



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

**UIT-T**

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

**G.663**

(04/2000)

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

Características de los medios de transmisión –  
Características de los componentes y los subsistemas  
ópticos

---

**Aspectos relacionados con la aplicación de los  
dispositivos y subsistemas de amplificadores  
ópticos**

Recomendación UIT-T G.663

(Anteriormente Recomendación del CCITT)

---

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

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
CARACTERÍSTICAS GENERALES COMUNES A TODOS LOS SISTEMAS ANALÓGICOS DE PORTADORAS	G.200–G.299
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES DE PORTADORAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.300–G.399
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES EN RADIOENLACES O POR SATÉLITE E INTERCONEXIÓN CON LOS SISTEMAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.400–G.449
COORDINACIÓN DE LA RADIOTELEFONÍA Y LA TELEFONÍA EN LÍNEA	G.450–G.499
EQUIPOS DE PRUEBAS	G.500–G.599
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.600–G.699
Generalidades	G.600–G.609
Cables de pares simétricos	G.610–G.619
Cables terrestres de pares coaxiales	G.620–G.629
Cables submarinos	G.630–G.649
Cables de fibra óptica	G.650–G.659
<b>Características de los componentes y los subsistemas ópticos</b>	<b>G.660–G.699</b>
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	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.663**

### **Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos**

#### **Resumen**

Esta Recomendación trata los aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos (OA) utilizados fundamentalmente en sistemas digitales. Las aplicaciones incluyen sistemas monocanal y multicanal utilizados en configuraciones punto a punto y punto a multipunto, para uso en redes de larga distancia y en redes de acceso ópticas. Esta Recomendación tiene por finalidad identificar los aspectos que deben considerarse para cada aplicación y especificar valores y gamas apropiados de parámetros para cada tipo de dispositivo de amplificador óptico.

#### **Orígenes**

La Recomendación UIT-T G.663, revisada por la Comisión de Estudio 15 (1997-2000) del UIT-T, fue aprobada por el procedimiento de la Resolución 1 de la CMNT el 4 de abril de 2000.

## 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 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 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 2001

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	Alcance .....	1
2	Referencias.....	1
3	Terminología.....	2
4	Abreviaturas.....	2
5	Aplicaciones.....	3
5.1	Amplificador de potencia.....	4
5.2	Preamplificador.....	4
5.3	Amplificador de línea .....	5
5.4	Transmisor con amplificación óptica.....	5
5.5	Receptor con amplificación óptica.....	5
5.6	Aplicaciones monocanal.....	6
5.7	Aplicaciones multicanal.....	6
5.8	Aplicaciones punto a punto.....	6
5.9	Aplicaciones punto a multipunto .....	6
6	Aspectos de operación, administración y mantenimiento.....	7
7	Valores y gamas de parámetros para dispositivos amplificadores de fibra óptica.....	7
7.1	Amplificador de potencia.....	7
	7.1.1 Punto a punto.....	7
	7.1.2 Punto a multipunto .....	7
7.2	Preamplificador.....	8
	7.2.1 Punto a punto.....	8
7.3	Amplificador de línea .....	8
	7.3.1 Punto a punto.....	8
	7.3.2 Punto a multipunto .....	8
8	Valores y gamas de parámetros para los aspectos de los subsistemas de amplificadores de fibra óptica que se relacionan con los amplificadores de fibra óptica.....	8
8.1	Transmisor con amplificación óptica.....	8
8.2	Receptor con amplificación óptica.....	8
9	Condiciones ambientales .....	8
10	Aspectos de seguridad óptica.....	9
Apéndice I – Valores y gamas de parámetros para dispositivos de amplificadores de fibra óptica en sistemas monocanal punto a punto.....		9

	<b>Página</b>
I.1 Amplificador de potencia.....	9
I.2 Preamplificador.....	10
Apéndice II – Aspectos relacionados con la transmisión.....	10
II.1 Finalidad .....	10
II.2 Factores que influyen en las aplicaciones de transmisión con amplificadores ópticos.....	11
II.3 No linealidades ópticas de la fibra .....	12
II.3.1 Automodulación de fase .....	12
II.3.2 Formación de solitones.....	14
II.3.3 Modulación de fase cruzada .....	14
II.3.4 Inestabilidad de la modulación .....	15
II.3.5 Mezcla de cuatro ondas .....	17
II.3.6 Dispersión de Brillouin estimulada .....	21
II.3.7 Dispersión de Raman estimulada .....	22
II.3.8 Recapitulación de las no linealidades de las fibras.....	23
II.4 Propiedades de polarización .....	25
II.4.1 Dispersión por modo de polarización.....	25
II.4.2 Pérdida dependiente de la polarización .....	27
II.4.3 Quemadura de hueco por polarización .....	28
II.5 Propiedades de dispersión de la fibra.....	29
II.5.1 Dispersión cromática .....	29
II.6 Otras propiedades relacionadas con los amplificadores ópticos.....	31
II.6.1 Acumulación del ruido .....	31
II.6.2 Efecto de autofiltrado .....	32
II.6.3 Generación de ondas de choque ópticas .....	33
II.6.4 No linealidad inducida por la saturación en los amplificadores ópticos de semiconductores .....	35
Apéndice III – Parámetros del preamplificador .....	36
Apéndice IV – Aspectos de operaciones, administración y mantenimiento de los amplificadores ópticos .....	39
IV.1 Subsistemas OA.....	39
IV.2 Dispositivos OA.....	40

## Recomendación UIT-T G.663

### Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos

#### 1 Alcance

Esta Recomendación trata los aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos (OA, *optical amplifier*) utilizados fundamentalmente en sistemas digitales. Las características genéricas de los dispositivos y subsistemas OA se describen en UIT-T G.662 [7]. Las aplicaciones incluyen sistemas monocanal y multicanal utilizados en configuraciones punto a punto y punto a multipunto para redes de larga distancia y en redes de acceso ópticas.

Esta Recomendación tiene por finalidad identificar los aspectos que deben considerarse para cada aplicación y especificar valores y gamas de parámetros comunes para cada tipo de dispositivo de amplificador óptico (amplificador de potencia, preamplificador y amplificador de línea). Esta Recomendación se sitúa en el marco del desarrollo de nuevos equipos que incluyen dispositivos OA y da directrices para aplicar dispositivos OA y subsistemas OA a los equipos existentes. Como un objetivo, para sistemas especificados como transversalmente compatibles, el grado de compatibilidad no deberá ser afectado por el uso de dispositivos OA.

La presente Recomendación trata temas importantes tales como los aspectos de transmisión, los aspectos de mantenimiento, y la seguridad óptica.

#### 2 Referencias

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

- [1] UIT-T G.650 (1997), *Definición y métodos de prueba de los parámetros pertinentes de las fibras monomodo.*
- [2] UIT-T G.652 (1997), *Características de un cable de fibra óptica monomodo.*
- [3] UIT-T G.653 (1997), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada.*
- [4] UIT-T G.654 (1997), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*
- [5] UIT-T G.655 (1996), *Características de un cable de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada no nula.*
- [6] UIT-T G.661 (1998), *Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*
- [7] UIT-T G.662 (1998), *Características genéricas de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*

- [8] UIT-T G.664 (1999), Procedimientos de seguridad óptica y requisitos para sistemas ópticos de transporte.
- [9] UIT-T G.671 (1996), *Características de transmisión de los componentes ópticos pasivos.*
- [10] UIT-T G.681 (1996), *Características funcionales de los sistemas de línea intercentrales y de larga distancia que utilizan amplificadores ópticos, incluida la multiplexación óptica.*
- [11] UIT-T G.692 (1998), *Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos.*
- [12] UIT-T G.783 (1997), *Características de los bloques funcionales del equipo de la jerarquía digital síncrona.*
- [13] UIT-T G.955 (1996), *Sistemas de línea digital basados en las jerarquías de 1544 kbit/s y 2048 kbit/s en cables de fibra óptica.*
- [14] UIT-T G.957 (1999), *Interfaces ópticas para equipos y sistemas basados en la jerarquía digital síncrona.*
- [15] CEI 60721-3:1997, *Classification of groups of environmental parameters and their severities.*
- [16] CEI 60825-1:1998, *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide.*
- [17] CEI 60825-2:1993, *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems, más enmienda 1 (1997).*

### 3 Terminología

A los fines de esta Recomendación son aplicables las definiciones indicadas en UIT-T G.661 y G.662.

### 4 Abreviaturas

En esta Recomendación se utilizan las siguientes siglas.

AM	Modulación de amplitud ( <i>amplitude modulation</i> )
APR	Reducción automática de potencia ( <i>automatic power reduction</i> )
ASE	Emisión espontánea amplificada ( <i>amplified spontaneous emission</i> )
BA	Amplificador de potencia [ <i>booster (power) amplifier</i> ]
BER	Tasa de errores en los bits ( <i>bit-error ratio</i> )
CD	Dispersión cromática ( <i>chromatic dispersion</i> )
CMC	Multicanal coherente ( <i>coherent multichannel</i> )
CW	Onda continua ( <i>continuous wave</i> )
DA	Acomodación de dispersión ( <i>dispersion accommodation</i> )
EDFA	Amplificador de fibra dopada con erbio ( <i>erbium-doped fibre amplifier</i> )
FDM	Multiplexación por división de frecuencia ( <i>frequency-division multiplexing</i> )
FWHM	Anchura entre semimáximos ( <i>full width at half maximum</i> )
FWM	Mezcla de cuatro ondas ( <i>four-wave mixing</i> )
LA	Amplificador de línea ( <i>line amplifier</i> )

LOS	Pérdida de la señal ( <i>loss of signal</i> )
MI	Inestabilidad de la modulación ( <i>modulation instability</i> )
OA	Amplificador óptico ( <i>optical amplifier</i> )
OAM	Operación, administración y mantenimiento ( <i>operation, administration and maintenance</i> )
OAN	Redes con amplificación óptica ( <i>optically amplified networks</i> )
OAR	Receptor con amplificación óptica ( <i>optically amplified receiver</i> )
OAT	Transmisor con amplificación óptica ( <i>optically amplified transmitter</i> )
OFA	Amplificador de fibra óptica ( <i>optical fibre amplifier</i> )
OFDM	Multiplexación en el dominio de las frecuencias ópticas ( <i>optical frequency domain multiplexing</i> )
PA	Preamplificador ( <i>pre-amplifier</i> )
PM	Modulación de fase ( <i>phase modulation</i> )
PDH	Jerarquía digital plesiócrona ( <i>plesiochronous digital hierarchy</i> )
PDL	Pérdida dependiente de la polarización ( <i>polarization dependent loss</i> )
PHB	Quemadura de hueco por polarización ( <i>polarization hole burning</i> )
PMD	Dispersión por modo de polarización ( <i>polarization mode dispersion</i> )
PSK	Modulación por desplazamiento de fase ( <i>phase shift keying</i> )
SBS	Dispersión de Brillouin estimulada ( <i>stimulated Brillouin scattering</i> )
SDH	Jerarquía digital síncrona ( <i>synchronous digital hierarchy</i> )
SMF	Fibra monomodo ( <i>single-mode fibre</i> )
SNR	Relación señal/ruido ( <i>signal-to-noise ratio</i> )
SOA	Amplificador óptico de semiconductores ( <i>semiconductor optical amplifier</i> )
SPM	Automodulación de fase ( <i>self phase modulation</i> )
SRS	Dispersión de Raman estimulada ( <i>stimulated Raman scattering</i> )
TRE	Equipo receptor terminal ( <i>terminal receiver equipment</i> )
WDM	Multiplexación por división de longitud de onda ( <i>wavelength division multiplexing</i> )
XPM	Modulación de fase cruzada ( <i>cross phase modulation</i> )

## 5 Aplicaciones

La aplicación de amplificadores ópticos (OA) en sistemas de transmisión ópticos ofrece varias ventajas. La más importante es la posibilidad de realizar tramos muy largos de sistemas sin repetidor, así como tramos muy largos de sistemas sin regenerador. El empleo de OA probablemente permita suprimir muchos emplazamientos de regeneradores convencionales existentes y, en el caso de nuevas rutas, prescindir de la construcción de muchos nuevos emplazamientos. Los OA permiten también tomar seriamente en consideración nuevas arquitecturas de sistemas ópticos para aplicación en redes de transmisión de gran distancia terrestres y submarinas, y en redes de acceso. Dos ejemplos de esto son las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda y las de punto a multipunto, cuyos proyectos, en general, se consideraban antes prohibitivos tanto por su complejidad como por su costo. Los OA ofrecen también ventajas potenciales con respecto a las

opciones de mejoramiento de las redes, pues son independientes del esquema de modulación y de la velocidad binaria.

Sin embargo, la aplicación de los OA pone de manifiesto algunos nuevos, y posiblemente graves factores de degradación de los sistemas, como consecuencia de los elevados niveles de potencia producidos por los OA y las largas distancias entre los puntos de regeneración. Entre estos factores de degradación de la transmisión están las no linealidades de la fibra óptica, los efectos de la polarización y los efectos debidos a las características de amplificación del propio OA. La dispersión cromática se hace cada vez más significativa en los sistemas largos no regenerados permitidos por los OA. Las características de dispersión de la fibra, además de determinar las limitaciones de dispersión cromática, influyen en la severidad de la degradación producida por varios de los efectos no lineales dominantes. Por lo tanto, la gestión de la dispersión ha sido un aspecto considerado en el diseño de sistemas. En las cláusulas siguientes se describen las aplicaciones de los OA y se indican los aspectos más importantes que deben considerarse para cada aplicación.

Si las características son longitudinalmente compatibles, los dispositivos OA especificados en esta Recomendación pueden utilizarse también para aumentar la distancia en los sistemas de línea ópticos de la jerarquía digital plesiócrona (PDH, *plesiochronous digital hierarchy*) de UIT-T G.955 [13] (que no son transversalmente compatibles). Para asegurar la compatibilidad transversal entre dispositivos OA y equipos de la jerarquía digital síncrona (SDH, *synchronous digital hierarchy*) y para cumplir los requisitos de las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690 pueden utilizarse equipos G.957 [14] de acuerdo con 6.1/G.957 y 6.22/G.957, o uno o más transpondedores.

## 5.1 Amplificador de potencia

El amplificador de potencia [BA; *booster (power) amplifier*] es un dispositivo OA de alta potencia de saturación que se inserta directamente después del transmisor óptico para aumentar el nivel de potencia de la señal. El BA no tiene que cumplir requisitos estrictos relativos al ruido y el filtrado óptico. Las funciones de operación, administración y mantenimiento (OAM, *operation administration and maintenance*) pueden ser o no compartidas con el transmisor óptico.

La aplicación de amplificadores de potencia (a menudo junto con preamplificadores) es muy atractiva, especialmente en aquellos casos en que los emplazamientos intermedios con equipo activo son indeseables o inaccesibles, como en los sistemas submarinos. En cualquier caso, un menor número de emplazamientos intermedios redundaría en un mantenimiento más fácil para el operador de la red. La forma más directa y sencilla de aumentar el balance de potencia disponible es utilizar un BA inmediatamente después del transmisor ordinario, o de un transmisor con amplificación óptica (véase 5.4).

Como el nivel de potencia de entrada es relativamente alto, el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE, *amplified spontaneous emission*), presente por su propia naturaleza como consecuencia del proceso estadístico de generación de fotones dentro del OA, es por lo general despreciable. Sin embargo, la aplicación de amplificadores de potencia puede repercutir en penalidades del sistema, causadas por no linealidades de la fibra, debido a los altos niveles de potencia óptica producidos por los amplificadores de potencia y a las grandes longitudes interactivas proporcionadas por el trayecto óptico.

## 5.2 Preamplificador

El preamplificador (PA, *pre-amplifier*) es un dispositivo OA de muy bajo nivel de ruido que se inserta inmediatamente antes del receptor óptico para mejorar su sensibilidad. El necesario bajo nivel de ruido ASE puede conseguirse mediante el empleo de filtros ópticos de banda estrecha. En este caso, una sintonización automática de la longitud de onda central del filtro del preamplificador a la longitud de onda del transmisor sería conveniente, pues permitiría la mitigación de los requisitos impuestos a la tolerancia de la longitud de onda del transmisor y a su estabilidad a largo plazo. Como se ha dicho anteriormente, la utilización de preamplificadores es una forma directa de obtener

aumentos significativos en el balance de potencia disponible. La función de operación, administración y mantenimiento (OAM) para preamplificadores puede estar o no compartida con el receptor óptico. En sistemas STM-64 o de nivel más alto, la utilización de una configuración exclusivamente de preamplificador puede ser conveniente (por ejemplo, para evitar posibles problemas debidos a no linealidades de la fibra).

### **5.3 Amplificador de línea**

El amplificador de línea (LA, *line amplifier*) es un dispositivo OA de bajo nivel de ruido que se utiliza entre secciones pasivas para aumentar las longitudes de regeneración o, en combinación con una conexión multipunto, para compensar las pérdidas causadas por las bifurcaciones en la red de acceso óptica. Como se ha dicho anteriormente, los amplificadores de línea podrían remplazar a algunos o todos los regeneradores convencionales en secciones de fibra de gran distancia. Puede preverse que más de un regenerador convencional pueda remplazarse por un solo LA, con la ventaja evidente de un equipo reducido en los enlaces de transmisión. Se puede prever además una situación en que aparezcan en redes de gran distancia amplificadores de línea para compensar la atenuación de la señal junto con regeneradores convencionales para compensar la distorsión de la señal.

En los sistemas que utilizan amplificadores de línea debe haber un canal de comunicación separado que permitiría los mensajes de alarma, la supervisión y el control de los LA distantes ya instalados. Es preferible que este canal de supervisión no imponga restricciones a la selección de la longitud de onda o de la ventana de operación del láser de bomba. Como cada LA debe poder insertar su propia información de estado y de alarma, el canal de supervisión tiene que ser recuperado, regenerado (con la nueva información insertada) y retransmitido en cada LA.

Teóricamente, pueden realizarse distancias de transmisión ultralargas (de miles de kilómetros) insertando periódicamente amplificadores de línea en el trayecto óptico. Sin embargo, cuando se conectan en cascada muchos OA, la calidad de funcionamiento del sistema puede deteriorarse debido a la acumulación de ruido, la dependencia espectral de la ganancia total, los efectos de polarización y dispersión cromática, así como efectos no lineales. Pruebas de laboratorio han demostrado que el comportamiento del sistema global cuando hay muchos amplificadores de línea conectados en cascada es mucho más complejo que cuando hay pocos amplificadores de línea conectados en cascada. En particular, la ganancia total de una cadena de amplificadores de línea conectados en cascada forma generalmente una punta alrededor de una determinada longitud de onda, lo que depende de la configuración concreta del amplificador, y repercute en una reducción considerable de la gama utilizable de longitudes de onda de trabajo de los amplificadores ópticos. Por lo tanto, el diseño de este tipo de sistema será muy diferente del correspondiente al caso en que hay unos pocos amplificadores de línea conectados en cascada.

### **5.4 Transmisor con amplificación óptica**

El transmisor con amplificación óptica (OAT, *optically amplified transmitter*) es un subsistema OA en el cual hay un amplificador de potencia integrado con el transmisor láser, con lo que se obtiene un transmisor de alta potencia. La conexión entre el transmisor y el OA es de naturaleza privada y no se especificará. Las consideraciones relativas a la aplicación de los transmisores con amplificación óptica son generalmente las mismas que para los amplificadores de potencia (véase 5.1).

### **5.5 Receptor con amplificación óptica**

El receptor con amplificación óptica (OAR, *optically amplified receiver*) es un subsistema OA en el cual hay un amplificador de potencia integrado con el receptor óptico, con lo que se obtiene un receptor de alta sensibilidad. La conexión entre el receptor y el OA es de naturaleza privada y no se especificará. Las consideraciones relativas a la aplicación de los receptores con amplificación óptica son generalmente las misma que para los preamplificadores (véase 5.2).

## 5.6 Aplicaciones monocanal

Los amplificadores BA, PA, LA, OAT y OAR pueden encontrar aplicación en sistemas monocanal. En el caso de transmisión monocanal, la acumulación de ruido puede reducirse utilizando amplificadores ópticos de bajo nivel de ruido en combinación con filtros ópticos de paso de banda adecuados. Normalmente, las limitaciones de dispersión pueden minimizarse trabajando cerca de la longitud de onda de corte de dispersión cero o utilizando técnicas de acomodación de dispersión (DA, *dispersion accommodation*) adecuadas. Además, hay que tomar la precaución de mantener bajo control los efectos no lineales como la dispersión de Brillouin estimulada (véase II.3.6) y la automodulación de fase (véase II.3.1).

Los valores de los principales parámetros de las interfaces de los trayectos ópticos para los sistemas de la jerarquía digital síncrona (SDH) punto a punto, monocanal, de gran distancia que utilizan amplificadores ópticos se describirán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690. Las configuraciones de referencia y las características funcionales de estos sistemas se describen en UIT-T G.681.

## 5.7 Aplicaciones multicanal

Los amplificadores ópticos encuentran también aplicación en sistemas multicanal. Además de las degradaciones de transmisión que afectan a los sistemas monocanal, los sistemas multicanal pueden sufrir degradaciones de la calidad de funcionamiento como consecuencia de ciertos efectos no lineales. Estos efectos incluyen la mezcla de cuatro ondas (FWM, *four-wave mixing*), la modulación de fase cruzada (XPM, *cross phase modulation*) y posiblemente la dispersión de Raman estimulada (SRS, *stimulated Raman scattering*). En consecuencia, cuando se diseñan sistemas multicanal hay que tomar precauciones especiales para evitar o mitigar estas degradaciones. En los sistemas multicanal que emplean una cadena de amplificadores de línea para proporcionar grandes longitudes sin regenerador, hay que tener también en cuenta los efectos de los amplificadores conectados en cascada, especialmente la reducción del espectro de ganancia utilizable.

Los valores de los parámetros de las interfaces ópticas para los sistemas de la jerarquía digital síncrona (SDH) punto a punto, multicanal, de gran distancia que utilizan amplificadores ópticos se describirán en UIT-T G.692 [11]. Las configuraciones de referencia y las características funcionales de estos sistemas se describen en UIT-T G.681 [10].

## 5.8 Aplicaciones punto a punto

Los esquemas de inserción de dispositivos y subsistemas OA en aplicaciones punto a punto se indican en UIT-T G.662 [7] (véanse en particular las figuras 1/G.662, 2/G.662 y 3/G.662).

## 5.9 Aplicaciones punto a multipunto

Los amplificadores ópticos pueden utilizarse en redes con amplificación óptica (OAN, *optically amplified networks*) para aumentar el balance de potencia óptica o para permitir tasas de división más elevadas en redes punto a multipunto. Por lo tanto, de una manera general, en las redes de este tipo se utilizarán amplificadores de potencia y amplificadores de línea. La utilización de amplificadores ópticos en redes en anillo inmediatamente antes de dispositivos de bifurcación, para compensar las pérdidas por división/bifurcación, es un ejemplo de una posible aplicación.

NOTA – Una de las primeras aplicaciones de los amplificadores ópticos puede ser para la distribución de señales de vídeo. En el caso de sistemas vídeo analógicos será necesario imponer requisitos adicionales, en comparación con los impuestos a los amplificadores ópticos para aplicaciones digitales, a fin de mantener una razón adecuada de la potencia de portadora a la potencia de ruido y evitar la distorsión de la señal. Si se utilizan láseres con modulación de amplitud (AM, *amplitude modulation*), por ejemplo, la ganancia de los amplificadores ópticos debe ser muy uniforme, a fin de evitar las conversiones de modulación de frecuencia en modulación de intensidad, lo que aumentaría la distorsión de la señal. Este efecto puede minimizarse cuando se utilizan láseres que trabajan en onda continua (CW, *continuous wave*), en combinación con moduladores externos. De este modo podrían minimizarse también los efectos de polarización. Asimismo, hay que tomar precauciones especiales para mantener la potencia de salida de los amplificadores ópticos a niveles aceptables, para reducir efectos no lineales como la dispersión de Brillouin estimulada (SBS, *stimulated Raman scattering*).

## **6 Aspectos de operación, administración y mantenimiento**

En el apéndice IV se hacen ciertas consideraciones sobre los aspectos de operación, administración y mantenimiento (OAM) de los amplificadores ópticos.

## **7 Valores y gamas de parámetros para dispositivos amplificadores de fibra óptica**

En esta cláusula se proporcionan valores de parámetros de dispositivos de amplificadores de fibra óptica (amplificador de potencia, preamplificador, amplificador de línea), de acuerdo con las listas indicadas en las cláusulas 7/G.662, 8/G.662 y 9/G.662, con el fin de garantizar en todo lo posible la compatibilidad transversal óptica entre los subsistemas de amplificadores de fibra óptica y los dispositivos de amplificadores de fibra óptica en las configuraciones de sistemas punto a punto.

### **7.1 Amplificador de potencia**

#### **7.1.1 Punto a punto**

Los parámetros de salida para los amplificadores de potencia son propios de cada sistema y se especifican en las Recomendaciones de sistema pertinentes (series G.690). En el apéndice I se presentan algunos ejemplos de valores de parámetros de entrada para amplificadores de potencia. Se supone que los parámetros de salida para los amplificadores de potencia, tal como se describen por las interfaces en las Recomendaciones de sistema pertinentes, son también aplicables a los sistemas PDH.

##### **7.1.1.1 Sistemas monocanal**

En el apéndice I se presentan algunos ejemplos de valores de parámetros de entrada para amplificadores de potencia. Los valores de los parámetros de salida se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

##### **7.1.1.2 Sistemas multicanal**

Los valores de parámetros para amplificadores de potencia que habrán de utilizarse en sistemas multicanal digitales quedan en estudio.

#### **7.1.2 Punto a multipunto**

Puesto que lo más probable es que las aplicaciones de las arquitecturas punto a multipunto que requieren amplificadores de potencia sean de naturaleza analógica, los valores de los parámetros correspondientes quedan en estudio.

## **7.2 Preamplificador**

### **7.2.1 Punto a punto**

Los parámetros de entrada para los preamplificadores son propios de cada sistema y se especifican en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690 de sistema pertinentes. En el apéndice I se presentan algunos ejemplos de valores de parámetros de salida para preamplificadores. Se supone que los parámetros de entrada para los preamplificadores, tal como se describen por las interfaces en las Recomendaciones de sistema pertinentes, son también aplicables a los sistemas PDH.

#### **7.2.1.1 Sistemas monocal**

En el apéndice I se presentan algunos ejemplos de valores de parámetros de salida para preamplificadores. Los valores de los parámetros de entrada se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

#### **7.2.1.2 Sistemas multicanal**

Los valores de parámetros para preamplificadores que habrán de utilizarse en sistemas multicanal digitales quedan en estudio.

## **7.3 Amplificador de línea**

### **7.3.1 Punto a punto**

#### **7.3.1.1 Sistemas monocal**

En las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690 se especificarán valores de parámetros concretos para amplificadores de línea en sistemas monocal punto a punto.

#### **7.3.1.2 Sistemas multicanal**

Los valores de parámetros concretos para amplificadores de línea en sistemas multicanal punto a punto quedan en estudio.

### **7.3.2 Punto a multipunto**

Puesto que lo más probable es que las aplicaciones de las arquitecturas punto a multipunto que requieren amplificadores de línea sean de naturaleza analógica, los valores de los parámetros correspondientes quedan en estudio.

## **8 Valores y gamas de parámetros para los aspectos de los subsistemas de amplificadores de fibra óptica que se relacionan con los amplificadores de fibra óptica**

### **8.1 Transmisor con amplificación óptica**

Los valores de parámetros de transmisores con amplificación óptica para aplicaciones monocal se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

### **8.2 Receptor con amplificación óptica**

Los valores de parámetros de receptores con amplificación óptica para aplicaciones monocal se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

## **9 Condiciones ambientales**

En CEI 60721-3-0 (1984) [15] y la Enmienda 1 (1987) se especifican diversas clases de condiciones ambientales. Pueden encontrarse más detalles en CEI 60721-3-1 (1997), para almacenamiento;

CEI 60721-3-2 (1997), para transporte; CEI 60721-3-3 (1994), Enmienda 1 (1995) y Enmienda 2 (1996) para uso estacionario, protegido contra la intemperie; y CEI 60721-3-4 (1995) y Enmienda 1 (1996) para uso estacionario, no protegido contra la intemperie.

## **10 Aspectos de seguridad óptica**

En ciertos casos (rotura de fibra, conectores abiertos), la potencia de salida óptica de un amplificador óptico puede salir al exterior, lo que podría ser peligroso para el ojo humano. En CEI 60825-2 [17] se indican precauciones especiales y requisitos para la instalación y utilización de sistemas ópticos (que incluyen amplificadores), así como una descripción de ayudas visuales.

Dado el elevado nivel de potencia que interviene, sobre todo en amplificadores de potencia y transmisores con amplificación óptica, las cuestiones relativas a la seguridad óptica y a la generación de ondas de choque ópticas (es decir, las relativas a la protección del personal y del equipo) son de interés primordial en los sistemas de línea que utilizan dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.

En UIT-T G.664 [8] se describe un procedimiento apropiado para la APR, el rearranque y el funcionamiento seguro de los amplificadores ópticos.

## **APÉNDICE I**

### **Valores y gamas de parámetros para dispositivos de amplificadores de fibra óptica en sistemas monocanal punto a punto**

En este apéndice se presentan ejemplos de valores de parámetros para dispositivos de amplificadores de fibra óptica (amplificadores de potencia y preamplificadores) para sistemas monocanal punto a punto. Estos valores son conformes a las listas indicadas en las cláusulas 7/G.662 y 8/G.662 y se elaboraron para garantizar lo más posible la compatibilidad con los valores de parámetros especificados en UIT-T G.957.

Como se indica en la cláusula 7, las especificaciones de interfaces ópticas para el trayecto óptico principal se proporcionarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

#### **I.1 Amplificador de potencia**

Los valores de parámetros contenidos en el cuadro I.1 son ejemplos de una lista mínima de parámetros de entrada pertinentes (tal como figuran en UIT-T G.662) para amplificadores de potencia en sistemas monocanal punto a punto. En el cuadro sólo se han incluido parámetros de entrada, ya que los parámetros de salida son propios del sistema y se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

**Cuadro I.1/G.663 – Parámetros de entrada para amplificadores de potencia en sistemas monocanal**

Parámetro	Unidad	Valor
Gama de potencias de entrada	dBm	-6/+3
Nivel de potencia ASE inversa	dBm	≤ -20
Reflectancia de entrada	dB	≤ -27
Fuga de la bomba	dBm	≤ -15 (nota)
Reflectancia máxima tolerable a la entrada	dB	-27
Banda de longitudes de onda de potencia	nm	1530-1565
NOTA – El valor medido de -15 dBm (máximo) tiene en cuenta todas las contribuciones procedentes de la distribución de potencia alrededor del valor de punta y valores descendentes hasta 30 dB por debajo de dicho valor de punta.		

## I.2 Preamplificador

Los valores de parámetros indicados en el cuadro I.2 son ejemplos de una lista mínima de parámetros de salida pertinentes (tal como figuran en UIT-T G.662) para preamplificadores en sistemas monocanal punto a punto. En el cuadro sólo se han incluido parámetros de salida, ya que los parámetros de entrada son propios del sistema y se especificarán en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690.

**Cuadro I.2/G.663 – Parámetros de salida para preamplificadores en sistemas monocanal**

Parámetro	Unidad	Valor
Gama de potencias de salida	dBm	-16/-9
Ganancia de señal pequeña	dB	≥ 20
Señal-espontánea de figura de ruido	dB	En estudio
Reflectancia máxima tolerable a la salida	dB	-27
Potencia de salida total máxima (nota)	dBm	-9
Banda de longitudes de onda (ganancia de pequeña señal)	nm	1530-1565
NOTA – Este parámetro se evalúa en la banda disponible de longitudes de onda de la señal, cuando se utiliza un filtro óptico dentro del amplificador de fibra óptica.		

## APÉNDICE II

### Aspectos relacionados con la transmisión

#### II.1 Finalidad

Los amplificadores ópticos permiten considerar nuevas arquitecturas de sistemas de transmisión óptica al proporcionar niveles muy altos de potencia óptica y alcanzar distancias mucho mayores entre regeneradores. Cuando se combinan con la multiplexación por división de longitud de onda, los amplificadores ópticos también simplifican el transporte de múltiples canales de información al reducirse la necesidad de equipo dedicado para cada canal, lo cual hace más económico obtener cantidades más grandes de anchura de banda. Como resultado del uso de amplificadores ópticos, han surgido nuevos efectos y limitaciones de la transmisión, que deben estudiarse. Entre ellos se

encuentran las no linealidades ópticas, como la dispersión de Brillouin estimulada, la mezcla de cuatro ondas y la automodulación de fase. Estos nuevos efectos se combinan con la dispersión cromática de la fibra y la dispersión por modo de polarización. Además, las características del amplificador óptico pueden contribuir también a degradaciones del sistema. Se han investigado muchos métodos para resolver los problemas relacionados con la transmisión. Sin embargo, las tecnologías difieren en la calidad de funcionamiento que proporcionan y en su aplicación.

Para diseñar sistemas económicos y fiables que emplean amplificadores ópticos basados en Recomendaciones UIT-T sobre parámetros de las interfaces ópticas es importante que tanto los operadores como los suministradores de equipos lleguen a una comprensión común de los problemas relacionados con los amplificadores ópticos y la manera de resolverlos. Con ese fin, en esta cláusula se pretende:

- Describir los efectos de transmisión inducidos por no linealidades ópticas, propiedades de polarización y de dispersión cromática, y otras propiedades relacionadas con los amplificadores ópticos en sistemas de transmisión que emplean amplificadores de fibra óptica.
- Determinar las limitaciones debidas a los mencionados efectos en los diversos tipos de sistemas de transmisión pertinentes (por ejemplo, digitales/analógicos, coherentes, multiplexación por división de longitud de onda, etc.).
- Indicar posibles remedios para estas degradaciones, así como el correspondiente campo de acción.

## **II.2 Factores que influyen en las aplicaciones de transmisión con amplificadores ópticos**

Los factores que influyen en las aplicaciones de transmisión con amplificadores ópticos pueden dividirse en cuatro categorías generales: no linealidades ópticas, propiedades de polarización, propiedades de dispersión, y otras propiedades relacionadas con los amplificadores óptica. En las cláusulas siguientes se indican los factores comprendidos en cada categoría y se describen sus efectos:

- a) *No linealidades ópticas de la fibra*
  - 1) automodulación de fase,
  - 2) formación de solitones,
  - 3) modulación de fase cruzada,
  - 4) inestabilidad de la modulación,
  - 5) mezcla de cuatro ondas,
  - 6) dispersión de Brillouin estimulada,
  - 7) dispersión de Raman estimulada.
- b) *Propiedades de polarización*
  - 1) dispersión por modo de polarización,
  - 2) pérdida dependiente de la polarización,
  - 3) quemadura de hueco por polarización.
- c) *Propiedades de dispersión de la fibra*
  - dispersión cromática.
- d) *Otras propiedades relacionadas con los amplificadores ópticos*
  - 1) acumulación de ruido,
  - 2) efecto de autofiltrado,
  - 3) generación de ondas de choque ópticas,

- 4) no linealidad inducida por la saturación en los amplificadores ópticos de semiconductores.

## II.3 No linealidades ópticas de la fibra

Las interacciones no lineales entre la señal y el medio de transmisión por fibra de sílice comienzan a aparecer cuando se aumentan las potencias de las señales ópticas para conseguir tramos de transmisión más largos a velocidades binarias altas. Por lo tanto, el comportamiento no lineal de las fibras ha surgido como un aspecto importante en los sistemas de gran capacidad y en las rutas largas sin regeneración. Estas no linealidades pueden agruparse generalmente como efectos de dispersión (dispersión de Brillouin estimulada y dispersión de Raman estimulada) o como efectos relacionados con el índice de refracción de la fibra que depende de la intensidad (automodulación de fase, modulación de fase cruzada, inestabilidad de la modulación, formación de solitones y mezcla de cuatro ondas). Diversos parámetros influyen en la severidad de estos efectos no lineales; entre esos parámetros están las características de dispersión de la fibra, el área efectiva de la fibra y el índice de refracción no lineal, el número y espaciamiento de los canales en los sistemas de múltiples canales, la longitud global del sistema sin regeneración, así como la intensidad de la señal y la anchura de la raya espectral de la fuente.

### II.3.1 Automodulación de fase

#### II.3.1.1 Descripción de los efectos

Como el índice de refracción depende de la intensidad óptica de la señal, la variación temporal de la intensidad óptica de la señal induce una modulación de la propia fase. Este efecto se denomina automodulación de fase (SPM, *self phase modulation*). El índice de refracción de la fibra puede expresarse<sup>1</sup> por la fórmula

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P$$

por tanto:

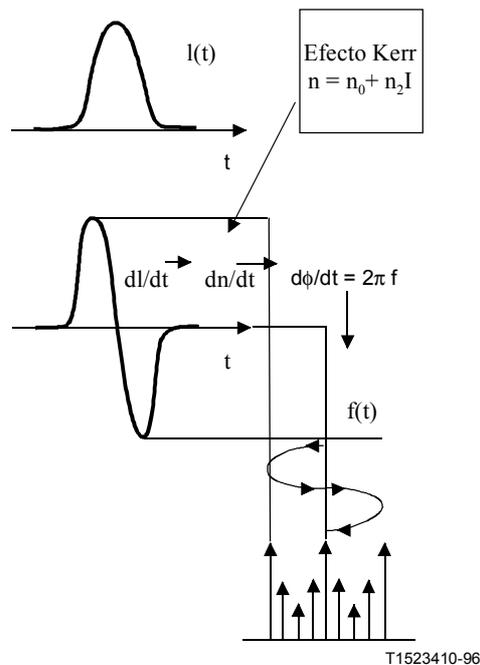
$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_2}{A_{eff}} \frac{\partial P}{\partial t}$$

donde  $n_2$  es el índice de refracción no lineal de la fibra en  $\text{m}^2/\text{W}$ ,  $A_{eff}$  es la superficie efectiva de la fibra y  $P$  la potencia inyectada.

En sistemas que funcionan con una sola longitud de onda, la automodulación de fase ensanchará gradualmente el espectro de la señal cuando las variaciones de la intensidad óptica producen variaciones de la fase (véase la figura II.3-1). Una vez introducido el ensanchamiento espectral por SPM, la señal sufre un mayor ensanchamiento temporal a medida que se propaga a lo largo de la fibra, debido a los efectos de la distorsión cromática, en la región de dispersión normal de la fibra (es decir, por debajo de la longitud de onda de dispersión cero). A la inversa, en la región de dispersión anómala, la dispersión cromática y la SPM pueden compensarse entre sí, produciendo así un menor ensanchamiento temporal. La propagación de solitones se basa en este fenómeno (véase II.3.2).

---

<sup>1</sup> MARCUSE (D.), CHRAPLYVY (A.R.) y TKACH (R.W.), Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber WDM systems, *Journal of Lightwave Technology*, Volume 12, Number 5, p. 885, mayo de 1994.



**Figura II.3-1/G.663 – Mecanismo de ensanchamiento espectral debido a automodulación de fase**

### II.3.1.2 Limitaciones de transmisión inducidas

Generalmente, los efectos de la SPM sólo son apreciables en sistemas que tienen una elevada dispersión acumulativa o una gran longitud. Los sistemas que funcionan en el régimen de dispersión normal y que están limitados por la dispersión pueden no tolerar los efectos adicionales debidos a la SPM. En los sistemas con múltiples canales en los que el espaciamento de éstos es muy pequeño, el ensanchamiento espectral inducido por la SPM puede también crear interferencia entre canales adyacentes. El efecto de la SPM puede también inducir degradación cuando va acompañado de filtrado óptico de banda ancha. Como la SPM es esencialmente un efecto monocanal, no resulta afectada cuando los canales son más numerosos. La penalidad de distorsión de la SPM aumenta con las potencias de canal inyectadas más grandes. También aumenta con la mayor velocidad binaria de canal, ya que las señales con velocidades binarias mayores tienen mayores pendientes de subida/bajada de los bits.

La SPM sobre señales moduladas en intensidad con bajo silbido conduce a una compresión de impulsos en fibras G.652 [2] y en fibras G.655 [5] con dispersión anómala, en función de la potencia del transmisor. La compresión de los impulsos contrarresta la dispersión cromática y ofrece alguna acomodación de dispersión. Sin embargo, existen límites de dispersión máxima y de la correspondiente longitud de transmisión.

### II.3.1.3 Minimización de las limitaciones inducidas

La utilización de la fibra G.653 [3] y la colocación del canal de señales cerca de la longitud de onda de dispersión cero reducirá el impacto de la SPM. Para sistemas de longitud inferior a unos 1000 km, la SPM puede controlarse mediante la aplicación de compensación de dispersión en intervalos adecuados a todo lo largo del sistema que emplea la fibra G.652. Los efectos de la SPM pueden mitigarse trabajando a longitudes de onda superiores a la longitud de onda de dispersión cero de la fibra G.655. Las fibras con atributos de área efectiva de la fibra aumentada o índice de refracción no lineal disminuido, también reducen la penalidad de la SPM. Para todos los diseños de fibra, los efectos sobre la SPM pueden reducirse disminuyendo las potencias de canal inyectadas, aunque las

tendencias de diseño de los sistemas exigen potencias más grandes para permitir mayores distancias de tramo.

## **II.3.2 Formación de solitones**

### **II.3.2.1 Descripción de los efectos**

En la región de dispersión anómala de la fibra (es decir, por encima de la longitud de onda de dispersión cero), la interacción entre el índice de refracción no lineal y la dispersión cromática puede dar origen a regímenes de propagación particulares, denominados impulsos solitones, que se propagan en largas distancias reproduciendo periódicamente su forma temporal y su espectro de frecuencia. Señales de otra clase pueden evolucionar espontáneamente y transformarse en solitones. Aunque los solitones fundamentales son muy resistentes y pueden utilizarse para lograr transmisiones en largas distancias, los de orden elevado sufren una evolución muy compleja que comprende la reestructuración de los impulsos, modificaciones espectrales, así como la descomposición de los impulsos. Estos efectos pueden afectar adversamente al funcionamiento de los sistemas.

### **II.3.2.2 Limitaciones de transmisión inducidas**

Los efectos debidos a la formación de solitones pueden ofrecer interés para los sistemas basados en fibras G.652, G.653 y G.655. Si bien la formación de solitones fundamentales puede ser útil, otros solitones generalmente provocan una importante degradación de la señal transmitida. Por lo tanto, la formación de solitones de alto orden impone un límite a la potencia máxima que puede inyectarse en la fibra.

### **II.3.2.3 Métodos para minimizar las limitaciones inducidas**

La formación de solitones puede evitarse trabajando a longitudes de onda por debajo de la longitud de onda de dispersión cero del enlace. Sin embargo, en este régimen no está soportada la transmisión de solitones, y tanto la dispersión como la no linealidad contribuyen al ensanchamiento de los impulsos. La degradación de la señal puede minimizarse por una gestión adecuada de la dispersión a lo largo del trayecto.

## **II.3.3 Modulación de fase cruzada**

### **II.3.3.1 Descripción de los efectos**

En los sistemas multicanal, la modulación de fase cruzada (XPM) ensanchará gradualmente el espectro de la señal cuando las variaciones de la intensidad óptica produzcan cambios de fase debidos a la interacción entre canales adyacentes. La cantidad de ensanchamiento espectral introducido por la XPM está relacionada con la separación de canales y la dispersión cromática, ya que las velocidades de grupo diferenciales inducidas por la dispersión tendrán por efecto que los impulsos que interactúan entre sí se separen a medida que se propagan a lo largo de la fibra. Una vez introducido el ensanchamiento espectral por la XPM, la señal experimenta un mayor ensanchamiento temporal a medida que se propaga a lo largo de la fibra, debido a los efectos de la dispersión cromática.

### **II.3.3.2 Limitaciones de transmisión inducidas**

La penalidad de los sistemas causada por la XPM aumenta con los menores espaciamientos de canales y el aumento del número de canales (aunque esto produce saturación según la distancia). Como se ha señalado para la SPM, el cambio en la fase de la señal está relacionado con el cambio en el índice de refracción de la fibra, que a su vez lo está con la potencia de canal. Potencias inyectadas medias más grandes conducen a desplazamientos de fase mayores, que cuando van acompañadas de efectos de dispersión producen una mayor penalidad del sistema.

La penalidad de la XPM disminuye en realidad para mayores velocidades binarias de canal, ya que las señales de velocidad binaria menores experimentan mayores interacciones de bits o "irrupciones".

Las degradaciones causadas por la XPM son más importantes en los sistemas basados en la fibra G.652 que en los basados en las fibras G.653 y G.655. El ensanchamiento debido a la XPM puede provocar interferencia entre canales adyacentes en sistemas de múltiples canales.

### **II.3.3.3 Minimización de las limitaciones inducidas**

La XPM puede controlarse mediante una selección adecuada del espaciamiento de los canales. Estudios realizados han revelado que sólo los canales adyacentes contribuyen significativamente a la distorsión de la señal inducida por XPM en sistemas de múltiples canales. La relación señal/ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*) del canal central de un sistema de tres canales se aproximará a la de un sistema monocal canal cuando se aumenta la separación de canales. En consecuencia, el efecto de la XPM puede hacerse despreciable con un espaciamiento adecuado entre los canales de señales. Se ha demostrado que separaciones de canales de 100 GHz son suficientes para reducir los efectos de la XPM en una simulación de un sistema con una potencia de 5 mW por canal<sup>1, 2</sup>. Las penalidades de dispersión debidas a la XPM pueden también controlarse aplicando una compensación de la dispersión en intervalos apropiados a lo largo del sistema. Las fibras con atributos de área efectiva de fibra aumentada, o índice de refracción no lineal disminuido, también reducen la penalidad por XPM. Los efectos de la XPM también se reducen con la menor atenuación de la fibra, que asegura que la dispersión de fase por la XPM se hace casi la misma cuando los impulsos "se invaden" entre sí<sup>1</sup>.

Para todos los diseños de fibra, los efectos de la XPM pueden reducirse disminuyendo las potencias de canal inyectadas, aunque las tendencias de diseño de los sistemas exigen potencias más grandes para permitir mayores distancias de tramo.

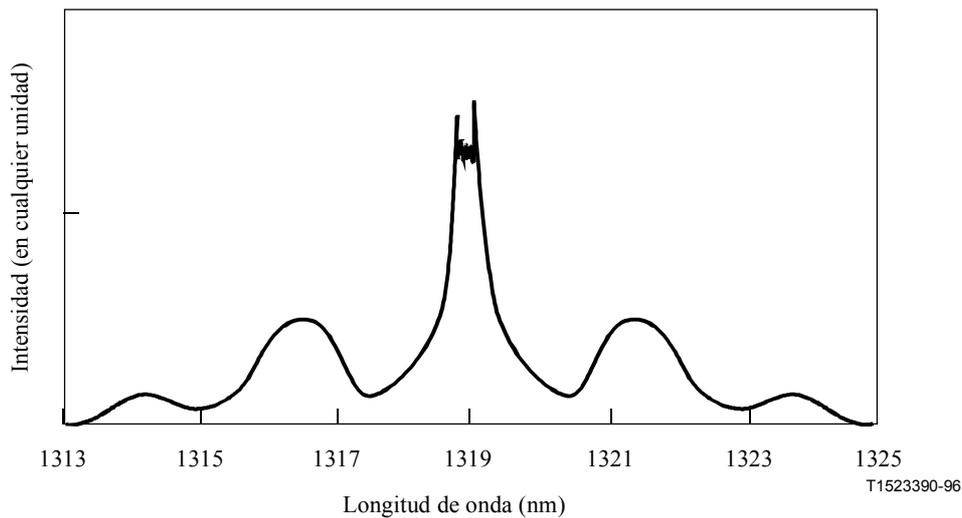
### **II.3.4 Inestabilidad de la modulación**

#### **II.3.4.1 Descripción de los efectos**

La inestabilidad de la modulación (MI, *modulation instability*) descompone una señal de onda continua (CW), o un impulso, en una estructura modulada. La inestabilidad de la modulación puede ser inducida por la SPM en el régimen de dispersión anómala (esto es, por encima de la longitud de onda de dispersión cero), donde una señal casi monocroma tiende espontáneamente a generar dos bandas laterales espectrales simétricas, como se muestra en la figura II.3-2. La inestabilidad de la modulación también puede ser inducida por la XPM. La inestabilidad de la modulación inducida por la XPM puede producirse en el régimen anómalo y en el régimen normal (es decir, por debajo de la longitud de onda de dispersión nula).

---

<sup>2</sup> KOCH (T.L.), KAMINOW (I.P.), *Optical Fiber Telecommunication, Academic Press, Volume IIIA, Chapter 8, 1997.*



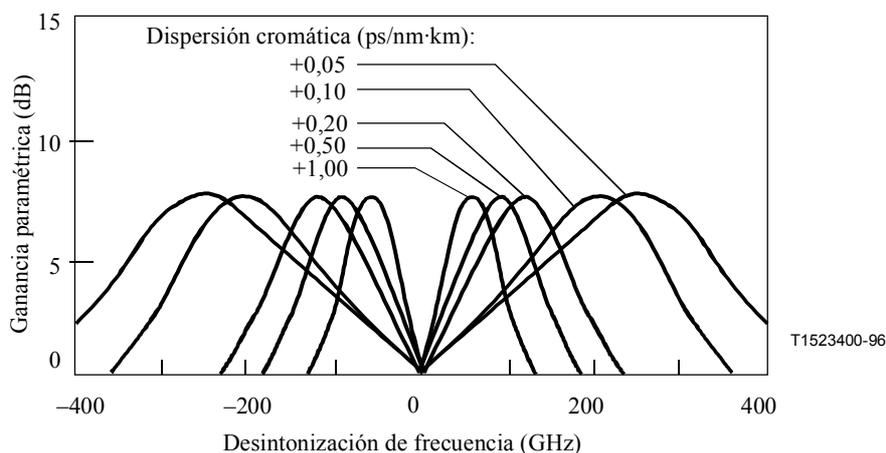
**Figura II.3-2/G.663 – Espectro de potencia de un impulso tras una propagación a lo largo de una fibra de 1 km (anchura de impulso de entrada: 100 ps, potencia de punta: 7 W). Aparecen lóbulos espectrales debidos a la inestabilidad de la modulación**

Cuando hay inestabilidad de la modulación inducida por la SPM, la separación de frecuencias y la ganancia de las bandas laterales son determinadas por la intensidad de la onda, y por el coeficiente de dispersión y los coeficientes no lineales de la fibra. La máxima eficiencia de conversión se obtiene a una separación de frecuencias dada por:

$$\Omega_{\text{máx}} = \pm \left[ \frac{8\pi^2 c n_2 P_o}{\lambda^3 A_{\text{eff}} D(\lambda)} \right]^{1/2}$$

donde  $n_2$  es el índice de refracción no lineal de la fibra,  $A_{\text{eff}}$  es el área efectiva de la fibra,  $P_o$  es la potencia inyectada,  $D(\lambda)$  es el coeficiente de dispersión cromática y  $\lambda$  es la longitud de onda de trabajo. Las bandas laterales situadas a  $\pm \Omega_{\text{máx}}$  de la portadora experimentan una ganancia por longitud unitaria:  $g_{\text{máx}} = 4\pi P_o / (\lambda A_{\text{eff}})$ . La pérdida de la fibra puede tenerse en cuenta mediante una pequeña modificación de la anterior ecuación. La variación de la ganancia de MI en función de la frecuencia, con respecto a la señal, se muestra en la figura II.3-3 en presencia de pérdida de la fibra para diversos valores de dispersión de la fibra.

La inestabilidad de la modulación puede considerarse como un caso particular de la mezcla de cuatro ondas, donde dos fotones de la señal entrante intensa se convierten en dos fotones de frecuencias diferentes.



**Figura II.3-3/G.663 – Característica de ganancia MI calculada – desintonización de frecuencia, de fibras de 30 km de largo (pérdida de 0,24 dB/km), con cinco valores diferentes del coeficiente de dispersión, para una potencia inyectada de señal CW de +16 dBm**

### II.3.4.2 Limitaciones de transmisión inducidas

La inestabilidad de la modulación puede disminuir la relación señal/ruido (SNR) debido a la generación de bandas laterales, bien espontáneamente, o bien al ser introducidas por la emisión espontánea del amplificador. Puesto que cabe esperar que la máxima degradación de la señal se produzca a valores elevados de  $g_{\text{máx}}$  y para  $\Omega$  próxima a la anchura de banda de la señal, la inestabilidad de la modulación puede ser crítica cuando se utilizan amplificadores de potencia muy fuertes en enlaces de fibra con dispersión desplazada, con láseres modulados directamente. En sistemas de larga distancia sin repetidores, la inestabilidad de la modulación puede observarse a niveles de potencia más bajos y puede causar una amplificación excesiva del ruido de emisión espontánea de los amplificadores ópticos conectados en cascada. El ensanchamiento en las colas espectrales de la señal puede causar el vaciado de la portadora de la señal y las colas pueden ser atenuadas por los filtros ASE de banda estrecha o por el efecto de autofiltrado en sistemas muy largos.

### II.3.4.3 Métodos para minimizar las limitaciones inducidas

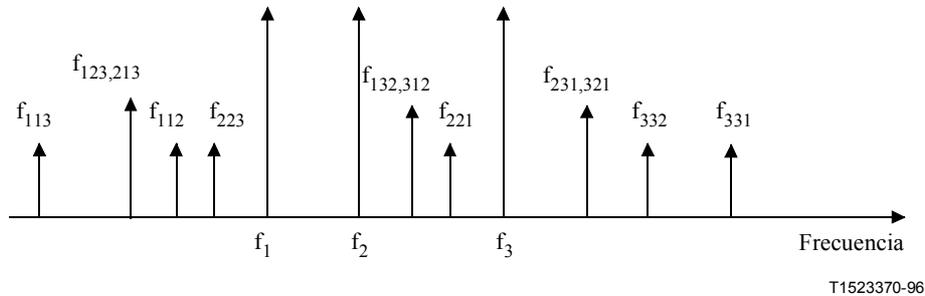
El efecto de la inestabilidad de la modulación puede minimizarse sea disminuyendo el nivel de potencia, sea trabajando a longitudes de onda por debajo de la longitud de onda de dispersión cero del enlace. La gestión de la dispersión puede utilizarse también para reducir la formación de bandas laterales de inestabilidad de la modulación. En otro caso, se puede filtrar electrónicamente la señal recibida para disminuir el nivel del ruido amplificado espurio. Una modulación externa de las fuentes láser que produzca un espectro de menor anchura puede aumentar considerablemente la influencia de la inestabilidad de la modulación.

## II.3.5 Mezcla de cuatro ondas

### II.3.5.1 Descripción de los efectos

La mezcla de cuatro ondas (FWM), denominada también mezcla de cuatro fotones, se produce cuando la interacción de dos o tres ondas ópticas de diferentes longitudes de onda genera nuevas ondas ópticas, denominadas productos de mezcla o bandas laterales, en otras longitudes de onda. Esta interacción puede producirse entre señales de sistemas de múltiples canales, entre el ruido de emisión espontánea amplificada de los amplificadores ópticos y un solo canal, y también entre el modo principal y los modos laterales de un canal único. En el caso de dos señales, el proceso de modulación de intensidad, en la frecuencia de batido de esas dos señales, modula el índice de

refracción de la fibra y produce una modulación de fase a una frecuencia diferencial. La modulación de fase crea dos bandas laterales a frecuencias dadas por esta frecuencia diferencial. En el caso de tres señales, los productos de modulación son más numerosos y más intensos (véase la figura II.3-4), y caerán directamente en canales de señales adyacentes cuando los espaciamentos de canales son iguales en frecuencia. Dos ondas ópticas que se propagan a lo largo de una fibra producen FWM con una alta eficiencia si se obtiene la condición de concordancia de fase entre bandas laterales y señales iniciales.



**Figura II.3-4/G.663 – Productos generados por la mezcla de cuatro ondas de tres señales**

Suponiendo que todos los canales tienen la misma potencia de entrada e igual separación de canales, la eficacia de la FWM,  $\eta$ , de una fibra puede expresarse como la relación potencia de FWM/potencia de salida de canal de la fibra, y es proporcional a<sup>3</sup>:

$$\eta \propto \left[ \frac{n_2 P}{A_{eff} D (\Delta\lambda)^2} \right]^2$$

donde  $n_2$  es el índice de refracción no lineal de la fibra,  $P$  la potencia de entrada de canal,  $A_{eff}$  es el área efectiva de fibra,  $D$  el coeficiente de dispersión cromática de la fibra y  $\Delta\lambda$  la separación de canales. Adviértase que la eficacia de FWM no es influenciada por el aumento de velocidad binaria.

### II.3.5.2 Limitaciones de transmisión inducidas

La generación de bandas laterales debidas a la FWM puede repercutir en una reducción considerable de la potencia de la señal. Además, cuando los productos de la mezcla caen directamente en canales de señales pueden causar interferencia paramétrica, que se manifiesta como una ganancia o pérdida de amplitud en el tren de impulsos de la señal, lo que depende de la interacción de fase entre la señal y la banda lateral.

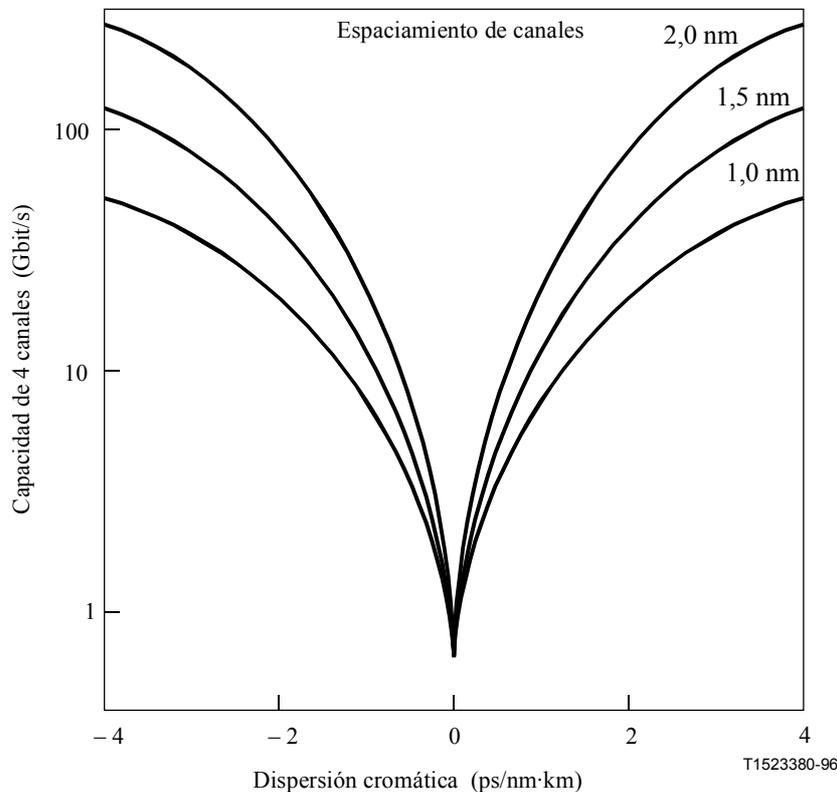
La interferencia paramétrica causa el cierre del diagrama de ojo en la salida del receptor, lo que degrada la característica de tasa de errores en los bits (BER, *bit-error rate*). Los sistemas multicanal tienden a tener un mayor número de canales, lo que aumenta el número de posibles productos de mezclado en los canales de señal.

Como puede verse en la ecuación de la cláusula anterior, el mayor espaciamento de frecuencias y la dispersión cromática reducen la eficiencia del proceso FWM al destruir la concordancia de fase entre las ondas que interactúan. Sin embargo, los sistemas tienden a tener menores espaciamentos de frecuencia, para permitir que más canales ocupen la misma banda de paso del amplificador óptico. Además, a medida que aumentan las potencias de canal inyectadas, aumenta también la eficiencia de la FWM (y por tanto la penalidad del sistema).

<sup>3</sup> KAMINOW (I.P.), KOCH (T.L.), Optical Fiber Telecommunication Academic Press Volume IIIA, p.213 1997.

Los sistemas multicanal que utilizan la ventana de operación de 1550 nm con la fibra G.652 [2] sufren mucha menos degradación FWM que los que emplean la fibra G.653 [3], ya que la fibra G.652 tiene mucha más dispersión cromática, así como mayor área efectiva de la fibra. A la inversa, la colocación de un canal de señales directamente en la longitud de onda de dispersión cero, o cerca de ella, puede repercutir en una formación apreciable de productos FWM en un tramo de fibra relativamente corto (decenas de kilómetros).

Cuando se utilizan en la región de dispersión 0 de 1550 nm de las fibras G.653, a veces denominada banda C, la mezcla de cuatro ondas puede producir una grave degradación del sistema cuando se trata de sistemas multicanal que emplean la fibra G.653, pues los canales de señales perciben sólo una pequeña cantidad de dispersión cromática. La influencia de la dispersión sobre la capacidad de sistema que puede obtenerse en el caso de un sistema de cuatro canales con tres tramos de amplificador se muestra en la figura II.3-5. Esta figura muestra lo que puede suceder a niveles de potencia altos cuando las condiciones favorecen la generación de productos de mezcla. La limitación de la capacidad se basa en un cálculo de caso más desfavorable de los productos de mezcla generados por el proceso FWM con cuatro canales de señales de 8 dBm centrados alrededor del valor de dispersión indicado. Este sistema produce niveles de distorsión intolerables debidos a la FWM cuando la dispersión percibida por los canales de señales se aproxima a cero.



**Figura II.3-5/G.663 – Influencia de la dispersión en la capacidad del sistema en presencia de FWM**

La fibra con dispersión desplazada no nula G.655 [5] ha sido desarrollada para eliminar el efecto FWM en la banda C. Sin embargo, posiblemente la mezcla de cuatro ondas puede también degradar los sistemas multicanal aun en la fibra G.655, dependiendo de los espaciamientos de canal de 50 GHz o menores, de la dispersión de la fibra y del coeficiente no lineal de la fibra (proporcional al índice de refracción no lineal dividido por el área efectiva).

En sistemas monocanal, la interacción FWM puede producirse entre el ruido de emisión espontánea amplificada del amplificador óptico y el canal de transmisión, así como entre el modo principal y los

modos laterales del transmisor óptico. Se añade ruido de fase a la portadora de la señal debido a la emisión espontánea amplificada acumulada, a través del efecto índice de refracción no lineal, lo que ensancha las colas espectrales de la señal.

### **II.3.5.3 Minimización de las limitaciones inducidas**

Como se ha señalado anteriormente, se puede utilizar la dispersión cromática, como en el caso de las fibras G.652 y G.655, para suprimir la generación de bandas laterales FWM. Las fibras con atributos de mayor área efectiva de la fibra o menor índice de refracción lineal también reducen la eficiencia de la FWM. Se puede también utilizar un espaciamiento de canales no uniforme para mitigar la severidad de la degradación FWM. La reducción de los niveles de potencia de entrada en los sistemas que emplean la fibra G.653 podría permitir la operación multicanal, pero podría también comprometer las ventajas económicas de la amplificación óptica.

Para suprimir adecuadamente la generación de productos de mezcla se ha propuesto la utilización de una fibra (especificada por Recomendaciones existentes o nuevas, actualmente en estudio) con una dispersión mínima permitida (esto es, diferente de cero) en la región de la banda de amplificación de los amplificadores ópticos. También se han considerado tramos de esa fibra de dispersión diferente de cero alternados con tramos de fibra con características de dispersión opuestas, como una posible solución, pues el cable resultante podría mantener una dispersión cromática neta de aproximadamente cero. Sin embargo, esta alternativa puede presentar dificultades en los aspectos de instalación, operaciones y mantenimiento, al introducir un segundo tipo de fibra en el entorno de la planta exterior. También se han propuesto otros métodos similares en que se emplean largos tramos de fibra con una dispersión pequeña finita y tramos cortos de fibra con una dispersión mayor y opuesta (para proporcionar compensación). En particular, en enlaces con amplificación periódica, se puede colocar un tramo corto de fibra de compensación en la caja en que se ha situado el amplificador óptico.

Se ha propuesto un espaciamiento de canales no uniforme y un espaciamiento de canales más grande como un medio para mitigar los efectos de las no linealidades y permitir el empleo de sistemas WDM basados en la fibra G.653. Un espaciamiento de canales no uniforme asegura que los productos de mezcla generados por tres o más canales no caigan directamente en otras longitudes de onda de canal. Sin embargo, la transferencia de potencia de las señales a los productos de mezcla (es decir, el denominado vaciado de la señal) no sufre ningún cambio al hacer el espaciamiento de canales no uniforme, y puede producir un cierre considerable del diagrama de ojo. El aumento del espaciamiento de los canales reduce los efectos de la mezcla de cuatro ondas. Estas técnicas de mitigación reducen la anchura del espectro de amplificación utilizable. Un espaciamiento de canales no uniforme y un mayor espaciamiento de canales pueden desgraciadamente exigir más de la banda de paso del amplificador óptico.

Se propone la transmisión WDM utilizando longitudes de onda mayores (banda L) además de la banda de 1550 nm. La transmisión utilizando la banda de gran longitud de onda (banda L) es generalmente útil con todos los tipos de fibra, ya que permite el aumento del número total de longitudes de onda. La transmisión en banda L por la fibra G.652 y G.654 puede exigir compensación de la dispersión debido a los grandes valores de dispersión. Con las fibras G.653, la transmisión en la banda L permite un sencillo diseño de longitud de onda porque el efecto FWM se observa en la banda L. La dispersión de la banda L en la fibra G.653 puede no requerir compensación de dispersión, según la velocidad binaria de transmisión.

NOTA – La definición de la banda L queda en estudio.

## II.3.6 Dispersión de Brillouin estimulada

### II.3.6.1 Descripción de los efectos

En un sistema de modulación de intensidad que emplea una fuente de escasa anchura de raya espectral, una cantidad de potencia óptica considerable se transfiere de la señal que se propaga en el sentido de ida a la señal que se propaga en sentido de retorno, cuando se rebasa el umbral de dispersión de Brillouin estimulada (SBS). En el SBS, la luz que se propaga en sentido de ida es esparcida desde fonones acústicos. Sin embargo, la fibra monomodo sólo guía la luz esparcida que se propaga en sentido de retorno. La luz esparcida sufre un desplazamiento descendente o un desplazamiento Brillouin de aproximadamente 11 GHz a 1550 nm.

De los efectos no lineales aquí descritos, el SBS es el que tiene el umbral de potencia más bajo. Si bien en estudios realizados se ha demostrado que el umbral SBS puede variar según el tipo de fibra e incluso entre fibras de un mismo tipo, dicho umbral suele ser de 5 a 10 mW para fuentes de raya espectral estrecha moduladas externamente, pero puede ser de 20 a 30 mW para láseres modulados directamente. El umbral SBS para un sistema que emplea la fibra G.653 es algo más bajo que el de un sistema que emplea la fibra G.652, debido a la menor área efectiva de la fibra de G.653. Generalmente, esto se cumple para todos los efectos no lineales. El umbral SBS es sensible a la anchura de la raya espectral y al nivel de potencia, e insensible al número de canales.

### II.3.6.2 Limitaciones de transmisión inducidas

El SBS limita efectivamente la cantidad de luz que puede transmitirse a través de un trayecto de fibra. La figura II.3-6 (2, 4) muestra este efecto para una fuente de banda estrecha, en la que toda la potencia de la señal cae dentro de la anchura de banda Brillouin. La potencia transmitida se satura y la potencia retroesparcida aumenta rápidamente. El nivel de potencia de entrada a la fibra en el que se produce este rápido aumento se define como el umbral SBS. En el caso general, el umbral SBS se expresa por:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

donde  $g$  designa el coeficiente de ganancia Brillouin ( $\sim 4 \times 10^{-9}$  cm/W), y  $A_{eff}$  es el área efectiva de la fibra.  $K$  es una constante determinada por el grado de libertad del estado de polarización (en la fibra G.652,  $K = 2$ ).  $\Delta\nu_B$  y  $\Delta\nu_p$  representan la anchura de banda Brillouin y una anchura de raya espectral de una luz de la bomba, respectivamente.  $L_{eff}$  designa la longitud efectiva definida como:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

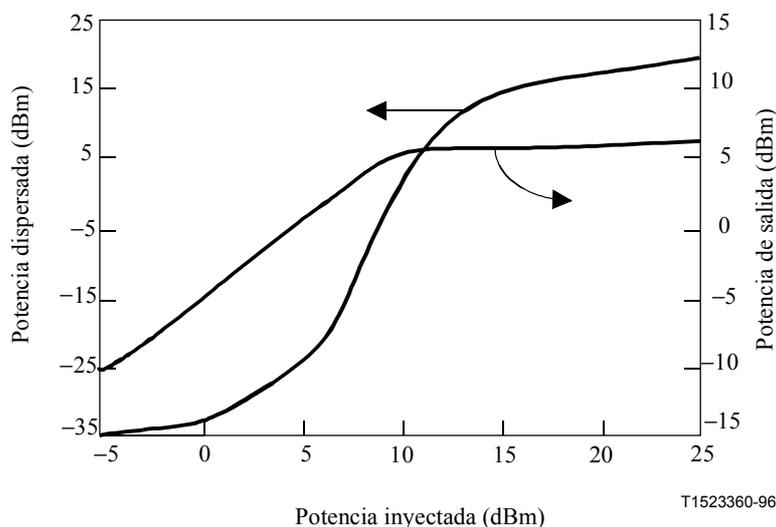
donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la fibra y  $L$  la longitud de la fibra.

El umbral SBS,  $P_{th}$ , depende de la anchura de la raya espectral de la luz de la bomba,  $\Delta\nu_p$ . Cuando la anchura de la raya espectral de la luz de la bomba es pequeña en comparación con la anchura de banda Brillouin, la potencia de umbral SBS puede estimarse utilizando la siguiente relación:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}}$$

---

<sup>4</sup> MAO (X.P.), TKACH (R.W.), CHRAPLYVY (A.R.), JOPSON (R.M.) y DEROSIER (R.M.), "Stimulated Brillouin Threshold dependence on fiber type and uniformity", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Volume. 4, pp. 66, 1992.



**Figura II.3-6/G.663 – Efecto de la dispersión de Brillouin estimulada para una fuente de banda estrecha**

### II.3.6.3 Minimización de las limitaciones inducidas

Las degradaciones por dispersión de Brillouin estimulada no se producirán en aquellos sistemas en los que la anchura de la raya espectral de la fuente es apreciablemente mayor que la anchura de banda Brillouin, o en los que la potencia de la señal es inferior a la potencia de umbral (calculada mediante las expresiones antes indicadas en II.3.6.2).

NOTA – En el apéndice III/G.650 [1] se da más información sobre la dispersión de Brillouin.

### II.3.7 Dispersión de Raman estimulada

#### II.3.7.1 Descripción de los efectos

La dispersión de Raman estimulada (SRS) es un efecto de banda ancha en el que se produce una interacción de la luz con los modos de vibración de las moléculas de sílice. El SRS hace que la longitud de onda de la señal se comporte como una bomba Raman para las longitudes de onda más grandes, sean éstas otros canales de señales, o luz que sufre un desplazamiento por una dispersión de Raman espontánea. En cualquier caso, la señal de menor longitud de onda es atenuada por este proceso, que amplifica la señal de mayor longitud de onda.

#### II.3.7.2 Limitaciones de transmisión inducidas

La dispersión de Raman estimulada (SRS) puede producirse en sistemas de un solo canal y de múltiples canales. En el caso de un canal único sin amplificadores de línea, se necesitan potencias de señal del orden de 1 W o mayores para que se perciba la degradación debida a este fenómeno. Sin embargo, señales de longitud de onda menores en sistemas de múltiples canales, con canales que ocupan una amplia gama de longitudes de onda, pueden sufrir una degradación de la característica señal/ruido cuando una parte de su potencia se transfiere a canales de longitudes de onda mayores a través del SRS. Esto se traduce en limitaciones de la capacidad del sistema completo, basadas en el número total de canales, el espaciamiento de canales, la potencia media de entrada y la longitud del sistema global. En particular, el umbral para la percepción de una penalidad de 1 dB en un sistema multicanal debido a la ganancia Raman en una fibra con dispersión no desplazada puede estimarse por <sup>2, 5</sup>:

<sup>5</sup> CHRAPLYVY (A.R.), TKACH (R.W.), What is the actual capacity of single-mode fibers in amplified lightwave systems? *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Volume 5, pp. 666, 1993.

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40mW \cdot nm \cdot Mm$$

donde  $P_{tot}$  es la potencia combinada de todos los canales,  $\Delta\lambda$  es el espectro óptico en el que se distribuyen los canales, y  $L_{eff}$  es la longitud efectiva [en unidades de  $10^6$  metros (Mm)]. El umbral SRS para un sistema que emplea la fibra G.653 es algo más bajo que para un sistema que emplea la fibra G.652, debido a la menor área efectiva de la fibra G.653. Prácticamente, el SRS no degrada los sistemas monocanal, pero puede limitar la capacidad de los sistemas WDM.

### II.3.7.3 Minimización de las limitaciones inducidas

En sistemas monocanal pueden utilizarse filtros para eliminar el espectro no deseado. Sin embargo, no se ha informado de ninguna técnica práctica para eliminar los efectos del SRS en los sistemas multicanal. Los efectos del SRS pueden también mitigarse reduciendo la potencia óptica de entrada. Sin embargo, el SRS no parece presentar una limitación práctica al empleo de los sistemas WDM actualmente contemplados.

### II.3.8 Recapitulación de las no linealidades de las fibras

El cuadro II.1 contiene una recapitulación de los efectos no lineales descritos en las cláusulas anteriores.

**Cuadro II.1/G.663 – Efectos ópticos no lineales en fibras ópticas**

Efecto óptico no lineal	Causa	Características	Potencia luminosa crítica en fibras monomodo	Consecuencias
Automodulación de fase (SPM) y modulación cruzada de fase (XPM)	Índice de refracción dependiente de la intensidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Desplazamiento de fase               <ul style="list-style-type: none"> <li>• autoinducido (SPM)</li> <li>• canal adyacente (XPM)</li> </ul> </li> <li>– Ensanchamiento del espectro de frecuencias</li> </ul>	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– El ensanchamiento espectral aumenta el efecto de la dispersión</li> <li>– Transmisión a altas velocidades binarias limitada por la potencia/dispersión</li> <li>– Compresión inicial de los impulsos (en régimen de dispersión positiva)</li> <li>– Ensanchamiento acelerado de los impulsos (en régimen de dispersión negativa)</li> <li>– Propagación de los impulsos (solitones)</li> <li>– Limitaciones en sistemas PSK por la conversión AM/PM</li> </ul>
Mezcla de cuatro ondas (FWM) o mezcla de cuatro fotones	Índice de refracción dependiente de la intensidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Productos de mezcla generados</li> </ul> $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (i, j \neq k)$	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$ (para fibras G.653) – depende de parámetros específicos, por ejemplo el espaciamiento de canales y la proximidad a $\lambda_0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Diafonía óptica en sistemas WDM</li> <li>– Vaciado de la potencia de la señal</li> </ul>

**Cuadro II.1/G.663 – Efectos ópticos no lineales en fibras ópticas (*fin*)**

Efecto óptico no lineal	Causa	Características	Potencia luminosa crítica en fibras monomodo	Consecuencias
Dispersión de Brillouin estimulada (SBS)	Interacción: fotón – fonones acústicos	– Rayas Brillouin en el sentido de retorno $f - \Delta f$ $\Delta f = \sim 13$ GHz (1310 nm) $\Delta f = \sim 11$ GHz (1550 nm)	$P_c > \sim 5$ mW (para una fuente óptica de raya espectral estrecha) – $P_c$ aumenta con la anchura de la raya espectral de la señal	– Inestabilidad de la señal – Pérdida óptica en la fibra – Diafonía óptica en sistema multicanal bidireccional
Dispersión de Raman estimulada (SRS)	Interacción de fotón – fonones ópticos	– Rayas Raman $f - n \Delta f$ (Stokes) $\Delta f = \sim 12$ THz $\Delta \lambda = \sim 70$ nm (1310 nm) $\Delta \lambda = \sim 102$ nm (1550 nm)	$P_c > \sim 1$ W (para un canal único) $P_c > \sim 1$ mW para amplificación Raman en un sistema WDM con espaciamiento crítico de canales, $\Delta \lambda$	– Pérdida óptica en la fibra – Diafonía óptica en sistema WDM – Vaciado de la potencia de la señal

En el cuadro II.2 se incluye un segundo resumen que compara las tendencias de los sistemas de larga distancia con sus efectos sobre las penalidades de los sistemas no lineales.

**Cuadro II.2/G.663 – Relación entre las tendencias de los sistemas de larga distancia y las penalidades de los sistemas no lineales**

Tendencia de los sistemas de larga distancia	Consecuencias SPM	Penalidad XPM	Penalidad FWM	Penalidad SBS	Penalidad SRS
(a) Menor espaciamiento de canales	–	↑	↑	ee	ee
(b) Mayor número de canales	–	↑	↑	ee	↑
(c) Mayor potencia de los canales	↑(nota)	↑	↑	↑	↑
(d) Mayor número de tramos (larga distancia)	↑	↑	↑	↑	↑
(e) Mayor velocidad binaria de canal	↑	↓	–	↓	ee
(f) Mayor número de canales mediante multiplexación alternativa (tal como multiplexación de modos de polarización)	ee	ee	ee		
(g) Mayor velocidad binaria de los canales mediante codificación de señal alternativa (tal como multiplexación de modos de polarización)	ee	ee	ee		
NOTA – Las consecuencias pueden ser positivas (formación de solitones) o negativas para la calidad de funcionamiento del sistema.					
↑ Aumenta la penalidad					
↓ Disminuye la penalidad					
– La penalidad no es significativamente afectada					
ee La penalidad queda en estudio					

## II.4 Propiedades de polarización

### II.4.1 Dispersión por modo de polarización

#### II.4.1.1 Descripción de los efectos

Es bien sabido que el modo fundamental de un guíaondas dieléctrico circularmente simétrico es doblemente degenerado. En una fibra óptica real, esta degeneración está dividida por birrefringencia. La birrefringencia puede introducirse deliberadamente, como por ejemplo en las fibras que mantienen la polarización, o ser un producto marginal no deseado en la fabricación de la fibra o en la fabricación del cable. En este caso, la birrefringencia es introducida de manera aleatoria mediante, por ejemplo, perturbaciones geométricas o inducida por esfuerzos mecánicos.

Las constantes de propagación,  $\beta_i(\omega)$ , de los dos modos ortogonales pueden ser desarrolladas por una serie Taylor alrededor de la frecuencia central,  $\omega_o$ :

$$\beta_i(\omega_o) = \beta_i(\omega_o) + \left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o)^2 + \dots$$

donde  $\beta_i(\omega_o)$  es la velocidad de fase  $v_p$ ,  $\left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o}$  está relacionado con la velocidad de grupo  $v_g$ , y  $\left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o}$  está relacionado con la dispersión de la velocidad de grupo (o dispersión cromática, D), etc.

Con el desarrollo de fibras con dispersión desplazada y el empleo de sistemas que funcionan cerca de la longitud de onda de dispersión cero, la contribución aportada por el término de segundo orden a la dispersión, o dispersión cromática, se reduce, y el término de primer orden puede hacerse entonces apreciable. En el caso de fibras birrefringentes, este término de primer orden conduce a un retardo de grupo denominado dispersión por polarización. Esta dispersión por polarización introduce un retardo de grupo diferencial entre estados de polarización ortogonales. Aunque el efecto de la dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*) es cambiar aleatoriamente el estado de polarización de un impulso que se propaga en una fibra, es posible definir un par de estados ortogonales o estados principales a la entrada cuyos estados de salida son ortogonales y no presentan ninguna dependencia de la longitud de onda hasta el primer orden. (En algunas situaciones, sin embargo, esta aproximación no es adecuada y los estados principales pueden mostrar una dependencia de la longitud de onda, lo que conduce a una ulterior degradación del sistema a través de un acoplamiento con la dispersión cromática.)

Como se ha dicho en el párrafo anterior, la birrefringencia introducida en la fibra es causada por mecanismos locales aleatorios y asimétricos como el esfuerzo mecánico, la flexión y la torsión. Estos mecanismos aleatorios de la birrefringencia redefinen los ejes de birrefringencia locales a lo largo de la fibra, causando así un acoplamiento aleatorio entre los modos de polarización a lo largo de la fibra. El proceso de cableado introduce también cierta cantidad de birrefringencia aleatoria y de acoplamiento aleatorio de modos. La longitud de la fibra entre los puntos en que se producen esos cambios se suele designar por la longitud de acoplamiento que, con respecto a una fibra, usualmente se expresa como el promedio del conjunto de todas las longitudes de acoplamiento local. Además, los cambios en las condiciones ambientales locales, como por ejemplo los de temperatura, producen fluctuaciones en los ejes de birrefringencia locales, lo que a su vez produce un acoplamiento de polarización aleatorio. Como resultado del acoplamiento de polarización que cambia aleatoriamente, la magnitud del retardo de grupo diferencial se convierte en una función con variación estadística. Puede demostrarse que la distribución de los retardos de grupo diferenciales se describe por una función de distribución de Maxwell definida por:

$$P(\Delta\tau) = \frac{32\Delta\tau^2}{\pi^2\langle\Delta\tau\rangle^3} \exp\left[-\frac{4\Delta\tau^2}{\pi\langle\Delta\tau\rangle^2}\right]$$

donde  $\Delta\tau$  es el retardo de grupo diferencial entre los dos estados principales, y  $\langle\Delta\tau\rangle$  es el retardo de grupo diferencial medio. Como consecuencia de la naturaleza estadística de la dispersión por modo de polarización, la magnitud de  $\langle\Delta\tau\rangle$  aumenta con la raíz cuadrada de la longitud de la fibra, o del cable, para longitudes mucho mayores que la longitud de acoplamiento. La dispersión por modo de polarización usualmente se expresa en unidades de ps o ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . La unidad de ps está generalmente reservada para elementos ópticos individuales que tienen una dispersión fija (por ejemplo, un acoplador o un aislador) o secciones cortas de fibra que no presentan acoplamiento de modos.

#### II.4.1.2 Limitaciones de transmisión inducidas

En un sistema de transmisión digital, el principal efecto de la dispersión por modo de polarización es una interferencia entre símbolos. Como una regla práctica aproximada, se produce una penalidad de 1 dB cuando el retardo de grupo diferencial instantáneo total es igual a  $0,3 \cdot T$ , donde  $T$  es el periodo de un bit. Este es el valor aceptado para la penalidad de potencia de sistema tolerable máxima. Los sistemas de velocidad binaria mayor tienen periodos de bits más cortos, por lo que toleran menos retardo de grupo diferencial. Aunque todavía no se ha llegado a una conclusión definitiva al respecto, estudios recientes indican que las fibras y cables ópticos se especificarán de acuerdo con el nivel medio de dispersión por modo de polarización; ésta es una perspectiva reflejada por estudios de sistemas monocanal y multicanal en que se especificará también el nivel medio. Esto corresponde a un retardo de grupo diferencial medio igual a una décima parte de un periodo de un bit, es decir,  $0,1 \cdot T$ . Se ha propuesto una especificación estadística de 0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  para enlaces concatenados de cable de fibra óptica. Cuando se tienen en cuenta los valores estadísticos de Maxwell y los valores probables de otros componentes, la probabilidad de la penalidad a 10 Gbit/s sea superior a 1 dB en un tramo de 400 km es inferior a  $0,4 \times 10^{-7}$ . La degradación por PMD puede por tanto considerarse como una penalidad de potencia del sistema combinada con una probabilidad de que se supere esta penalidad. Un aumento del número de canales aumenta la posibilidad de que al menos uno de ellos sobrepase  $0,3T$ .

Por otra parte, en sistemas de larga distancia, con amplificadores, que emplean pseudoaleatorizadores de polarización (dispositivos que deliberadamente modulan el estado de polarización de un láser de señal, de modo que aparezca como no polarizado), la dispersión por modo de polarización causa un aumento en el grado de polarización de la señal. Esto degrada la calidad de funcionamiento del sistema al producirse interacciones con la pérdida dependiente de la polarización y la quemadura de hueco por polarización (véanse las cláusulas siguientes). En un sistema analógico, la interacción de la dispersión por modo por polarización con el silbido del láser conduce a una distorsión de segundo orden proporcional a la frecuencia de modulación. Se sufre una ulterior penalidad de segundo orden, independiente de la frecuencia de modulación, cuando está presente en el sistema una pérdida adicional dependiente de la polarización.

También se ha demostrado, y se ha mencionado brevemente con anterioridad, que un efecto de segundo orden puede producir un acoplamiento entre la dispersión por modo de polarización y la dispersión cromática. Esto se produce porque el retardo de grupo diferencial depende de la longitud de onda, y lo que es más importante, porque los principales estados de polarización dependen de la longitud de onda. Esto conduce a una contribución estadística a la dispersión cromática. Este es un tema que todavía no se comprende bien y se encuentra en estudio. El uso de dispositivos compensadores de la dispersión cromática también tiene consecuencias poco claras sobre la penalidad PMD. Las consecuencias de una mayor potencia de canal inyectada sobre la PMD también quedan en estudio.

En los sistemas de 1550 nm con amplificación, la PMD es probable que sea un tema de más interés en las fibras de reciente aparición que operan en sistemas PDM de 10 Gbit/s o velocidades superiores, más que en las más modernas fibras G.652, G.653 o G.655.

#### II.4.1.3 Métodos para minimizar la limitación inducida

Dado que el problema tiene su origen en la birrefringencia, una gran parte de los trabajos destinados a reducir los efectos de la distorsión por modo de polarización se ha concentrado en la minimización de la birrefringencia introducida por la fabricación de la fibra o cable. Se ha tomado la precaución de optimizar la producción de la fibra para asegurar la simetría circular geométrica y óptica, y/o para inducir el acoplamiento entre modos de polarización. En la fabricación de los cables ópticos se emplean materiales y procesos que minimizan el esfuerzo residual en la estructura del cable a través del núcleo de la fibra. Se pueden utilizar también estructuras de cable más complejas que introducen un componente circular en la birrefringencia inducida. Mediante un diseño cuidadoso, tal efecto puede contrarrestar la birrefringencia lineal para producir un cable con una dispersión por modo de polarización resultante igual a cero. Típicamente, la dispersión por modo de polarización media de las fibras y cables está comprendida en la gama:

$$0 < \langle \Delta\tau \rangle < 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$$

En otro método para reducir el efecto de la PMD se utiliza el concepto de estados principales introducido anteriormente. En este esquema, se inserta un controlador de la polarización en los extremos de entrada y de salida del sistema. Un divisor de haz de polarización sigue al controlador de polarización de salida y se utiliza para generar una señal de error. El polarizador de salida busca la señal de error, y el polarizador de entrada se ajusta de manera que la señal de error sea mínima. En el punto de ausencia de señal de error, el estado de polarización de entrada es uno de los estados principales del sistema. Mediante esa técnica se ha logrado compensar un retardo con una duración de hasta un periodo de un bit en un sistema de 5 Gbit/s. Se ha aplicado una técnica similar a los sistemas de multiplexación por división de frecuencia (FDM, *frequency-division multiplexing*).

#### II.4.2 Pérdida dependiente de la polarización

##### II.4.2.1 Descripción de los efectos

La pérdida dependiente de la polarización (PDL, *polarization dependent loss*) tiene su origen en el dicroísmo de los componentes ópticos pasivos como aisladores, acopladores, etc., en el trayecto de la señal. Cuando la señal atraviesa el elemento dicroico, el componente de su campo eléctrico que es paralelo al eje de las pérdidas se atenúa. Al igual que en el caso de la dispersión por modo de polarización, los ejes que definen la pérdida dependiente de la polarización están orientados aleatoriamente uno con respecto al otro.

##### II.4.2.2 Limitaciones de transmisión inducidas

Para examinar el efecto de la pérdida dependiente de la polarización se examina una posible configuración de sistema. En los sistemas amplificados, un modo de controlar el amplificador consiste en trabajar a una potencia de señal constante. Tanto la señal como el ruido son afectados por las pérdidas dependientes de la polarización. Sin embargo, como el ruido no está polarizado, la señal y el ruido se ven afectados de manera diferente. El ruido puede resolverse en dos componentes: uno paralelo a la señal y el otro ortogonal a la señal. Puede demostrarse que el efecto combinado de la PDL y la amplificación óptica es siempre aumentar el componente de ruido ortogonal a la señal. Además, la magnitud del componente de ruido ortogonal a la señal varía en función del tiempo a medida que la polarización de la señal cambia debido a la dispersión por modo de polarización. Esto conduce a una reducción de la relación señal/ruido y del valor Q en el receptor. Además, las fluctuaciones en función del tiempo conducen a un debilitamiento de la relación señal/ruido y de la Q del receptor, con la consiguiente degradación de la calidad de funcionamiento del sistema.

En los sistemas analógicos, la pérdida dependiente de la polarización puede interactuar con el silbido del láser y la dispersión por modo de polarización para reducir la calidad de funcionamiento del sistema, en términos de una distorsión de segundo orden compuesta. Como es de esperar, esta degradación varía en función del tiempo y conduce a fluctuaciones, en función del tiempo, en la distorsión de segundo orden compuesta del sistema.

### **II.4.2.3 Métodos para minimizar las limitaciones inducidas**

Al igual que en el caso de la dispersión por modo de polarización, es importante que la pérdida dependiente de la polarización de los componentes ópticos se reduzca al mínimo. Sin embargo, debe señalarse que la influencia de la pérdida dependiente de la polarización sobre la calidad de funcionamiento del sistema aumenta a medida que aumenta el número de amplificadores. En los sistemas submarinos de gran distancia, por ejemplo, las exigencias son muy estrictas porque puede haber varios cientos de amplificadores conectados en serie. En un sistema terrestre de corta distancia, en el que sólo haya unos pocos amplificadores conectados en serie, la influencia de la pérdida dependiente de la polarización en la calidad de funcionamiento del sistema está todavía en estudio.

Se ha demostrado que la modulación de polarización, o pseudoaleatorización, mejora la calidad de funcionamiento del sistema al reducir las fluctuaciones y mejorar la  $Q$  media. Esta técnica se describe con más detalle en II.4.3.3.

## **II.4.3 Quemadura de hueco por polarización**

### **II.4.3.1 Descripción del efecto**

La quemadura de hueco por polarización (PHB, *polarization hole burning*) se produce por una saturación anisótropa creada por una señal de saturación polarizada, inyectada en la fibra de erbio. Esto causa una despoblación selectiva de los estados excitados alineados con el campo polarizado. En consecuencia, la ganancia disponible en la dirección ortogonal es más alta. Aunque los iones de erbio se distribuyen al azar dentro de la matriz de vidrio, en un nivel microscópico el dipolo asociado con el ión de erbio es anisótropo. El efecto de quemadura de hueco por polarización es máximo donde la señal de saturación con polarización lineal está alineada con el eje mayor del dipolo, y se reduce donde el estado de polarización de la señal de saturación es elíptico o circular. Tanto el láser de señal como el láser de bomba contribuyen al efecto total, siendo la ganancia diferencial total la suma de las dos contribuciones. El grado de quemadura de hueco es proporcional al grado de polarización de la señal de saturación. En el caso de una señal de saturación no polarizada, no hay quemadura de hueco. En principio, esto es similar al caso de una señal con polarización circular.

### **II.4.3.2 Limitaciones de transmisión inducidas**

La quemadura de hueco por polarización influye en la calidad de funcionamiento del sistema al hacer que la formación de ruido a lo largo de la cadena de amplificadores sea mayor que la prevista según la teoría lineal simple. Esto es, la relación señal/ruido se reduce por quemadura de hueco por polarización y, al igual que en los casos de dispersión por modo de polarización y pérdida dependiente de la polarización, la  $Q$  medida fluctúa con el tiempo. Como hay dos contribuciones a la quemadura de hueco por polarización, la calidad de funcionamiento del sistema es afectada de dos maneras. El efecto total es proporcional a la saturación de la ganancia y aumenta cuando aumenta el grado de saturación.

Primeramente, considérese el efecto del láser de bomba polarizado. A los fines de esta exposición, puede considerarse que la polarización de la bomba es fija e invariante. La bomba produce una ganancia diferencial en el sentido ortogonal a su eje de polarización. El ruido alineado ortogonalmente a la bomba experimenta una ganancia mayor que el ruido alineado con la bomba. Sin embargo, los ejes de polarización de los láseres de bomba en cada amplificador de una cadena de amplificadores no están correlacionados unos con otros. En consecuencia, el efecto acumulativo es similar a un paseo al azar, y la quemadura de hueco por polarización inducida puede considerarse

como una contribución a la pérdida dependiente de la polarización del amplificador. Por lo tanto, la formación de ruido promediada en cierto número de amplificadores debe ser lineal, como cabe esperar según la teoría básica.

La quemadura de hueco por polarización inducida por el láser de señal es algo diferente. Cuando la luz emitida por el láser de señal se propaga a lo largo del sistema, el ruido polarizado paralelamente al láser de señal, percibirá la misma ganancia que la señal. En cambio, el ruido polarizado ortogonalmente al láser de señal experimentará siempre una ganancia más alta porque será siempre ortogonal al eje de polarización de la señal. Por lo tanto, el ruido total aumentará de una manera no lineal a lo largo de la cadena de amplificadores.

La ganancia diferencial total debida a quemadura de hueco por polarización varía a medida que el estado de polarización de la señal cambia (debido a la dispersión por modo de polarización) a lo largo de la cadena de amplificadores. Varía porque el efecto de quemadura de hueco de la señal está correlacionado con el efecto de la bomba. Cuando los estados de polarización relativos de los láseres de señal y de bomba cambian, la magnitud de la ganancia diferencial cambia. En consecuencia, aunque el ruido total aumenta de manera no lineal a lo largo de la cadena de amplificadores, lo hace de tal manera que el ruido total fluctúa con el tiempo. En consecuencia, como ha explicado anteriormente, la relación señal/ruido se reduce y fluctúa con el tiempo. Por lo tanto, la Q del sistema se reduce y fluctúa con el tiempo.

### **II.4.3.3 Métodos para reducir las limitaciones de transmisión inducidas**

Hay varias maneras de reducir el efecto de quemadura de hueco por polarización. Una posible solución consiste en hacer trabajar los amplificadores en el régimen de señal pequeña, pero esto no siempre es posible y, en muchos casos no es deseable. En la práctica, lo más sencillo es utilizar una señal depolarizada. Esta señal puede crearse de muchas formas, pero lo más usual es generarla por una pseudoaleatorización de la polarización. Mediante un modulador de fase, el estado de polarización se hace variar en función del tiempo entre dos estados ortogonales. La señal parece entonces estar depolarizada.

Se ha demostrado que lo mejor es aplicar la modulación de polarización a una velocidad igual al doble de la velocidad binaria. Esto se debe a que la pérdida dependiente de la polarización en el amplificador convierte la modulación de polarización en modulación de amplitud. Al modular la polarización al doble de la velocidad binaria, las fluctuaciones de la amplitud se producen a una velocidad mayor que la correspondiente a la anchura de banda del detector, por lo que el receptor no las percibe. Con tales técnicas, la calidad de funcionamiento de los sistemas de distancias muy largas se ha mejorado hasta el punto de que la calidad de funcionamiento prevista se obtiene con un alto grado de confianza. La modulación de polarización es actualmente un procedimiento estándar en la implementación de sistemas amplificados transoceánicos.

Sin embargo, en los sistemas amplificados largos, la dispersión por modo de polarización produce una repolarización de la señal, lo que hace posible que la quemadura de hueco por polarización vuelva a degradar la calidad de funcionamiento del sistema. Este efecto pone de manifiesto la naturaleza compleja de la interacción de los fenómenos de polarización en los enlaces amplificados.

## **II.5 Propiedades de dispersión de la fibra**

### **II.5.1 Dispersión cromática**

#### **II.5.1.1 Descripción de los efectos**

La dispersión cromática es predominantemente una limitación de la capacidad de transmisión como resultado de las características espectrales de la fuente de transmisión y de la dispersión cromática de la fibra óptica. Los amplificadores ópticos, por su propia naturaleza, no cambian significativamente la dispersión cromática a menos que se haya incorporado una forma de función de compensación de la dispersión en un subsistema amplificado.

Los amplificadores ópticos producen luz alrededor de la longitud de onda de transmisión de la señal, lo que se conoce por emisión espontánea amplificada (ASE). Usualmente, el componente ASE no está modulado, por lo que no se detecta sincrónicamente con la señal. En muchas implementaciones de amplificadores ópticos, la ASE es bloqueada por un filtro insertado en el amplificador, el trayecto de la señal o el receptor. A menos que la ASE se module junto con la señal de transmisión, su presencia se traduce por ruido óptico, como se describe con más detalle en II.6.1. El espectro más ancho de la ASE no altera la interacción de las características espectrales de la señal con la dispersión cromática de la fibra óptica.

Generalmente, los amplificadores ópticos no alteran significativamente la dispersión cromática global cuando son insertados en un sistema. Hay una pequeña cantidad de dispersión cromática que es añadida por la fibra dopada con tierra rara utilizada como el medio de ganancia activo en un amplificador de fibra óptica, pero esas longitudes de fibra son del orden de decenas de metros a algunos cientos de metros. La dispersión cromática de las fibras dopadas con tierra rara no es significativamente diferente de la de las fibras de G.652, G.653 y G.655. Para sistemas con longitudes de decenas a cientos de kilómetros, esta contribución de dispersión se considera despreciable.

### II.5.1.2 Limitaciones de transmisión inducidas

Generalmente, los amplificadores ópticos no alteran las limitaciones de transmisión debidas a la dispersión cromática. Ciertos efectos no lineales pueden interactuar con la dispersión cromática de la fibra debido a los altos niveles de potencia amplificada de salida. Estos efectos y los métodos para minimizar las limitaciones inducidas se describen con más detalle en II.3.

La presencia de un amplificador óptico no afecta a la dispersión cromática en un sistema. Sin embargo, los OA no permiten la consideración de largos sistemas sin regeneración, en lo que las penalidades del sistema debidas a la dispersión cromática pueden resultar significativas. Por ejemplo, una fuente monofrecuencia con silbido cero tiene una penalidad de potencia óptica a 1 550 nm de hasta aproximadamente 1 dB cuando se cumple la ecuación siguiente<sup>6</sup>:

$$B^2 DL \leq 104,000$$

Donde  $B$  es la velocidad binaria en Gb/s,  $D$  es el coeficiente de dispersión cromática en ps/nm-km, y  $L$  es la longitud total de la ruta en km.

Hay también en estudio ecuaciones similares a ésta en CEI SC86C WG1<sup>7</sup>. La ecuación anterior se aplica a los sistemas lineales, pero puede ser incorrecta cuando se tienen en consideración las no linealidades<sup>8</sup>. Éste es un tema que queda en estudio. Además, la interacción de los efectos no lineales con la dispersión cromática puede producir interacciones que no pueden deshacerse por compensación de dispersión, lo cual tiene implicaciones en la cantidad ideal de dispersión que una fibra debe tener, y en su uniformidad con la longitud de onda.

### II.5.1.3 Minimización de la limitación inducida

La presencia de un amplificador óptico no afecta a la dispersión cromática en un sistema, por lo que no se requieren métodos específicos para minimizar estos efectos. En algunos subsistemas con amplificación óptica, una función de compensación de dispersión pasiva se puede combinar con un amplificador óptico para obtener un subsistema amplificado que añade una cantidad finita de

---

<sup>6</sup> KAMINOW (I.P.), KOCH (T.L.), *ibid.* p. 167.

<sup>7</sup> Draft IEC 61282-5 SC86C WG1, *Guidelines to accommodate and compensate for dispersion in fibre optic systems.*

<sup>8</sup> CHBAT (M.), BIGO (S.), Measurement of the impact of fiber non-linearity on high data rate dispersion managed WDM systems, *Symposium on Optical Fiber Measurements*, NIST (USA), septiembre de 1998.

dispersión cromática al sistema, de signo opuesto al de la fibra del sistema. Con esto se consigue una dispersión cromática del sistema global más baja. Esta función puede ser cubricada con un amplificador óptico para contrarrestar las pérdidas asociadas con la función de compensación de dispersión pasiva. Los cambios de la dispersión cromática en el sistema de transmisión se deben a la presencia de la función de compensación de dispersión pasiva (que se describe con más detalle en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690), y no al amplificador óptico.

NOTA – En las Recomendaciones UIT-T de la serie G.690 se describen otras técnicas para minimizar las limitaciones introducidas por la dispersión cromática.

## **II.6 Otras propiedades relacionadas con los amplificadores ópticos**

### **II.6.1 Acumulación del ruido**

#### **II.6.1.1 Descripción de los efectos**

En los sistemas de transmisión con amplificadores ópticos (OA) conectados en cascada, el ruido ASE generado por un amplificador de fibra óptica sufre un ciclo repetitivo de atenuación y amplificación de la misma manera que la luz de la señal. Como el ruido ASE entrante se amplifica en cada OA y se añade al ruido ASE generado en ese OA, la potencia total del ruido ASE aumenta casi proporcionalmente al número de amplificadores ópticos, y la potencia de la señal disminuye correspondientemente. La potencia del ruido puede ser mayor que la de la señal.

El perfil espectral del ruido ASE también varía a lo largo del sistema. Cuando el ruido ASE del primer OA se introduce en el segundo OA, el perfil de ganancia del segundo OA cambia debido a la potencia de ruido ASE, a través del efecto de saturación de ganancia. De manera similar, el perfil de ganancia efectivo del tercer OA es modificado por el espectro de la potencia de salida del segundo OA. Este efecto se transmite de la misma forma hasta el último OA. El ruido ASE se acumula incluso si se utilizan filtros de banda estrecha en cada OA, porque el ruido existe en bandas de frecuencias que incluyen la frecuencia de la señal.

#### **II.6.1.2 Limitaciones de transmisión inducidas**

La acumulación de ruido ASE afecta a la relación señal/ruido (SNR) del sistema porque la degradación en la SNR de la señal recibida se debe mayormente a un ruido de batido relacionado con la ASE. Tal ruido de batido aumenta linealmente con el número de amplificadores ópticos. Por lo tanto, la tasa de errores empeora para números crecientes de amplificadores ópticos. Además, el ruido se acumula exponencialmente con la magnitud de la ganancia del amplificador.

Como resultado del espectro de ganancia del amplificador óptico, el espectro del ruido ASE tras muchos amplificadores ópticos tiende a formar una punta en una longitud de onda, debido al efecto de autofiltrado, que se describirá en II.6.2. En particular, si se considera una arquitectura de red exclusivamente óptica, en anillo, el ruido ASE se acumula como si hubiese un número infinito de amplificadores ópticos conectados en cascada. Aunque los filtros reducen considerablemente la acumulación del ruido ASE en sistemas filtrados, la ASE dentro de banda aumenta aún con el número de amplificadores ópticos en cascada. Así, la SNR se degrada a medida que aumenta el número de amplificadores ópticos.

#### **II.6.1.3 Minimización del efecto de acumulación de ruido**

La acumulación del ruido ASE puede reducirse disminuyendo el espaciamiento entre amplificadores ópticos (al mismo tiempo que se mantiene la ganancia total igual a la pérdida total del trayecto de transmisión), ya que el ruido ASE se acumula exponencialmente con la magnitud de la ganancia del amplificador. Una de las siguientes técnicas de filtrado puede reducir aún más el efecto no deseado del ruido ASE: utilización de filtros de ruido ASE o utilización del efecto de autofiltrado (método de autofiltrado).

El método de autofiltrado es aplicable a los sistemas que tienen varias decenas de amplificadores ópticos, o más. En este método, la longitud de onda de la señal está alineada con la longitud de onda de autofiltrado, de modo que el ruido ASE recibido en el detector se reduce, exactamente como si se hubiera utilizado un filtro de banda estrecha. Este método es muy eficaz cuando se utiliza con tramos acortados de amplificadores ópticos y amplificadores ópticos de baja ganancia para reducir el ruido ASE inicial.

El método de autofiltrado no es aplicable si se considera una red WDM en anillo, cerrada, exclusivamente óptica. En realidad, la punta resultante en el espectro de ganancia global de los amplificadores ópticos puede degradar considerablemente la calidad de funcionamiento del sistema. En este caso, la acumulación de ruido ASE puede minimizarse con el método del filtro ASE, que se obtiene filtrando los canales WDM no dedicados al nodo de red antes de conmutarlos para desconectarlos del nodo.

En el caso de sistemas con un menor número de amplificadores ópticos, el método de autofiltrado es menos eficaz que el método del filtro ASE. El método del filtro ASE da flexibilidad en la elección de la longitud de onda de la señal y proporciona otras ventajas (véase II.6.2). Debe procederse con cautela al seleccionar las características de los filtros, ya que la banda de paso de los filtros conectados en cascada es más estrecha que la banda de paso de un solo filtro (a menos que tenga una banda de paso espectral rectangular). En los sistemas monocanal de gran distancia podrían utilizarse filtros convencionales con una anchura entre semimáximos (FWHM) del orden de 3 nm.

## **II.6.2 Efecto de autofiltrado**

### **II.6.2.1 Descripción del efecto**

Como resultado de la acumulación del ruido ASE en sistemas no filtrados, el perfil característico del espectro ASE (o del espectro de ganancia global) tiende a presentar una punta. La anchura de raya espectral de punta se reduce con números crecientes de amplificadores ópticos hasta que finalmente se satura después de cierto número de OA. Esto puede dar por resultado anchuras de raya espectral de sólo 2 a 3 nm de ancho, después de varias decenas de amplificadores ópticos. Este efecto se denomina autofiltrado.

El efecto de autofiltrado está determinado por la forma espectral de las secciones transversales de emisión y de absorción y por el grado de inversión de los amplificadores ópticos. La longitud de onda de autofiltrado puede variar cuando varía la composición del vidrio anfitrión, la potencia óptica de entrada, o la pérdida entre amplificadores y su dependencia con respecto a la longitud de onda, la longitud de onda de la bomba y la longitud de la fibra dopada. El efecto de autofiltrado puede considerarse generalmente deseable en sistemas monocanal (como se señala en II.6.1.3), e indeseable en sistemas multicanal.

### **II.6.2.2 Limitaciones de transmisión inducidas**

Para sistemas con un número limitado de amplificadores ópticos, la anchura espectral de la punta de ganancia de autofiltrado permanece ancha y no reduce la acumulación de ruido ASE, incluso con la longitud de onda de la señal ajustada a la longitud de onda de punta. En sistemas con muchos amplificadores ópticos y una punta de ganancia de autofiltrado bien desarrollada, la relación señal/ruido (SNR) puede ser alta, pero podría degradarse si la longitud de onda de la señal se desplaza con respecto a la longitud de onda de autofiltrado. Este desplazamiento puede producirse después de la reconfiguración o reparación de un sistema, como consecuencia de cambios en la pérdida entre amplificadores.

Los sistemas multicanal con amplificadores ópticos en cascada pueden ser afectados por una variación de la potencia entre canales, que aumenta exponencialmente con el número de amplificadores ópticos (el número de amplificadores ópticos es el exponente). Por ejemplo, el ensanche de la potencia para un sistema de cinco canales de ~3 dB tras el primer amplificador de fibra dopada de erbio (EDFA, *erbium doped fibre amplifier*) aumentó a ~15 dB después del sexto

EDFA. En el caso de sistemas multicanal, los cambios en el número total de canales repercuten en cambios espectrales de ganancia que perturban otros canales. La ganancia con dependencia espectral, inducida por saturación, produce también una variación de la ganancia entre los canales.

Por lo tanto, hay que diseñar con cuidado el margen del balance de pérdidas para tener en cuenta esos cambios espectrales en la ganancia del amplificador EDFA tanto en sistemas filtrados como en sistemas no filtrados. Mediante el empleo de filtros ASE se resuelve el problema, como se indica en II.6.2.3.

### **II.6.2.3 Método para tratar el efecto de autofiltrado**

En esta cláusula se examina la utilización de efectos de autofiltrado con OA y filtros de ruido ASE para mejorar la calidad de funcionamiento del sistema.

La utilización del método de autofiltrado para mejorar la relación señal/ruido es más eficaz cuando la longitud de onda de dispersión óptima, la longitud de onda de autofiltrado, y la longitud de onda de la señal coinciden. Este método no requiere el empleo de filtros de ruido ASE, que pueden causar una degradación asociada con pérdidas dependientes de la polarización en el filtro. Esto es particularmente cierto en sistemas submarinos transoceánicos. Por otra parte, el hecho de basarse en el efecto de autofiltrado complica el diseño, la reconfiguración y la reparación del sistema, porque la longitud de onda de la señal tiene siempre que corresponder con la longitud de onda de filtrado, que puede cambiar. Las características espectrales de las ganancias de los amplificadores ópticos y de las pérdidas entre amplificadores deben ser lo más uniformes posible. De lo contrario, la punta de ganancia de autofiltrado puede no hacerse suficientemente estrecha, lo que tiende a reducir la relación señal/ruido, y hace más difícil evitar la saturación inducida por el ruido ASE en los sistemas largos.

Con el fin de evitar esos inconvenientes, se puede utilizar el método del filtro ASE para reducir la acumulación de ASE, con la banda de paso del filtro ajustada a la frecuencia de la señal. Pueden obtenerse en el comercio filtros de banda estrecha con una FWHM inferior a 1 nm. La acumulación de ruido ASE se minimiza entonces, y el sistema ya no estará sujeto a restricciones tales como las impuestas por las complejidades en su diseño, reconfiguración y reparación, ni a las exigencias de tramos cortos para los amplificadores ópticos y una calidad de funcionamiento uniforme de cada amplificador óptico.

En sistema multicanal, el ensanche de la potencia entre canales debido al efecto de autofiltrado puede evitarse amplificando cada canal en un amplificador óptico físicamente separado. Este método, sin embargo, exige un demultiplexor costoso, amplificadores ópticos separados, y un multiplexor. Una alternativa consiste en proporcionar ecualización de potencia de canal óptico en cada nodo de red, incluso si este método exige un dispositivo electrónico de control adicional y un balance de potencia más crítico a través de la red. Otro método consiste en utilizar un amplificador óptico menos saturado o menos intensamente invertido, porque con esto se consigue que la atenuación sea menos dependiente de la longitud de onda y, por consiguiente, una reducción del ensanche de potencia entre canales. En una serie de amplificadores EDFA intensamente invertidos, sin embargo, la ASE aumenta con el número de EDFA en la primera punta de ganancia a ~1530 nm, y hay que suprimirla con un filtro que elimine las longitudes de onda cortas. Además, el método de preacentuación minimiza las diferencias de SNR para todos los canales ajustando las potencias ópticas de transmisor para cada canal en base a la información de señal recibida del terminal en el extremo.

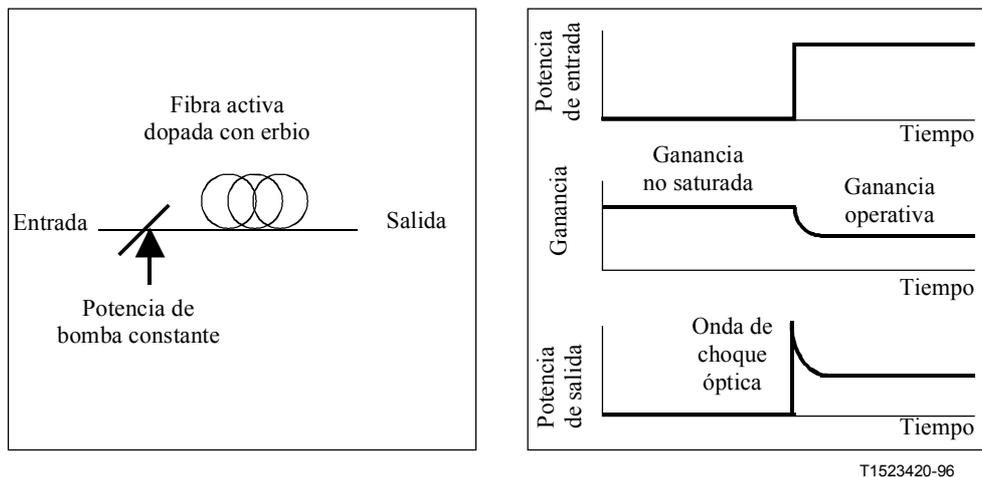
## **II.6.3 Generación de ondas de choque ópticas**

### **II.6.3.1 Descripción de los efectos**

Cuando la potencia de entrada de la señal óptica aumenta rápidamente en amplificadores EDFA suficientemente bombeados, se producen ondas de choque ópticas debido a la dinámica de baja ganancia de los EDFA. La onda de choque óptica principal probablemente provendrá, sobre todo,

de EDFA controlados en su potencia de salida. Esto sucede porque la potencia de bomba para esos EDFA aumenta cuando disminuye la potencia de entrada óptica, y la onda de choque óptica tiende a producirse cuando la potencia de entrada se recupera repentinamente. La figura II.6-1 ilustra la generación de una onda de choque óptica.

Cuando se reconecta un conector convencional se obtiene un tiempo de subida (10-90%) de la potencia óptica de  $\sim 0,3$  ms, que es lo suficientemente corto para provocar una onda de choque óptica. Sin embargo, si el EDFA ya está ópticamente saturado, un rápido aumento adicional en la potencia de entrada óptica puede no provocar ondas de choque ópticas apreciables.



T1523420-96

**Figura II.6-1/G.663 – Ejemplo de generación de una onda de choque óptica**

### II.6.3.2 Limitaciones de transmisión inducidas

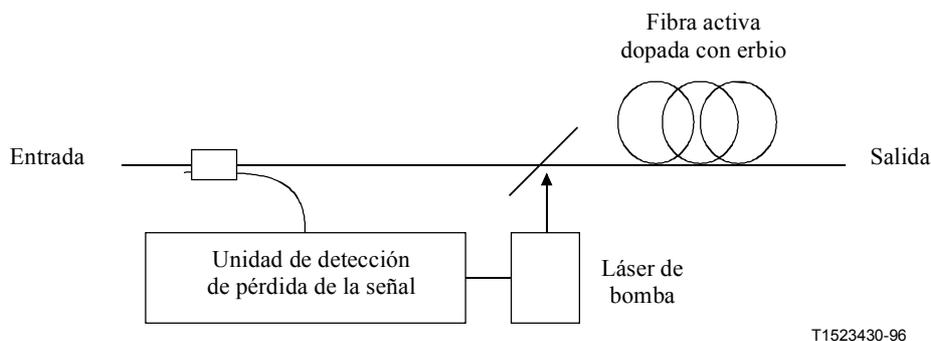
En cadenas de amplificadores EDFA conectados en serie, en condiciones particulares, la potencia de punta de una onda de choque óptica puede llegar a ser de varios vatios, lo que posiblemente dañe los convertidores O/E y los preamplificadores eléctricos, así como los componentes ópticos incluidas las caras terminales de los conectores ópticos. Las ondas de choque pueden también causar daño al ojo humano. Se ha observado que el umbral para daños causados por la cara terminal de un conector óptico contaminado corresponde a niveles de potencia óptica de unos 20 dBm.

### II.6.3.3 Minimización del efecto de generación de ondas de choque ópticas

Para la prevención de las ondas de choque ópticas pueden considerarse las siguientes acciones:

- 1) Reducir o cerrar la potencia de bomba pasada a los EDFA cuando se detecta la pérdida de la señal de entrada.
- 2) Restablecer el nivel de potencia de bomba en los EDFA cuando se detecta la recuperación de la señal de entrada. A este respecto, la reactivación del nivel de potencia del láser de bomba a su valor nominal debe efectuarse gradualmente y debe definirse el correspondiente tiempo mínimo de reactivación.

La figura II.6-2 muestra un ejemplo de una configuración que permite prevenir las ondas de choque ópticas, en la cual una unidad de detección de la pérdida de la señal controla el estado activado/desactivado del láser de bomba. En caso de producirse una pérdida de la señal durante un tiempo justamente lo suficientemente más corto que el de la dinámica de ganancia del EDFA, por ejemplo de menos de 1 ms, la potencia del láser de bomba debe mantenerse sin modificación.



**Figura II.6-2/G.663 – Ejemplo de un sistema de prevención de ondas de choque ópticas**

## II.6.4 No linealidad inducida por la saturación en los amplificadores ópticos de semiconductores

### II.6.4.1 Descripción de los efectos

El amplificador óptico de semiconductores (SOA, *semiconductor optical amplifier*) sufre de un tipo peculiar de comportamiento no lineal, relacionado con la acción combinada de la dinámica de ganancia rápida de los SOA y del acoplamiento de amplitud-fase típico de los medios de amplificación de semiconductores.

Este fenómeno, denominado universalmente no linealidad inducida por la saturación, puede afectar a la calidad de funcionamiento de los sistemas de telecomunicación que utilizan amplificadores SOA debido a que el tiempo de vida de la portadora  $\tau_c$  (0,2-0,5 ns) del SOA es comparable con la anchura de los impulsos ópticos utilizados para la transmisión. En realidad, la ganancia del SOA puede saturarse tan rápidamente que el frente anterior y el frente posterior del impulso óptico experimentan una ganancia diferente. La evolución temporal de la saturación depende en general del perfil del temporal del impulso, mientras que el grado de compresión de ganancia depende de la energía del impulso, en comparación con la energía de saturación del SOA ( $E_{sat} = P_{sat} \tau_c$ , donde un valor típico para la potencia de saturación intrínseca del SOA es 30 mW, que no ha de confundirse con la potencia de saturación a 3 dB, que es de 10-15 mW). Este comportamiento se rige por la ecuación siguiente:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma_0 - \Gamma}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{E_{sat}} \{\exp(\Gamma) - 1\}$$

donde  $\Gamma(t)$  es el coeficiente de ganancia integrado en toda la longitud de SOA,  $\Gamma_0$  es la ganancia integrada no saturada del SOA y  $P_{in}(t)$  es el perfil temporal de la señal óptica. La ganancia del SOA viene dada por  $G(t) = \exp[\Gamma(t)]$ .

Por tanto, la señal óptica que sale del amplificador es distorsionada por la ganancia diferencial, dado que  $P_{out}(t) = G(t) P_{in}(t)$ . Este comportamiento puede causar efectos patrón en la frecuencia de datos ópticos, ya que la ganancia experimentada por un impulso no varía dependiendo de la presencia de 'marcas' o 'espacios' lógicos en los bits precedentes. Es importante advertir que este fenómeno puede aparecer en todo tipo de amplificador láser (incluso los EDFA), pero en el SOA la escala de tiempo de saturación de ganancia es comparable con la duración temporal del bit óptico.

El aspecto peculiar de los SOA es que el impulso amplificado experimenta también silbidos y es desplazado en frecuencia, debido al acoplamiento de amplitud-fase típico de los medios semiconductores. Esto es debido a que la potencia óptica del impulso que entra en el SOA reduce la

población de portadoras y modifica así el índice de refracción de la cavidad semiconductor. Como consecuencia, la fase del impulso varía dinámicamente de la manera siguiente:

$$\phi_{out}(t) = \phi_{in}(t) - \frac{1}{2} \beta_c \Gamma(t)$$

$\beta_c$  es el factor de realce de línea, el parámetro que mide la intensidad del acoplamiento de amplitud-fase (ordinariamente 4-6 para los SOA). El desplazamiento de frecuencia instantáneo se obtiene diferenciando a la ecuación anterior con respecto al tiempo y teniendo en cuenta la ecuación de  $\Gamma(t)$ . Este fenómeno se denomina *automodulación de fase inducida por saturación* (SI-SPM, *saturation induced self-phase modulation*)<sup>9</sup>. SI-SPM puede ser perjudicial cuando se combina con la dispersión cromática de la fibra.

#### II.6.4.2 Limitaciones de transmisión inducidas

Los sistemas ópticos punto a multipunto monocanal convencionales que utilizan transmisores sin retorno a cero (NRZ) son degradados predominantemente por efectos patrón y, en menor medida, por el silbido de impulsos inducido por los SOA<sup>10</sup>. Los efectos patrón pueden también afectar a la propagación de impulsos RZ; en este caso, si la potencia del impulso es suficientemente alta, el desplazamiento de frecuencia del impulso puede también desempeñar un papel relevante. Cuando la dispersión de la fibra a la longitud de onda de funcionamiento es distinta de cero, el desplazamiento de frecuencia se convierte en fluctuación de tiempo, que puede destruir la secuencia de bits original, imponiendo así limitaciones al alcance del sistema. Este efecto puede ser particularmente perjudicial cuando se utilizan técnicas de transmisión no lineales, tales como solitones ópticos, porque en los solitones la energía de los impulsos debe mantenerse alta y la dispersión debe ser distinta de cero (anómala)<sup>10,11</sup>.

#### II.6.4.3 Métodos para minimizar las limitaciones inducidas

La no linealidad inducida por la saturación es inherente al SOA. Puede evitarse haciendo funcionar el SOA en régimen lineal o implementando técnicas de fijación. En el primer caso debe prestarse atención a la acumulación de ASE a lo largo del enlace óptico; el uso de un filtro óptico después de cada amplificador puede ser útil para evitar efectos de saturación de ganancia estática debidos a la acumulación de ASE. Por otra parte, la fijación de ganancia reduce la ganancia disponible. Manteniendo baja la potencia media (1-5 mW) y la dispersión próxima a cero, se ha demostrado experimentalmente la buena calidad de funcionamiento de los sistemas NRZ y RZ hasta 400 km<sup>11,12</sup>. Las degradaciones debidas a la SI-SPM en los sistemas de solitones de larga distancia pueden aliviarse utilizando técnicas de filtrado adecuadas (filtros ajustables)<sup>11</sup>.

### APÉNDICE III

#### Parámetros del preamplificador

Este apéndice contiene la definición de los parámetros característicos propios del preamplificador que permiten, mediante el empleo de fórmulas ordinarias, obtener la potencia de entrada mínima que garantiza una BER =  $10^{-12}$  en el equipo receptor terminal.

<sup>9</sup> AGRAWAL (G.P.), OLSSON (N.A.), *Quantum Electron.*, Volume 25, pp. 2297-2306, 1989.

<sup>10</sup> SETTEMBRE (M.) *et al.*, *J. Wavelength Technol.*, Volume 15, pp. 962-967, 1997.

<sup>11</sup> MECOZZI (A.), *Optics Letters*, Volume 20, pp. 1616-1618, 1995.

<sup>12</sup> REID (J.J.E.) *et al.*, Proc. of ECOC'98, Volume 1, pp. 567-568, Madrid (España), 1998.

En base a consideraciones teóricas y pruebas experimentales relacionadas con el ruido de amplificador óptico, los parámetros característicos propios del preamplificador que permiten obtener la potencia de entrada mínima que garantiza una tasa de errores de bit (BER) =  $10^{-12}$  en el equipo receptor terminal (TRE, *terminal receiver equipment*) son:

- máxima ganancia de señal pequeña "GM<sub>ax</sub>" (UIT-T G.661 [6]);
- ganancia de señal pequeña "G" (UIT-T G.661);
- figura de ruido señal-emisión espontánea "NF<sub>s-sp</sub>" (UIT-T G.661);
- figura de ruido "NF" (UIT-T G.661);
- anchura de banda óptica equivalente del ruido de batido espontánea espontánea (B<sub>sp-sp</sub>) (UIT-T G.661).

El ruido de amplificador óptico (excluido el ruido de reflexión interno) está determinado por dos componentes, además de la contribución del ruido de granalla de la señal y el ruido de emisión espontánea. Estos dos componentes principales son el ruido de batido señal espontánea y el ruido de batido espontánea espontánea.

NOTA – Los términos de ruido de salida pueden dividirse en cinco categorías:

- a) ruido de granalla de la señal de entrada amplificada;
- b) ruido de granalla de la emisión espontánea amplificada (ASE);
- c) ruido de batido señal espontánea procedente de la señal mezclada con ASE;
- d) ruido de batido espontánea espontánea procedente de la ASE mezclada consigo misma;
- e) ruido de reflexión.

Cada una de las contribuciones de ruido puede expresarse en forma de un factor de ruido parcial "F", donde la figura de ruido total es la suma de todas las contribuciones individuales. El factor de ruido total (en unidades lineales, no en unidades logarítmicas) es:

$$F_{total} = F_{shot-sig} + F_{shot-ASE} + F_{sig-sp} + F_{sp-sp} + F_{refl}$$

Esta ecuación puede utilizarse tanto para evaluar el factor de ruido obtenido de mediciones ópticas, como para estimar la influencia de parámetros tales como ganancia, reflexiones, anchura de la raya espectral de la fuente y frecuencia de la banda de base. Representa un modelo completo del factor de ruido de un amplificador óptico.

En estas condiciones es posible obtener, mediante fórmulas ordinarias, la siguiente expresión para el factor de ruido total:

$$F = F_{s-sp} \left( 1 + \frac{h\nu n_{sp} B_{sp-sp}}{2P_{in}} \frac{G-1}{G} \right)$$

donde:

$$F_{s-sp} = 2n_{sp} \left( \frac{G-1}{G} \right) \text{ y } n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

$h\nu$  es la energía de fotón de la señal,  $P_{in}$  es la potencia óptica a la entrada del preamplificador,  $n_2$  es la densidad de población del nivel excitado,  $n_1$  es la densidad de población del nivel de base, y  $G$  y  $B_{sp-sp}$  se han definido antes. Es evidente que  $F$  se reduce al reducirse el valor  $B_{sp-sp}$ , pero, por razones de compatibilidad con la actual UIT-T G.957 [14], se ha limitado a valores del orden de 1 nm ( $\approx 120$  GHz). La SNR en el equipo receptor terminal viene dada por la fórmula:

$$SNR = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F + \frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}}$$

donde  $m$  es la profundidad de modulación  $\left(1 - \frac{1}{ExtRatio}\right)$ ,  $B$  es la anchura de banda eléctrica del receptor (proporcional a la velocidad binaria) y  $N_{R_x}$  es el ruido equivalente del equipo receptor terminal (TRE). Mediante estas dos últimas fórmulas es posible obtener la potencia de entrada mínima del preamplificador para  $BER = 10^{-12}$  en el TRE. Es evidente que el preamplificador óptimo debe tener una ganancia suficientemente alta para que la contribución de ruido del TRE sea insignificante en comparación con la del preamplificador. El valor de la SNR para una BER mejor que  $10^{-12}$  debe mantenerse en toda la gama de potencias de entrada. El preamplificador se caracterizará, desde el punto de vista del ruido, definiendo una ganancia de señal pequeña,  $G$ , una contribución señal-emisión espontánea al factor de ruido ( $F_{s-sp}$ ) y una anchura de banda equivalente de ruido de batido espontánea ( $B_{sp-sp}$ ). Es importante verificar la figura de ruido total del preamplificador para estar seguro de que ninguna contribución del ruido de reflexión interno está afectando al preamplificador.

### Ejemplo

#### **Cálculo de la relación señal/ruido (SNR) para un receptor equipado con un preamplificador capaz de asegurar una BER = $10^{-12}$ en un equipo receptor terminal de la jerarquía digital síncrona a 2,5 GHz**

Sobre la base de las anteriores consideraciones y de los parámetros antes definidos, la SNR a la salida del preamplificador puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$SNR_{(PA)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F}$$

En esta fórmula no se ha tenido en cuenta la contribución de ruido de granalla por ser despreciable en comparación con los componentes de ruido de batido, habiéndose definido una ganancia de señal pequeña de 20 dB. La fórmula supone una aproximación de caso más desfavorable en la que el ruido en los ceros se considera igual al ruido en los unos (los ceros no presentan un ruido de batido señal espontánea) y el ruido de salida se considera gaussiano.

Mediante la anterior fórmula es fácil obtener la sensibilidad del preamplificador.

La sensibilidad global del receptor compuesto (preamplificador + equipo receptor terminal) se obtiene añadiendo al denominador de la fórmula precedente el término  $\frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}$ , en el que  $N_{R_x}$  es el ruido equivalente del equipo receptor terminal.

$$SNR_{(PA+TRE)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F + \frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}}$$

Sin embargo, es evidente que el término  $\frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}$  es despreciable en el caso de valores suficientemente altos de la ganancia  $G$ . Teniendo en cuenta la compatibilidad de acuerdo con UIT-T G.957 [14] para un equipo receptor terminal de 2,5 Gbit/s con una sensibilidad mínima de -26 dBm para una BER =  $10^{-12}$  y los parámetros característicos del preamplificador antes considerado:

- Máxima ganancia de señal pequeña 24 dB
- Ganancia de señal pequeña ( $G$ )  $\geq 20$  dB
- Figura de ruido señal espontánea ( $N_{s-sp}$ )  $\leq 5,5$  dB
- Banda disponible de longitudes de onda de la señal ( $B_{s-sp}$ ) 1 nm (0,8 – 1,2)
- Relación señal/ruido (SNR) para BER =  $10^{-12}$  en el TRE 3 dB
- Tasa de extinción de la fuente óptica 8,2 dB
- Anchura de la banda de paso del TRE (la anchura de banda eléctrica del receptor, proporcional al valor de la velocidad binaria)  $B = f_{Nyquist} (1 + \ell)$ ; donde  $f_{Nyquist} = (\text{velocidad binaria})/2 = (2,5 \text{ Gbit/s})/2$  y  $\ell$  es el coeficiente de caída del canal de Nyquist, variable entre 0 y 1
 

{	Valor mínimo = $\frac{2,5}{2}$ GHz
	Valor mínimo = $\frac{2,5}{2} \cdot 1,5$ GHz
	Valor máximo = 2,5 GHz

Es fácil establecer que, para valores de la señal de receptor de -16 dBm, la contribución de ruido del TRE puede considerarse despreciable. Con los valores de parámetros antes considerados, se obtiene una potencia de entrada mínima de -36 dBm para una BER =  $10^{-12}$  en el TRE. Puede considerarse que este valor incluye el margen debido a la hipótesis de caso más desfavorable utilizada en los cálculos. Consecuentemente con el valor de ganancia máxima, el nivel de la señal de salida del preamplificador será de -12 dBm, lo que permite considerar la sensibilidad del preamplificador como la del receptor compuesto (PA + TRE). Considerando para el PA condiciones operativas de ganancia mínima (ganancia de señal pequeña,  $G = 20$  dB), la potencia óptica media a la salida del PA será de -16 dBm, lo que permite también en este caso considerar la sensibilidad del PA como la del receptor compuesto (PA + TRE).

Utilizando los anteriores valores y fórmulas es posible también determinar, por cálculo, que se puede obtener a la salida del preamplificador una relación señal/ruido mejor que 13 dB con un nivel de potencia de entrada al preamplificador de tan sólo -43 dB, cuando se utiliza una configuración sin amplificadores de línea.

## APÉNDICE IV

### **Aspectos de operaciones, administración y mantenimiento de los amplificadores ópticos**

A continuación se indican posibles aspectos de operaciones, administración y mantenimiento (OAM) genéricos relativos a los subsistemas de amplificador óptico (OA).

#### **IV.1 Subsistemas OA**

Puesto que los transmisores y los receptores con amplificación óptica (OAT y OAR) no se diferencian de los transmisores y receptores convencionales desde el punto de vista del

mantenimiento, los correspondientes aspectos de operación, administración y mantenimiento (OAM) son idénticos a los de los transmisores y receptores especificados en UIT-T G.783 [12].

## IV.2 Dispositivos OA

Las siguientes condiciones de OAM se pueden presentar como información al sistema de gestión que interviene:

- Pérdida de la señal (LOS, *loss of signal*) del amplificador óptico, indicativa de una posible pérdida de la señal de entrada (defecto de transmisión).
- Fallo del amplificador óptico, indicativa de que un amplificador óptico ya no puede realizar su función básica de amplificación óptica (defecto del equipo).
- OA en condiciones de cerrado (estado de salida).

Se distingue entre estas condiciones para proporcionar al usuario información sobre el equipo y la planta de cable. Además, los amplificadores ópticos pueden estar dotados de una señal de control "habilitación/inhabilitación de salida" para poder limitar los niveles de potencia óptica que pudieran necesitarse para satisfacer exigencias de seguridad óptica.

NOTA – La utilización de otras informaciones sobre las causas de fallos del equipo, como "degradación de amplificador óptico" o "pérdida de canal de supervisión óptica" (cuando se emplean amplificadores de línea), queda en estudio.



## **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, facsimil y circuitos arrendados internacionales
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos y comunicación entre sistemas abiertos
Serie Y	Infraestructura mundial de la información y aspectos del protocolo Internet
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación