

# UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

# G.696.1

(07/2005)

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

---

**Aplicaciones de la multiplexación por división  
en longitud de onda densa en el intradominio  
longitudinalmente compatibles**

Recomendación UIT-T G.696.1

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 SATELITE 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
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
CALIDAD DE SERVICIO Y DE TRANSMISIÓN – ASPECTOS GENÉRICOS Y ASPECTOS RELACIONADOS AL USUARIO	G.1000–G.1999
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.6000–G.6999
DATOS SOBRE CAPA DE TRANSPORTE – ASPECTOS GENÉRICOS	G.7000–G.7999
ASPECTOS RELATIVOS AL PROTOCOLO ETHERNET SOBRE LA CAPA DE TRANSPORTE	G.8000–G.8999
REDES DE ACCESO	G.9000–G.9999

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

## **Recomendación UIT-T G.696.1**

### **Aplicaciones de la multiplexación por división en longitud de onda densa en el intradominio longitudinalmente compatibles**

#### **Resumen**

La presente Recomendación contiene especificaciones de capa física para aplicaciones de redes ópticas con multiplexación por división en longitud de onda densa (DWDM) en el intradominio (IaD). Las aplicaciones longitudinalmente compatibles dentro de un dominio administrativo único se describen para sistemas de líneas multicanales, punto a punto, con o sin amplificadores de línea. Los códigos de aplicación que figuran en esta Recomendación proporcionan un conjunto de categorías para los sistemas de transmisión con multiplexación por división en longitud de onda densa (DWDM) y enlaces por fibra óptica. El principal objetivo es permitir a los diferentes fabricantes diseñar equipos de transmisión DWDM para enlaces por fibra óptica conformes con esta Recomendación.

#### **Orígenes**

La Recomendación UIT-T G.696.1 fue aprobada el 14 de julio de 2005 por la Comisión de Estudio 15 (2005-2008) del UIT-T por el procedimiento de la Recomendación UIT-T A.8.

## PREFACIO

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

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

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

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

## NOTA

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

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

## PROPIEDAD INTELECTUAL

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

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

© UIT 2005

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

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
1 Alcance .....	1
2 Referencias .....	1
2.1 Referencias normativas .....	1
2.2 Referencias informativas .....	2
3 Términos y definiciones .....	2
3.1 Definiciones.....	2
3.2 Términos definidos en otras Recomendaciones .....	3
4 Abreviaturas, siglas o acrónimos .....	3
5 Clasificación de interfaces ópticas.....	4
5.1 Aplicaciones .....	4
5.2 Configuraciones de referencia .....	4
5.3 Nomenclatura .....	5
6 Compatibilidad longitudinal .....	6
7 Parámetros .....	6
7.1 Atenuación máxima y mínima por tramo .....	7
7.2 Tipos de fibras .....	7
7.3 Gama de longitud de onda de funcionamiento .....	7
7.4 Dispersión cromática mínima y máxima por tramo .....	8
7.5 Coeficiente de dispersión cromática local mínima.....	9
7.6 Desviación de la dispersión cromática máxima .....	9
7.7 Retardo diferencial de grupo máximo .....	9
7.8 Pérdida de retorno óptica mínima en MPI-S <sub>M</sub> o S <sub>M</sub> .....	10
7.9 Reflectancia discreta máxima entre MPI-S <sub>M</sub> y MPI-R <sub>M</sub> .....	11
8 Consideraciones sobre seguridad óptica.....	11
Apéndice I – Límites teóricos y consideraciones sobre el diseño de sistemas con multiplexación por división en longitud de onda densa .....	12
I.1 La tecnología necesaria y sus límites .....	12
I.2 Otros efectos que limitan la distancia de transmisión .....	15
I.3 Técnicas utilizadas para atenuar las degradaciones.....	17
I.4 Ejemplo práctico.....	19
BIBLIOGRAFÍA .....	20



## Recomendación UIT-T G.696.1

### Aplicaciones de la multiplexación por división en longitud de onda densa en el intradominio longitudinalmente compatibles

#### 1 Alcance

La presente Recomendación contiene especificaciones de capa física para aplicaciones de redes ópticas DWDM en el intradominio (IaD). Estas especificaciones se refieren a sistemas de línea multicanales, punto a punto, con o sin amplificadores de línea. Su finalidad es ofrecer aplicaciones longitudinalmente compatibles dentro de un dominio administrativo. El principal objetivo es permitir a los diferentes fabricantes suministrar equipos de transmisión para enlaces por fibra óptica conformes a esta Recomendación.

A fin de proporcionar un marco para las especificaciones de la aplicación IaD, esta Recomendación incluye un modelo de referencia genérico para las aplicaciones de capa física. Las especificaciones se organizan de conformidad con los códigos de aplicación, que tienen en cuenta diferentes parámetros como las gamas de longitud de onda de funcionamiento de los amplificadores ópticos, las combinaciones de cómputos de canales, las clases de cliente, las distancias de los tramos, los tipos de fibras y las configuraciones de los sistemas.

En esta versión inicial de la Recomendación se hace hincapié en las aplicaciones del intradominio, sin la intervención de elementos de conmutación ópticos. Se espera que en futuras versiones, o en otras nuevas Recomendaciones, se puedan abordar configuraciones de capa física más complejas y se permita soportar un nivel más elevado de compatibilidad. Para esas aplicaciones, probablemente se requerirán diversos parámetros además de los especificados para una configuración punto a punto.

En la presente Recomendación se supone que las señales ópticas afluentes transportadas por los canales ópticos son digitales y no analógicas. Las especificaciones para sistemas que permitan el transporte de señales ópticas analógicas afluentes quedan en estudio.

#### 2 Referencias

##### 2.1 Referencias normativas

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. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

- Recomendación UIT-T G.650.2 (2005), *Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables monomodo.*
- Recomendación UIT-T G.652 (2005), *Características de las fibras y cables ópticos monomodo.*
- Recomendación UIT-T G.653 (2003), *Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada.*
- Recomendación UIT-T G.654 (2004), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*

- Recomendación UIT-T G.655 (2003), *Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula*.
- Recomendación UIT-T G.663 (2000), *Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos*, más Enmienda 1 (2003): *Enmiendas al Apéndice II*.
- Recomendación UIT-T G.664 (2003), *Procedimientos y requisitos de seguridad óptica para sistemas ópticos de transporte*, más Enmienda 1 (2005).
- Recomendación UIT-T G.665 (2005), *Características generales de los amplificadores Raman y de los subsistemas con amplificación Raman*.
- Recomendación UIT-T G.691 (2003), *Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos*, más Enmienda 1 (2005).
- Recomendación UIT-T G.707/Y.1322 (2003), *Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona*, más Enmienda 1 (2004) y Corrigendum 1 (2004).
- Recomendación UIT-T G.709/Y.1331 (2003), *Interfaces para la red óptica de transporte*, más Enmienda 1 (2003).
- Recomendación UIT-T G.872 (2001), *Arquitectura de las redes ópticas de transporte*, más Enmienda 1 (2003) y Corrigendum 1 (2005).
- Recomendación UIT-T G.957 (1999), *Interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona*, más Enmienda 1 (2003) y Enmienda 2 (2005).
- Recomendación UIT-T G.959.1 (2003), *Interfaces de capa física de red de transporte óptica*.
- CEI 60825-1 (2001), *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*.
- CEI 60825-2 (2005), *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*.
- CEI/TR 61292-4 (2004) *Optical amplifiers – Part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers*.

## 2.2 Referencias informativas

- Recomendación UIT-T G.975.1 (2004), *Corrección de errores en recepción para sistemas submarinos con multiplexación por división en longitud de onda densa de alta velocidad binaria*.
- Recomendaciones de la serie G del UIT-T – Suplemento 39 (2003), *Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos*.

## 3 Términos y definiciones

### 3.1 Definiciones

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

**3.1.1 clase de cliente:** La clase de cliente se refiere a una clase de velocidad binaria de la señal del cliente de una señal afluente óptica que se coloca en un canal óptico para su transporte por la red óptica. En el contexto de la presente Recomendación, la velocidad binaria de cliente es la velocidad binaria de una señal digital continua antes de que se le añadan bytes FEC adicionales. En el caso de

una señal conforme a la Rec. UIT-T G.707/Y.1322, será la velocidad de la unidad k de datos de canal óptico (ODUk).

**3.1.2 clase de cliente 1,25G:** Se aplica a una señal digital continua con una velocidad binaria de cliente comprendida entre 622 Mbit/s nominales y 1,25 Gbit/s nominales. La clase de cliente 1,25G comprende una señal con velocidad binaria STM-4 que se ajusta a la Rec. UIT-T G.707/Y.1322.

**3.1.3 clase de cliente 2,5G:** Se aplica a una señal digital continua con una velocidad binaria de cliente comprendida entre 622 Mbit/s nominales y 2,5 Gbit/s nominales. La clase de cliente 2,5G incluye una señal con velocidad binaria STM-16, de conformidad con la Rec. UIT-T G.707/Y.1322, y velocidad binaria ODU1 que se ajusta a la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

**3.1.4 clase de cliente 10G:** Se aplica a una señal digital continua con una velocidad binaria de cliente comprendida entre 2,4 Gbit/s nominales y 10,5 Gbit/s nominales. La clase de cliente 10G incluye una señal con velocidad binaria STM-64, de conformidad con la Rec. UIT-T G.707/Y.1322, y velocidad binaria ODU2, de conformidad con la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

**3.1.5 clase de cliente 40G:** Se aplica a una señal digital continua con una velocidad binaria de cliente comprendida entre 9,9 Gbit/s nominales y 42 Gbit/s nominales. La clase de cliente 40G incluye una señal con velocidad binaria STM-256, de conformidad con la Rec. UIT-T G.707/Y.1322, y velocidad binaria ODU3, de conformidad con la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

## 3.2 Términos definidos en otras Recomendaciones

En la presente Recomendación se utilizan los siguientes términos definidos en la Rec. UIT-T G.872:

- interfaz intradominio IaDI (*intra-domain interface*);
- regeneración 3R (*3R regeneration*).

En la presente Recomendación se utiliza el siguiente término definido en la Rec. UIT-T G.709/Y.1331:

- unidad k de datos de canal óptico (ODUk) (*optical channel data unit-k*)

En la presente Recomendación se utiliza el siguiente término definido en la Rec. UIT-T G.959.1:

- Señal afluyente óptica (*optical tributary signal*).

## 4 Abreviaturas, siglas o acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes abreviaturas, siglas o acrónimos.

3R	(Regeneración) reamplificación, reconformación, retemporización (( <i>regeneration</i> ) <i>re-amplification, reshaping and retiming</i> )
ASE	Emisión espontánea amplificada ( <i>amplified spontaneous emission</i> )
BER	Tasa de errores en los bits ( <i>bit error ratio</i> )
DCM	Módulo de compensación de dispersión ( <i>dispersion compensation module</i> )
DEMUX	Demultiplexor ( <i>demultiplexer</i> )
DGD	Retardo diferencial de grupo ( <i>differential group delay</i> )
DRA	Amplificación tipo Raman distribuida ( <i>distributed Raman amplification</i> )
DWDM	Multiplexación por división en longitud de onda densa ( <i>dense WDM</i> )
EDFA	Amplificador de fibra dopada con erbio ( <i>erbium doped fibre amplifier</i> )
FEC	Corrección de errores en recepción ( <i>forward error correction</i> )

FWM	Mezcla de cuatro ondas ( <i>four wave mixing</i> )
IaD	Intradominio ( <i>intra-domain</i> )
IaDI	Interfaz intradominio ( <i>intra-domain interface</i> )
MPI	Interfaz del trayecto principal ( <i>main path interface</i> )
MUX	Multiplexor ( <i>multiplexer</i> )
NCG	Ganancia neta de codificación ( <i>net coding gain</i> )
NRZ	Sin retorno a cero ( <i>non-return to zero</i> )
OA	Amplificador óptico ( <i>optical amplifier</i> )
ODU <sub>k</sub>	Unidad k de datos de canal óptico (k = 1, 2 ó 3) ( <i>optical channel data unit k (k = 1, 2 or 3)</i> )
OPM	Monitor de potencia óptica ( <i>optical power monitor</i> )
OSA	Analizador de espectro óptico ( <i>optical spectrum analyzer</i> )
OSNR	Relación señal óptica/ruido ( <i>optical signal-to-noise ratio</i> )
PDG	Ganancia dependiente de la polarización ( <i>polarization-dependent gain</i> )
PDL	Pérdida dependiente de la polarización ( <i>polarization-dependent loss</i> )
PMD	Dispersión por modo de polarización ( <i>polarization mode dispersion</i> )
PMD <sub>Q</sub>	Parámetro estadístico para enlaces de tipo PMD ( <i>statistical parameter for link PMD</i> )
RZ	Retorno a cero ( <i>return to zero</i> )
SPM	Automodulación de fase ( <i>self-phase modulation</i> )
VOA	Atenuador óptico variable ( <i>variable optical attenuator</i> )
WDM	Multiplexación por división en longitud de onda ( <i>wavelength division multiplexing</i> )
XPM	Tansmodulación de fase ( <i>cross-phase modulation</i> )

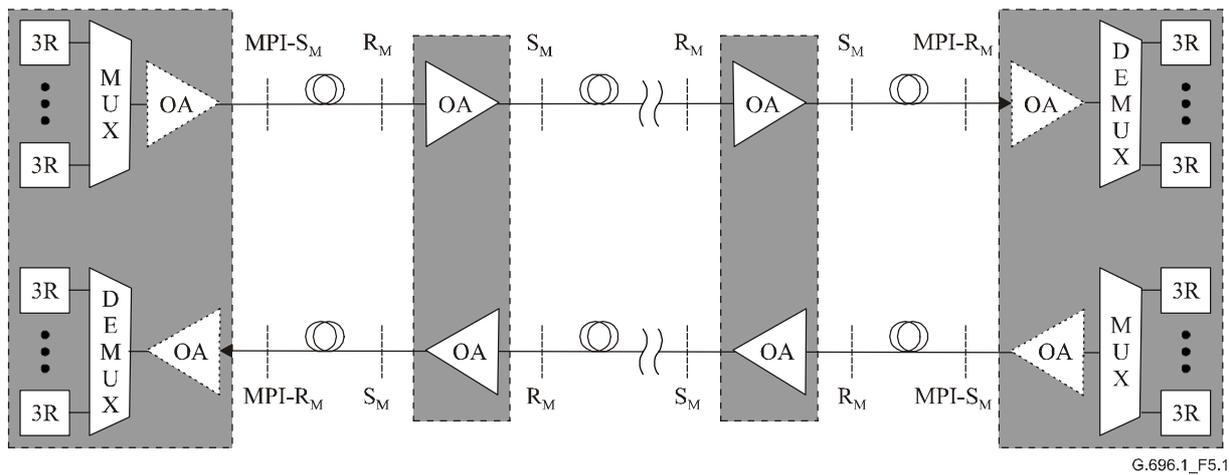
## 5 Clasificación de interfaces ópticas

### 5.1 Aplicaciones

En esta Recomendación se tratan las aplicaciones de multiplexación por división en longitud de onda densa en el intradominio longitudinalmente compatibles, con o sin amplificadores de línea ópticos. Se pueden utilizar diferentes tipos de amplificadores de línea, en particular amplificadores de línea discretos, de conformidad con la Rec. UIT-T G.663, o amplificadores Raman, conformes con la Rec. UIT-T G.665.

### 5.2 Configuraciones de referencia

A los efectos de esta Recomendación, en la figura 5-1 se indican los puntos de referencia pertinentes aplicables a las aplicaciones de la interfaz DWDM en el intradominio.



**Figura 5-1/G.696.1 – Configuración de referencia para un sistema DWDM con tramos múltiples**

Los puntos de referencia de la figura 5-1 se definen de la siguiente manera, utilizando la misma nomenclatura que en la Rec. UIT-T G.959.1:

- MPI-S<sub>M</sub> es un punto de referencia (multicanal) de la fibra óptica inmediatamente detrás del conector óptico de salida de la interfaz de transporte de elementos de red óptica;
- MPI-R<sub>M</sub> es un punto de referencia (multicanal) de la fibra óptica inmediatamente delante del conector óptico de entrada de la interfaz de transporte de elementos de red óptica;
- S<sub>M</sub> es un punto de referencia situado inmediatamente detrás del conector óptico de salida del OA multicanal de línea;
- R<sub>M</sub> es un punto de referencia de la fibra óptica situado inmediatamente delante del conector óptico de entrada del OA multicanal de la línea.

### 5.3 Nomenclatura

La notación de un código de aplicación se construye de la siguiente manera:

$$\mathbf{n.B-xWF(s)}$$

donde:

- n** es el número máximo de canales soportados por el código de aplicación,
- B** indica la clase de cliente:
  - 1,25G indica una velocidad binaria de cliente en la gama de 622 Mbit/s a 1,25 Gbit/s;
  - 2,5G indica una velocidad binaria de cliente en la gama de 622 Mbit/s a 2,5 Gbit/s;
  - 10G indica una velocidad binaria de cliente en la gama de 2,4 Gbit/s a 10,5 Gbit/s;
  - 40G indica una velocidad binaria de cliente en la gama de 9,9 Gbit/s a 42 Gbit/s.
- x** es el número de tramos en el código de aplicación,

- W** es una letra que indica la atenuación del tramo,  
**S** indica corta distancia (atenuación de tramo de hasta 11 dB),  
**L** indica larga distancia (atenuación de tramo de hasta 22 dB),  
**V** indica muy larga distancia (atenuación de tramo de hasta 33 dB),
- F** es el tipo de fibra (completamente detallada), como G.652.A, ... G.652.D indicada respectivamente por "652A" ... "652D" en el código de aplicación.
- s** indica la gama de longitudes de onda de funcionamiento en relación con las bandas espectrales (véase el Suplemento UIT-T G.39):

<b>s</b>	<b>Descripción</b>	<b>Intervalo (nm)</b>
O	Original	1260 a 1360
E	Ampliada	1360 a 1460
S	Longitud de onda corta	1460 a 1530
C	Convencional	1530 a 1565
L	Longitud de onda larga	1565 a 1625

Si se utiliza más de una banda espectral, **s** se convierte en las letras de las bandas separadas por "+", por ejemplo, para una aplicación que requiere el uso de las bandas C y L, el valor **s** será "C+L". En los casos en que se utiliza más de una banda espectral, el orden de las letras es el de las longitudes de onda y va de las longitudes de onda más bajas a las más altas.

En el caso de un sistema de transmisión DWDM amplificado con un amplificador Raman, se debe añadir una letra "R" al final del código de aplicación, que se escribirá de la siguiente manera:

**n.B-xWF(s)R**

A continuación, se indica un ejemplo de aplicaciones específicas:

40.10G-20L652A(C)R

Esta aplicación se refiere a un sistema de 40 canales con señales de la clase útil de 10G, 20 tramos de larga distancia de fibra G.652A, que es adecuado para utilizar con amplificadores Raman. La banda C se utiliza como gama de longitud de onda de funcionamiento.

## **6 Compatibilidad longitudinal**

Las aplicaciones comprendidas en esta Recomendación son longitudinalmente compatibles, de conformidad con la definición que figura en el Suplemento UIT-T G.39.

## **7 Parámetros**

Los códigos de aplicación utilizados en esta Recomendación (n.B-xWF(s)) constan de dos partes separables. La primera parte, "n.B", se refiere a los sistemas de transmisión óptica y la segunda, "xWF(s)", se refiere a la infraestructura de la fibra.

Como esta Recomendación abarca los sistemas longitudinalmente compatibles, los parámetros que figuran en el cuadro 7-1 se refieren sólo a la infraestructura de la fibra, excepto cuando la parte del código de aplicación relativa al sistema afecta a los requisitos de la fibra.

**Cuadro 7-1/G.696.1 – Parámetros de la fibra para aplicaciones DWDM en el intradominio**

Parámetros	Cláusula
Atenuación máxima por tramo	7.1
Atenuación mínima por tramo	7.1
Tipo de fibras	7.2
Gama de longitud de onda de funcionamiento	7.3
Dispersión cromática mínima por tramo	7.4
Dispersión cromática máxima por tramo	7.4
Coefficiente de dispersión cromática local mínima	7.5
Desviación de la dispersión cromática máxima	7.6
Retardo diferencial de grupo máximo	7.7
Pérdida de retorno óptico mínima en la MPI-S <sub>M</sub> o S <sub>M</sub>	7.8
Reflectancia discreta máxima entre MPI-S <sub>M</sub> y MPI-R <sub>M</sub>	7.9

### 7.1 Atenuación máxima y mínima por tramo

Las atenuaciones máximas y mínimas por tramo se indican en el cuadro 7-2.

**Cuadro 7-2/G.696.1 – Atenuaciones máximas y mínimas por tramo**

Parámetro	Unidades	Valores de "W" en el código de aplicación		
		S	L	V
Atenuación máxima por tramo	dB	11	22	33
Atenuación mínima por tramo	dB	(En estudio)	11	22

### 7.2 Tipos de fibras

Esta Recomendación abarca todos los tipos de fibras que figuran en las Recomendaciones de la serie G.65x del UIT-T y actualmente se incluyen los tipos que figuran en el cuadro 7-3.

**Cuadro 7-3/G.696.1 – Tipos de fibras**

G.652.A	G.653.A	G.654.A	G.655.A	G.656
G.652.B	G.653.B	G.654.B	G.655.B	
G.652.C		G.654.C	G.655.C	
G.652.D				

### 7.3 Gama de longitud de onda de funcionamiento

La gama de longitud de onda de funcionamiento consta de una o más de las bandas de longitudes de onda que se definen en el Suplemento UIT-T G.39 (véase el cuadro 7-4).

**Cuadro 7-4/G.696.1 – Gammas de longitudes de onda**

s	Descripción	Gama (nm)
O	Original	1260 a 1360
E	Ampliada	1360 a 1460
S	Longitud de onda corta	1460 a 1530
C	Convencional	1530 a 1565
L	Longitud de onda larga	1565 a 1625

#### 7.4 Dispersión cromática mínima y máxima por tramo

La dispersión cromática mínima y la dispersión cromática máxima por tramo (excluida toda compensación de dispersión) se pueden calcular utilizando los parámetros de fibra normalizados (en la serie G.65x) o se pueden medir. Para los sistemas 40G y 10G con muchos tramos, a menudo la medición es la opción más práctica.

Se puede realizar un cálculo de la dispersión cromática mínima y máxima por tramo utilizando los parámetros de las fibras que figuran en las Recomendaciones de la serie G.65x del UIT-T, además de los parámetros adicionales utilizados en la presente Recomendación. El cálculo detallado se efectúa de la siguiente manera: la dispersión cromática máxima por tramo,  $CD_{máx}^{(tramo)}$ , está dada por

$$CD_{máx}^{(tramo)} = D_{máx}(s) \cdot L_{máx}^{(tramo)}$$

donde:

$$L_{máx}^{(tramo)} = \frac{A_{máx}(W)}{\alpha(s)}$$

es la longitud de tramo máxima con la atenuación de tramo máxima  $A_{máx}(W)$  definida por la letra "W" (véase el cuadro 7-2) y el coeficiente de atenuación  $\alpha(s)$  en la gama de longitud de onda de funcionamiento "s" (véase 5.3) donde  $\alpha(s)$  es el "valor típico del enlace" en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.65x. El coeficiente de dispersión cromática máxima en la gama de las longitudes de onda de funcionamiento "s", se indica con  $D_{máx}(s)$ .

Del mismo modo, la dispersión cromática mínima por tramo  $CD_{mín}^{(tramo)}$ , está dada por:

$$CD_{mín}^{(tramo)} = D_{mín}(s) \cdot L_{mín}^{(tramo)}$$

donde:

$$L_{mín}^{(tramo)} = \frac{A_{mín}(W)}{\alpha(s)}$$

es la longitud de tramo mínima con la atenuación de tramo mínima  $A_{mín}(W)$  definida por la letra "W" (véase el cuadro 7-2) y el coeficiente de atenuación  $\alpha(s)$  en la gama de longitud de onda de funcionamiento "s" (véase 5.3), donde  $\alpha(s)$  es el "valor típico del enlace" de las Recomendaciones UIT-T de la serie G.65x. El coeficiente de dispersión cromática mínima en la gama de las longitudes de onda de funcionamiento "s" se indica con  $D_{mín}(s)$ .

Los coeficientes de dispersión cromática se pueden obtener para cualquier tipo de fibra en las Recomendaciones UIT-T de la serie G.65x utilizando los "atributos del enlace". Las atenuaciones de tramo máxima y mínima se definen en el cuadro 7-2.

## 7.5 Coeficiente de dispersión cromática local mínima

Al considerar los resultados de los distintos canales por separado en un sistema de transmisión multitramos, la dispersión cromática residual extremo a extremo (incluida la compensación) debe mantenerse dentro de límites estrictos a fin de que el funcionamiento del sistema sea aceptable.

Para que el funcionamiento de los sistemas DWDM a través de largas distancias y con separación de canales pequeña (por ejemplo, 100 GHz) sea aceptable, el coeficiente de dispersión local de la fibra de transmisión deberá tener un cierto valor mínimo, a fin de evitar efectos no lineales como la mezcla de cuatro ondas (FWM) y la transmodulación de fase (XPM).

El valor del coeficiente de dispersión cromática local necesario para evitar inconvenientes significativos debidos a esos efectos, depende de numerosos factores que intervienen en el diseño del sistema de transmisión, como la separación de canales, el nivel de potencia, la longitud del enlace, etc., lo que está fuera del alcance de esta Recomendación.

En la Rec. UIT-T G.663 y en el Suplemento UIT-T G.39, figuran más detalles acerca de esos efectos no lineales y en la cláusula I.3 se examinan algunos métodos para atenuarlos.

## 7.6 Desviación de la dispersión cromática máxima

Los requisitos relativos a la desviación de la dispersión cromática máxima quedan en estudio.

## 7.7 Retardo diferencial de grupo máximo

El retardo diferencial de grupo máximo (DGD) se aplica a todo el enlace comprendido entre un transmisor (en la figura 5-1, "3R" conectado a un MUX) y el receptor correspondiente (en la figura 5-1, "3R" conectado al DEMUX).

La ecuación siguiente permite calcular el DGD máximo de un enlace (con múltiples componentes y secciones de fibra) con un excedente probable definido.

$$DGD_{\text{máx}_{\text{enlace}}} = \left[ DGD_{\text{máx}_F}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}$$

donde:

$DGD_{\text{máx}_{\text{enlace}}}$  es el DGD máximo (ps) del enlace

$DGD_{\text{máx}_F}$  es el DGD (ps) máximo del cable de fibra óptica concatenado

$S$  es el factor de ajuste de Maxwell (véase el cuadro 7-5)

$PMD_{Ci}$  es el valor de la dispersión por modo de polarización (PMD) del  $i$ -ésimo componente (ps)

En esta ecuación se supone que la distribución de Maxwell se aproxima a las estadísticas de los valores del retardo diferencial de grupo (DGD) instantáneo, con la probabilidad de que los valores del factor de ajuste de Maxwell sacados del cuadro 7-5 controlen los valores de ese DGD instantáneo por encima de  $DGD_{\text{máx}_{\text{enlace}}}$ .

**Cuadro 7-5/G.696.1 – Valores S y probabilidades**

Relación entre el máx. y el valor medio (S)	Probabilidad de superar el máx.	Relación entre el máx. y el valor medio (S)	Probabilidad de superar el máx.
3	$4,2 \times 10^{-5}$	4	$7,4 \times 10^{-9}$
3,2	$9,2 \times 10^{-6}$	4,2	$9,6 \times 10^{-10}$
3,4	$1,8 \times 10^{-6}$	4,4	$1,1 \times 10^{-10}$
3,6	$3,2 \times 10^{-7}$	4,6	$1,2 \times 10^{-11}$
3,8	$5,1 \times 10^{-8}$		

En las Recs. UIT-T G.650.2 y G.691 figuran más detalles al respecto. Puede medirse el valor de  $DGD_{máx_F}$  (el DGD máximo debido a la parte correspondiente a la fibra) o también se puede calcular un límite superior para una longitud de fibra dada, utilizando el coeficiente  $PMD_Q$  que figura en la correspondiente Recomendación sobre las fibras.

Los límites del retardo diferencial de grupo de la totalidad del enlace figuran en el cuadro 7-6 para los sistemas sin retorno a cero (NRZ) y en el cuadro 7-7 para los sistemas con retorno a cero (RZ).

**Cuadro 7-6/G.696.1 – Retardo diferencial de grupo máximo del enlace para NRZ**

Clase de cliente	Unidades	Valor
1,25G	ps	240
2,5G	ps	120
10G	ps	30
40G	ps	7,5

**Cuadro 7-7/G.696.1 – Retardo diferencial de grupo máximo del enlace para RZ**

Clase de cliente	Unidades	Valor
1,25G	ps	(En estudio)
2,5G	ps	(En estudio)
10G	ps	(En estudio)
40G	ps	(En estudio)

### 7.8 Pérdida de retorno óptica mínima en MPI-S<sub>M</sub> o S<sub>M</sub>

Provocan reflexiones las discontinuidades del índice de refracción a lo largo del trayecto óptico. De no controlarse, pueden degradar la calidad de funcionamiento del sistema por su efecto perturbador para el funcionamiento de la fuente óptica y del amplificador óptico o por la presencia de múltiples reflexiones que pueden dar lugar a ruido interferométrico en el receptor. Las reflexiones del trayecto óptico se controlan especificando:

- la pérdida de retorno óptica mínima de la planta del cable en el punto de referencia de la fuente (por ejemplo, MPI-S<sub>M</sub>, S<sub>M</sub>), incluyendo los conectores; y
- la reflectancia discreta máxima entre los puntos de referencia de la fuente (por ejemplo, MPI-S<sub>M</sub>, S<sub>M</sub>) y los puntos de referencia del receptor (por ejemplo, MPI-R<sub>M</sub>, R<sub>M</sub>).

La reflectancia representa la reflexión desde cualquier punto simple de reflexión discreta, mientras que la pérdida de retorno óptico es la relación entre la potencia óptica de incidencia y la potencia óptica total de retorno de toda la fibra, incluyendo tanto las reflexiones discretas como la retrodispersión distribuida, como la de Rayleigh.

Los métodos de medición de las reflexiones se describen en el apéndice I/G.957. A los efectos de la medición de la reflectancia y de la pérdida de retorno, se supone que los puntos MPI-S y MPI-R coinciden con la fase terminal de cada clavija. Es razonable ignorar el comportamiento reflectante real de los conectores respectivos durante el funcionamiento del sistema. Se supone que esas reflexiones tienen el valor nominal correspondiente al tipo específico de conector utilizado.

El límite de la pérdida de retorno óptica mínima de la planta del cable en MPI-S<sub>M</sub> o S<sub>M</sub> es de -24 dB.

### **7.9 Reflectancia discreta máxima entre MPI-S<sub>M</sub> y MPI-R<sub>M</sub>**

La reflectancia óptica se define como la relación entre la potencia óptica reflejada, presente en un punto, y la potencia óptica de incidencia en ese punto. El control de las reflexiones se examina ampliamente en la Rec. UIT-T G.957. El número máximo de conectores o de puntos de reflexión discreta que se pueden incluir en el trayecto óptico (por ejemplo, repartidores o elementos de WDM) debe permitir obtener la pérdida de retorno óptica global especificada. Si ello no se puede lograr con conectores que satisfagan las reflexiones discretas máximas aquí citadas, se deberán utilizar otros conectores que tengan un mejor comportamiento reflectante. Otra solución consiste en reducir el número de conectores. También puede ser necesario limitar el número de conectores o utilizar conectores con mejor comportamiento reflectante a fin de evitar degradaciones inaceptables provocadas por las reflexiones múltiples.

El valor máximo de la reflectancia discreta entre MPI-S<sub>M</sub> y MPI-R<sub>M</sub> no debe superar los -27 dB.

## **8 Consideraciones sobre seguridad óptica**

Si bien esta Recomendación se refiere a la infraestructura de la fibra y no especifica las características de los sistemas de transmisión óptica que funcionan en ella, esos sistemas pueden funcionar bien a niveles de potencia óptica relativamente elevados. Para las consideraciones sobre seguridad óptica véanse la Rec. UIT-T G.664, las publicaciones CEI 60825-1 y CEI 60825-2, así como el Informe técnico CEI TR 61292-4.

## Apéndice I

### Límites teóricos y consideraciones sobre el diseño de sistemas con multiplexación por división en longitud de onda densa

Este apéndice presenta algunas de las limitaciones físicas y tecnológicas a las distancias de enlace que pueden alcanzarse con los sistemas de transmisión óptica con multiplexación por división en longitud de onda densa (DWDM) en el intradominio.

En la cláusula I.1 se examinan los límites fundamentales debidos al ruido ASE y a la PMD. En la cláusula I.2 se examinan otros efectos que limitan las distancias en los sistemas prácticos y en la cláusula I.3 se describen las técnicas utilizadas para atenuar esos efectos. Por último, en la cláusula I.4 figura un ejemplo de las características típicas de la tecnología actualmente disponible.

#### I.1 La tecnología necesaria y sus límites

En esta cláusula se indican algunas de las limitaciones fundamentales de la viabilidad tecnológica de las aplicaciones DWDM.

Se supone que la atenuación óptica del enlace se compensa con los amplificadores ópticos y que la dispersión cromática se compensa con compensadores de dispersión cromática.

El ruido ASE y la PMD son las degradaciones más importantes que limitan la capacidad y la distancia de transmisión de las aplicaciones DWDM.

Las cuestiones examinadas en la cláusula I.1 se refieren a la codificación de línea sin retorno a cero (NRZ) ya que esa codificación se utiliza comúnmente en las aplicaciones DWDM. En algunos casos, otras codificaciones de líneas pueden dar resultados diferentes y ser más convenientes (en la cláusula I.3 se examinan algunas posibilidades diferentes de NRZ).

##### I.1.1 Ruido ASE

La influencia del ruido de emisión espontánea amplificada (ASE) se caracteriza fundamentalmente por la relación señal óptica/ruido (OSNR). Como se indica en el Suplemento UIT-T G.39, la OSNR de un sistema de referencia multicanal de  $x$  tramos con un amplificador de potencia,  $x-1$  amplificadores de línea y un preamplificador está dada por:

$$\text{OSNR} = P_{\text{out}} - L - \text{NF}_{\text{eff}} - 10 \cdot \log \left( x + \frac{10^{\frac{G_{\text{BA}}}{10}}}{10^{\frac{L}{10}}} \right) - 10 \cdot \log [h \cdot \nu \cdot \nu_r] \quad (\text{I-1})$$

$P_{\text{out}}$  es la potencia de salida (por canal) del amplificador elevador y de los amplificadores de línea dBm;  $L$  es la atenuación del tramo en dB (que se supone es igual a la ganancia  $G_{\text{LA}}$  de los amplificadores de línea);  $G_{\text{BA}}$  es la ganancia del amplificador de potencia óptico en dB;  $\text{NF}_{\text{eff}}$  es el factor de ruido del amplificador óptico en dB;  $h$  es la constante de Planck (en mJ\*s para que concuerde con  $P_{\text{out}}$  en dBm);  $\nu$  es la frecuencia óptica en Hz;  $\nu_r$  es la anchura de banda de referencia en Hz; y  $x-1$  es el número total de amplificadores de línea.

La ecuación I-1 tiene en cuenta el ruido de granalla y el ruido de batido espontáneo de la señal como las contribuciones de ruido más dominantes. En algunos casos, se pueden considerar otras contribuciones de ruido.

Esta ecuación indica que el ruido ASE de todos los  $x + 1$  amplificadores se acumula.

Para este sistema de referencia se han adoptado las siguientes hipótesis principales:

- Todos los amplificadores ópticos de la cadena, incluidos el amplificador elevador y el preamplificador, tienen el mismo factor de ruido.

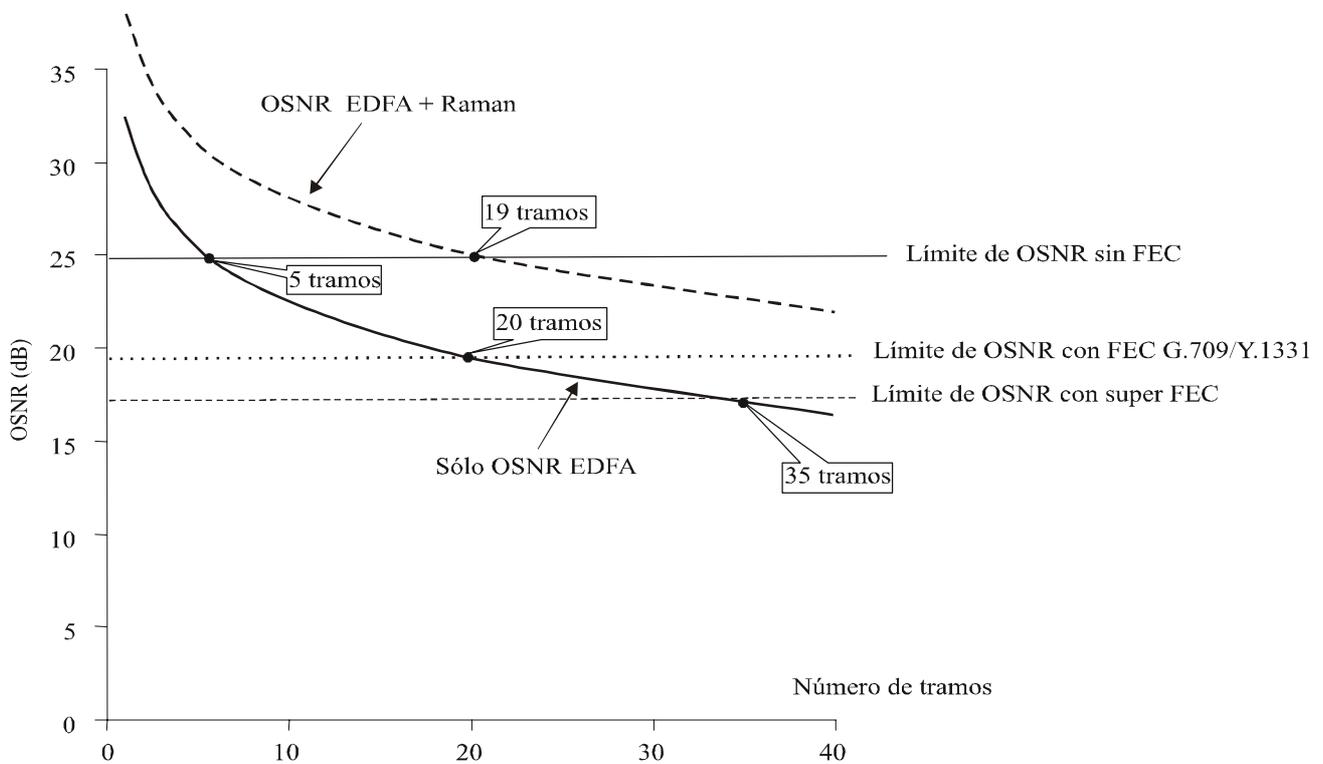
- Las pérdidas (por canal) son iguales en todos los tramos.
- La potencia de salida (por canal) del amplificador elevador y de los amplificadores de línea es la misma.

Por ejemplo, suponiendo que la potencia óptica de salida del canal  $P_{out} = 3 \text{ dBm}$ , el factor de ruido  $NF_{eff} = 6,5 \text{ dB}$ , la anchura de banda de referencia  $\nu_r = 0,1 \text{ nm}$  y la atenuación de tramo  $L = 22 \text{ dB}$ , obtenemos la curva de trazo lleno de la figura I.1.

Para una velocidad binaria de 10 Gbit/s, suponiendo una limitación de la OSNR de 25 dB para una BER de  $10^{-12}$  sin FEC, obtenemos una distancia límite teórica de 5 tramos.

Suponiendo que se utiliza la FEC G.709/Y.1331 con una ganancia neta de codificación (NCG) de 5,6 dB, la OSNR límite será de 19,4 dB cuyo valor se alcanza a los 20 tramos.

Si se utiliza una FEC más potente, por ejemplo, uno de los esquemas que figuran en el apéndice I/G.975.1, es factible obtener una ganancia neta de codificación (NCG) de aproximadamente 8 dB y la limitación de la OSNR pasa a ser de 17 dB, que se alcanza a los 35 tramos.



G.696.1\_F1.1

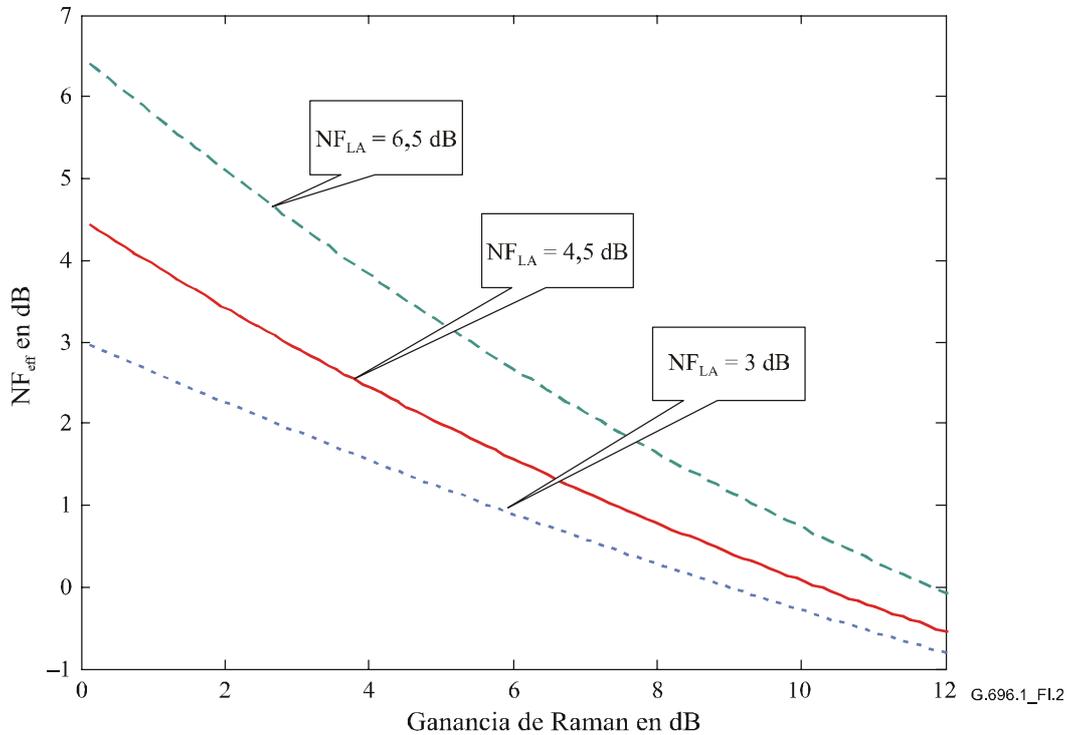
**Figura I.1/G.696.1 – Límites de la OSNR para un sistema de referencia, OSNR en función del número de tramos con y sin amplificación Raman**

La amplificación tipo Raman distribuida (DRA, *distributed Raman amplification*) es otra opción para prolongar la distancia de transmisión. El factor de mejoramiento de la OSNR que se puede lograr con la DRA en configuración de bombeo hacia atrás se puede calcular mediante el factor de ruido efectivo ( $NF_{eff}$ ), que puede expresarse mediante la siguiente ecuación (I-2) [1].

$$NF_{eff} = 10 \cdot \log \left( \left( NF'_{LA} + \frac{P_{ASE,Raman}}{h \cdot \nu \cdot \nu_r} \right) \cdot \frac{1}{G'_{Raman}} \right) \quad (I-2)$$

donde  $NF'_{LA}$  es el factor de ruido lineal del amplificador de línea discreto,  $G'_{Raman}$  es la ganancia lineal de la DRA,  $P_{ASE,Raman}$  es la potencia de ASE que resulta de la DRA y  $v_r$  es la anchura de banda de referencia. La ecuación  $NF_{LA} = 10 \cdot \log(NF'_{LA})$  es válida cuando  $NF_{LA}$  es el factor de ruido del amplificador de línea discreto en dB.

$P_{ASE,Raman}$  y  $G_{Raman} = 10 \log(G'_{Raman})$  se pueden calcular analíticamente [2].



**Figura I.2/G.696.1 –  $NF_{eff}$  en función de la ganancia de Raman**

En la figura I.2 se ilustra el valor de  $NF_{eff}$  en función de la ganancia de Raman  $G_{Raman}$ . En este caso, se han supuesto los siguientes valores de parámetros: longitud de la fibra 80 km, coeficiente de atenuación 0,275 dB/km y 0,3 dB/km para la longitud de onda de bombeo y de señal, respectivamente, superficie efectiva de la fibra 80  $\mu m^2$  y coeficiente de ganancia de Raman  $3.1E-14$ . Los factores de ruido del EDFA son 3 dB, 4,5 dB y 6,5 dB, respectivamente. La distancia máxima de transmisión con la combinación de amplificadores Raman – EDFA se puede calcular introduciendo la  $NF_{eff}$  de la ecuación I-2 en la ecuación I-1 de la OSNR, con  $L = G_{Raman} + G_{LA}$ , donde  $G_{LA}$  es la ganancia del amplificador de línea en dB.

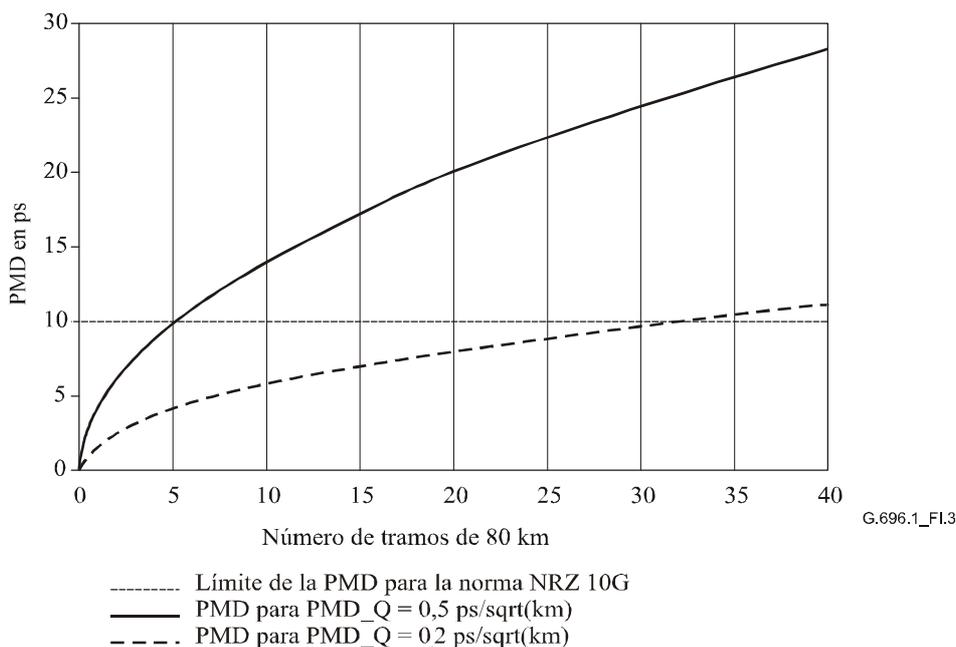
Suponiendo una ganancia de Raman de aproximadamente 9,3 dB y un factor de ruido de EDFA de  $NF_{LA} = 6,5$  dB, obtenemos un factor de ruido eficaz de  $NF_{eff} = 1$  dB, lo que da la curva punteada de la figura I.1.

En este caso, la distancia límite teórica sin los FEC pasa a ser de 19 tramos y si se suman los FEC G.709/Y.1331 se podrá disponer de un sistema con más de 40 tramos.

### I.1.2 PMD

La PMD de un enlace de fibra de longitud total  $L$  y coeficiente de PMD para las secciones de cables por separado  $PMD_Q$  está dada por:  $PMD = \sqrt{L} \cdot PMD_Q$ . Para una interfaz NRZ de 10 Gbit/s la PMD total no deberá superar los 10 ps (lo que corresponde a una probabilidad de interrupción con "cinco nueves" para un DGD máximo inducido en la fibra de 30 ps). Si el valor  $PMD_Q$  del coeficiente de PMD no supera  $0,5 \text{ ps/km}^{1/2}$ , la longitud total del enlace será de 400 km; y con un

coeficiente máximo de  $PMD_Q=0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$ , la longitud total del enlace pasa a ser de 2500 km, véase la figura I.3.



**Figura I.3/G.696.1 – PMD en función de la distancia para diferentes coeficientes de PMD y límite de PMD para sistemas NRZ de 10 Gbit/s con disponibilidad del 99,999%**

La figura I.3 da una orientación sobre la distancia máxima admitida de conformidad con el  $PMD_Q$  máximo de la fibra para una codificación de línea NRZ en base a su tolerancia de DGD de primer orden. En la figura no se ha tenido en cuenta la contribución de la PMD del equipo.

Un sistema real en un enlace de fibra real debería tener en cuenta el límite de la PMD que resulta de la contribución combinada del enlace de fibra y el equipo, y abarca todos los nodos de un enlace.

En ciertos casos, también debería considerarse una PMD de orden más elevado.

## I.2 Otros efectos que limitan la distancia de transmisión

Los límites de las distancias de enlace calculados en las cláusulas precedentes son las distancias que podrían alcanzarse en circunstancias ideales. No obstante, existen numerosos efectos en los sistemas prácticos que reducen la longitud máxima del enlace.

### I.2.1 Ondulación de ganancia acumulada de la aplicación en cascada y la inclinación de EDFA debido a los efectos de Raman estimulados

Un sistema verdadero en un enlace verdadero necesita que se tenga en cuenta la divergencia de potencia entre canales debida a la ondulación de ganancia acumulada y a los efectos de Raman estimulados.

Si bien se pueden utilizar tecnologías como los filtros de ganancia de alisamiento y la igualación de ganancia/potencia dinámica para disminuir las repercusiones de esos efectos, igual seguirán existiendo algunas que reducirán las distancias que pueden alcanzarse a valores inferiores a los de la figura I.1.

### **I.2.2 Longitud de tramo no uniforme**

Los códigos de aplicación de la presente Recomendación consideran longitudes de tramo iguales. Para el estudio realizado en este apéndice se ha utilizado una atenuación constante de 22 dB por tramo. En los sistemas reales, generalmente las longitudes de tramo son diferentes y dependen efectivamente de las limitaciones topológicas y topográficas de la red real.

De manera general es difícil tener en cuenta esta "diferencia con la situación ideal" ya que, para el mismo sistema, tramos más largos significa un "déficit" de OSNR y tramos más cortos un "crédito" de OSNR.

El "déficit" de OSNR debido a los tramos más largos se puede compensar, parcial o totalmente, si se aumenta la potencia de salida del amplificador que precede al propio tramo, siempre y cuando el aumento de potencia no produzca efectos no lineales que no se puedan tolerar sin causar una penalidad suplementaria.

Por consiguiente, de manera general, es probable que un enlace con tramos más largos haga que el sistema soporte un número menor de tramos, mientras que es probable que un enlace con tramos más cortos pueda permitirle al sistema soportar un número mayor de tramos. Dado que este problema depende del diseño específico del sistema que realiza el fabricante del equipo, aquí simplemente se menciona para brindar una visión más general de ese tipo de aplicaciones, sin proporcionar ningún detalle.

### **I.2.3 No linealidad óptica**

Los efectos no lineales, como la automodulación de fase (SPM, *self-phase modulation*) y/o la transmoción de fase (XPM, *cross-phase modulation*), se acumulan a lo largo de los tramos y resultan significativos a medida que aumenta el número de éstos. Por consiguiente, en un enlace real no se puede ignorar el deterioro no lineal.

Una potencia de canal más elevada es buena para la OSNR, pero no necesariamente lo es para la BER. Ello se debe a los efectos no lineales de la fibra.

Considerando el NRZ con la potencia media de canal de 3 dBm en la fibra G.652 (suponiendo la misma potencia de la figura I.1), la fase no lineal (SPM) acumulada  $\Phi_{NL} = \gamma P_{ch} L_{eff} N_{tramo}$  después de 10 tramos se aproxima a 1 radián y la transmisión tiene lugar en una región llamada "de fuerte distorsión no lineal", donde la distancia de enlace puede estar limitada no linealmente. En ese caso, la longitud total del enlace puede ser mucho menor que la prevista en la figura I.1 basándose sólo en los límites OSNR.

En la Rec. UIT-T G.663 y en el Suplemento UIT-T G.39 se proporcionan más detalles sobre la linealidad óptica y en la cláusula I.3 se examinan algunos métodos para atenuar esos efectos.

### **I.2.4 Dispersión residual y tolerancia de dispersión**

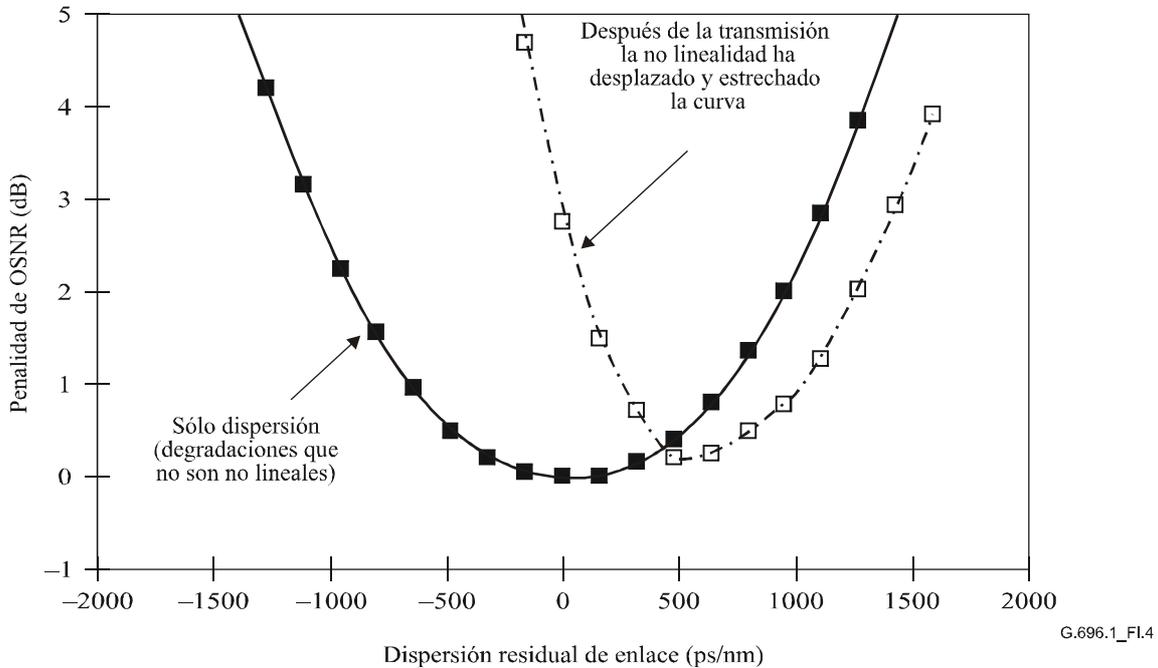
Según las curvas de la figura I.1, la dispersión en cada canal en el sistema WDM está perfectamente compensada. Si bien se pueden utilizar módulos de compensación de dispersión (DCM, *dispersion compensation modules*) con una dispersión exactamente inversa respecto de la pendiente de la longitud de onda para la fibra, en general esto no sucede; si tal es el caso, en la medida en que aumente el número de tramos, podría ser necesario considerar una dispersión cromática de un orden más elevado.

Además de la desigualdad de pendientes que causan una dispersión residual en algunos de los canales WDM, si no se atenúa, la distorsión no lineal puede ensanchar el espectro y, por consiguiente, reducir la tolerancia de dispersión después de la transmisión por fibra.

Por ejemplo, para un enlace por fibra con dispersión periódica compensada, la no linealidad produce una fluctuación negativa que reduce la tolerancia de compensación de dispersión y lleva el

punto de compensación de dispersión óptima a una dispersión neta positiva. Este efecto se ilustra en la figura I.4.

El presente ejemplo se basa en la simulación de un sistema DWDM de ocho canales con señales NRZ 10G a través de  $10 \times 80$  km de una fibra G.652 con una potencia media de salida de 3 dBm por canal. En la simulación se supone que la dispersión cromática de cada sección de 80 km se compensa exactamente en cada amplificador de línea.



**Figura I.4/G.696.1 – Ejemplo del efecto de la no linealidad en la tolerancia de dispersión después de la transmisión**

### I.2.5 Efectos acumulados de PDL

Los componentes ópticos como los filtros WDM, VOA y OA presentan una pérdida dependiente de la polarización (PDL, *polarization dependent loss*) finita, que puede variar de 0,1 a 0,3 dB, o aún más, por dispositivo. La PDL produce una modulación de intensidad estocástica en las señales ópticas debido a las variaciones en el tiempo de la polarización de la señal. Bajo los efectos de la ganancia dependiente de la polarización (PDG, *polarization dependent gain*), las fluctuaciones de potencia inducidas se transforman en los OA en fluctuaciones OSNR.

En un sistema de larga distancia extendido, donde se concatenan numerosos elementos de red óptica, la PDL acumulada puede producir una fluctuación de potencia significativa, que a su vez puede degradar la calidad y la estabilidad del sistema. No obstante, la correlación entre las fluctuaciones de potencia y las variaciones de la OSNR pueden no ser necesariamente biunívocas. Las fluctuaciones de potencia pueden producirse con demasiada rapidez como para ser totalmente compensadas mediante igualación de ganancia dinámica.

### I.3 Técnicas utilizadas para atenuar las degradaciones

Existen numerosas técnicas prácticas que pueden mejorar la calidad de un enlace IaDI, al seleccionar, por ejemplo:

- i) la igualación de ganancia dinámica;
- ii) la codificación de línea;
- iii) el número de canales ópticos y su separación;

- iv) los tipos de fibra;
- v) la mezcla de diferentes tipos de fibras en un tramo.

### **I.3.1 Igualación de ganancia dinámica**

A fin de compensar la desviación de ganancia introducida por una larga cadena de amplificadores, se puede utilizar un analizador de espectro óptico (OSA, *optical spectrum analyzer*) o un controlador de potencia óptica (OPM, *optical power monitor*) y filtros de alisamiento de ganancia ajustables integrados, que permiten lograr una buena igualación en todos los canales de la señal agregada de DWDM.

### **I.3.2 Formato de modulación**

Los formatos de modulación distintos de NRZ pueden aportar algunas ventajas en ciertas circunstancias.

Tal como se describe en el Suplemento UIT-T G.39, los sistemas de código de línea con retorno a cero (RZ) son mucho más tolerantes a la PMD de primer orden que los sistemas con NRZ. Además, los formatos de codificación de RZ modificados, como los RZ modulados en fase, pueden ser adicionalmente ventajosos en lo que se refiere al aumento de la tolerancia no lineal. Esas características estimulan la utilización de la codificación de línea con RZ para distancias de enlace muy largas, donde la PMD y los efectos no lineales son particularmente importantes.

Por otra parte, la codificación RZ tiene (debido a que es preciso utilizar mayor anchura de banda) el inconveniente potencial de tener menos rendimiento espectral en comparación con los NRZ (véase el Suplemento UIT-T G.39) y es en general más sensible a la dispersión cromática residual que los NRZ. Por esa razón, los sistemas que adoptan el formato de modulación RZ requieren que la caracterización y la compensación de la dispersión asociada con el enlace sean más precisas.

También se puede aplicar a los sistemas DWDM códigos de línea distintos de NRZ y RZ, y cada uno de ellos presenta ventajas e inconvenientes. Particularmente, para enlaces muy largos y señales DWDM de capacidad ultra alta, la elección de un código de línea particular depende del diseño óptimo del sistema del caso.

### **I.3.3 Número de canales ópticos y su separación**

De manera general, el número máximo de canales DWDM cuyo rendimiento es aceptable disminuye con el aumento de la longitud del enlace y/o la disminución de la separación del canal óptico, debido al efecto cada vez mayor de la no linealidad óptica.

### **I.3.4 Tipos de fibras**

En ciertas condiciones, los distintos tipos de fibras pueden tener sus ventajas e inconvenientes, comparados entre sí. Por ejemplo, en la banda C la dispersión cromática de la fibra G.652 es mayor que la de las fibras G.655 y G.653, y por consiguiente puede introducir menos efectos no lineales. No obstante, la ganancia de Raman depende en gran medida del tipo de fibra y, debido a sus grandes diámetros de campo modal, para una potencia de bombeo dada, la ganancia de Raman de las fibras G.652 es inferior a la de otras fibras.

### **I.3.5 Mezcla de diferentes tipos de fibras en un tramo**

Una técnica que se puede utilizar para atenuar los efectos de no linealidad de la fibra es mezclar expresamente en un mismo tramo fibras con diferentes características. Por ejemplo, un tramo que contiene a la vez fibras con dispersión positiva y negativa tendrá un alto valor de dispersión local (conveniente para reducir los efectos de la transmódulación de fase (XPM) y de la mezcla de cuatro ondas (FWM)) y una baja dispersión neta (lo cual reduce las necesidades de compensación de dispersión).

En los casos en que los diferentes tramos de un enlace tengan diferentes tipos de fibra, es probable que, para reducir al mínimo la distorsión no lineal, según los tipos de fibra de los primeros 20 km de cada tramo, la potencia inicial deba ser diferente en cada uno de esos tramos.

#### **I.4 Ejemplo práctico**

Del examen precedente surge claramente que el número de tramos que prácticamente se pueden realizar para una separación de canales, una región de longitud de onda de explotación, una velocidad binaria y una pérdida de tramo dados, depende en gran medida de las opciones de diseño de los sistemas, como por ejemplo, el esquema de FEC que se ha de utilizar, si se ha de utilizar igualación de ganancia dinámica o amplificación de Raman, etc.

No obstante, como ejemplo de tecnología disponible, un sistema con los siguientes atributos:

- separación de canal mínima: 100 GHz;
- región de longitud de onda de explotación: banda C (1530 a 1565 nm);
- clase de cliente: 10G;
- pérdida de tramo: 22 dB;
- tipo de fibra G.652;
- FEC G.709/Y.1331,

puede actualmente resultar eficaz, siempre y cuando tenga como máximo aproximadamente 15 tramos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISLAM (M.N.) (Editor): Raman Amplifiers for Telecommunications 2 Sub-Systems and Systems, *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 90/2, pp. 432, 2004 (ISBN:0-387-40656-5).
- [2] AOKI (Y.) *et al.*: Properties of fibre Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, páginas 1225-1239, 1988.



## SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
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	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedios
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	Gestión de las telecomunicaciones, incluida la RGT y el mantenimiento de redes
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, comunicaciones de sistemas abiertos y seguridad
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y Redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación