2-28)$$

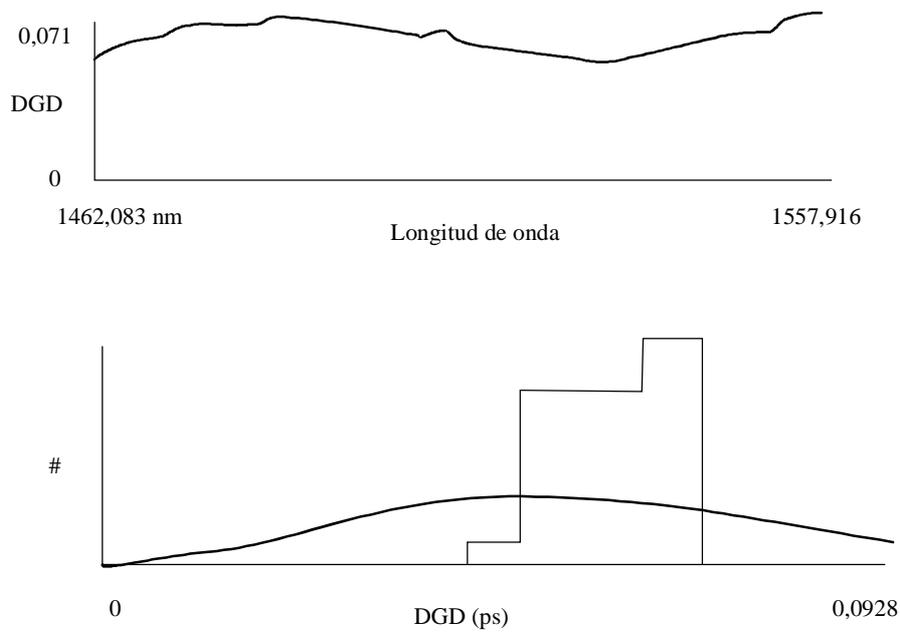
donde  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son los valores propios complejos de  $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega) \mathbf{T}^{-1}(\omega)$  y Arg designa la función argumento, es decir,  $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$ . Para fines de análisis de datos, cada valor de DGD se toma para que represente el retardo 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.

#### 2.7.1.4.2 Representación del DGD en función de la longitud de onda

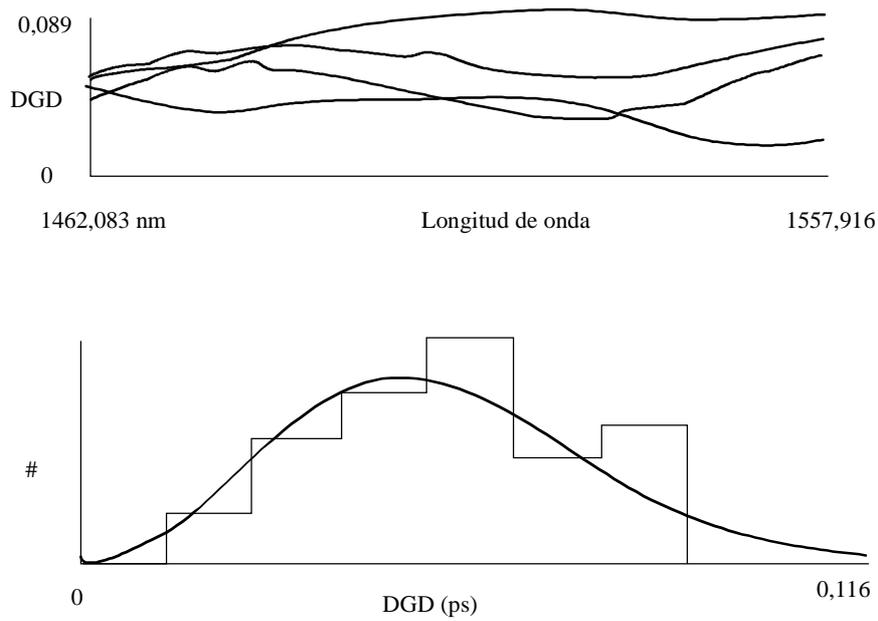
Los datos pueden representarse en formato x-y con el DGD en el eje vertical y la longitud de onda en el eje horizontal, como se muestra en la figura 23. Los datos pueden también representarse en un histograma, como se muestra en la figura 24.



**Figura 23/G.650 – DGD medido de una fibra monomodo de 44 km**



a) Medición única en 24 intervalos de una fibra bobinada



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

T1524640-96

**Figura 24/G.650 – Ejemplos de datos de DGD en forma de histograma**

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.

### 2.7.1.4.3 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.

#### **2.7.1.4.4 Coeficiente de PMD**

PMD puede expresarse en forma de 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 1-9. Para fibras con acoplamiento de modos aleatorio, utilícese el coeficiente de "gran longitud" de la ecuación 1-10.

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

#### **2.7.1.4.5 Presentación de los resultados**

- a) Identificación de la fibra y/o el cable medida/o.
- b) Largo de prueba.
- c) Dispersión por modo de polarización en ps. Si el grado de acoplamiento de modos es conocido, la PMD puede darse en ps/km (acoplamiento de modos despreciable) o ps/km<sup>1/2</sup> (acoplamiento de modos aleatorio).
- d) La gama de longitudes de onda en la que se efectuó la medición, y el tamaño del paso de longitud de onda.
- 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 determinado una PMD media a partir de mediciones repetidas de la muestra, registrar el número de mediciones efectuadas.
- h) El número de valores de DGD obtenidos a partir de una sola medición en la gama de longitud de onda, correspondiente al número de intervalos de longitud de onda.

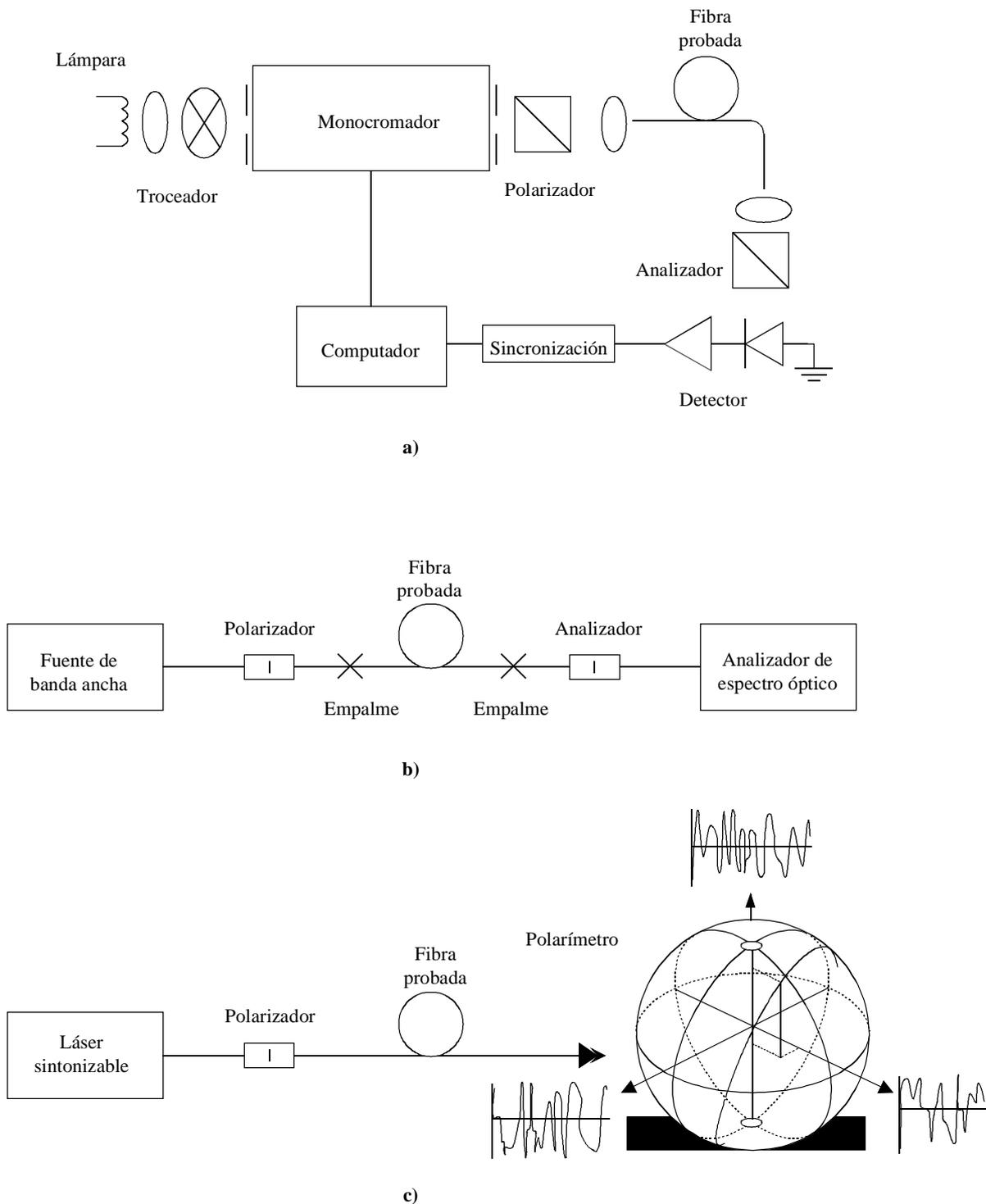
### **2.7.2 Técnica del analizador fijo**

#### **2.7.2.1 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 modos de polarización nulo y fuerte. En algunas circunstancias, pueden necesitarse mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria con este método. El procedimiento se limita a longitudes de onda mayores e iguales que aquella a la que la fibra es efectivamente monomodo.

#### **2.7.2.2 Aparato de prueba**

Véase en la figura 25 un diagrama esquemático de los componentes clave de un sistema de medición típico.



T1524650-96

**Figura 25/G.650 – Diagrama esquemático del equipo (típico)**

### 2.7.2.2.1 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. Será de intensidad y distribución espectral estables en un periodo de tiempo suficientemente largo para permitir la medición.

#### **2.7.2.2.2 Monocromador**

Obtener un conjunto especificado de longitudes de onda de prueba filtrando la fuente luminosa con un monocromador, como en la figura 25 a), o utilizando un analizador de espectro óptico como detector, como en la figura 25 b). Este filtrado no es necesario cuando la fuente es un láser sintonizable [véase la figura 25 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 2.7.2.4.1.4 y 2.7.2.4.2.8).

#### **2.7.2.2.3 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, deben evitarse efectos de interferencia debidos a reflexiones, lo cual puede exigir materiales de adaptación de índice o cortes angulados. Los rabillos serán monomodo.

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

#### **2.7.2.2.4 Supresor de modos de revestimiento**

Suprimir cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra a prueba. En la mayoría de las circunstancias, el revestimiento de la fibra efectuará esta función; en otro caso, emplear un dispositivo que extraiga la potencia de modos de revestimiento.

#### **2.7.2.2.5 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 25). 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.

#### **2.7.2.2.6 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.

#### **2.7.2.2.7 Polarizador y analizador**

El polarizador a la entrada de la fibra (figura 25) 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, puede ser de utilidad algún ajuste de la orientación del polarizador al maximizar la amplitud de las oscilaciones de la figura 26 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 25 c)].

#### **2.7.2.3 Procedimiento de medición**

La muestra de prueba será un largo conocido de fibra óptica monomodo que puede o no estar cableada. Debe fijarse la posición de la muestra y los rabillos 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.

Cuando es importante minimizar el acoplamiento de modos adicional, la fibra no cableada se sustentará de alguna manera (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) en caso de 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 cada longitud de onda de prueba designada  $\lambda$  por turno 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 2.7.2.4.1 y 2.7.2.4.2).

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.

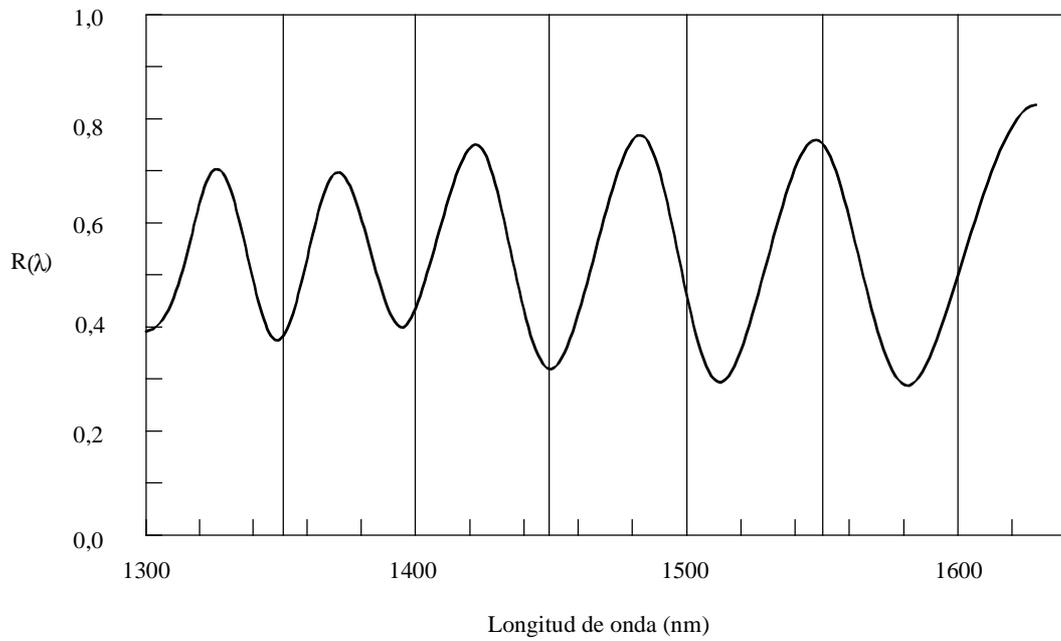
Suprimir el analizador del haz y repetir la exploración del monocromador. Llamar  $P_{TOT}(\lambda)$  a esta potencia recibida. Esta última potencia puede utilizarse para eliminar la dependencia espectral de los componentes del sistema de medición y la pérdida de la fibra a prueba. En la figura 26 se muestran representaciones típicas de la relación:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)} \quad (2-29)$$

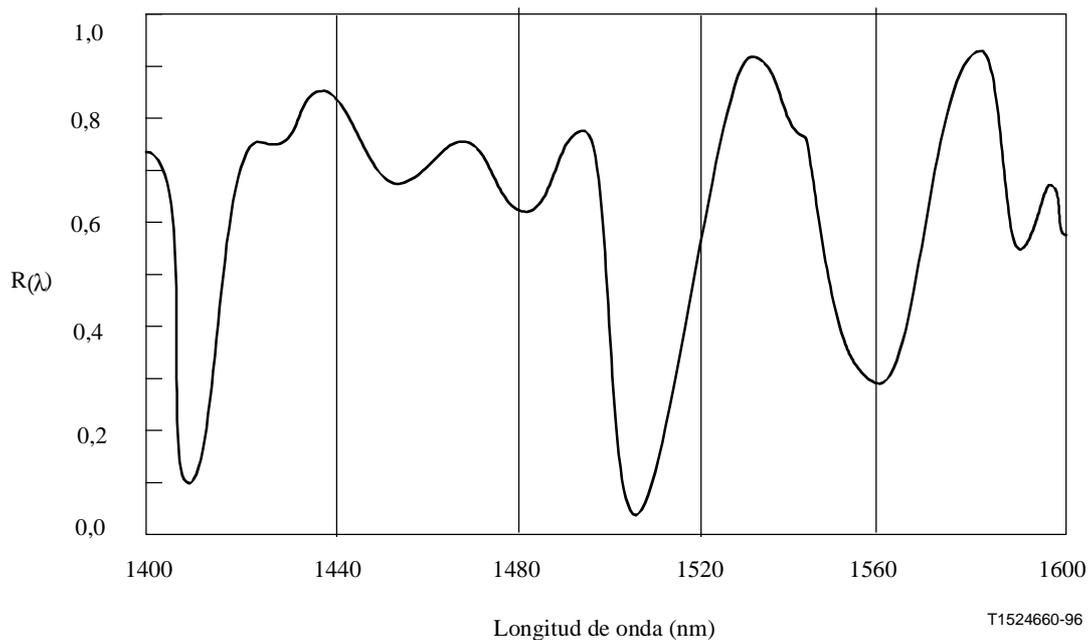
Un procedimiento alternativo es dejar en su sitio el analizador, pero girarlo 90° con respecto a la orientación utilizada más arriba. Llamando en este caso  $P_{ROT}(\lambda)$ , resulta:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{ROT}(\lambda)} \quad (2-30)$$

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 2.7.2.4.1 y 2.7.2.4.2). 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 26/G.650 – Datos típicos obtenidos al medir la PMD**

#### 2.7.2.4 Cálculos o interpretación de los resultados

Se utilizará uno de los dos métodos siguientes (2.7.2.4.1 y 2.7.2.4.2) para calcular la PMD a partir de los datos de medición.

### 2.7.2.4.1 Cómputo de extremos

#### 2.7.2.4.1.1 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  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  para que coincidan con extremos, en cuyo caso  $E$  es el número de extremos (incluidos los situados en  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ) menos uno.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k E \lambda_1 \lambda_2}{2 (\lambda_2 - \lambda_1) c} \quad (2-31)$$

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 1-9), y 0,82 es el límite del acoplamiento de modos fuerte (el régimen de la ecuación 1-10).

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. El valor de  $\langle \Delta\tau \rangle$  proporcionado por la ecuación 2-31, o el promedio de los tres valores de  $\langle \Delta\tau \rangle$  derivado de la detección polarimétrica, puede utilizarse en la ecuación 1-9 o 1-10 (la que sea apropiada para la muestra considerada) a fin de calcular el coeficiente de PMD. El valor resultante ha de interpretarse como un promedio en la gama de longitudes de onda  $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ .

#### 2.7.2.4.1.2 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 26 b)] y menos en otro caso [figura 26 a)]. Son típicos valores de  $E$  de la gama 7 a 40. Cuando  $E$  es el extremo bajo de esta gama, las incertidumbres de porcentaje en  $E$  y en la PMD resultan grandes. 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 hacerse la ventana suficientemente ancha para asegurar que  $E$  es mayor que alrededor de 10 para el máximo valor de PMD de interés (en el que un asunto es la condición de aceptación/rechazo).

#### 2.7.2.4.1.3 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 26 b). Al identificar extremos, es útil un algoritmo con las siguientes características:

- 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.

#### 2.7.2.4.1.4 Resolución espectral

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

$$\Delta\lambda / \lambda < (8\nu\Delta\tau)^{-1} \quad (2-32)$$

donde  $\nu$  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  $\lambda$  próxima a 1550 nm, la ecuación 2-32 reduce la condición de que  $\Delta\lambda$  (nm) debe ser menor que el inverso de  $\Delta\tau$ (ps).

## **2.7.2.4.2 Análisis de Fourier**

### **2.7.2.4.2.1 Sinopsis**

En este método se utiliza un análisis de Fourier de  $R(\lambda)$ , normalmente expresado en el dominio de la frecuencia óptica,  $\nu$ , para obtener la PMD. 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 2.7.2.4.2.4 y 2.7.2.4.2.5, respectivamente).

### **2.7.2.4.2.2 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 2.7.2.3) a valores  $\lambda$  tales que formen intervalos iguales en el dominio de la frecuencia óptica. Otra posibilidad es ajustar los datos tomados en intervalos iguales de  $\lambda$  (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  $\lambda$  utilizado se calcula mediante las ecuaciones 2-29 o 2-30, 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 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  $\delta\tau$ .

### **2.7.2.4.2.3 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  $3 \cdot (\text{número de puntos de datos originales}) / (\text{longitud total de la formación que sigue al relleno de ceros})$ . Utilícese la subcláusula 2.7.2.4.2.4 para calcular PMD. Si no ocurre así, se procede a calcular PMD utilizando las subcláusulas 2.7.2.4.2.5 ó 2.7.2.4.2.6.

### **2.7.2.4.2.4 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 26 a)]. La transformación de Fourier dará una salida  $P(\delta\tau)$  que contenga 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  $\langle \Delta\tau \rangle$ , 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, se utilizan en la ecuación:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (2-33)$$

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 2-33 suele consignarse en picosegundos. Si el dispositivo a prueba es una fibra de longitud  $L$ , el coeficiente de PMD puede calcularse utilizando la ecuación 1-9. 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.

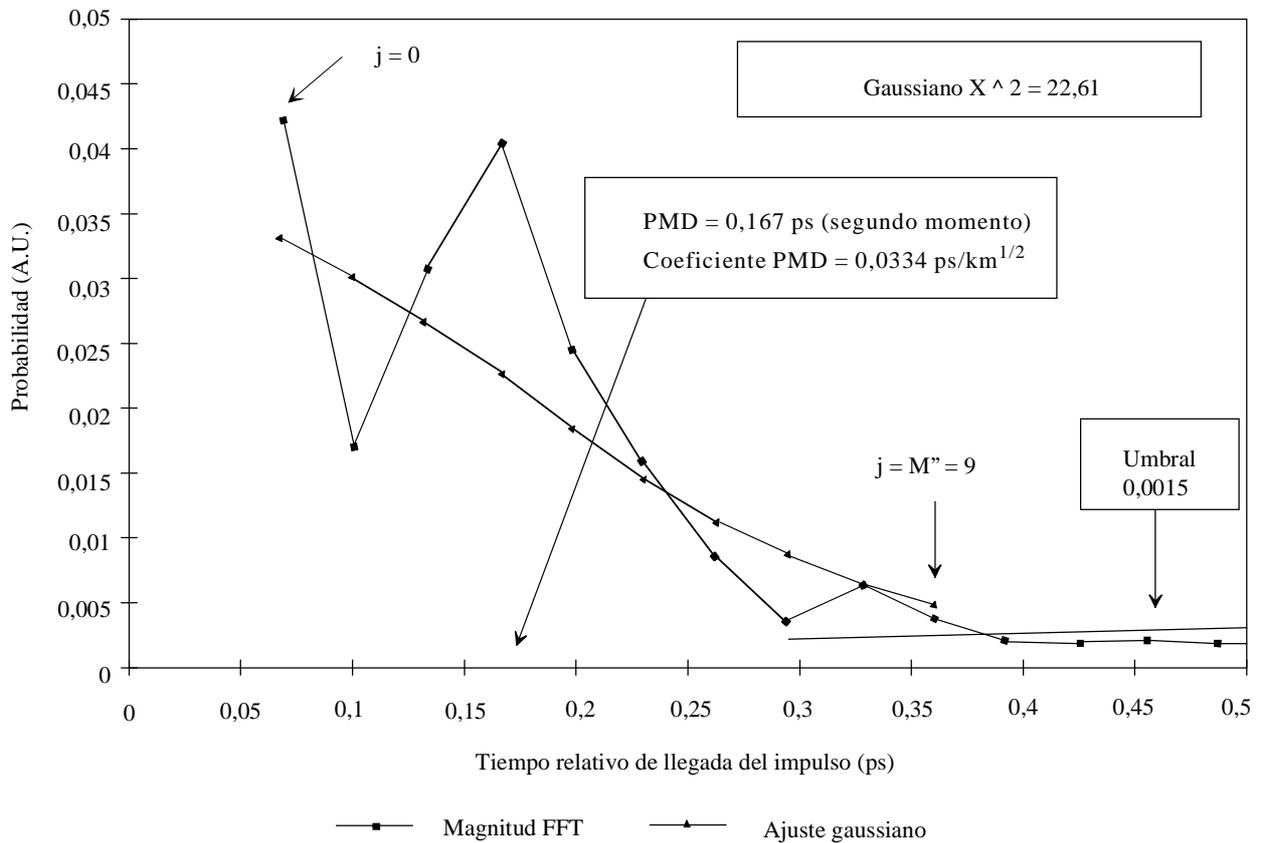
#### 2.7.2.4.2.5 Cálculo de la PMD para fibras con fuerte acoplamiento de modos

En los casos de fuerte acoplamiento de modos,  $R(\lambda)$  adopta una forma de onda compleja similar a la de la figura 26 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  $P$  que supera  $T_1$ , y que va seguido al menos por  $X$  puntos de datos que caen por debajo de  $T_1$ . 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,  $\sigma_R$ , de esta distribución define la PMD  $\langle \Delta\tau \rangle$  de la fibra, y viene dada por:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (2-34)$$

El valor de  $\langle \Delta\tau \rangle$  dado por la ecuación 2-34, suele consignarse en picosegundos. En la figura 27 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.



T1524670-96

**Figura 27/G.650 – PMD utilizando análisis de Fourier**

#### 2.7.2.4.2.6 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 tanto la determinación del centroide (véase 2.7.2.4.2.4) y la obtención del segundo momento (véase 2.7.2.4.2.5). Adviértase que las puntas de  $P(\delta\tau)$  sólo pueden determinarse más allá de la  $\delta\tau_{\text{last}}$  calculada.

#### 2.7.2.4.2.7 Gama espectral

Con fibras fuertemente acopladas, debe utilizarse gama espectral suficiente para formar el conjunto espectral (promedio) con precisión suficiente. 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 ( $\lambda_1$ ) o por la caída de respuesta del detector en el extremo alto ( $\lambda_2$ ) (por ejemplo, 1700 nm).

Además, valores de  $\delta\tau$  muy bajos darán muy largos periodos en  $R(\lambda)$ , y la gama espectral  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ , debe comprender al menos dos "ciclos" completos. La gama espectral cubierta define el menor valor de  $\delta\tau$  que puede resolverse en  $P(\delta\tau)$ ,  $\delta\tau_{\text{mín}}$ :

$$\delta\tau_{\text{mín}} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (2-35)$$

donde el factor 2 se introduce para permitir el hecho de que dos puntos de datos en  $P$  y adyacentes a cero son generalmente ignorados (véase 2.7.2.4.2.3). Por ejemplo, para  $\lambda_1 = 1270$  nm,  $\lambda_2 = 1700$  nm,  $\delta\tau_{\text{mín}} = 0,033$  ps.

Con fibras de alta PMD débilmente acopladas con datos de relación  $R(\lambda)$  parecidos a los de la figura 26 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.

#### 2.7.2.4.2.8 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):

$$\delta\tau_{\text{máx}} = 1 / (2 \cdot \Delta\nu) \quad (2-36)$$

Si de la transformada de Fourier se desprende que existe energía considerable cerca de  $\delta\tau_{\text{máx}}$  [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 menor que el menor valor de  $\Delta\nu$  a utilizar (correspondiente al mayor valor  $\delta\tau$ ).

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

#### 2.7.2.5 Presentación de los resultados

- a) Identificación de la fibra y/o el cable medida/o.
- 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<sup>1/2</sup> (acoplamiento de modos fuerte).
- d) La gama de longitudes de onda en la que se efectuó la medición y la longitud de onda o tamaño del paso 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.

#### 2.7.3 Método de prueba: Técnica interferométrica

##### 2.7.3.1 Generalidades

Este método de prueba describe 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.

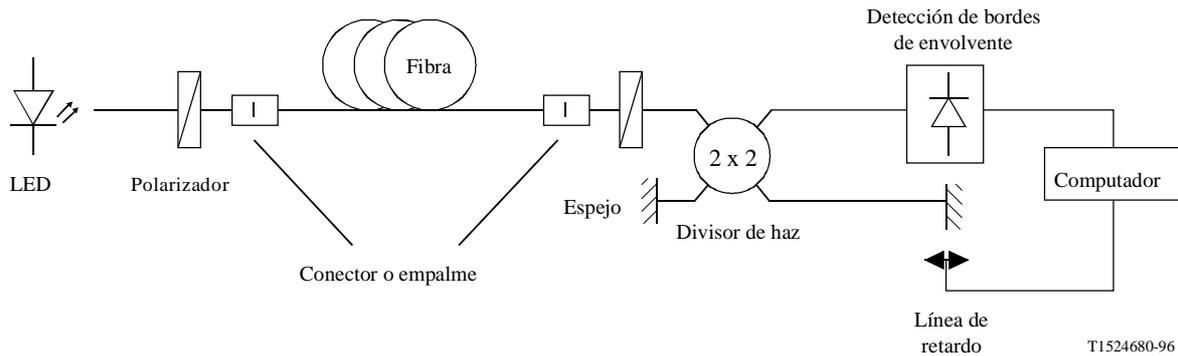
La ventaja principal de este método es que el tiempo de medición es muy corto y el equipo puede utilizarse fácilmente en funcionamiento real.

La dinámica y la estabilidad son proporcionadas por la conocida técnica espectroscópica de la transformada de Fourier.

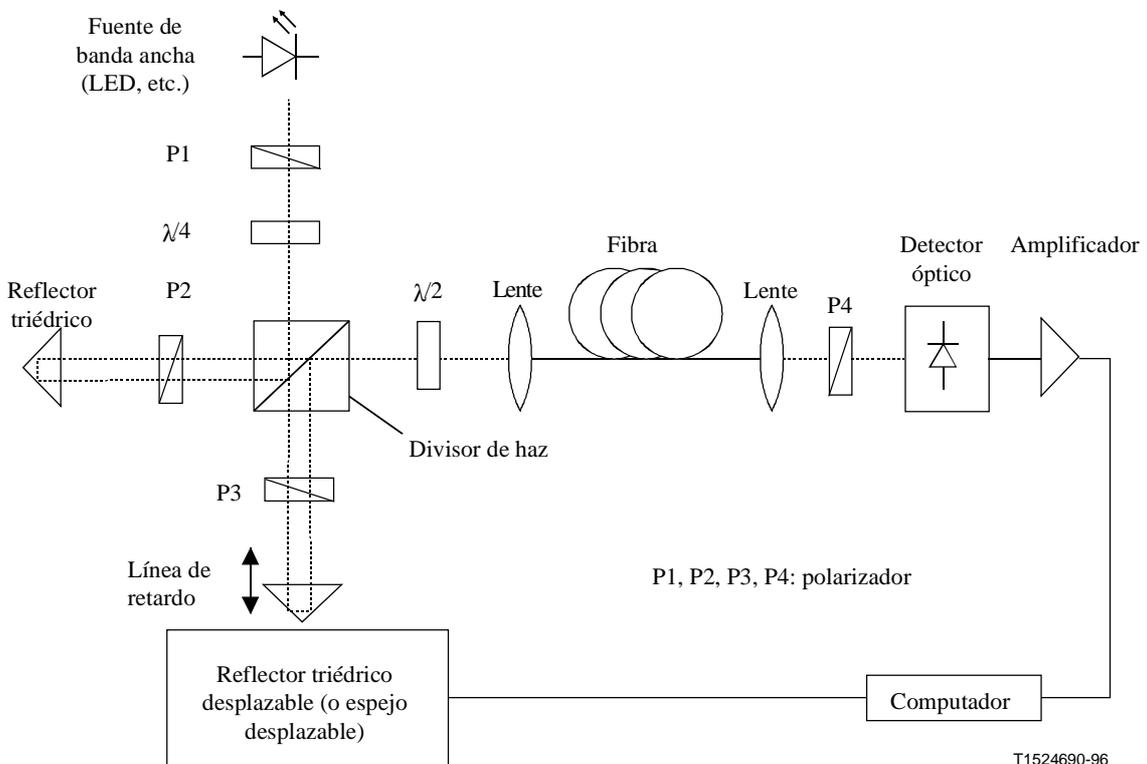
La fibra será monomodo en la gama de longitudes de onda medida.

### 2.7.3.2 Aparato de prueba

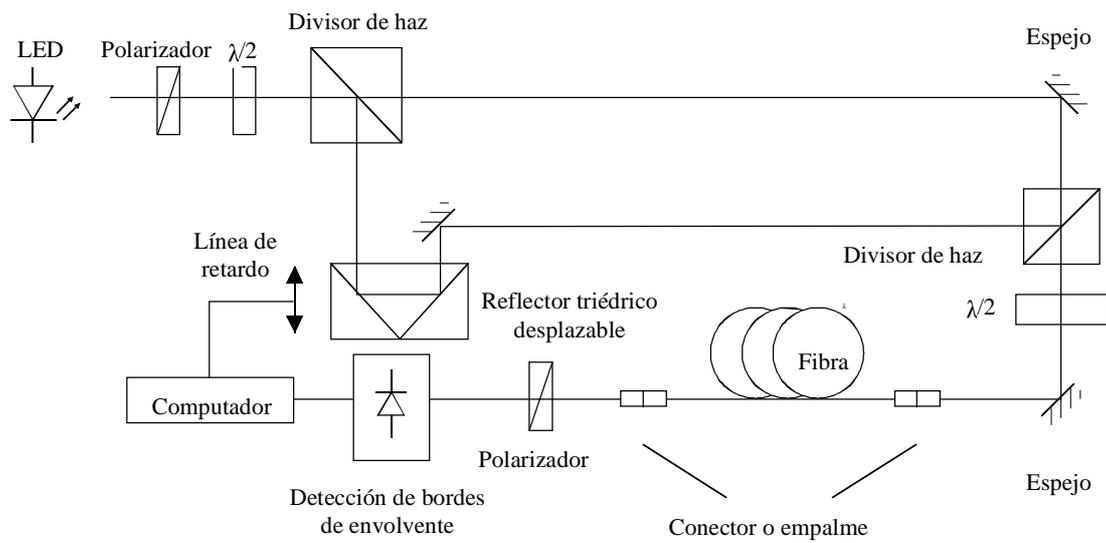
Son posibles diferentes implementaciones. El interferómetro puede ser del tipo trayecto aéreo o del tipo fibra, puede ser del tipo Michelson o Mach-Zehnder, y puede estar situado en la fuente o en el extremo receptor del dispositivo probado. Se incluyen ejemplos en las figuras 28, 29 y 30.



**Figura 28/G.650 – Técnica interferométrica utilizando un interferómetro de Michelson con acoplador de fibras**



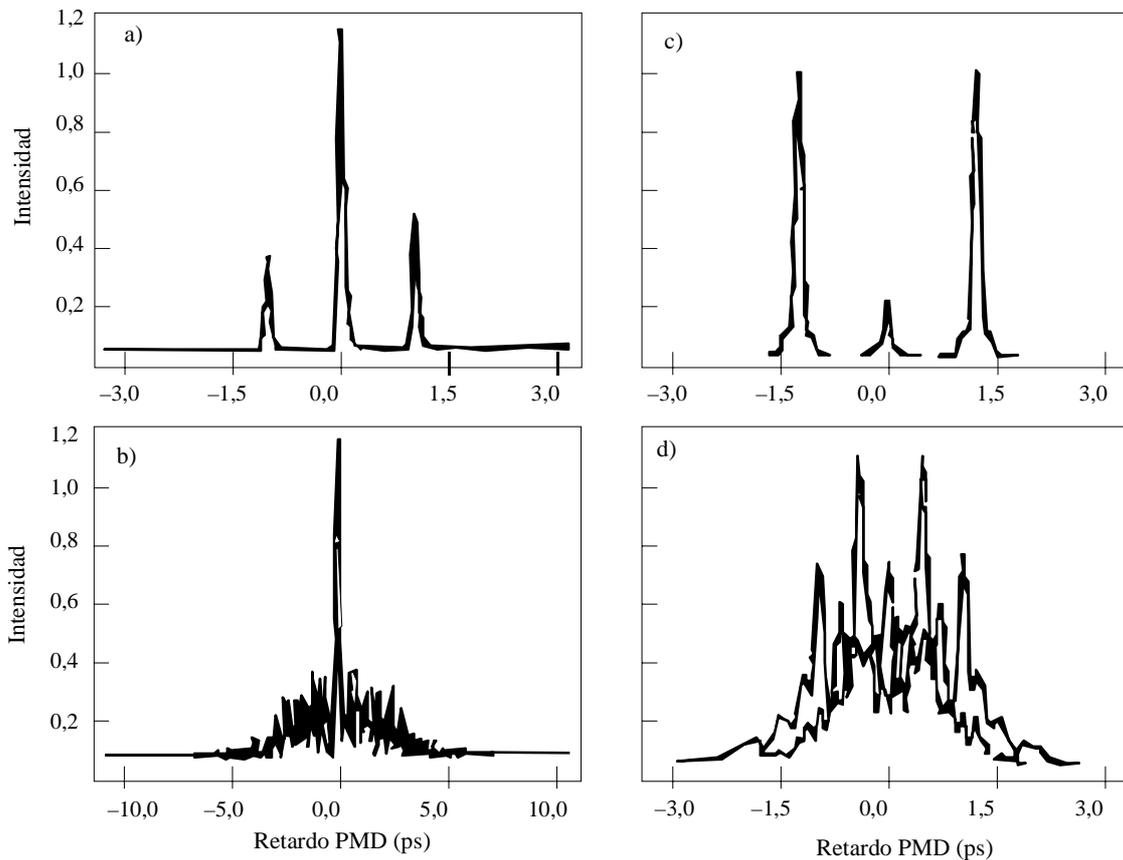
**Figura 29/G.650 – Técnica interferométrica utilizando un interferómetro de Michelson con trayecto aéreo**



T1524700-96

**Figura 30/G.650 – 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 31 a), b)]. En cambio, los interferogramas de transcorrelación se obtienen cuando los efectos de polarización de los dos brazos del interferómetro son tales que se desvanece la cresta central [por ejemplo, figura 31 c), d)].



T1524710-96

**Figura 31/G.650 – Ejemplo de diagrama de bordes obtenido con el instrumento tipo de autocorrelación (a, b) y con el instrumento tipo de transcorrelación (c, d) para un acoplamiento de modos de polarización bajo (parte superior) y alto (parte inferior)**

### 2.7.3.2.1 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.

### 2.7.3.2.2 Polarizador

El polarizador polarizará en toda la gama de longitudes de onda de la fuente.

### 2.7.3.2.3 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.

### 2.7.3.2.4 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.

### 2.7.3.2.5 Muestras

La muestra de prueba será un largo conocido de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos 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.

Cuando es importante minimizar el acoplamiento adicional de modos, la fibra no cableada se sustentará de alguna manera (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm) con una tensión de la fibra prácticamente nula (arrollamiento holgado).

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.

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.

### 2.7.3.2.6 Procesamiento de datos

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

### 2.7.3.3 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 28 ó figura 30, o al detector a través de las lentes y polarizadores que se muestran en la figura 29. 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 una característica de valor de referencia para el sistema de detección utilizado. Para obtener un contraste complementario suficiente, la potencia óptica en ambos brazos será casi idéntica.

Efectuar una primera recogida 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 31 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.

### 2.7.3.4 Determinación de la dispersión por modo de polarización

#### 2.7.3.4.1 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.

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta L}{c} \quad (2-37)$$

donde  $\Delta L$  es el trayecto móvil de la línea de retardo óptico y  $c$  la velocidad de la luz en el espacio libre.

### 2.7.3.4.2 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,  $\sigma$ , de la curva gaussiana que se ajusta al interferograma de acuerdo con:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}}\sigma \quad (2-38)$$

NOTA –  $\sigma$  es la desviación típica de la curva gaussiana.

El apéndice II da un ejemplo de algoritmo para determinar el retardo de PMD  $\Delta\tau$  a partir de un interferograma. Puede a menudo demostrarse que la relación de  $\sigma_e$  a  $\sigma$  es un valor consecuente, que permite una sustitución alternativa. Son posibles otros algoritmos, por ejemplo, los basados en la integración acumulativa.

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

### 2.7.3.5 Calibración del equipo

El equipo se calibra verificando la mecánica de la línea de retardo con una fibra de alta birrefringencia de retardo de PMD conocido. Otra posibilidad es el uso de una "fibra de oro" con PMD conocida.

### 2.7.3.6 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) Tipo de 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  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ .
- l) Otras condiciones especiales.

## 2.7.4 Método del estado de polarización principal (PSP)

### 2.7.4.1 Generalidades

Este método se limita a la zona 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.

El método se basa en el hecho de que cuando se varía la frecuencia óptica de la luz inyectada, el estado de polarización a la salida de la fibra, representado en la esfera 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 dependiente 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 esfera de Poincaré correspondiente a la variación de la frecuencia angular  $\Delta\omega$ , el retardo PMD,  $\delta\tau$ , se obtiene como:

$$\delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (2-39)$$

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

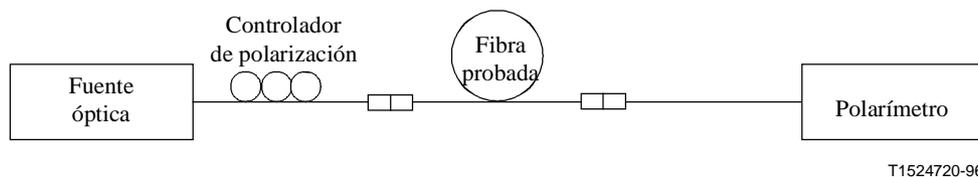
La técnica proporciona directamente los retardos de grupo diferenciales (DGD) entre los estados de polarización principales de la fibra probada en función de la longitud de onda o del tiempo. La PMD se obtiene mediante promediación adecuada en el tiempo o en la longitud de onda, o en ambos. El método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

#### 2.7.4.2 Aparatos de prueba

En la figura 32 se muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba. La técnica exige la medición del 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.

##### 2.7.4.2.1 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 asegurar que no se produzca despolarización de la señal debido a la PMD de la fibra probada.



**Figura 32/G.650 – Esquema del aparato para la medición de la PMD por análisis del estado de polarización**

##### 2.7.4.2.2 Controlador de polarización

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

##### 2.7.4.2.3 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.

##### 2.7.4.2.4 Muestras

La muestra de prueba será un largo conocido de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos 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.

Cuando es importante minimizar el acoplamiento adicional de modos, la fibra no cableada se sustentará de alguna manera (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) en caso de 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 PMD no es relevante.

### 2.7.4.3 Procedimiento de medición

#### 2.7.4.3.1 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. El controlador de polarización se fija de manera que optimice las condiciones para la determinación del ángulo de rotación en la esfera de Poincaré, si es necesario, si los trayectos están en la fibra, a condición de que las fibras sean estacionarias durante las mediciones que siguen.
- 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  $180^\circ$  en torno al eje de los PSP en la esfera de Poincaré de una longitud de onda de prueba a la siguiente, debe cumplirse el requisito  $\Delta\tau_{\text{máx}}\Delta\lambda \leq 4$  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.

#### 2.7.4.3.2 Método de la esfera de Poincaré (PS, *Poincaré sphere*)

- a) La traza de la esfera de Poincaré que describe la evolución del estado de polarización (SOP, *state of polarization*) 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 33, (o) y (x) son arcos de SOP de valores medidos debidos a la PMD en función de la longitud de onda  $\lambda$ . Aquí,  $P_{a-a}$  es el estado de polarización principal (PSP).

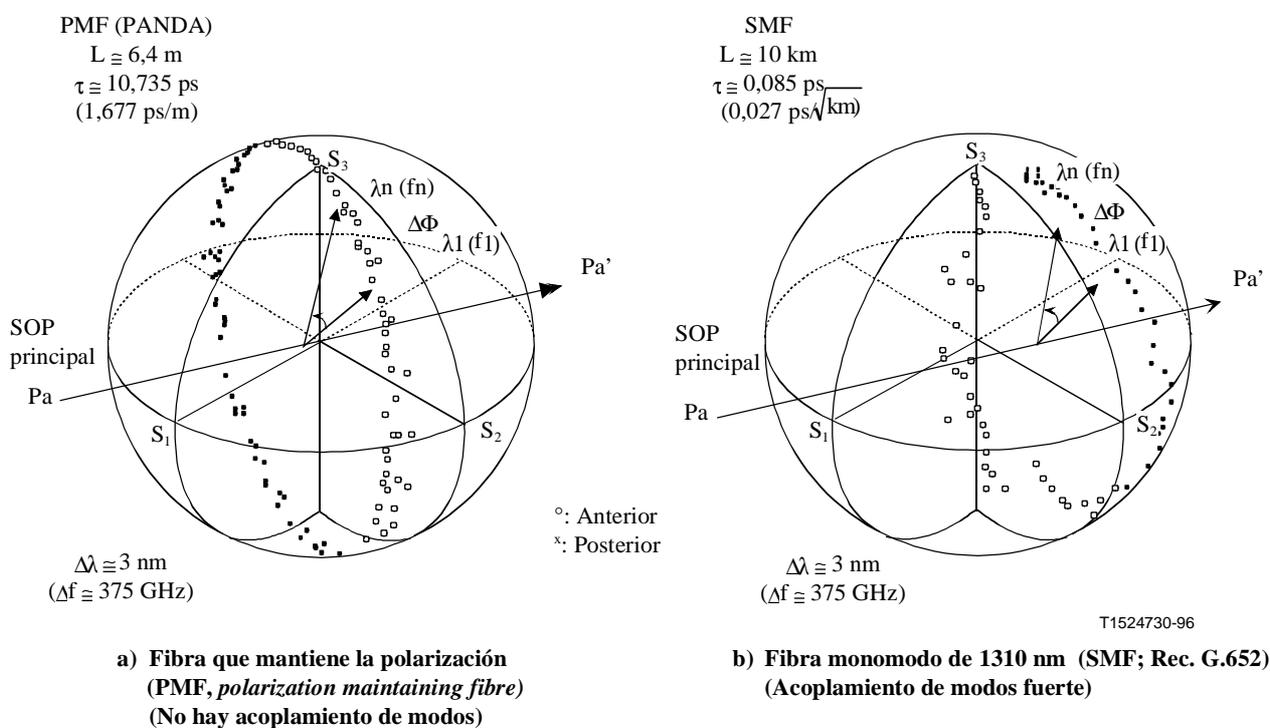
La traza se analizará trozo a trozo, considerando los intervalos de longitud de onda (que pueden incluir más de dos pasos de longitud de onda), de manera que se mantengan las hipótesis que aseguran la existencia de PSP bien determinados. El eje del PSP local en la esfera de Poincaré y el ángulo de rotación 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 esfera 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:

$$\delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\Phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \quad (2-40)$$

donde  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta f$  y  $c$  son la diferencia de fase (arco del vector de Stokes en la esfera de Poincaré), la diferencia de frecuencia, y la velocidad de la luz en el espacio libre, respectivamente, y  $\lambda_1$  y  $\lambda_n$  son las longitudes de onda inicial y final de  $\Delta\lambda$ , respectivamente.

- El DGD (en ps) se calculará en función de la longitud de onda. Los datos pueden también representarse en forma de histograma, representando la distribución de la frecuencia de aparición de los valores de DGD medidos.
- 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.
- Los coeficientes de PMD se calcularán mediante normalización adecuada del valor medio medido de la DGD  $\langle\delta\tau\rangle_\lambda$  a la longitud  $L$  (en km) de la fibra probada, que suele darse en unidades de raíz cuadrada de kilómetro.



**Figura 33/G.650 – Representación por el método de la esfera de Poincaré de dos ejemplos de mediciones de la PMD**

### 2.7.4.3.3 Método del estado de polarización (SOP)

Tras medirse la fluctuación de polarización mediante el analizador de Stokes (o el analizador girable), puede transformarse en la curva de SOP en función de la longitud de onda (frecuencia);

El SOP se expresa como:

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (2-41)$$

donde:

$$\eta = \tan \left[ 0,5 \tan^{-1} \left\{ S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right\} \right] \quad (2-42)$$

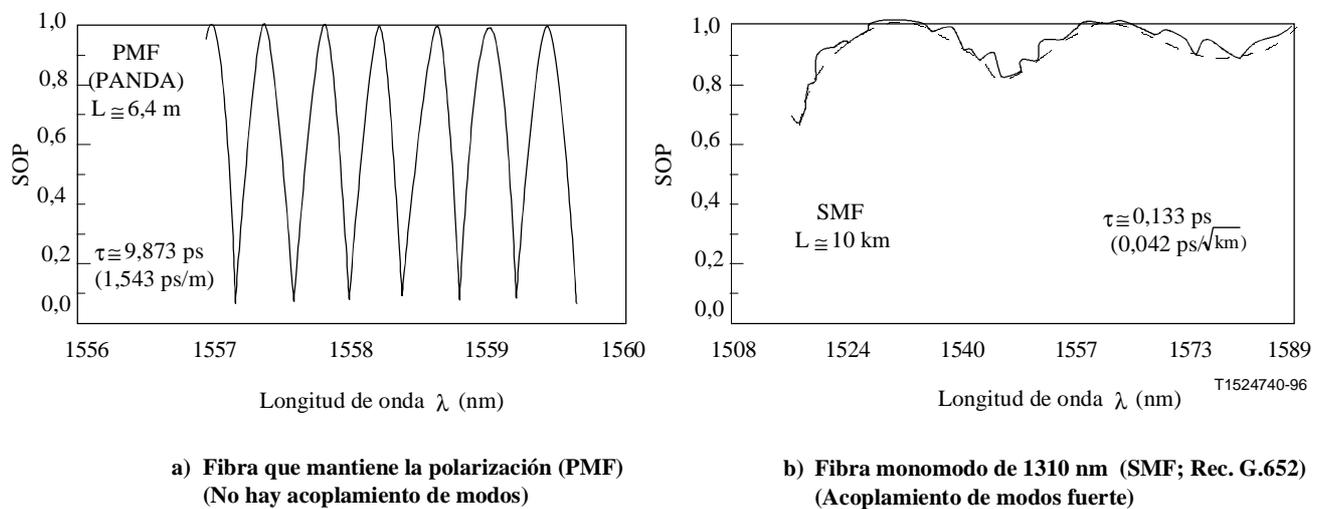
Aquí,  $\eta$  es la elipticidad de la polarización, y  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  son los parámetros de Stokes.

En la figura 34, el cresta a cresta (o extremo a extremo) de las curvas SOP es equivalente a la diferencia de fase de  $\pi$ .

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

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta\lambda} \quad (2-43)$$

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



**Figura 34/G.650 – Representación por el método del estado de polarización (SOP) de dos ejemplos de mediciones de la PMD**

#### 2.7.4.4 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 de la fibra y longitud de la misma.
- Condiciones de instalación de la fibra.
- Indicación de la exactitud y la repetibilidad.
- Representación de la exactitud y repetibilidad.
- Histograma de los DGD medidos en función de la longitud de onda (si es necesario).
- DGD medio.
- Coefficiente de PMD.

## APÉNDICE I

### Métodos de interpolación de longitud de onda de corte

En este apéndice se presentan métodos para determinar los coeficientes,  $A_t$  y  $B_t$ , presentados en 2.3.1.3.4, ecuación 2-10.

#### I.1 Método del error negativo limitado

El algoritmo se basa en la observación de que las estructuras de transición (jorobas) constan de puntos de datos con una desviación positiva con respecto a la curva ideal esperada. El procedimiento de interpolación se basa en un modelo teórico de la región de transición  $LP_{11}$  y un método de ajuste de los datos al modelo. El procedimiento tiene seis pasos.

Los dos primeros pasos definen la región  $LP_{01}$ , o una región de longitud de onda superior. Los dos segundos pasos definen la región de transición, en la que la atenuación  $LP_{11}$  empieza a aumentar. El quinto paso caracteriza esta región de acuerdo con un modelo teórico. El último paso calcula la longitud de onda de corte,  $\lambda_c$ , a partir de los parámetros de caracterización.

#### Paso 1 – Definir la región de longitud de onda superior

##### Longitud de onda inferior de la región

Para la referencia multimodo:

Hallar la longitud de onda de máxima pendiente, longitud de onda a la cual la primera diferencia  $a(\lambda) - a(\lambda + 0,01)$ , es mayor. Para longitudes de onda mayores que la longitud de onda de máxima pendiente, la longitud de onda inferior de la región es la longitud de onda a la que la atenuación es mínima.

Para la referencia de flexión, se simula a continuación el procedimiento para la referencia multimodo:

Hallar la longitud de onda de máxima atenuación. Para longitudes de onda mayores que la longitud de onda de máxima atenuación, la longitud de onda inferior de la región es la longitud de onda a la que es mínima la función siguiente:

$$a(\lambda) - 8 + 8\lambda \quad (\lambda \text{ en } \mu\text{m})$$

##### Longitud de onda superior de la región

Longitud de onda inferior de la región más  $0,15 \mu\text{m}$ .

#### Paso 2 – Caracterizar la curva de atenuación, $a(\lambda)$ , de la región de longitud de onda superior, como una ecuación lineal de la longitud de onda, $\lambda$

$$a(\lambda) \cong A_u + B_u \lambda \quad (\text{I-1})$$

Se sugieren los siguientes planteamientos:

Método de la referencia de flexión:

Fijar  $B_u = 0$

Fijar  $A_u$  = mediana de los valores de atenuación en la región de longitud de onda superior.

Método de la referencia multimodo:

Hallar  $A_u$  y  $B_u$  de manera que la suma de los valores absolutos del error en la región de longitud de

onda superior sea mínima, y de manera que todos los errores sean no negativos. Hallar la mediana de los errores en la región de longitud de onda superior y añadir a  $A_u$ .

Determinar el error más negativo en la región de longitudes de ondas superiores E:

$$E = \text{mín}[a(\lambda) - A_u - B_u \lambda] \quad (\text{I-2})$$

### Paso 3 – Hallar la longitud de onda superior de la región de transición

Empezando en la longitud de onda superior de la región de longitud de onda superior, a partir del paso 1, determinar la máxima longitud de onda a la que la atenuación es 0,1 dB mayor que la línea hallada en el paso 2. Fijar la longitud de onda superior de la región de transición a este valor más 10 nm.

### Paso 4 – Hallar la longitud de onda inferior de la región de transición

Hay diversos métodos para determinar esta longitud de onda. A continuación se dan ejemplos:

Sea: 
$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - A_u - B_u(\lambda) \quad (\text{I-3})$$

a) Empezando por la longitud de onda superior de la región de transición, a partir del paso 3, hallar la longitud de onda a la que  $\Delta a(\lambda)$  tiene un máximo local, y por tanto la diferencia entre este máximo y el mínimo local siguiente (a  $\lambda$  más grande) es mínima.

b) La longitud de onda más grande, por debajo de la longitud de onda superior de la región de transición, de manera que:

$\Delta a(\lambda)$  sea mayor que 2 dB; y

b1) Haya un máximo local para  $\Delta a(\lambda)$ ; o

b2) Haya un mínimo local para  $\Delta a(\lambda) - \Delta a(\lambda + 0,01)$ .

### Paso 5 – Caracterizar la zona de transición con el modelo y las constricciones sobre los errores

El modelo es una regresión lineal de una transformación. Las constricciones sobre los errores controlan los errores de regresión negativos de forma que la transformada inversa de la línea ajustada no producirá errores de atenuación negativos menores que E, a partir del paso 2. El ajuste de los datos con las constricciones sobre los errores puede efectuarse por métodos de programación lineal simplex.

Hallar  $A_t$  y  $B_t$ , a partir de 2.3.1.3.4, ecuación 2-10, de manera que la suma de los valores absolutos de error se reduzca al mínimo y que ningún error sea menor que  $-v(\lambda)$ , con  $v(\lambda)$  indicado en función de E, a partir del paso 2:

$$w(\lambda) = 10^{\frac{\Delta a(\lambda) - E}{10}} \quad (\text{I-4})$$

$$z(\lambda) = 10 \log \left[ -\frac{10}{A} \log \left( \frac{w(\lambda) - 1}{\rho} \right) \right] \quad (\text{I-5})$$

$$v(\lambda) = Y(\lambda) - z(\lambda) \quad (\text{I-6})$$

### Paso 6 – Evaluar la pendiente de la transición y calcular la longitud de onda de corte, $\lambda_c$

Si  $B_t$  es mayor que algún valor negativo pequeño, por ejemplo  $-1$  a  $-0,1$ , reducir la longitud de onda superior de la región de transición en 10 nm y repetir el paso 5.

En otro caso, calcular  $\lambda_c$ :

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t} \quad (\text{I-7})$$

## I.2 Método de los mínimos cuadrados

Este algoritmo se basa en la hipótesis de que la estructura a veces vista en la región de transición es causada por un efecto de interferencia alrededor de la posición de la curva ideal.

El modelo matemático es el mismo utilizado en el método del error negativo limitado.

**Paso 1** – Como en el método del error negativo limitado.

**Paso 2** – Como en el método del error negativo limitado. No se requiere E en la ecuación I-2.

**Paso 3** – Como en el método del error negativo limitado.

**Paso 4** – Como en el método del error negativo limitado.

**Paso 5** – Caracterizar la zona de transición.

El modelo es un mejor ajuste de mínimos cuadrados de una transformación.

Hallar  $A_t$  y  $B_t$ , a partir de 2.3.1.3.4, ecuación 2-10, de manera que la suma de los cuadrados del error se reduzca al mínimo, utilizando las ecuaciones 2-7, 2-8, 2-9 y:

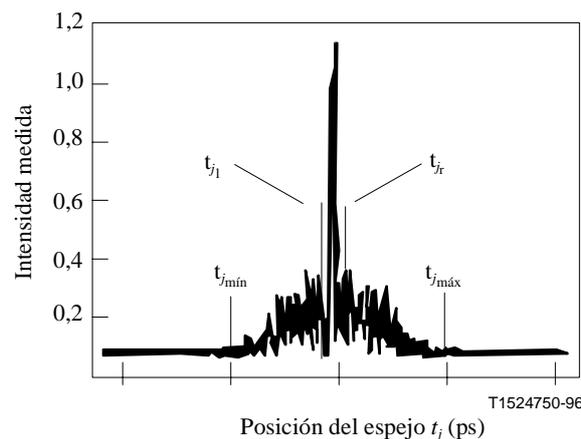
$$W(\lambda) = 10^{\Delta a(\lambda)/10} \quad (\text{I-8})$$

**Paso 6** – Como en el método del error negativo limitado.

## APÉNDICE II

### Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma

Este apéndice 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 II.1.



**Figura II.1/G.650 – 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)

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

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

$$Na = \sqrt{X_2 - I_0^2} \quad (\text{II-3})$$

**Paso 2 – Definición de la intensidad desplazada  $I_j$**

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

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

**Paso 3 – Cálculo del centro  $C$  del interferograma**

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

**Paso 4 – Eliminación de la cresta de autocorrelación central**

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

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

donde  $\tau_c$  es el tiempo de coherencia de la fuente

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

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

**Paso 5 – Cálculo del segundo momento  $S$  del interferograma**

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

**Paso 6 – Truncar el interferograma**

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

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

**Paso 7 – Cálculo del segundo momento  $\sigma_\varepsilon$  del interferograma truncado**

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

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

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

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

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

NOTA 2 – Para interferogramas apropiadamente medidos, puede demostrarse que  $\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{3}{4}}$ .

**APÉNDICE III**

**Atributos no lineales**

**III.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 generalmente clasificarse 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, transmodulación 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.

### III.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:

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

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

$$I(r) = \exp\left(-2r^2 / w^2\right) \quad (III-2)$$

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

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

La aproximación gaussiana es exacta para fibras de índice en escalón G.652 y G.654 cerca del corte  $LP_{11}$ , 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,  $A_{eff}$  no puede estimarse con exactitud a partir de la ecuación III-3.

Una relación más general, pero empírica, entre  $A_{eff}$  y  $w$  es <sup>2</sup>

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

donde  $k$  es un factor de corrección.

### III.3 Factor de corrección $k$

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

El factor de corrección  $k$  en la ecuación III-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. Las figuras III.1 y III.2 dan ejemplos de resultados calculados y medidos para una variedad de tipos de fibra.

Con otros diseños de fibra que pueden desarrollarse para aplicaciones ópticas submarinas y de multiplexión por división en longitud de onda (WDM), la relación de  $A_{eff}$  puede variar, y debe determinarse mediante la ecuación III-1. Las gamas de  $k$  para estos ejemplos se resumen en el cuadro III.1.

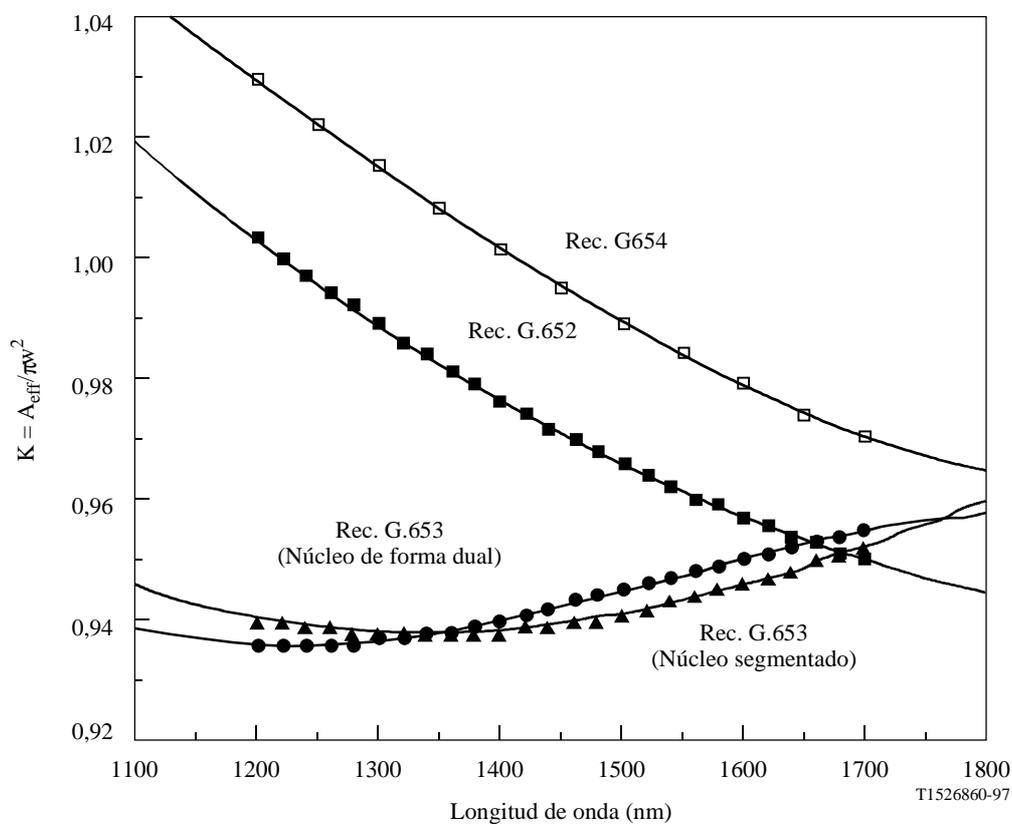
---

<sup>2</sup> NAMIHIRA (Y.): Relationship between non-linear effective area and mode field diameter for dispersion shifted fibres, *Electron. Lett.*, Vol. 30, No. 3, pp. 262-263, 1994.

**Cuadro III.1/G.650 – Sumario del factor de corrección  $k$  de  $A_{\text{eff}}$  y MFD ( $= 2W$ ) de las fibras G.652, G.653 y G.654 basado en los ejemplos de las figuras III.1 y III.2**

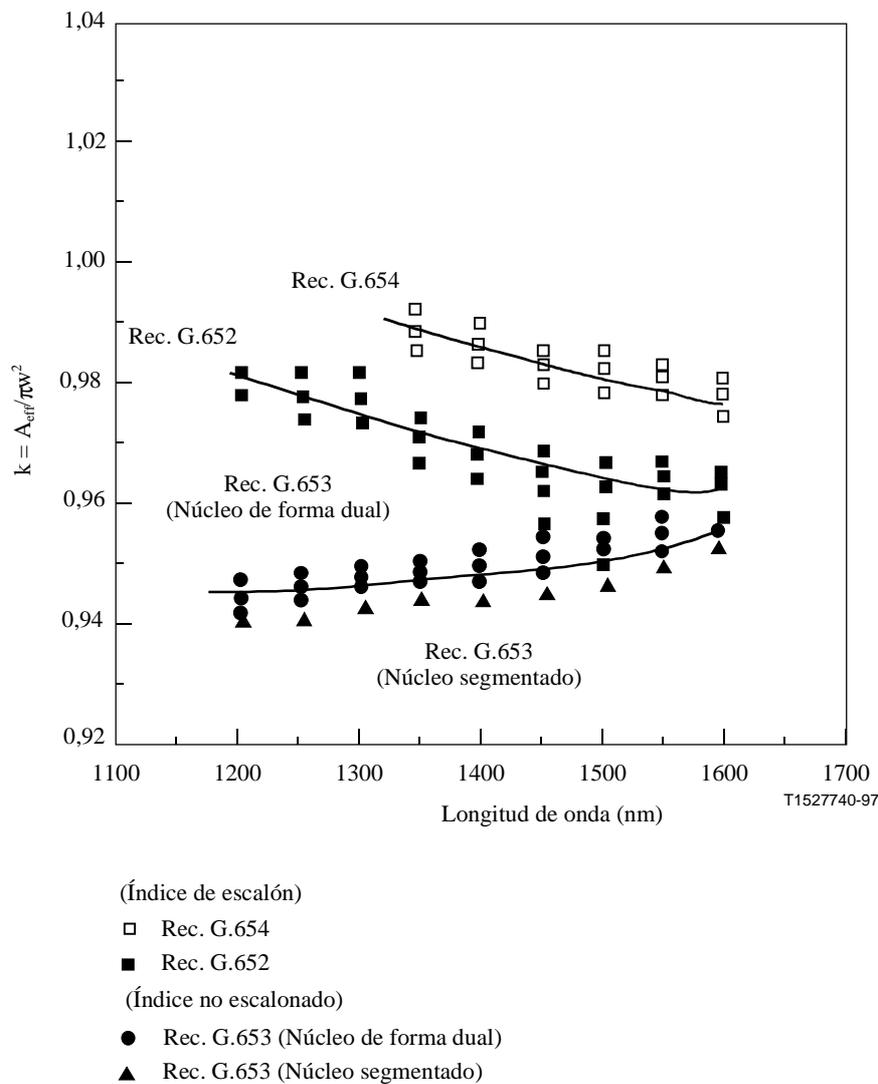
Longitud de onda $\lambda$	~ 1310 nm	~ 1550 nm
Tipos de fibra		
Rec. G.652	0,970 ~ 0,980 <sup>a)</sup>	0,955 ~ 0,965
Rec. G.654	...	0,975 ~ 0,985 <sup>a)</sup>
Rec. G.653	0,940 ~ 0,950	0,945 ~ 0,960 <sup>a)</sup>

a) Región de longitud de onda óptima.



- (Índice de escalón)
- Rec. G.654
  - Rec. G.652
- (Índice no escalonado)
- Rec. G.653 (Núcleo de forma dual)
  - ▲ Rec. G.653 (Núcleo segmentado)

**Figura III.1/G.650 – Ejemplo de la dependencia calculada con respecto a la longitud de onda del factor de corrección  $k$  de  $A_{\text{eff}}$  y MFD ( $= 2W$ ) de las fibras G.652, G.653 y G.654**



**Figura III.2/G.650 – Ejemplo de la dependencia medida con respecto a la longitud de onda del factor de corrección  $k$  de  $A_{\text{eff}}$  y MFD ( $= 2W$ ) de las fibras G.652, G.653 y G.654**

### III.4 Coeficiente no lineal ( $n_2/A_{\text{eff}}$ )

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

$$n = n_0 + n_2 I \tag{III-5}$$

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  $n_2/A_{\text{eff}}$ . 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.

Hay en estudio métodos para medir el coeficiente no lineal.

### III.5 Dispersión de Brillouin estimulada

#### III.5.1 Descripción del efecto

En un sistema con modulación de intensidad que utilice una fuente de anchura espectral pequeña, se transfiere considerable potencia óptica 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.

#### III.5.2 Estimación del umbral de SBS en las fibras monomodo

##### III.5.2.1 Umbral de SBS

En general, el umbral de SBS se expresa como:

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

donde se supone una bomba de Lorentz (Lorentzian pump) y una anchura espectral de Brillouin, y se 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:

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

donde  $\alpha$  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 máxima potencia de entrada puede escribirse:

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

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

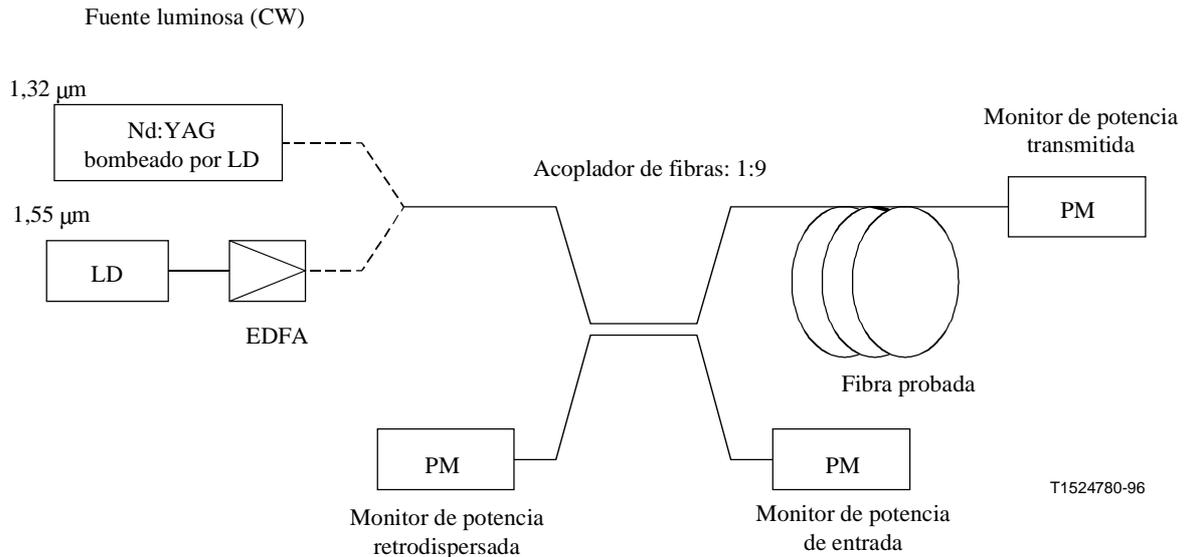
NOTA 2 –  $P_{th}$  y  $P_m$  requieren ambos una estimación del coeficiente de ganancia,  $g$ , que debe determinarse experimentalmente y, opcionalmente, caracterizarse como una función del diámetro del campo modal para un determinado diseño de fibra.

##### III.5.2.2 Configuración experimental para medir el umbral SBS

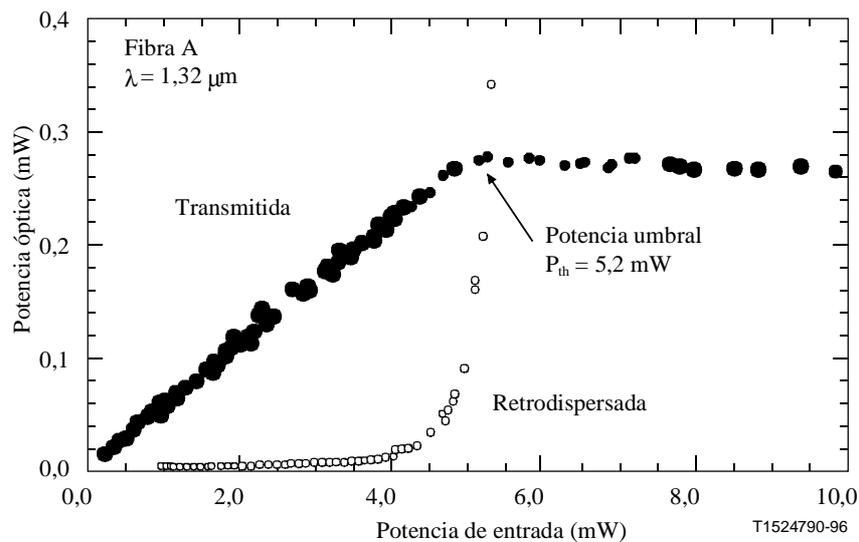
La figura III.3 muestra una configuración para medir el umbral SBS. La bomba de 1,32  $\mu\text{m}$  es un láser unifrecuencia de Nd:YAG bombeado por diodo láser con una anchura espectral de unos 5 kHz. La bomba de 1,55  $\mu\text{m}$  es un diodo láser con realimentación distribuida monomodo (DFB LD, *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 (Er-doped). 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.

La figura III.4 muestra un ejemplo de la potencia transmitida y retrodispersada a  $1,32 \mu\text{m}$  en función de la potencia de entrada en una fibra G.654. 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 III.4). El cuadro III.2 resume los parámetros de la fibra y los umbrales de SBS para diversos tipos de fibra.



**Figura III.3/G.650 – Configuración experimentada**



**Figura III.4/G.650 – Potencia transmitida y retrodispersada en función de la potencia de entrada**

Las potencias umbral en el cuadro III.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 III.2/G.650 – Parámetros de la fibra a prueba**

Fibra		A	B	C	D	E	F	G
Tipo de fibra		Rec. G.654	Rec. G.652	Rec. 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

### III.5.2.3 Estimación del umbral de SBS

La figura III.5 muestra la relación entre el umbral de SBS y  $A_{eff}/L_{eff}$  de las fibras a prueba. Esta figura muestra que el umbral SBS es linealmente dependiente de  $A_{eff}/L_{eff}$ . El umbral de SBS puede estimarse por la siguiente ecuación:

$$P_{th} = 0,11 \left[ \frac{A_{eff}}{L_{eff}} \right] \quad (III-9)$$

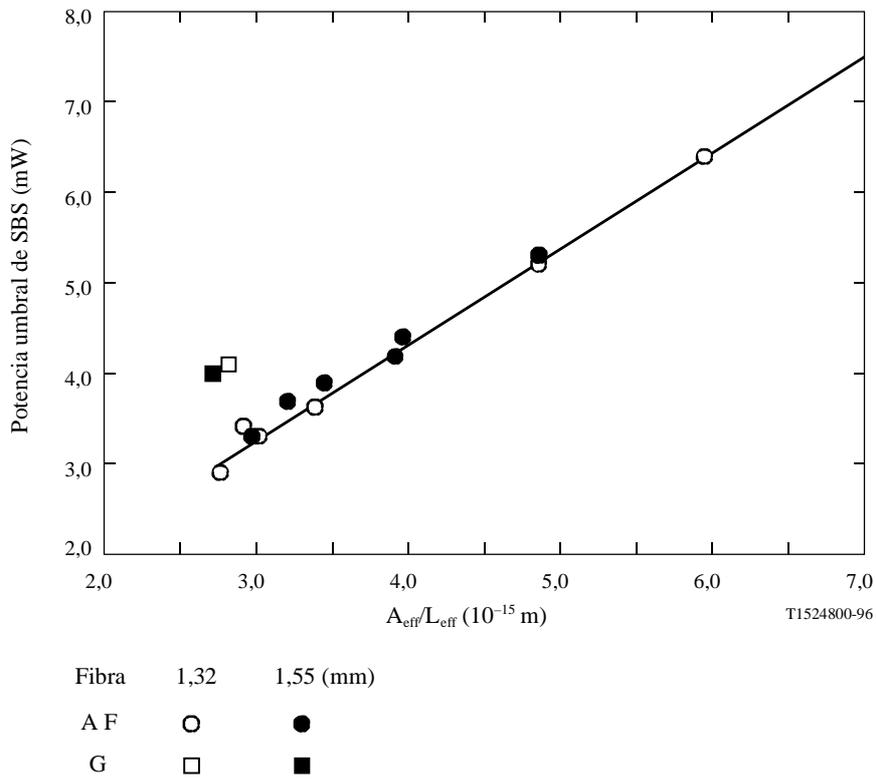
donde  $A_{eff}$  está en  $\mu m^2$ ,  $L_{eff}$  en km, y  $P_{th}$  en mW.

La ecuación III-9 puede reescribirse utilizando una longitud de fibra L, un diámetro del campo modal 2W, y un coeficiente de atenuación  $\alpha$ , como sigue:

$$P_{th} = 0,11 \left[ k\pi \left( \frac{2W}{2} \right)^2 \frac{\alpha}{1 - \exp(-\alpha L)} \right] \quad (III-10)$$

k es aquí un factor de corrección que relaciona el diámetro del campo modal con  $A_{eff}$  para unos determinados 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 III-9.



**Figura III.5/G.650 – Relación entre el umbral de SBS y  $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$**

### III.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.



## **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
<b>Serie G</b>	<b>Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales</b>
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Transmisiones de señales radiofónicas, de televisión 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 Z	Lenguajes de programación