

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

Serie G
Suplemento 41
(05/2005)

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

**Directrices para el diseño de sistemas de cable
submarino de fibra óptica**

Recomendaciones UIT-T de la serie G – Suplemento 41



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
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.

Suplemento 41 a las Recomendaciones UIT-T de la serie G

Directrices para el diseño de sistemas de cable submarino de fibra óptica

Resumen

En el presente Suplemento se describen las consideraciones de diseño para sistemas con repetidores, sin repetidores y con amplificadores ópticos que soportan señales SDH y OTN en sistemas de cable submarino ópticos. Se abordan principalmente de las cuestiones específicas de los sistemas de cable submarino de fibra óptica.

Asimismo, se describe una concepción común de los requisitos para el diseño de sistemas de cable submarino de fibra óptica; el propósito es refundir y ampliar la información contenida en varias Recomendaciones, en particular la G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 y G.977.

Orígenes

El Suplemento 41 a las Recomendaciones UIT-T de la serie G fue aceptado el 27 de mayo de 2005 por la Comisión de Estudio 15 (2005-2008) del UIT-T.

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 publicación, 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 publicación es voluntaria. Ahora bien, la publicación 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 publicación 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 publicaciones.

En la fecha de aprobación de la presente publicación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta publicación. 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 2006

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

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
2.1 Referencias generales	1
2.2 Referencias en las cláusulas 6, 7 y 9	3
3 Términos y definiciones	3
4 Abreviaturas, siglas o acrónimos	3
5 Parámetros de elementos de sistema.....	5
5.1 Parámetros del transmisor	5
5.2 Parámetros del cable submarino.....	7
5.3 Parámetros del repetidor submarino.....	10
5.4 Parámetros de empalme del cable	13
5.5 Parámetros de los receptores	14
6 Topología de la red óptica	15
6.1 Punto a punto	15
6.2 Estrella.....	16
6.3 Estrella con derivación	16
6.4 Troncal con derivaciones.....	16
6.5 Festón	17
6.6 Anillo.....	17
6.7 Anillo con derivaciones.....	17
7 Consideraciones de diseño de sistema.....	18
7.1 Balance de potencia óptica	18
7.2 Consideraciones relativas a la dispersión.....	34
8 Correlación de errores en recepción	36
9 Consideración relativa a la fiabilidad	36
9.1 Requisito de fiabilidad.....	36
9.2 Avería interna	36
9.3 Avería externa	40
9.4 Localización de averías	40
10 Consideraciones relacionadas con la actualización.....	41

Suplemento 41 a las Recomendaciones UIT-T de la serie G

Directrices para el diseño de sistemas de cable submarino de fibra óptica

1 Alcance

En el presente Suplemento se describen las consideraciones de diseño para sistemas con repetidores, sin repetidores y con amplificadores ópticos que soportan señales SDH y OTN en sistemas de cable submarino ópticos. Se abordan principalmente de las cuestiones específicas de los sistemas de cable submarino de fibra óptica.

Asimismo, se describe una concepción común de los requisitos para el diseño de sistemas de cable submarino de fibra óptica; el propósito es refundir y ampliar la información contenida en varias Recomendaciones, en particular la G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 y G.977.

Por otra parte, este Suplemento también servirá para que el lector comprenda mejor las especificaciones de las fibras, componentes e interfaces de sistema incluidas en las Recomendaciones que se están elaborando actualmente en el marco de las Cuestiones 5, 7 y 8 de la Comisión de Estudio 15, respectivamente. Este Suplemento no debe impedir el desarrollo técnico de las tecnologías de sistemas de cable de fibra óptica.

2 Referencias

2.1 Referencias generales

En este Suplemento se citan las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias.

- Recomendación UIT-T G.650.1 (2004), *Definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos de fibras y cables monomodo.*
- 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.656 (2004), *Características de las fibras y cables con dispersión no nula para el transporte de servicios de banda ancha.*
- Recomendación UIT-T G.661 (1998), *Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*
- Recomendación UIT-T G.663 (2000), *Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*
- Recomendación UIT-T G.671 (2005), *Características de transmisión de los componentes y subsistemas ópticos.*
- 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.*

- Recomendación UIT-T G.692 (1998), *Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos.*
- Recomendación UIT-T G.693 (2005), *Interfaces ópticas para sistemas de conexión local.*
- Recomendación UIT-T G.694.1 (2002), *Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa.*
- Recomendación UIT-T G.694.2 (2003), *Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de longitudes de onda con multiplexación por división aproximada de longitud de onda.*
- Recomendación UIT-T G.826 (2002), *Parámetros y objetivos de las características de error de extremo a extremo para conexiones y trayectos digitales internacionales de velocidad binaria constante.*
- Recomendación UIT-T G.828 (2000), *Parámetros y objetivos de característica de error para trayectos digitales síncronos internacionales de velocidad binaria constante.*
- Recomendación UIT-T G.911 (1997), *Parámetros y metodología de cálculo de la fiabilidad y la disponibilidad de los sistemas de fibra óptica.*
- Recomendación UIT-T G.957 (1999), *Interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona.*
- Recomendación UIT-T G.959.1 (2003), *Interfaces de capa física de red óptica de transporte.*
- Recomendación UIT-T G.971 (2004), *Características generales de los sistemas de cable submarino de fibra óptica.*
- Recomendación UIT-T G.972 (2004), *Definición de términos pertinentes a los sistemas de cable submarino de fibra óptica.*
- Recomendación UIT-T G.973 (2003), *Características de los sistemas de cable submarino de fibra óptica sin repetidores.*
- Recomendación UIT-T G.974 (2004), *Características de los sistemas de cable submarino de fibra óptica con regeneración.*
- Recomendación UIT-T G.975 (2000), *Corrección de errores en recepción para sistemas submarinos.*
- 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.*
- Recomendación UIT-T G.976 (2004), *Métodos de prueba aplicables a los sistemas de cable submarino de fibra óptica.*
- Recomendación UIT-T G.977 (2004), *Características de los sistemas de cable submarino de fibra óptica con amplificación óptica.*
- Recomendaciones UIT-T de la serie G – Suplemento 39 (2003), *Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos.*
- CEI/TR 61282-3 (2002), *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.*
- CEI/TR 62380 (2004), *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.*

2.2 Referencias en las cláusulas 6, 7 y 9

- [1] ZSAKANY (J.C.), MARSHALL (N.W.), ROBERTS (J.M.), ROSS (D.G.): The Application of Undersea Cable Systems in Globe Networking, *AT&T Technical Journal*, Vol. 74, No.1, pp.8-15, enero/febrero de 1995.
- [2] O'MAHONY (M.J.), SPIRIT (D.M.): High Capacity Optical Transmission Explained, *John Wiley & Sons*, 1995.
- [3] WINZER (P.J.), KALMÁR (A.): Sensitivity Enhancement of Optical Receivers by Impulse Coding, *JLT*, Vol. 17, No. 2, febrero de 1999.
- [4] AGRAWAL (G.P.): Nonlinear Fiber Optics, *Academic Press*, Edition 1989.
- [5] TKACH (R.W.), CHAPLYVY (A.R.), FORGHIERI (F.), GNAUCK (A.H.), DEROSIER (R.M.): Four Photon Mixing and High-Speed WDM Systems, *JLT*, Vol. 13, No. 5, mayo de 1995.
- [6] BERGANO (N.S.), ASPELL (J.), DAVIDSON (C.R.), TRISCHITTA (P.R.), NYMAN (B.M.), KERFOOT (F.W.): Bit Error Rate Measurements of 14000 km 5 Gbit/s Fibre-Amplifier Transmission System using Recirculating Loop, *Elec. Letters*, Vol. 27, No. 21, octubre de 1991.
- [7] Military Handbook MIL-HDBK-217, *Reliability prediction of electronic component* (1995).
- [8] Telcordia Technologies Special Report SR-332, *Reliability procedure for electronic equipment*, Issue No. 1 (mayo de 2001).

3 Términos y definiciones

Las definiciones formales aparecen en las Recomendaciones principales.

4 Abreviaturas, siglas o acrónimos

En este suplemento se utilizan las siguientes abreviaturas, siglas o acrónimos.

3R	Regeneración de potencia, forma y temporización (<i>regeneration of power, shape, and timing</i>)
ASE	Emisión espontánea amplificada (<i>amplified spontaneous emission</i>)
BER	Tasa de errores en los bits (<i>bit-error ratio</i>)
BOL	Comienzo de vida (<i>beginning of life</i>)
BU	Unidad de derivación (<i>branching unit</i>)
COTDR	Reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo (<i>coherent optical time domain reflectometry</i>)
CSF	Fibra monomodo con corte desplazado (<i>cut-off shifted single mode fibre</i>)
CWDM	Multiplexación por división aproximada en longitud de onda (<i>coarse wavelength division multiplexing</i>)
DGD	Retardo diferencial de grupo (<i>differential group delay</i>)
DLS	Sección de línea digital (<i>digital line section</i>)
DPSK	Modulación por desplazamiento de fase diferencial (<i>differential phase shift keying</i>)
DSF	Fibra monomodo con dispersión desplazada (<i>dispersion shifted single mode fibre</i>)

DWDM	Multiplexación por división en longitud de onda densa (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
DWDMS	Sistema de multiplexación por división en longitud de onda densa (<i>dense wavelength division multiplexing system</i>)
EDF	Fibra dopada con erbio (<i>erbium doped fibre</i>)
EOL	Final de vida (<i>end of life</i>)
ER	Tasa de extinción (<i>extinction ratio</i>)
FEC	Corrección de errores en recepción (<i>forward error correction</i>)
FIT	Fallo de la hora (<i>failure in time</i>)
FWM	Mezcla de cuatro ondas (<i>four-wave mixing</i>)
IrDI	Interfaz interdominio (<i>inter-domain interface</i>)
LOC	Canal óptico de línea (<i>line optical channel</i>)
MPI-R	Interfaz de trayectos múltiples en el receptor (<i>multi-path interface at the receiver</i>)
MPI-S	Interfaz multitrayecto en la fuente (<i>multi-path interface at the source</i>)
MTBF	Tiempo medio entre fallos (<i>mean time between failures</i>)
MTTR	Tiempo medio hasta la reparación (<i>mean time to repair</i>)
NDSF	Fibra monomodo sin dispersión desplazada (<i>non-dispersion shifted single mode fibre</i>)
NF	Figura de ruido (<i>noise figure</i>)
NRZ	Sin retorno a cero (<i>non return to zero</i>)
NZDSF	Fibra monomodo con dispersión desplazada no nula (<i>non-zero dispersion shifted single mode fibre</i>)
OA	Amplificador óptico (<i>optical amplifier</i>)
OD	Demultiplexor óptico (<i>optical demultiplexer</i>)
OFA	Amplificador de fibra óptica (<i>optical fibre amplifier</i>)
OM	Multiplexor óptico (<i>optical multiplexer</i>)
OOK	Multiplexión cerrado-abierto (<i>on-off keying</i>)
OSNR	Relación señal óptica/ruido (<i>optical signal-to-noise ratio</i>)
OSR	Repetidor submarino óptico (<i>optical submarine repeater</i>)
OTDR	Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (<i>optical time domain reflectometry</i>)
OTN	Red óptica de transporte (<i>optical transport network</i>)
PDG	Ganancia dependiente de la polarización (<i>polarization-dependent gain</i>)
PDL	Pérdida dependiente de la polarización (<i>polarization-dependent loss</i>)
PFE	Equipo de alimentación de energía (<i>power feeding equipment</i>)
PHB	Quemadura de hueco por polarización (<i>polarization hole burning</i>)
PMD	Dispersión por modo de polarización (<i>polarization mode dispersion</i>)
R	Punto de interfaz óptica monocanal en el receptor (<i>single channel optical interface point at the receiver</i>)
RX	Receptor (óptico) (<i>optical receiver</i>)

RZ	Retorno a cero (<i>return to zero</i>)
S	Interfaz óptica monocanal en el origen (<i>single channel optical interface at the source</i>)
SDH	Jerarquía digital síncrona (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SOP	Estado de polarización (<i>state of polarization</i>)
SPM	Automodulación de fase (<i>self-phase modulation</i>)
SRS	Dispersión de Raman estimulada (<i>stimulated Raman scattering</i>)
SWS	Sistema monolongitud de onda (<i>single wavelength system</i>)
TS	Estación terminal (<i>terminal station</i>)
TTE	Equipo terminal de transmisión (<i>terminal transmission equipment</i>)
TX	Transmisor (óptico) (<i>optical transmitter</i>)
WDM	Multiplexación por división en longitud de onda (<i>wavelength division multiplexing</i>)
WDMS	Sistema de multiplexación por división en longitud de onda (<i>wavelength division multiplexing system</i>)
XPM	Transmodulación de fase (<i>cross-phase modulation</i>)

5 Parámetros de elementos de sistema

5.1 Parámetros del transmisor

Estos parámetros se definen en los puntos de referencia S o MPI-S a la salida del transmisor, definidos en las Recs. UIT-T G.957, G.691, G.692 y G.959.1.

5.1.1 Intervalo de longitud de onda de funcionamiento del sistema

Los intervalos de longitud de onda de funcionamiento para los sistemas SDH monocanal de hasta 10 Gbit/s figuran en las Recs. UIT-T G.691 y G.957. Los intervalos de longitud de onda de funcionamiento para sistemas IrDI monocanal y multicanal de hasta 40 Gbit/s se definen en la Rec. UIT-T G.959.1. Otros sistemas pueden utilizar diferentes bandas de longitud de onda e intervalos dentro de esas bandas, como se define en este Suplemento.

5.1.2 Características espectrales

Las características espectrales de las interfaces SDH monocanal de hasta 10 Gbit/s se describen en las Recs. UIT-T G.957 y G.691. Para velocidades binarias más altas y distancias más largas, en particular en un entorno WDM, pueden ser necesarias especificaciones adicionales.

5.1.3 Anchura espectral máxima de fuentes SLM

Este parámetro, para los sistemas SDH monocanal, se define en la Rec. UIT-T G.691.

5.1.4 Anchura espectral máxima de fuentes MLM

Este parámetro, para sistemas SDH monocanal, se define en la Rec. UIT-T G.691.

5.1.5 Fluctuación

Este parámetro se define en la Rec. UIT-T G.691. Para sistemas con velocidad binaria más alta o de mayor distancia, que posiblemente también funcionan en otros códigos de línea, probablemente sea necesaria la especificación adicional de un comportamiento dinámico en el dominio del tiempo. Esta especificación, y la medición de este parámetro, quedan en estudio.

5.1.6 Relación de supresión del modo lateral

La relación de supresión del modo lateral de una fuente óptica monomodo longitudinal se define en las Recs. UIT-T G.957, G.691 y G.959.1. Se dan valores para los sistemas SDH y OTN IrDI de hasta 40 Gbit/s.

5.1.7 Densidad de potencia espectral máxima

La densidad de potencia espectral máxima se define en la Rec. UIT-T G.691.

5.1.8 Máxima potencia media de salida del canal

La máxima potencia media de salida del canal de una señal óptica multicanal se especifica y define en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.9 Mínima potencia media de salida de canal

Esta propiedad de una señal óptica multicanal se especifica y define en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.10 Frecuencia central

Las frecuencias centrales de las señales WDM se describen en la Rec. UIT-T G.694.1. Aquí, las frecuencias se indican para una separación inferior a 12,5 GHz.

5.1.11 Separación de canal

La separación de canal para DWDM se define en la Rec. UIT-T G.694.1 y para CWDM en la Rec. UIT-T G.694.2. En la Rec. UIT-T G.671 figura una clasificación exhaustiva de los sistemas WDM.

5.1.12 Máxima desviación de la frecuencia central

La máxima desviación de la frecuencia central para canales ópticos con codificación NRZ se define en las Recs. UIT-T G.692 y G.959.1. En los casos en que se emplea un filtrado asimétrico puede ser necesaria una definición diferente, que queda en estudio.

5.1.13 Tasa de extinción mínima

La tasa de extinción mínima, indicada mediante un valor por canal para sistemas WDM con codificación NRZ, se define en la Rec. UIT-T G.959.1. Para señales con codificación RZ se aplica el mismo método. La definición para otros códigos de línea queda en estudio.

5.1.14 Plantilla del diagrama en ojo

Las plantillas del diagrama en ojo para sistemas monocanal SDH se definen en las Recs. UIT-T G.957, G.691, G.693 y otras. La plantilla del diagrama en ojo para interfaces monocanal y multicanal IrDI con codificación NRZ se define en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.15 Polarización

Este parámetro indica la distribución de polarización de la señal de la fuente óptica. Este parámetro puede afectar a la tolerancia PMD y reviste gran importancia en el caso de multiplexación de polarización.

5.1.16 Relación señal óptica/ruido de una fuente óptica

Este valor indica la relación de la potencia de la señal óptica con respecto a la potencia de ruido óptico de un transmisor óptico en una determinada anchura de banda incorporada en el trayecto de transmisión.

5.2 Parámetros del cable submarino

El cable submarino está concebido para garantizar la protección de las fibras ópticas contra la presión del agua, la propagación longitudinal en el agua, la agresión química y los efectos de contaminación del hidrógeno a lo largo de la vida útil del cable.

El cable está concebido además para que no se produzcan degradaciones en la calidad de funcionamiento de la fibra durante las operaciones de tendido, enterramiento, recuperación y explotación del cable en las prácticas submarinas comunes.

Las especificaciones importantes, así como los aspectos relacionados con la implementación de los cables submarinos de fibra óptica, figuran en las Recs. UIT-T G.973, G.974 y G.977, respectivamente.

5.2.1 Clasificación de los cables submarinos

5.2.1.1 Clasificación basada en la aplicación

Un cable de fibra óptica sumergido puede ser:

- un cable submarino con repetidor;
- un cable submarino sin repetidor;
- un cable terrenal marinizado.

Los cables submarinos con repetidor pueden utilizarse en todas las aplicaciones sumergidas, principalmente en aguas profundas.

El cable submarino sin repetidor se utiliza normalmente en aguas poco profundas y profundas. Los cables terrenal marinizados (MTC, *marinized terrestrial cables*) se utilizan, por lo general, para atravesar lagos y ríos. Normalmente, todos los cables submarinos se prueban exhaustivamente con objeto de comprobar que pueden instalarse y repararse in situ, aun en las condiciones meteorológicas más adversas, sin que se degrade la calidad de funcionamiento óptico, eléctrico o mecánico o la fiabilidad.

5.2.1.2 Clasificación basada en la protección del cable

El cable submarino de fibra óptica debe protegerse contra los peligros ambientales que existen a la profundidad en que se utiliza: protección contra los seres vivos marinos, mordeduras de peces y erosión, y blindaje contra la agresión y actividades de los barcos. En la Rec. UIT-T G.972 se definen diferentes tipos de cables protegidos, en particular:

- cable con armadura simple;
- cable con armadura doble;
- cable con armadura reforzada.

5.2.1.3 Clasificación basada en la protección de la fibra por la estructura del cable

La resistencia de la estructura del cable junto con la de la fibra determina el comportamiento mecánico general del cable. Éste debe diseñarse para garantizar la vida útil del sistema, habida cuenta del efecto acumulativo de las tensiones que se aplican al cable durante el tendido, recuperación y reparación, así como la tensión permanente o el alargamiento residual que sufre el cable instalado.

Para proteger las fibras ópticas se emplean comúnmente dos tipos genéricos de estructuras de cable:

- Estructura del cable apretada, en la que las fibras se mantienen fuertemente unidas al cable, de modo que el alargamiento de la fibra es prácticamente igual al del cable.
- Estructura del cable floja, en la que las fibras pueden desplazarse libremente dentro del cable, de modo que el alargamiento de la fibra es inferior al del cable, y es nulo hasta que la elongación del cable alcanza un determinado valor.

5.2.2 Parámetros de transmisión de la fibra en un cable submarino

Por lo general, las características de transmisión de las fibras antes del cableado (instalación del cable) será similar o idéntica a las especificadas en las Recs. UIT-T G.652, G.653, G.654, G.655 y G.656. Los tipos de fibra se eligen para optimizar el costo y la calidad de funcionamiento global del sistema.

Las características de transmisión de las fibras en la sección del cable elemental deben estar dentro de los límites de variación especificados para las características de la fibra antes del cableado, en particular, el diseño del cable, los empalmes del cable y las fibras deben ser tales que el aumento de la atenuación debido a la curvatura y microcurvatura de la fibra sea despreciable. Habrá que tener en cuenta lo anterior para determinar el radio de curvatura mínimo de la fibra en el cable y en el equipo (empalmes del cable óptico, terminación, repetidores, etc.).

La atenuación, dispersión cromática y PMD de la fibra deben ser estables dentro de los límites especificados para la vida útil del sistema; en particular, el diseño del cable debe minimizar hasta niveles aceptables la penetración del hidrógeno del exterior y la generación de hidrógeno dentro del cable, aun después de que éste se rompa en la profundidad en la que se esté utilizando; también debe tomarse en consideración la sensibilidad de la fibra óptica a la radiación gama.

Los principales parámetros que caracterizan la fibra óptica son:

- el coeficiente de atenuación a todas las longitudes de onda de funcionamiento expresadas en dB/km;
- el coeficiente de dispersión cromática a todas las longitudes de onda de funcionamiento en ps/nm.km;
- la longitud de onda de dispersión cero λ_0 en nm;
- el coeficiente de dispersión alrededor de las longitudes de onda de funcionamiento, en ps/nm².km;
- el índice de refracción no lineal n_2 en m²/W;
- la sección eficaz A_{eff} en μm^2 ;
- el coeficiente no lineal n_2/A_{eff} in W⁻¹;
- la dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*) media global en ps/(km)^{1/2}.

En lo que respecta a esos parámetros, los ingenieros de sistemas submarinos distinguen varios tipos de fibra óptica, entre los que pueden citarse:

- Fibra monomodo sin dispersión desplazada (NDSF, *non-dispersion shifted single mode fibre*), definida en la Rec. UIT-T G.652.
- Fibra monomodo con dispersión desplazada (DSF, *dispersion shifted single mode fibre*), definida en la Rec. UIT-T G.653.
- Fibra monomodo con corte desplazado (CSF, *cut-off shifted single mode fibre*), definida en la Rec. UIT-T G.654.
- Fibra monomodo con dispersión desplazada no nula (NZDSF, *non-zero dispersion shifted single mode fibre*), definida en las Recs. UIT-T G.655 y G.656.
- Fibra monomodo con compensación de dispersión (DCF, *dispersion compensation single mode fibre*).
- Fibra con gradiente de dispersión negativo.
- Fibra de sección eficaz muy grande.

Dependiendo de las especificaciones del sistema (velocidad binaria de datos y codificación, número de longitudes de onda, amplificación, potencia de salida del amplificador, longitud del enlace, etc.,) pueden emplearse diversas combinaciones de estos tipos de fibra para garantizar la calidad de funcionamiento del sistema. En este caso, se dice que el sistema está gestionado por dispersión.

5.2.2.1 Atenuación en la fibra

La atenuación en la fibra óptica se caracteriza por el coeficiente de atenuación expresado en dB/km (valor logarítmico) o en km^{-1} (valor lineal).

5.2.2.2 No linealidad de la fibra

Cabe tener en cuenta los efectos no lineales al diseñar enlaces ópticos de gran longitud y con OFA de gran potencia de salida. Estos efectos son acumulativos a lo largo del enlace óptico y pueden degradar considerablemente la propagación. En los sistemas SWS, el efecto no lineal predominante es, por lo general, la automodulación de fase de la señal proporcional al coeficiente no lineal (relación n_2/A_{eff}) multiplicado por el cuadrado de su amplitud normalizada. Este efecto no lineal, en la presencia de dispersión cromática, causa el ensanchamiento del pulso en el dominio del tiempo, y por lo consiguiente, la degradación de la calidad de funcionamiento del sistema. En los sistemas WDMS o DWMS, el efecto predominante es normalmente la transmodulación de fase debida a la presencia de longitudes de onda adyacentes. Este efecto no lineal también causa la degradación de la calidad de funcionamiento.

5.2.2.3 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Las ligeras desviaciones de la asimetría cilíndrica perfecta en el núcleo de la fibra producen la doble refracción, cuya causa es la diferencia de índice de modo existente en los componentes con polarización ortogonal del modo fundamental. La PMD causa el ensanchamiento del pulso y debe limitarse a un valor máximo. Este valor puede expresarse para el enlace en su totalidad y generalmente se fija a una cierta relación de intervalo de tiempo por bit. La PMD se expresa en $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$.

5.2.2.4 Dispersión cromática

La dispersión cromática es la dependencia de longitud de onda con respecto a la velocidad de grupo, dado que todos los componentes espectrales de la señal óptica se propagan a velocidades diferentes. Esto causa el ensanchamiento del pulso y puede dar lugar a una degradación importante. En función del diseño del sistema y, en particular, del número de longitudes de onda (sistemas WDM) quizá convenga gestionar la dispersión cromática de manera muy diferente para limitar el ensanchamiento del pulso y otros efectos de propagación. Por lo general, esta gestión se traduce en la elaboración de un mapa de dispersión que muestra cómo se gestiona la dispersión a lo largo de todo el enlace.

5.2.3 Parámetros mecánicos de la fibra

La calidad de funcionamiento mecánico de la fibra depende sobremanera de la aplicación de una prueba a toda la longitud de la fibra. La prueba de la fibra óptica se caracteriza por la tensión aplicada a la fibra o el alargamiento de la misma y la duración de aplicación. El nivel de la prueba debe determinarse en función de la estructura del cable. Los empalmes de la fibra también deben someterse a prueba de manera similar. Se recomienda que la duración de la prueba sea lo más breve posible.

Para determinar el radio de curvatura mínimo de la fibra en el cable y en el equipo (repetidores, unidades de derivación, cajas de empalme del cable o terminaciones del cable) debe tenerse en cuenta la resistencia mecánica de la fibra y los empalmes.

5.2.4 Parámetros mecánicos del cable

Los barcos deben manipular con seguridad el cable, las cajas de empalme, conectores y transiciones del cable, durante las operaciones de tendido y reparación; el cable debe soportar el paso varias veces por la proa del barco.

El cable debe ser reparable, y el tiempo necesario para empalmar el cable a bordo del barco en una operación de reparación, y en buenas condiciones de trabajo, debe ser razonablemente corto.

En caso de que el cable se enganche en un rezón, ancla o aparejo de pesca, normalmente se romperá a una tensión aproximadamente inferior (dependiendo del tipo del cable y de las características del rezón) a la de ruptura cuando está estirado en línea recta; por consiguiente, existe el riesgo que se reduzca la vida útil de la fibra y el cable y la fiabilidad en las proximidades del punto de ruptura, debido especialmente a la tensión aplicada a la fibra o a la penetración de agua; la parte dañada del cable debe reemplazarse; su longitud debe permanecer dentro de un valor especificado.

En la Rec. UIT-T G.972 se definen diversos parámetros que determinan las características mecánicas del cable y su capacidad de instalación, recuperación y reparación; estos parámetros deben utilizarse como guía para la manipulación del cable:

- tensión de ruptura del cable, medida durante la prueba de calificación;
- tensión, aplicada al cable, de ruptura de la fibra, medida durante la prueba de calificación;
- resistencia a la tensión transitoria nominal, que podría producirse fortuitamente, especialmente durante las operaciones de recuperación;
- resistencia a la tensión operativa nominal, que podría producirse durante la reparación;
- resistencia a la tensión permanente nominal, que caracteriza al estado del cable después del tendido;
- mínimo radio de curvatura de cable, que ha de servir de guía para la manipulación del cable.

5.2.5 Parámetros eléctricos del cable

El cable debe permitir la alimentación eléctrica distante de repetidores o unidades de derivación, e incluir un conductor eléctrico de poca resistencia lineal, y un aislante con capacidad de aislamiento de alto voltaje.

5.2.6 Longitud de fabricación del cable submarino

La longitud de fabricación del cable submarino debe ser lo más larga posible, por lo general de más de 25 km.

5.2.7 Parámetros físicos del cable submarino

Los parámetros físicos del cable submarino son, entre otros, el diámetro exterior, el peso en el aire, el peso en el agua.

5.2.8 Cable de reparación

El cable de reparación se utiliza cuando se estropea o rompe un cable submarino. Las características ópticas, electrónicas y mecánicas del cable de reparación deben ser similares a las del cable que se desea reparar.

5.3 Parámetros del repetidor submarino

Véanse las Recs. UIT-T G.974 y G.977.

5.3.1 Tipo de repetidores

Existen tres tipos de repetidores:

- repetidor óptico con regeneración eléctrica 3R;
- repetidor óptico con amplificador EDF;
- repetidor óptico con amplificación Raman.

NOTA – En otras cláusulas de este Suplemento se emplea OFA para designar a los amplificadores EDF y a los amplificadores Raman.

5.3.2 Parámetros del repetidor óptico con regeneración eléctrica 3R

5.3.2.1 Parámetros ópticos

La señal en la interfaz óptica debe ser acorde con el balance de potencia de la sección óptica. En particular, en el momento de ensamblar el sistema, deben respetarse ciertos límites:

- Mínima potencia media a la entrada del repetidor (dBm): al ensamblar el enlace, la señal de línea óptica debe tener un valor igual a la potencia óptica media en la interfaz de entrada óptica del repetidor, de modo que el balance de potencia óptica de la sección del cable ofrezca un margen de seguridad.
- Mínima potencia media a la salida del repetidor (dBm): al ensamblar el enlace, la señal de línea óptica debe tener un valor igual a la potencia óptica media en la interfaz de salida óptica del repetidor, de modo que el balance de potencia óptica de la sección del cable ofrezca un margen de seguridad.

Para los sistemas integrados, deben especificarse parámetros similares como parte de la especificación de la integración en la interfaz óptica de línea de integración.

5.3.2.2 Parámetros de fluctuación de fase

La calidad de funcionamiento de la fluctuación de fase del repetidor (tolerancia a la fluctuación, máxima fluctuación a la salida, características de transferencia de fluctuación) en la interfaz óptica ha de ser compatible con la especificación del sistema.

Para sistemas integrados deben especificarse los mismos parámetros, la densidad espectral de fluctuación del repetidor a la salida y la fluctuación de alineación, como parte de la especificación de integración en la interfaz óptica de línea de integración.

5.3.3 Parámetros del repetidor óptico con amplificación EDF

5.3.3.1 Parámetros ópticos

La Rec. UIT-T G.661 versa sobre la definición y los métodos de prueba de los parámetros genéricos importantes de los amplificadores EDF. Para los amplificadores EDF en los repetidores, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- ganancia de pequeña señal (SSG, *small signal gain*);
- ganancia nominal (NG, *nominal gain*);
- figura de ruido (NF, *noise figure*);
- potencia nominal de salida de la señal (NSOP, *nominal signal output power*);
- potencia nominal de entrada de la señal (NSIP, *nominal signal input power*);
- factor de compresión (CF, *compression factor*);
- mínima potencia media a la entrada del repetidor (dBm);
- mínima potencia media a la salida del repetidor (dBm);

- calidad de funcionamiento de fluctuación;
- calidad de funcionamiento del modulador de fase.

Además, especialmente para WDMS, es necesario tener en cuenta el parámetro:

- uniformidad de ganancia (GF, *gain flatness*).

5.3.3.2 Efectos de polarización

Puede seleccionarse cada componente óptico de un amplificador EDF para garantizar que su calidad de funcionamiento sea razonablemente insensible a los efectos de la polarización tales como PDL y PMD, dependiendo de los requisitos del sistema. Otros efectos de polarización como PDG y PHB son intrínsecos y sólo pueden evitarse o limitarse utilizando mecanismos externos (por ejemplo aleatorización de la polarización de la señal en el transmisor TTE).

5.3.4 Parámetros del repetidor óptico con amplificación Raman

Queda en estudio.

5.3.5 Parámetros mecánicos de repetidor

5.3.5.1 Alojamiento del repetidor

El alojamiento del repetidor debe diseñarse de modo que permita la operación, tendido, recuperación y nuevo tendido de los repetidores ópticos a grandes profundidades sin que se produzca degradación de las características mecánicas, eléctricas y ópticas.

Las consideraciones técnicas de diseño del alojamiento repetidor son las siguientes:

- Calidad de funcionamiento, fiabilidad y facilidad de fabricación deben tomarse en consideración al determinar el diseño de la estructura básica y las posiciones de los componentes.
- Es necesario un alojamiento de repetidor que tenga una estructura eficaz en lo tocante a la absorción de choques y la dispersión de calor.
- Son necesarios conectores de alta fiabilidad, con resistencia a la presión, herméticos al gas y de baja atenuación para que las fibras y las líneas de energía eléctrica puedan conectarse al almacenamiento del repetidor.
- Son necesarios conectores del cable de alta fiabilidad y baja atenuación que sean resistentes a la presión y soporten una tracción dada.
- Estructura de empalme del cable al repetidor.

5.3.5.2 La unidad interna

Dentro del alojamiento repetidor, la unidad interna puede contener varios módulos de alimentación eléctrica y pares de OFA que amplifiquen la señal óptica en ambas direcciones desde uno o varios pares de fibra.

5.3.5.3 Protección contra corrosión

El alojamiento externo del OSR debe diseñarse de modo que no sufra corrosión debido al agua del mar.

5.3.5.4 Resistencia a la presión del agua

El OSR debe diseñarse para que soporte las grandes presiones en las profundidades del mar.

5.3.5.5 Asilamiento de alta tensión

Es necesario el aislamiento de alta tensión entre el alojamiento de repetidor y la unidad interna para garantizar el funcionamiento adecuado del repetidor.

5.3.5.6 Gestión térmica

El calor generado por los componentes electrónicos dentro del OSR debe disiparse lo suficiente mediante la conducción térmica en el alojamiento del repetidor.

5.3.5.7 Hermeticidad del aislamiento del repetidor

El repetidor debe ser hermético a la penetración de agua y gas, tanto directamente por el agua que lo rodea como de las fugas en el cable axial que resultan de la ruptura del cable cerca del repetidor.

5.3.5.8 Control de la atmósfera del ambiente

La fiabilidad y el correcto funcionamiento de los componentes pueden exigir una atmósfera interna controlada en lo que respecta a la humedad relativa o cualquier tipo de gas que pueda generarse dentro del repetidor.

5.3.6 Parámetros eléctricos de repetidor

5.3.6.1 Módulos de potencia

La alimentación eléctrica de los OSR se hace desde la estación en el extremo terminal a corriente constante a través de un conductor eléctrico en el cable. Los módulos de potencia alimentan los pares OFA para garantizar la amplificación óptica. El OSR puede aceptar los dos tipos de polaridad eléctrica.

5.3.6.2 Protección contra sobretensiones

El OSR debe protegerse contra sobretensiones eléctricas que pueden resultar de una interrupción súbita de la fuente de alimentación de alta tensión en el cable (ruptura del cable o cortocircuito PFE).

5.4 Parámetros de empalme del cable

Los empalmes del cable sirven para unir dos segmentos del cable, de modo que exista la continuidad óptica, eléctrica y mecánica entre secciones contiguas del cable. El empalme de los cables sirve para:

- empalmar subsecciones de cable para formar secciones;
- unir los cables a los repetidores durante el ensamblado del sistema;
- terminar los extremos de los cables para la posterior conversión a empalmes cable a cable durante la instalación del sistema;
- unir cables submarinos a cables terrestres en la orilla del mar.

Los empalmes de cable submarino están concebidos para ofrecer conexiones fiables entre los cables o repetidores y el cable cuando se somete a éste a grandes tensiones durante la carga del barco, instalación, recuperación, reparación y nueva instalación a profundidades de hasta 7500 metros. Existen diseños de empalmes de cable adecuados para atender las diferentes necesidades de cables submarinos armados.

5.4.1 Parámetros ópticos

5.4.1.1 Atenuación en el empalme

Por atenuación en el empalme se entiende el aumento de la atenuación debido a los empalmes en la fibra y al exceso de fibra óptica cuando se empalma el cable. Lo más conveniente es minimizar la atenuación en el empalme. Los métodos de prueba deben basarse en la Rec. UIT-T G.650.1, según proceda.

5.4.2 Parámetros mecánicos

5.4.2.1 Resistencia

Los miembros de resistencia del cable se terminan con un diseño de zócalo, cuya resistencia a la ruptura es superior al 90 por ciento de la resistencia a la ruptura mínima que ha de tener el cable.

5.4.2.2 Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión se define en la Rec. UIT-T G.972. Las demás posibilidades quedan en estudio.

5.4.2.3 Protección contra corrosión

El empalme debe protegerse para impedir su corrosión debido al agua del mar.

5.4.2.4 Resistencia a la presión del agua

El empalme debe diseñarse para soportar grandes presiones de agua.

5.4.2.5 Hermeticidad del empalme

El empalme debe ser hermético al ingreso de agua y gas en el medio marítimo.

5.4.2.6 Características de curvatura

Las fundas que limitan la curvatura garantizan una transición gradual en la rigidez de curvatura en los empalmes y están diseñados para que puedan pasar a través de la maquinaria de manipulación del cable situada a bordo de los barcos.

5.4.3 Parámetros eléctricos

Esta conexión termina el conductor eléctrico en el cable y proporciona la continuidad eléctrica a través del empalme.

5.4.3.1 Aislamiento de alta tensión

Es necesario el aislamiento de alta tensión entre el conductor eléctrico del cable y el mar para garantizar las operaciones de empalme.

5.4.4 Parámetros físicos

Los parámetros físicos del empalme del cable son la longitud, el diámetro exterior, el peso en el aire y el peso en el agua.

5.5 Parámetros de los receptores

Estos parámetros se definen en los puntos de referencia del receptor R o MPI-R según se indica en las Recs. UIT-T G.957, G.691, G.692 y G.959.1.

5.5.1 Sensibilidad

Las sensibilidades del receptor para los sistemas monocanales SDH de hasta 10 Gbit/s se definen en las Recs. UIT-T G.957 y G.691. Las sensibilidades para los receptores IrDI SDH y OTN se definen en la Rec. UIT-T G.959.1.

Las sensibilidades del receptor se definen como valores para el caso más desfavorable al final de la vida, habida cuenta del envejecimiento y los márgenes de temperatura, así como la plantilla en ojo para el caso más desfavorable y las penalizaciones de la tasa de extinción que resultan de las imperfecciones en el transmisor dadas para la especificación del transmisor de la interfaz particular.

No obstante, las penalizaciones relacionadas con los efectos del trayecto se especifican por separado del valor de la sensibilidad básico.

5.5.2 Sobrecarga

La definición de la sobrecarga del receptor y sus valores para los sistemas monocanales SDH de hasta 10 Gbit/s se definen en las Recs. UIT-T G.957 y G.691. La definición de sobrecarga y los valores para los receptores IrDI SDH y OTN de hasta 40 Gbit/s se definen en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.3 Mínima potencia media de entrada por canal

La mínima potencia media de entrada por canal de las IrDI con multiplexación óptica de hasta 10 Gbit/s para los receptores multicanal se definen en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.4 Máxima potencia media de entrada de canal

La máxima potencia media de entrada de canal de las IrDI con multiplexación óptica de hasta 10 Gbit/s para receptores multicanal se definen en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.5 Penalización del trayecto óptico

La definición de la penalización del trayecto óptico y los valores para los sistemas monocanales SDH de hasta 10 Gbit/s se definen en las Recs. UIT-T G.957 y G.691. La definición de la penalización del trayecto y los valores para los receptores IrDI OTN monocal y multicanal de hasta 10 Gbit/s se definen en la Rec. UIT-T G.959.1. Las definiciones de la penalización del trayecto y los valores para los receptores IrDI SDH y OTN monocal de hasta 40 Gbit/s se definen también en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.6 Máxima diferencia de potencia a la entrada del canal

Este parámetro indica la diferencia máxima entre los canales de una señal con multiplexación óptica y se define en la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.7 Mínima OSNR en la entrada del receptor

Este valor define la mínima relación señal óptica/ruido que es necesaria para lograr la BER deseada en el punto de referencia del receptor a un determinado nivel de potencia en los sistemas (con amplificación de línea) con OSNR limitada. Cabe observar que éste es un parámetro de diseño.

6 Topología de la red óptica

Los tipos de topología de la red óptica para los sistemas de cable submarino de fibra óptica son punto a punto, en estrella, en estrella con derivación, troncal con derivaciones, festón, anillo y anillo con derivación. Esta sección se basa en la información que figura en [1].

6.1 Punto a punto

Esta configuración (figura 6-1) consiste en un enlace de submarino directo entre dos equipos terminales de transmisión (TTE, *terminal transmission equipments*) ubicados en dos estaciones terminales (TS, *terminal stations*) diferentes.

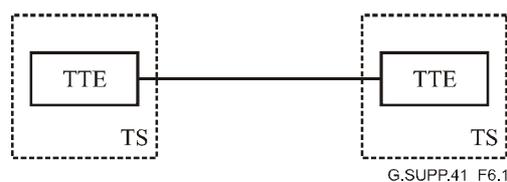


Figura 6-1 – Topología punto a punto

6.2 Estrella

Esta configuración (figura 6-2) consiste en una estación terminal (TS) principal que enlaza otras TS mediante cables separados. En la configuración en estrella básica, el tráfico se transmite directamente desde los TTE de la TS principal hacia el TTE de otras TS, y de manera independiente. Por consiguiente, la red en estrella exige un cable separado para cada TS, lo que da lugar a que la configuración sea relativamente costosa, especialmente cuando las TS están muy distantes entre sí.

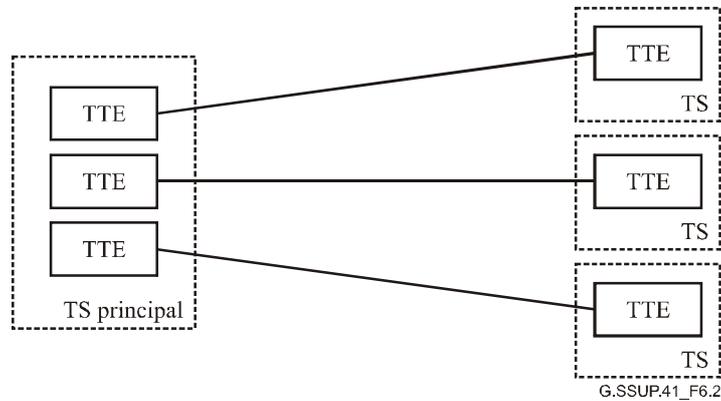


Figura 6-2 – Topología en estrella

6.3 Estrella con derivación

Esta configuración (figura 6-3) ofrece la misma capacidad que la topología en estrella básica; la diferencia estriba en que la división del tráfico se realiza bajo el agua, lo que minimiza el costo del cable entre las TS distantes. La división de tráfico se realiza mediante una unidad de derivación (BU, *branching unit*) que interconecta las fibras de un mismo cable troncal a las fibras separadas dentro de dos o más derivaciones.

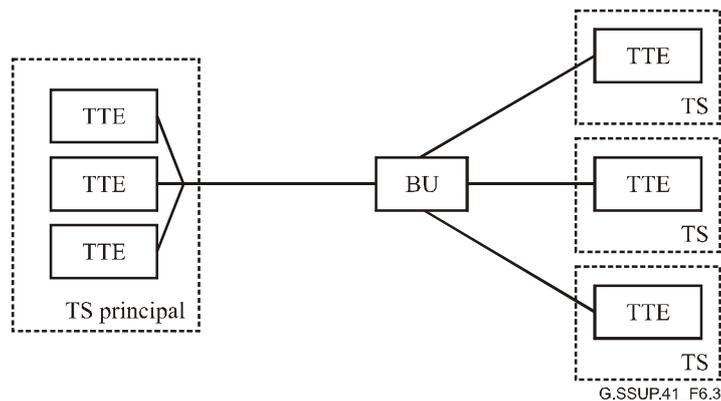


Figura 6-3 – Topología en estrella con derivación

6.4 Troncal con derivaciones

En esta configuración (figura 6-4) se conectan diversas TS que incluyen TTE a un mismo cable troncal mediante unidades de derivación que permiten la extracción de una parte del tráfico en la dirección de la TS de las derivaciones.

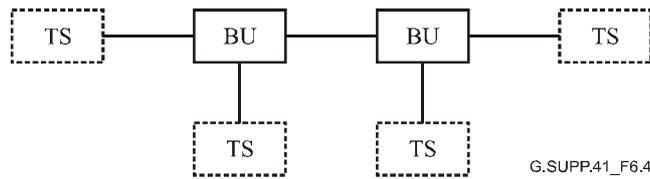


Figura 6-4 – Topología troncal con derivaciones

6.5 Festón

El festón consiste (figura 6-5) básicamente en una serie de lazos entre los principales puntos ubicados en la tierra costera que normalmente – aunque no siempre – se despliegan con un sistema sin repetidor. Previendo la necesidad de aumentar la capacidad en el futuro, estas aplicaciones sin repetidor se diseñan normalmente con cables que contienen un número de fibras mayor que los necesarios para el servicio inicial. Así pues, en caso de que se necesite aumentar la capacidad, la única inversión adicional necesaria serán los equipos del terminal. La arquitectura de una topología festón es con frecuencia idéntica a la de una instalación típica basada en tierra. A menudo puede utilizarse esta arquitectura como una ruta diferente y complementaria de un sistema terrestre existente. Esa configuración se está convirtiendo en una alternativa cada vez más generalizada para los sistemas terrestres, especialmente cuando la instalación y mantenimiento en el terreno continental resultan difíciles y problemáticos.

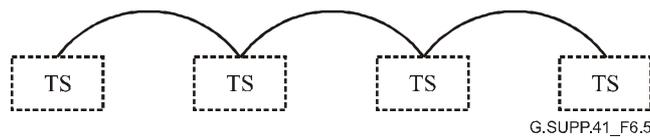


Figura 6-5 – Topología en festón

6.6 Anillo

La configuración en anillo (figura 6-6) es básicamente un conjunto de cables conectados punto a punto cuya capacidad es el doble de la necesaria para la transmisión. En caso de que se produzca un fallo en el anillo, por ejemplo la ruptura de un cable, el tráfico se encamina alrededor del anillo – en el sentido opuesto a donde se encuentra el segmento inoperable – hasta su destino original. El equipo de transmisión en la costa ofrece la detección automática de fallos y el control de la conmutación para todo el anillo sin rechazar las llamadas.

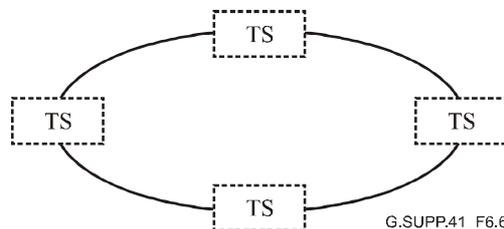


Figura 6-6 – Topología en anillo

6.7 Anillo con derivaciones

Esta configuración (figura 6-7) aumenta de manera rentable la capacidad básica del anillo, gracias a la adición de una unidad de derivación. La estructura en anillo con derivación mantiene la naturaleza de autoprotección del anillo. Así pues, el anillo con derivación puede verse como una fusión de las topologías troncal con derivaciones y de anillo, que ofrece las ventajas de ambas

topologías. Esta configuración puede realizarse de diversas maneras, e incluir la conexión de otras redes. Mediante la adecuada planificación, la red puede instalarse como una configuración troncal con derivaciones y modificarse más adelante para darle una configuración en anillo con derivaciones.

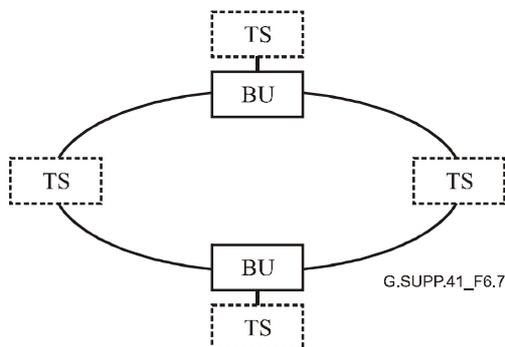


Figura 6-7 – Topología de anillo con derivaciones

7 Consideraciones de diseño de sistema

7.1 Balance de potencia óptica

El balance de potencia óptica, definido en la Rec. UIT-T G.976, es un balance de la calidad de funcionamiento contractual que garantiza una calidad de funcionamiento del sistema mayor que el mínimo exigido por la calidad de funcionamiento BER definida en las Recs. UIT-T G.826 y/o G.828.

El balance de potencia óptica comienza con un factor de calidad lineal sencillo (factor Q) que sólo tiene en cuenta la degradación debida al ruido ASE de los amplificadores (*Q medio*). Posteriormente, en el balance de potencia óptico se tienen en cuenta las penalidades/imperfecciones de todos los tipos de degradación (las debidas a la transmisión, a los equipos terminales, etc.). La degradación se calcula utilizando una combinación de análisis teórico, simulaciones por computador y mediciones directas sobre bancos de prueba experimentales.

Para cada sección de la línea digital submarina, se recomienda establecer dos balances de potencia distintos, uno al comienzo de vida (BOL, *beginning of life*) y otro al final de vida (EOL, *end of life*):

- El balance de potencia BOL corresponde al caso más desfavorable de la calidad de funcionamiento de la sección de la línea digital que se mide durante la puesta en servicio.
- El balance de potencia EOL corresponde al caso más desfavorable calculado de la calidad de funcionamiento de la sección de la línea digital al final de la vida útil del sistema e incluye los márgenes para tener en cuenta el envejecimiento, los fallos internos y los márgenes de reparación específicos.

El margen EOL es la diferencia entre el factor Q del peor caso calculado al final de la vida del sistema y el mínimo factor Q necesario para satisfacer los requisitos de calidad de funcionamiento de la transmisión. Por otra parte, el balance de potencia óptico debe mostrar claramente el mínimo factor Q necesario para obtener la característica de error especificada del sistema e incluir un margen de mejoramiento que ofrece la utilización de FEC (si la hubiere). (Véase la figura 7-1.)

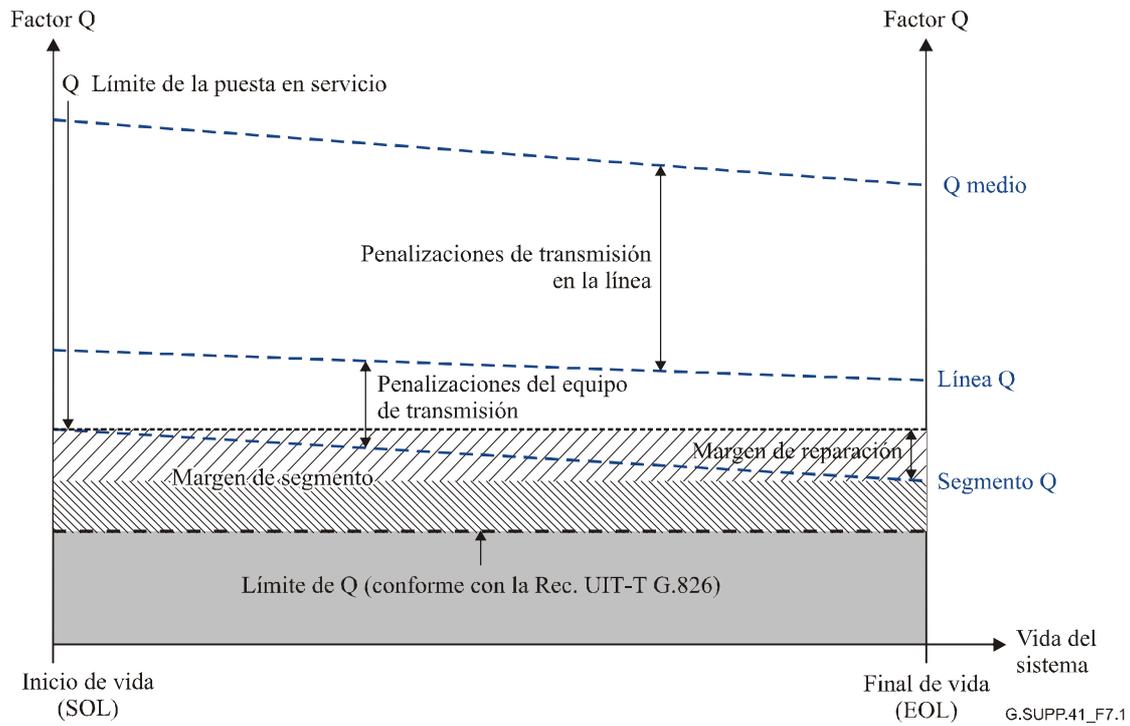


Figura 7-1 – Ejemplo de estructura de balance de potencia

7.1.1 Factor de calidad (factor Q)

El cuadro del balance de potencia óptica de una sección de línea digital submarina utiliza los factores Q, que se describen en el anexo A/G.977 y se expresan en decibelios. El texto que figura a continuación se basa en el Suplemento 39 de las Recomendaciones UIT-T de la serie G y se reproduce a continuación para facilitar su consulta.

El factor Q es la relación señal-ruido en el circuito de decisión, en unidades de tensión o corriente, y viene dado por:

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)} \quad (7-1)$$

siendo $\mu_{1,0}$ el valor medio de las tensiones o corrientes de las marcas/espacios, y $\sigma_{1,0}$ su desviación típica. Por ejemplo, una BER de 10^{-12} corresponde a $Q \approx 7,03$.

Dado que las técnicas prácticas de medición de Q efectúan las mediciones en las regiones superior e inferior del "ojo" recibido a fin de inferir la calidad de la señal al nivel de decisión óptimo, Q puede considerarse únicamente indicador cualitativo de la BER real.

Las relaciones matemáticas con la BER (en el caso de funcionamiento no FEC) cuando el umbral se fija en el valor óptimo son:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (7-2)$$

siendo:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta \quad (7-3)$$

Una aproximación que se suele utilizar para esta función es la siguiente:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (7-4)$$

Para $Q > 3$ (suponiendo una gaussiana).

Una expresión alternativa que proporciona respuestas precisas en todo el intervalo de Q [2] viene dada por:

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (7-5)$$

La figura 7-2 es un gráfico en el que se comparan estas dos aproximaciones para valores de Q menores o iguales que 5.

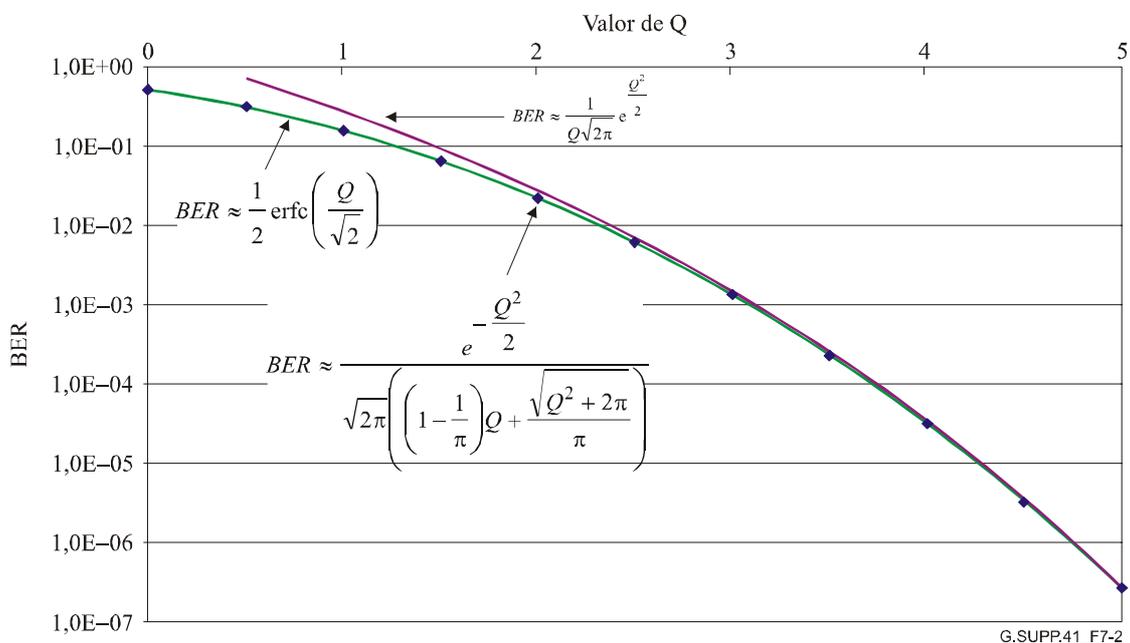


Figura 7-2 – Aproximaciones de la relación entre la BER y Q

El factor Q se expresa en decibelios en lugar de en valores lineales:

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad (7-6)$$

La calidad de funcionamiento de una sección de línea digital submarina debe caracterizarse por la medición de su factor Q o por una medición directa de la BER, las cuales deben cumplir los límites del factor Q contractuales en la puesta en funcionamiento que se indican en el balance de potencia óptica.

Obsérvese que las ecuaciones 7-2 a 7-5 son válidas únicamente en el caso de una distribución de ruido gaussiana. Esta aproximación es aceptable para los formatos de modulación basados en la técnica OOK, ampliamente utilizada en los sistemas submarinos. Los formatos de modulación basados en la modulación de fase, como por ejemplo DPSK, que se han vuelto a estudiar en los últimos años para su aplicación bajo el mar, quedan en estudio.

7.1.2 Parámetros importantes para el balance de potencia óptica

De conformidad con la Rec. UIT-T G.977, se recomienda que el balance de la potencia óptica tenga en cuenta, al menos, las degradaciones causadas por los siguientes efectos y consideraciones:

- Acumulación de ruido óptico (véase 7.1.3) → Cálculo del factor Q medio.
- Degradaciones de propagación (véase 7.1.4) → Cálculo del factor de la línea Q.
 - Degradaciones de propagación debidas a los efectos combinados de la dispersión cromática y efectos no lineales (efectos debidos a la automodulación de fase, transmodulación de fase, mezcla de cuatro ondas entre los LOC, dispersión Raman estimulada, etc.) (véase 7.1.4.1).
 - Degradaciones de propagación debidas a los efectos de polarización óptica tales como la dispersión por modo de polarización (PMD), la pérdida dependiente de la polarización (PDL, *polarization dependent loss*), la ganancia dependiente de la polarización (PDG, *polarization dependent gain*). Como estas degradaciones varían con el tiempo, debe adoptarse una disposición distinta para tener en cuenta la variación de la calidad de funcionamiento con el correr del tiempo (véase 7.1.4.2).
 - Degradaciones debidas a la no uniformidad de la curva de ganancia acumulativa en todo el segmento (véase 7.1.4.3).
 - Degradaciones debidas a la preacentuación no óptima (véase 7.1.4.4).
 - Degradaciones debidas al desajuste de longitud o longitudes de onda de la sección de línea óptica submarina (véase 7.1.4.5)
 - Degradaciones debidas a la supervisión (véase 7.1.4.6)
 - Degradaciones debidas a la fabricación y el medio ambiente (véase 7.1.4.7)
- Degradaciones resultantes de las características no ideales del equipo de transmisión terminal (en lo relativo a la calidad de funcionamiento del factor Q del equipo de transmisión terminal) (véase 7.1.5) → Cálculo del factor Q del segmento.
- Deben añadirse algunos márgenes adicionales específicos para el balance de potencia EOL (véase 7.1.6) → Margen de segmento.
 - Márgenes debidos a las operaciones de reparación específicas (empalmes de reparación, atenuación adicional y variación en la plantilla de dispersión debido al exceso de longitud del cable después de la reparación, etc.) (véase 7.1.6.1).
 - Márgenes debidos al envejecimiento del cable y los componentes (véase 7.1.6.2).
 - Márgenes debidos a la previsión de fallos de algunos componentes, por ejemplo fallo en el láser de bombeo (véase 7.1.6.3).

La transmodulación de fase y la mezcla de cuatro ondas entre los canales ópticos, la dispersión Raman estimulada, la no uniformidad de la curva de ganancia acumulativa y las no optimizadas potencias relativas de los canales ópticos son degradaciones especialmente aplicables a los sistemas WDM y DWDM, ya que se deben a la propagación simultánea de varias señales ópticas por la misma fibra.

7.1.3 Acumulación del ruido óptico

7.1.3.1 Cálculo de la relación señal óptica/ruido

En un sistema que conste de una cadena de amplificadores ópticos en cascada, se acumula el ruido ASE de las contribuciones de cada amplificador óptico. La relación señal óptica/ruido (OSNR) disminuye después de haber pasado por cada amplificador óptico. Por consiguiente, la OSNR es un parámetro que sirve para supervisar y caracterizar la calidad de funcionamiento de los amplificadores ópticos. La figura 7-3 representa un sistema multicanal que se ha utilizado como referencia (N tramos, N – 1 amplificadores de línea).

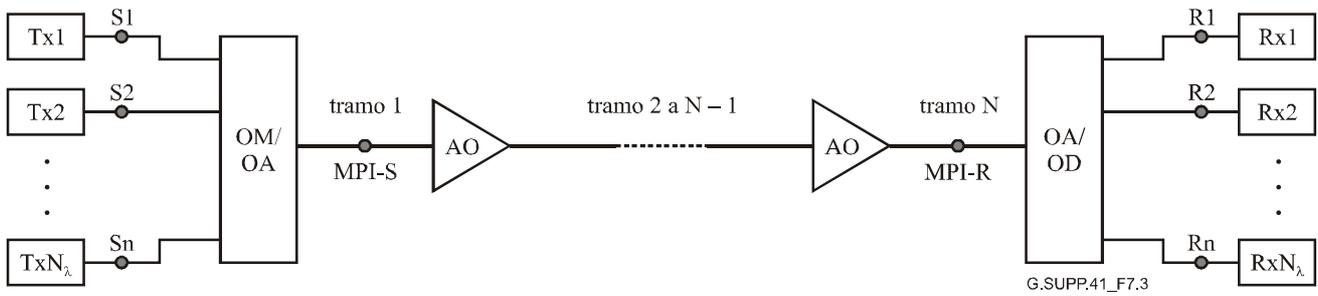


Figura 7-3 – Representación de las interfaces del sistema de línea óptica (sistema de N tramos multicanal)

Existen dos maneras distintas de calcular la OSNR:

- i) acumulación de ruido simple a una potencia de señal constante; o
- ii) acumulación de ruido una potencia total de salida constante.

Aun cuando la hipótesis más realista corresponda al punto ii), la fórmula que se obtiene mediante la hipótesis i) es una buena aproximación de ii) y se utiliza de manera generalizada.

En esta cláusula se desarrolla el punto i): la potencia de la señal permanece constante.

Para el sistema que se muestra en la figura 7-3 se toma como hipótesis lo siguiente:

- todos los amplificadores ópticos en la cadena tienen la misma figura de ruido (NF),
- la atenuación producida en todos los tramos es la misma,
- la potencia de salida total es idéntica en todos los amplificadores en línea.

En este caso, la OSNR a la entrada de los receptores (punto R_i en la figura 7-3, $i = 1, \dots, n$) puede aproximarse por la ecuación:

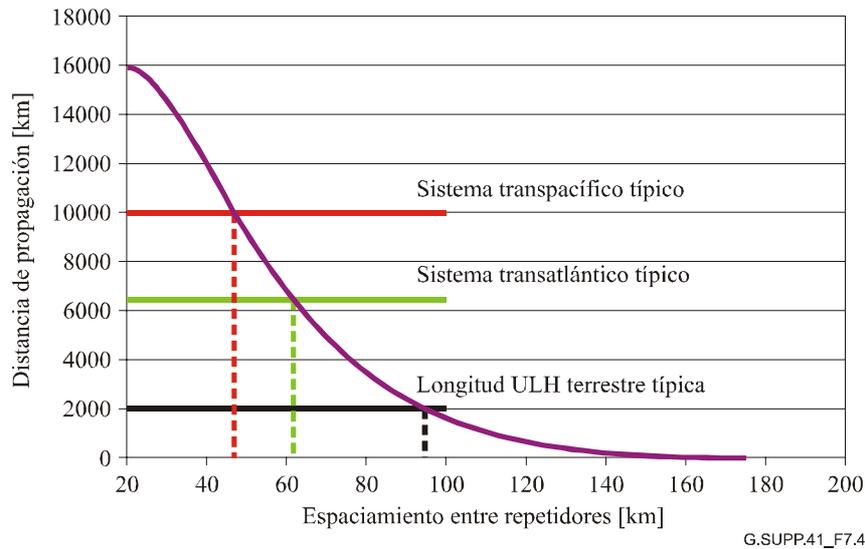
$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot N_{amp} \cdot NF - \frac{1}{G} \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-7)$$

siendo P_{out} la potencia total de salida del amplificador en W, G la ganancia del amplificador (que se supone idéntica a la atenuación total del tramo), NF la figura de ruido del amplificador óptico, h la constante de Planck's en $J \cdot s$, ν la frecuencia óptica en Hz, B_r la anchura de banda de referencia óptica en Hz, N_{λ} el número total de longitudes de onda y N_{amp} el número total de amplificadores. La ecuación 7-7 indica que el ruido ASE se acumula por la contribución de todos los amplificadores N_{amp} .

Si la ganancia de los amplificadores en la línea es muy alta, es decir $G \gg 1$, la ecuación 7-7 puede simplificarse del modo siguiente:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot N_{amp} \cdot NF \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-8)$$

siendo la ganancia G igual a $e^{\alpha L}$, donde L es la longitud del tramo. De esta ecuación se deduce que dada una OSNR, la longitud total alcanzable es una función de longitud del tramo. En la figura 7-4 se muestra un ejemplo de las longitudes de tramo típicas que se utilizan en los sistemas submarinos y terrestres.



NOTA – Los parámetros utilizados son los siguientes: $OSNR = 16$ dB en la anchura de referencia $B_r = 0,1$ nm, $NF = 4,7$ dB, $N_\lambda = 64$ canales, $P_{out} = 14$ dBm y la atenuación de la fibra $\alpha = 0,21$ dB/km.

Figura 7-4 – Ejemplo de espaciamiento entre repetidores que es necesario para lograr distancias de transmisión submarinas y terrestres típicas

En el caso de un sistema sin repetidores que incluya un único preamplificador, la ecuación 7-8 se transforma en:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot NF \cdot G_{pre-amplifier} \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-9)$$

donde L es la longitud del cable en kilómetros y α es la atenuación total en km^{-1} .

En el caso de los sistemas sin repetidores con amplificación remota y con un único amplificador de repetidor en el transmisor, la ecuación 7-7 se transforma en:

$$OSNR = \frac{P_{Trans} \cdot e^{-\alpha L}}{N_\lambda \cdot h\nu \cdot B_r \cdot \left(NF_1 + \frac{NF_2}{G_1} \right)} \quad (7-10)$$

siendo L la longitud total del cable en km, α la atenuación total en km^{-1} , P_{Trans} la potencia de salida del transmisor (punto MPI-S en la figura 7-3), NF_1 y NF_2 las figuras de ruido del amplificador distante y el amplificador de repetidor y G_1 la ganancia del amplificador distante.

El caso de los sistemas submarinos sin repetidor con amplificación Raman queda en estudio.

7.1.3.2 Cálculo del factor Q

Si se desprecia el ruido térmico y el ruido por agitación térmica del receptor y se aplican las aproximaciones que figuran en 7.1.1, el factor Q lineal teórico puede aproximarse por la siguiente relación:

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2M \cdot OSNR \cdot (1 - ER)}{1 + ER} \sqrt{\frac{B_r}{B_e}}}{\sqrt{1 + \frac{4M \cdot ER \cdot OSNR}{1 + ER}} + \sqrt{1 + \frac{4M \cdot OSNR}{1 + ER}}} \quad (7-11)$$

siendo $OSNR$ la relación señal óptica/ruido expresada en la anchura de banda óptica B_r , ER la tasa de extinción del transmisor expresada en unidades lineales, B_e la anchura de banda eléctrica del receptor en Hz, B_r la anchura de banda óptica del receptor en Hz, y M el coeficiente relacionado con el formato de modulación ($M = 1$ para NRZ, $M \sim 1,4$ para RZ [3]). Obsérvese que el coeficiente M también depende del parámetro tasa de extinción.

7.1.4 Degradaciones debidas a la propagación

Las degradaciones debidas a la propagación causan algunas penalidades adicionales en comparación con el valor de Q_{medio} calculado teniendo únicamente en cuenta la acumulación de ruido ASE. Estas degradaciones se han de restar del factor Q_{medio} a fin de obtener el valor de Q_{lineal} (véase la figura 7-1).

7.1.4.1 Degradaciones en la propagación ocasionada por efectos no lineales

Las interacciones no lineales entre la señal y el medio de transmisión comienzan a producirse cuando la densidad de potencia de la señal óptica es alta. Cabe observar que para lograr un valor de $OSNR$ aceptable sin reducir las longitudes de los trayectos es necesario que la potencia de la señal sea elevada. Por consiguiente, se ha conferido una atención especial a las no linealidades de la fibra, tanto en sistemas de alta capacidad como en rutas largas sin regeneración electrónica y, en particular, en el caso de enlaces submarinos largos con amplificación óptica. Por lo general, se distinguen dos tipos de no linealidades: las relacionadas con el índice de refracción dependiente de la intensidad de la fibra, conocido como el efecto Kerr (automodulación de fase, transmodulación de fase y mezcla de cuatro ondas) y las relacionadas con los efectos de dispersión (principalmente la disposición Raman estimulada). Hay diversos factores que influyen en la gravedad de estos efectos no lineales, en particular las características de dispersión de la fibra, la sección eficaz y el índice de refracción no lineal de las fibras, el número y separación de canales en los sistemas WDM, así como la intensidad de la señal y la densidad de datos. Estos efectos no lineales se describen en el apéndice II/G.663. En 7.1.4.1.1, 7.1.4.1.2, 7.1.4.1.3 y 7.1.4.1.4 se resumen los principales efectos no lineales.

7.1.4.1.1 Automodulación de fase (SPM)

El texto que figura a continuación se basa en II.3.1/G.663, y se reproduce para facilitar su consulta. 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*).

En los sistemas de transmisión ópticos, la automodulación de fase ensancha gradualmente el espectro de la señal cuando las variaciones de la intensidad óptica producen variaciones de la fase (véase la figura 7-5). Al producirse el ensanchamiento espectral causado por la 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 dispersión cromática, en la región de dispersión normal de la fibra (es decir, por debajo de la longitud de onda de dispersión nula. 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.

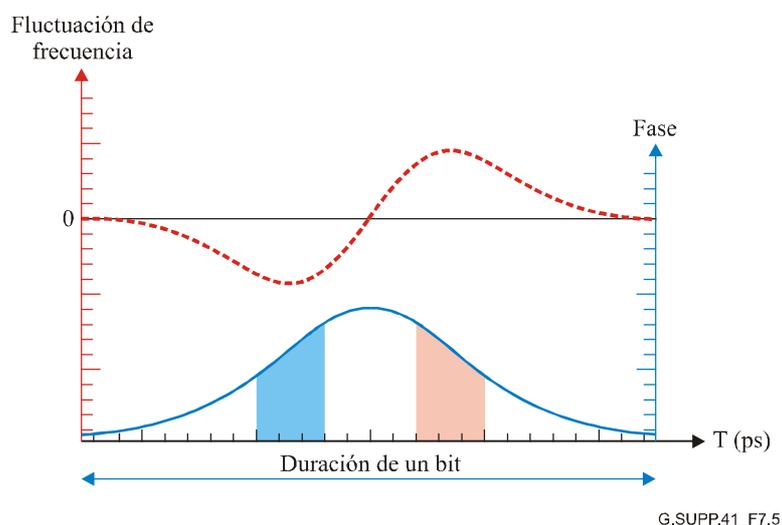


Figura 7-5 – Variación temporal del desplazamiento de fase y la fluctuación de frecuencia debida a la SPM [4]

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 espaciamiento 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.

Los efectos de automodulación de fase se pueden reducir si se utilizan longitudes de onda por encima de la dispersión nula de la fibra de la Rec. UIT-T G.655. Las fibras con atributos de zona efectiva aumentada o índice de refracción no lineal disminuido también, pueden reducir la penalidad SPM. Para todos los diseños de fibra, los efectos de la SPM pueden reducirse disminuyendo las potencias de canal inyectadas, si bien es cierto que la tendencia en el diseño de sistemas es la utilización de grandes potencias para permitir distancias de tramo mayores.

7.1.4.1.2 Transmodulación de fase (XPM)

El texto que figura a continuación se basa en II.3.3/G.663, y se reproduce para facilitar su consulta. En los sistemas multicanal, la transmodulación de fase (XPM, *cross-phase modulation*) 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.

La penalidad de los sistemas causada por la XPM aumenta con los menores espaciamientos de canales. 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.

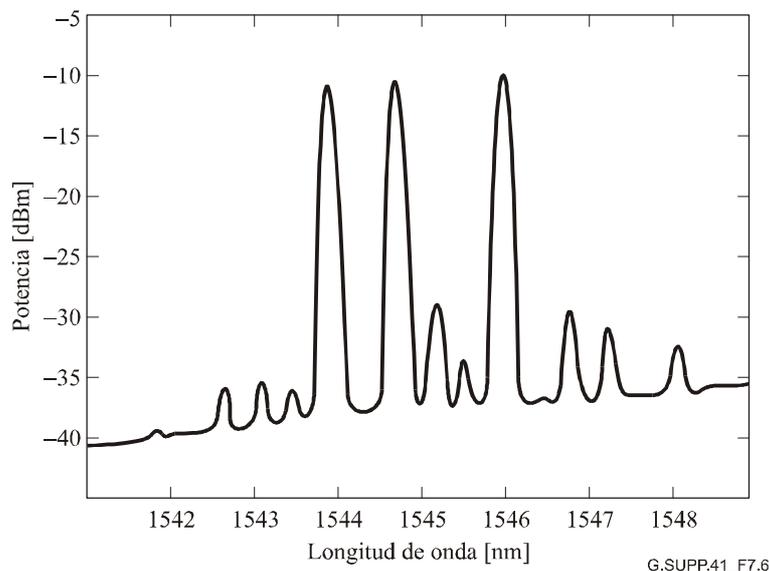
Las degradaciones causadas por la XPM son más importantes en los sistemas de fibras basados en la Rec. UIT-T G.652 que en los basados en las Recs. UIT-T G.653 y G.655. El ensanchamiento debido a la XPM puede provocar interferencia entre canales adyacentes en sistemas WDM.

Para todos los diseños de fibra, los efectos de la XPM pueden reducirse disminuyendo las potencias de canal inyectadas, si bien es cierto que la tendencia en el diseño de sistemas es la utilización de grandes potencias para permitir distancias de tramo mayores.

7.1.4.1.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM)

El texto que figura a continuación se basa en II.3.5/G.663 y se reproduce para facilitar su consulta. La mezcla de cuatro ondas (FWM, *four-wave mixing*), 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 WDM.

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 7-6), y caerán directamente en canales de señales adyacentes cuando los espaciamientos 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.



NOTA – ($D = -0,2$ ps/nm.km en el canal central) cuando se emplean canales de 3 mW [5].

Figura 7-6 – Espectro de la potencia óptica medido a la salida de una fibra de 25 km de longitud con dispersión desplazada

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 ratio*). 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.

Las penalizaciones de sistema causadas por la FWM pueden reducirse incrementando la separación de frecuencias y la dispersión cromática con objeto de eliminar 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).

7.1.4.1.4 Dispersión de Raman estimulada (SRS)

El texto que figura a continuación se basa en II.3.7/G.663 y se reproduce para facilitar su consulta. La dispersión de Raman estimulada (SRS, *stimulated Raman scattering*) 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.

La dispersión de Raman estimulada (SRS) se produce principalmente en sistemas WDM de gran anchura de banda. Las señales de longitud de onda más corta en sistemas WDM 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.

No se conoce ninguna técnica que elimine los efectos de SRS en los sistemas WDM. Puede emplearse un filtro de ganancia para corregir la variación OSNR inducida. Los efectos de la SRS también pueden reducirse disminuyendo la potencia óptica de entrada.

7.1.4.1.5 Influencia de los efectos no lineales

Los sistemas de transmisión de alta velocidad que constan de múltiples tramos y que llevan a cabo la compensación íntegra de la dispersión se ven afectados, en general, por fenómenos ópticos no lineales tales como la SPM en sistemas de monocal o la XPM y la FWM en sistemas WDM. Sus efectos son mayores al aumentar la potencia de entrada óptica. Por consiguiente, la calidad de funcionamiento del sistema se degrada intensamente por esos efectos no lineales cuando la potencia óptica de entrada a la fibra es muy alta.

Por lo general, la influencia de estos efectos no lineales en los sistemas WDM se calcula mediante herramientas de simulación numérica basadas en el método de Fourier por pasos [4]. La mayor parte de las veces los resultados se verifican mediante instrumentos experimentales tales como un bucle cerrado [6] o un banco de pruebas.

Evidentemente, la calidad de funcionamiento del sistema se degrada a potencias ópticas de entrada bajas debido a la pequeña relación señal ruido óptica que se recibe en el extremo de la línea de transmisión (véase 7.1.3).

Por consiguiente, existe una compensación entre las potencias de entrada ópticas de bajo nivel (limitación OSNR) y las potencias de entrada alta (limitación de los efectos no lineales). A fin de descubrir el punto de funcionamiento óptimo que garantice la mejor calidad de funcionamiento del sistema se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de fibra óptica utilizada para la transmisión.
- Mecanismo de compensación de la dispersión.

- Longitud del tramo.
- Potencia óptica de salida en la línea.
- Separación de canal.

7.1.4.1.6 Conclusiones

Es imposible escoger un único valor de la mínima potencia de entrada óptica para lograr un determinado factor Q, por ejemplo, mayor que 7. Entre este valor mínimo y el máximo valor de la potencia posible sin que se produzcan degradaciones no lineales drásticas, es posible determinar la región de calidad de funcionamiento óptima del sistema mediante simulaciones preliminares con los parámetros de sistema deseados (tipos de fibra, compensación de la dispersión, separación de amplificadores, separación de canal, etc.).

7.1.4.2 Degradaciones de la propagación debido a los efectos de polarización óptica

El texto que figura a continuación se basa en II.4.1/G.663 y se reproduce para facilitar su consulta. Es bien sabido que los componentes y sus sistemas óptimos son, en mayor o menor medida, sensibles al estado de polarización de la señal óptica. Estos efectos de polarización pueden dividirse en tres tipos:

- la PMD: dispersión por modo de polarización;
- la PDL: pérdida dependiente de la polarización;
- la PDG: ganancia dependiente de la polarización.

Estos efectos se describen en detalle en las Recs. UIT-T G.663, G.671 y G.650.2, y en CEI 61282-3.

Todos estos efectos introducen degradaciones en la señal óptica y han de tenerse en cuenta en el diseño de la línea de los sistemas ópticos de transmisión submarina. En particular, dependen de las condiciones externas, tales como la temperatura, que causan la fluctuación de la calidad de funcionamiento con el tiempo. Para calcular la penalización inducida se recomienda un método estadístico.

7.1.4.2.1 Dispersión por modo de polarización (PMD)

La doble refracción en la fibra óptica, debida a la falta de uniformidad de las propiedades geométricas durante el proceso de fabricación, causa una modificación del tiempo de propagación que depende del estado de polarización (SOP, *state of polarization*). El valor de la dispersión por modo de polarización es el retardo diferencial de grupo (DGD, *differential group delay*) entre dos modos de polarización ortogonales, que causa el ensanchamiento del pulso en los sistemas de transmisión ópticos. El texto que figura a continuación se basa en el Suplemento 39 de las Recomendaciones UIT-T de la serie G y se reproduce aquí para facilitar su consulta.

El DGD varía en el tiempo al azar de acuerdo con una distribución de Maxwell caracterizada por el valor de la PMD. La PMD del cable de fibra óptica se especifica asimismo con arreglo a un formato estadístico que puede combinarse con los demás elementos del enlace óptico para determinar un DGD máximo definido como límite de probabilidad. Véanse el apéndice I/G.650.2 y el apéndice II/G.663, en el que figura una descripción de la especificación estadística de la PMD para el cable de fibra óptica. En la Rec. UIT-T G.671 se explica cómo combinar las especificaciones de la PMD de otros elementos del enlace con las del cable de fibra óptica para determinar un DGD máximo combinado para el enlace.

$$DGD_{\text{máx}}^{\text{link}} = \left[DGD_{\text{máx}}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2} \quad (7-12)$$

siendo:

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

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

S el factor de ajuste de Maxwell (véase el cuadro 7-1)

PMD_{Ci} el valor de la PMD del i -ésimo componente (ps)

En la ecuación 7-12 se supone que la estadística del DGD instantáneo se aproxima mediante una distribución de Maxwell, con la probabilidad de que el DGD instantáneo supere $DGD_{\text{máx}_{link}}$ controlada por el valor del factor de ajuste de Maxwell obtenido del cuadro 7-1.

Cuadro 7-1 – Medias y probabilidades DGD con referencia a la Rec. UIT-T G.959.1

Relación entre el máximo y la media	Probabilidad de rebasar el máximo
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$
4,0	$7,4 \times 10^{-9}$

Por consiguiente, si conocemos el valor máximo de la DGD que el sistema puede tolerar, es posible obtener la DGD media equivalente dividiendo la $DGD_{\text{máx}}$ por la relación entre el máximo y la media que corresponde a una probabilidad aceptable.

Para mayor información véanse el Suplemento 39 de las Recomendaciones UIT-T de la serie G y la Rec. UIT-T G.959.1, en la que se describe, en particular, el cálculo de la DGD máxima de 30 ps para una aplicación NRZ de 10 Gbit/s con una probabilidad de 1×10^{-5} .

Penalización de potencia de la PMD

Como se explica en el Suplemento 39 de las Recomendaciones UIT-T de la serie G, la penalización de potencia inducida por el DGD en un punto receptor R (véase la figura 7-3) es función de la potencia relativa de los dos modos de polarización ortogonales, que varían en el tiempo debido a la alineación relativa de los estados principales de polarización del cable de fibra óptica y a la variación de la polarización de la fuente. El valor máximo de la DGD del enlace se fija de manera de no permitir más que una determinada penalización de potencia de primer orden en la relación de división de potencia correspondiente al caso más desfavorable (la misma potencia en ambos modos). La penalización de potencia de primer orden en el caso más desfavorable queda también afectada por el hecho de que el formato de transmisión sea NRZ o RZ.

Para aplicaciones NRZ de 10 Gbit/s (véanse el apéndice I/G.691 y la Rec. UIT-T G.959.1) una tolerancia de penalización de primer orden de 1 dB corresponde a un límite de 30 ps sobre el DGD en el punto R.

El caso de RZ queda en estudio.

7.1.4.2.2 Pérdida dependiente de la polarización (PDL)

En la Rec. UIT-T G.671 se define la pérdida dependiente de la polarización (PDL, *polarization-dependent loss*) como la mayor variación de pérdidas por inserción debidas a una variación del estado de polarización (SOP), para todos los SOP. 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 dividirse 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 OSNR y del valor Q en el receptor. Además, las fluctuaciones en función del tiempo conducen a un debilitamiento de la OSNR y del valor Q del receptor, con la consiguiente degradación de la calidad de funcionamiento del sistema.

Se pueden reducir las penalidades del sistema inducidas por las PDL acumuladas de los componentes ópticos, minimizando la PDL de cada uno de ellos. Cabe indicar que el efecto de la PDL en el desempeño del sistema aumenta a medida que aumenta el número de amplificadores. Las exigencias son particularmente estrictas en sistemas submarinos largos, debido a que el número de amplificadores puede ser de varias centenas. Se ha demostrado que la modulación por polarización y la aleatorización pueden mejorar la calidad de funcionamiento del sistema, ya que disminuyen las fluctuaciones y mejoran el valor Q medio.

7.1.4.2.3 Ganancia dependiente de la polarización (PDG)

En la Rec. UIT-T G.661 se define la ganancia dependiente de la polarización (PDG, *polarization-dependent gain*) como la máxima variación de la ganancia debida a la variación del estado de polarización de la señal de entrada en condiciones nominales de funcionamiento. Se estudiarán posteriormente las penalizaciones que la ganancia dependiente de la polarización induce en el sistema.

7.1.4.3 Degradaciones debidas a la no uniformidad de la curva de ganancia acumulativa

Las degradaciones debidas a la no uniformidad de la curva de ganancia acumulativa están relacionadas con la degradación de preénfasis no óptimo (véase 7.1.4.4).

7.1.4.4 Degradación de preénfasis no óptimo

Se puede utilizar la preecualización o el preénfasis en la interfaz MPI-S para mitigar el efecto de la variación de ganancia del amplificador en línea y de la desviación de ganancia que pueden tener lugar durante la propagación a través del sistema.

Con el preénfasis se compensa en parte la variación de la ganancia del amplificador y la desviación de ganancia, utilizando el siguiente esquema:

La potencia óptica más alta en MPI-S se asigna al canal que tendrá la menor ganancia de amplificación en línea, mientras que la potencia óptica más baja en MPI-S se asigna al canal que tendrá la mayor ganancia de amplificación en línea. La diferencia entre el valor de potencia óptica más alto y el más bajo se denomina valor de preénfasis, y se especifica para cada longitud de onda.

Es así como el preénfasis de potencia de canal permite igualar la calidad de transmisión de todos los canales del sistema. Sin embargo, como el nivel de potencia de cada canal es diferente, la propagación en una fibra óptica inducirá nuevas penalizaciones (véase la figura 7-7).

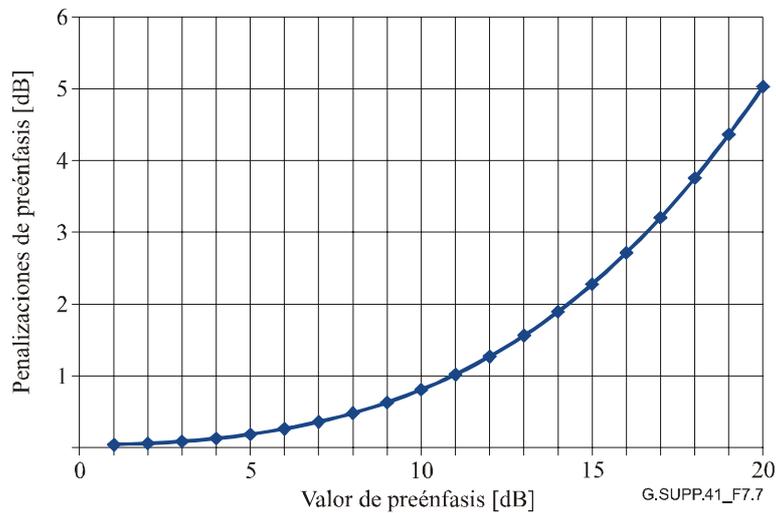


Figura 7-7 – Ejemplo de las penalizaciones inducidas por el ajuste de preénfasis

7.1.4.5 Degradaciones debidas al desajuste de la longitud o longitudes de onda

El desajuste de las longitudes de onda de la señal o de todos los componentes ópticos responsables de la función de filtrado (filtros ópticos, multiplexores y demultiplexores) puede ocasionar algunas degradaciones adicionales. Por ejemplo, el desplazamiento de la longitud de onda entre un láser y el centro del correspondiente ancho de banda del multiplexor puede generar pérdidas adicionales causantes de la degradación del factor Q.

7.1.4.6 Degradaciones debidas a la supervisión

Estas degradaciones están relacionadas con la utilización de instrucciones ópticas que se envían por la línea para supervisar algunos equipos sumergidos. Por ejemplo, se puede interrogar y dar respuesta a la mayoría de los repetidores utilizados en sistemas submarinos mediante una modulación a baja frecuencia de la señal óptica. Esta amplitud de modulación es pequeña, en comparación con la amplitud de la modulación de datos, para afectar lo menos posible la calidad de funcionamiento de la señal. En la estimación del valor Q de la línea se evalúan y tienen en cuenta las degradaciones debidas a esta modulación adicional.

7.1.4.7 Degradaciones debidas a la fabricación y al entorno

Durante el proceso de fabricación no se puede garantizar que todos los equipos fabricados se comporten exactamente de la misma manera o, en otras palabras, que tengan la misma calidad de funcionamiento. Por lo tanto, se debe asignar parte de la degradación para tener en cuenta la variación de la calidad de la transmisión resultante de estas diferencias. Esto también está relacionado con las posibles variaciones de las condiciones ambientales en el sistema (por ejemplo, la temperatura y la presión).

7.1.5 Degradaciones debidas a imperfecciones de los equipos terminales de transmisión

Por lo general, las degradaciones debidas a los equipos terminales de transmisión se expresan mediante el factor Q, medido cuando el transmisor y el receptor se disponen en una configuración de equipos adosados. Para calcular el verdadero factor Q de todo el segmento es necesario tener en cuenta las características reales del transmisor y del receptor. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{Q_{\text{segmento}}^2} = \frac{1}{Q_{\text{línea}}^2} + \frac{1}{Q_{\text{TTE adosados}}^2} \quad (7-13)$$

7.1.6 Márgenes del sistema

Los sistemas submarinos se diseñan para una vida nominal de 25 años. Para ello, es necesario cumplir ciertos márgenes adicionales.

7.1.6.1 Degradaciones debidas a operaciones de reparación

Tras el tendido del cable submarino, con cada reparación se añade cable adicional, lo que da lugar a un incremento en la atenuación del tramo y, como consecuencia, a una degradación del factor Q.

El margen de operación de la reparación se calcula mediante una estimación del número total de reparaciones que necesitará el sistema en el transcurso de su vida nominal. Por lo general se utiliza el siguiente caso hipotético:

- reparación de cables terrestres: una reparación cada 4 km y un mínimo de 2 reparaciones;
- reparaciones en aguas poco profundas: una reparación cada 15 km y un mínimo de 5 reparaciones;
- reparación en aguas profundas: una reparación cada 1000 km.

Con cada reparación se añade una sección de cable cuya longitud depende directamente de la profundidad del agua en el sitio de la reparación. Normalmente, el incremento de la longitud se sitúa entre 1,5 y 2,5 veces la profundidad del agua.

Con el fin de calcular el margen necesario para las operaciones de reparación, se evalúa la longitud total del cable adicional para el caso menos favorable, una vez sumadas todas las reparaciones estimadas. Se calcula otro factor Q adicionando la longitud total de la línea inicial y la del cable adicional que se añadiría en las reparaciones. La diferencia entre este factor Q y el factor Q medio es el margen adjudicado a las reparaciones.

7.1.6.2 Degradaciones debidas al envejecimiento de los equipos

Las degradaciones por el envejecimiento de los equipos se deben principalmente a la fibra. En efecto, la atenuación aumentará lentamente debido a los efectos físicos relacionados con el entorno. Por lo general se tienen en cuenta dos de ellos:

- Los efectos del hidrógeno en la fibra: por lo general la degradación se aproxima en unos 0,003 dB/km tras 25 años.
- Efectos de radiación: las fibras ópticas pueden tener pérdidas a altas energías de radiación (rayos gama), cuyos orígenes podrían estar relacionados con sedimentos, aguas marinas o fuentes artificiales (sitios para evacuación de desechos). Se estima que el incremento en las pérdidas tras 25 años sea menor que 0,002 dB/km.

De la misma manera en que se hace para las operaciones de reparación (véase 7.1.6.1) se calcula el factor Q teniendo en cuenta estas pérdidas adicionales y se le compara con el valor Q promedio, para obtener así el valor del margen correspondiente al envejecimiento de los equipos.

7.1.6.3 Degradaciones debidas a fallos previstos de algunos componentes

Debido al costo y complejidad de las operaciones marinas relacionadas con el reemplazo o reparación de equipos sumergidos, se instalan de manera redundante los componentes más delicados para así evitar en lo posible las intervenciones. Los principales fallos que se han de tener en cuenta son las averías de las bombas del repetidor. Mediante redundancia de las bombas se evita un apagón de potencia en caso de un fallo de la bomba, pero este incidente siempre inducirá a una degradación de la potencia de salida y del factor de ruido, lo que conduce a una disminución del factor Q.

El margen adicional requerido para tener esto en cuenta depende de la fiabilidad de la bomba y de la configuración de redundancia.

7.1.6.4 Margen no atribuido

Los márgenes provisionales son márgenes residuales que quedan después de que se tienen en cuenta todos los márgenes de reparación al llegar al final de la vida nominal. Los compradores casi siempre solicitarán conocer estos márgenes para sentirse seguros con el sistema o dejar margen para una posible actualización no prevista del sistema.

7.1.7 Conclusión

Los cuadros de balance de potencia óptica indican cómo se cumplirá con los requisitos de calidad de funcionamiento del sistema. En el anexo A/G.977 se presenta una plantilla recomendada para un cuadro de balance de potencia óptica.

En sistemas submarinos que utilizan amplificadores ópticos (véanse las Recs. UIT-T G.973 y G.977), la regeneración tiene lugar únicamente en el equipo terminal de transmisión ubicado en la interfaz submarina electro-óptica. Los canales sufrirán degradaciones entre la emisión y la recepción debido, por ejemplo, a la acumulación de ruido óptico, y a la propagación (no linealidades de la fibra, dispersión cromática, etc.). Por lo tanto, se recomienda generar un balance de potencia óptica a nivel de las secciones de línea digital. Debido a que algunos sistemas pueden incluir varias secciones de línea digital submarinas, con degradaciones diferentes, se recomienda además generar un balance de potencia óptica para cada sección de línea digital submarina.

También es preciso tener en cuenta que, en algunos casos (por ejemplo, si se tiene WDM-BU), las rutas troncal y de derivación pueden estar sujetas a degradaciones diferentes: en este caso, se debe generar un balance de potencia independiente para cada ruta y se debe tener en cuenta el caso más desfavorable.

Además, si se ha optimizado el diseño del sistema de múltiples puntos de amarre para la sección de línea digital submarina más larga en términos de la degradación de la relación de señal óptica a ruido y del espaciamiento entre repetidores, podrían haber márgenes adicionales para las secciones más cortas. Se debe informar claramente en los cuadros de balance de potencia acerca de estos márgenes adicionales, normalmente denominados márgenes de proveedor/segmento no atribuidos.

El proveedor debe suministrar información suficiente para confirmar la validez de los cuadros de balance de potencia, y ésta debe incluir al menos lo siguiente:

- la distancia total de transmisión y las longitudes de los tramos;
- el número de longitudes de onda transmitidas;
- la relación de extinción en el transmisor;
- el valor de potencia de salida nominal de los repetidores;
- el valor de la figura de ruido nominal;
- los anchos de banda eléctrico y óptico en el receptor;
- la especificación del Q adosado en el terminal;
- las características del código de corrección de errores en recepción (incluidas las curvas de BER antes de FEC y de BER después de FEC).

El proveedor también debe aclarar si se utilizan dispositivos que mejoran la calidad de transmisión, bien sea al extremo del transmisor o del receptor, como aleatorizadores de polarización y/o canales de relleno o inactivos, o dentro de la planta sumergida, como filtros de igualación de ganancia, igualadores de variación de ganancia y/o igualadores de pendiente.

7.2 Consideraciones relativas a la dispersión

La dispersión cromática es una manifestación de la dependencia de la longitud de onda de la velocidad de grupo, de forma que los componentes espectrales de una señal óptica se propagan a velocidades diferentes. Esto produce el ensanchamiento de los impulsos, lo que puede dar lugar a una degradación importante. Para limitar el ensanchamiento de los impulsos, así como otros efectos de propagación, puede ser conveniente gestionar la dispersión cromática en función del diseño del sistema y especialmente del número de longitudes de onda (sistema WDM). Por lo general, como resultado de la gestión se obtiene un mapa de dispersión que muestra cómo se gestiona la dispersión a lo largo del enlace completo.

7.2.1 Ensanchamiento de los impulsos debido a la dispersión cromática

La dispersión cromática de una fibra monomodo resulta de la combinación de la dispersión material y de la dispersión del guíaondas, y contribuye a la distorsión y al ensanchamiento de los impulsos de una señal digital. Ésta se debe principalmente a la existencia de longitudes de onda diferentes en el espectro óptico de la fuente. Cada longitud de onda en la fibra tiene un retardo de grupo y un retardo de fase diferentes, de suerte que el impulso de salida resulta distorsionado en el tiempo.

7.2.2 Mapa de dispersión cromática

Tal como se explica en la Rec. UIT-T G.973 para el caso de sistemas monocanal y en la Rec. UIT-T G.977 para los sistemas WDM, el mapa de dispersión es la principal herramienta utilizada para describir las características de dispersión cromática de un sistema. La dispersión acumulativa se define como la dispersión medida entre la salida del transmisor terminal y cualquier otro punto del trayecto óptico. El mapa de dispersión es la representación de la dispersión cromática local, para una determinada longitud de onda de funcionamiento, en función de la distancia desde el transmisor óptico hasta el receptor óptico. El mapa de dispersión dependerá principalmente del tipo de sistema (SWS o WDMS).

En un SWS se utilizan fibras con dispersión cromática negativa baja próxima a cero, pero distinta de cero, a lo largo de todo el enlace correspondiente a secciones principales, mientras que las fibras con dispersión cromática positiva elevada se utilizan en el enlace correspondiente a pocas secciones de compensación de la dispersión. El objetivo de esta gestión es mantener próxima a cero la dispersión acumulativa del enlace completo, mientras se mantiene una dispersión cromática local distinta de cero.

Para un WDMS a 10 Gbit/s, en la mayoría de las secciones se utilizan normalmente fibras con una dispersión cromática negativa baja pero bien alejada de cero (aproximadamente -2 ps/(nm.km)) (en ocasiones pueden utilizarse dos tipos de fibras: al inicio de la sección, una fibra con una gran superficie efectiva, y al final una fibra de pendiente baja), mientras que las fibras con dispersión cromática positiva elevada se utilizan a menudo en las secciones de compensación de dispersión. El objetivo de esta gestión es mantener en un nivel cercano a cero la dispersión acumulativa de todo el enlace, al tiempo que se mantiene la dispersión cromática local más elevada y distinta a cero para limitar la mezcla de cuatro ondas y la transmodulación de fase.

Para un WDMS a 10 Gbit/s con una gran cantidad de LOC (véase la figura 7-8), habitualmente se utilizan fibras con una gran dispersión cromática a lo largo del enlace en todas las secciones. Una parte de la sección tiene típicamente dispersión positiva con una pendiente positiva (generalmente con una superficie efectiva muy grande) y la parte restante tiene dispersión negativa con una pendiente negativa (generalmente con una superficie efectiva muy pequeña).

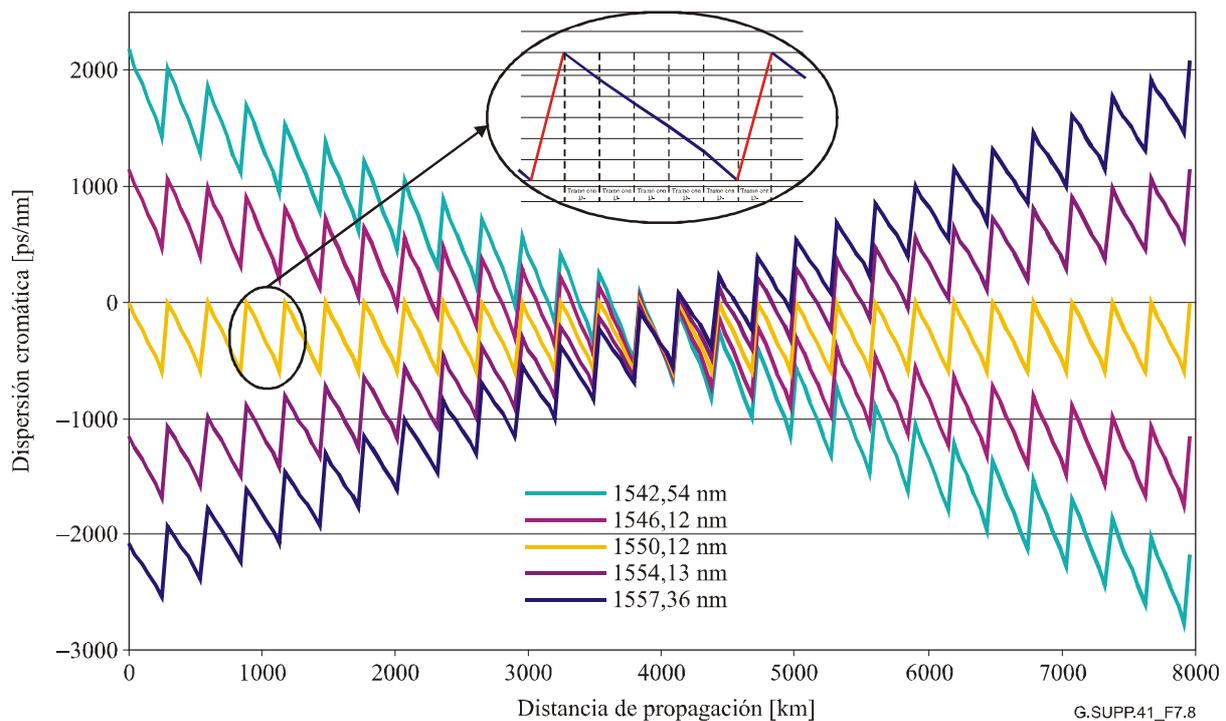


Figura 7-8 – Mapa de dispersión cromática típica para un sistema submarino WDM con 163 tramos diseñados para 40 longitudes de onda centradas alrededor de 1550,12 nm

7.2.3 Implementación de la gestión de dispersión

El diseño del mapa de dispersión para cada sección óptica debe cumplir con los requisitos de transmisión (limitación de efectos no lineales, ensanchamiento de los impulsos, etc.).

Se puede compensar la dispersión acumulativa residual para cada longitud de onda utilizando cierta longitud de fibra de ecualización u otros dispositivos pasivos de compensación de la dispersión al lado de transmisión (pre-compensación) y/o recepción (post-compensación) en los equipos terminales de transmisión submarina. Por lo general, la compensación se realiza sólo en el extremo de recepción en los sistemas monocanal y en los extremos de transmisión y recepción en sistemas WDM.

El diseño del sistema debe tener en cuenta todas las causas de variación con respecto al mapa de dispersión proyectado, tanto aleatorias como sistemáticas, que incluyen, entre otras, las siguientes:

- incertidumbre en las mediciones de la longitud de onda de dispersión nula, dispersión y pendiente de dispersión de las DSF, NDSF, DCF, NZDSF, CSF, fibras de pendiente negativa, EDF, etc.;
- incertidumbre resultante de la reorganización y selección "aleatoria" de porciones de conjuntos de fibra en el ensamblaje de secciones elementales de cable;
- incertidumbre de temperatura, presión y coeficientes de rigidez de estas fibras en el cable y en los recipientes a presión;
- incertidumbre de la temperatura exacta y tirantez de estas fibras durante las mediciones de dispersión;
- incertidumbre de la temperatura de la fibra instalada;
- envejecimiento;
- operaciones de reparación.

8 Correlación de errores en recepción

Esta cláusula queda en estudio.

9 Consideración relativa a la fiabilidad

Es necesario que las redes submarinas tengan sistemas de fibra óptica fiables y sólidos, para evitar reparaciones costosas de planta húmeda. Es más, si se tiene en cuenta que las tecnologías pueden cambiar en el transcurso del tiempo de vida del sistema, se debe establecer un esquema de mantenimiento al inicio de la vida del sistema, para garantizar las reparaciones que puedan suscitarse durante el tiempo de vida contractual del sistema.

Los fallos que ocurran durante el tiempo de vida del sistema pueden deberse a averías internas (fallos por derivación, incremento de la pérdida de la fibra, fallos de repetidores, fallos de tarjetas, etc.) o a agresiones externas (por ejemplo anclas y actividades de pesca en el caso de la planta húmeda y errores de operación en el caso de la planta seca).

9.1 Requisito de fiabilidad

Se define la fiabilidad como la probabilidad de que un componente o un subsistema lleve a cabo una función requerida bajo condiciones específicas durante un periodo dado de tiempo. Esto se puede expresar mediante diversas características:

- Fallo de la hora (FIT, *failure in time*): número de fallos en 10^9 dispositivos durante una hora. Este valor depende de la temperatura y se debe registrar a la temperatura de funcionamiento. Desde el punto de vista estadístico esta definición es equivalente a: número de fallos por dispositivo durante 10^9 horas.
- Tiempo medio entre fallos (MTBF, *mean time between failures*): el tiempo esperado entre dos fallos consecutivos.

Cabe señalar que estas cifras estadísticas no tienen significado alguno para un dispositivo individual y que únicamente indican probabilidades de calidad de funcionamiento y no expectativas absolutas.

Como primera medida se utilizará como restricción la fiabilidad total para calcular primero la fiabilidad que puede tener cada subsistema y luego la de cada componente. Se utiliza la fiabilidad exigida de cada componente durante la vida nominal de un sistema dado para hallar la tasa de fallos (FIT) o el MTBF.

Las siguientes características se definen para los sistemas o subsistemas:

- tiempo medio hasta la reparación (MTTR, *mean time to repair*): el tiempo necesario esperado para reparar un fallo;
- interrupción = $MTTR/MTBF$: cantidad de tiempo, normalmente expresada en minutos por año, en el que la red no está en capacidad de cumplir con su función;
- disponibilidad de las redes (%) = $(\text{Tiempo total} - \text{Interrupción}) / \text{Tiempo total} * 100\%$.

9.2 Avería interna

Para lograr las metas de fiabilidad en los sistemas submarinos (minimizando las averías internas) y establecer políticas de mantenimiento aplicables a lo largo de la vida útil del sistema, se deben identificar las principales causas de avería a nivel del componente, del subsistema y del sistema. Por lo tanto, se debe demostrar la fiabilidad de todos los componentes utilizados, para el periodo nominal contractual (que por lo general es de 25 años). Por lo general para predecir la fiabilidad se utiliza la Rec. UIT-T G.911, CEI 62380, MIL-HDBK-217 [7], Telcordia SR 332 [8] y los datos del proveedor de cada componente.

9.2.1 Análisis de tasa de fallos

9.2.1.1 Mortalidad infantil

Los componentes o unidades utilizadas en sistemas submarinos presentan al inicio de su vida en funcionamiento una alta tasa de fallos que disminuye con el tiempo. A este corto periodo se le denomina tiempo de mortalidad infantil (la mortalidad infantil es por lo general de uno o dos años), y es principalmente causado por el proceso de fabricación no lineal (materiales brutos defectuosos, operaciones inadecuadas, entorno contaminado, sobretensiones, inspecciones poco efectivas y transporte y manipulación inadecuados). Cabe señalar que la mortalidad infantil está relacionada con todo un lote de dispositivos y no se puede pretender que indique el comportamiento de un dispositivo individual. En el caso particular, el dispositivo individual falla o pasa una prueba, mientras que la tasa de averías de un cierto grupo de unidades obedece a una curva decreciente.

9.2.1.2 Fallos aleatorios

El periodo posterior al de mortalidad infantil se caracteriza por una tasa de fallos más baja. A este periodo se le denomina vida útil debido a que la tasa de averías es casi constante hasta el inicio de la última fase (periodo de desgaste). Los fallos constantes se deben a procesos aleatorios y por lo general no se detectan ni siquiera mediante un control rígido.

9.2.1.3 Envejecimiento

El último periodo tiene lugar cuando los sistemas y sus componentes comienzan a desgastarse por el uso. Pueden haber fallos debidos al envejecimiento, a la fatiga del material, al desgaste excesivo, a la corrosión ambiental, a un entorno inhóspito y a daños acumulados.

El comportamiento de la tasa de fallos se describe tradicionalmente como una curva de bañera que abarca la vida del sistema, tal y como se muestra en la figura 9-1.

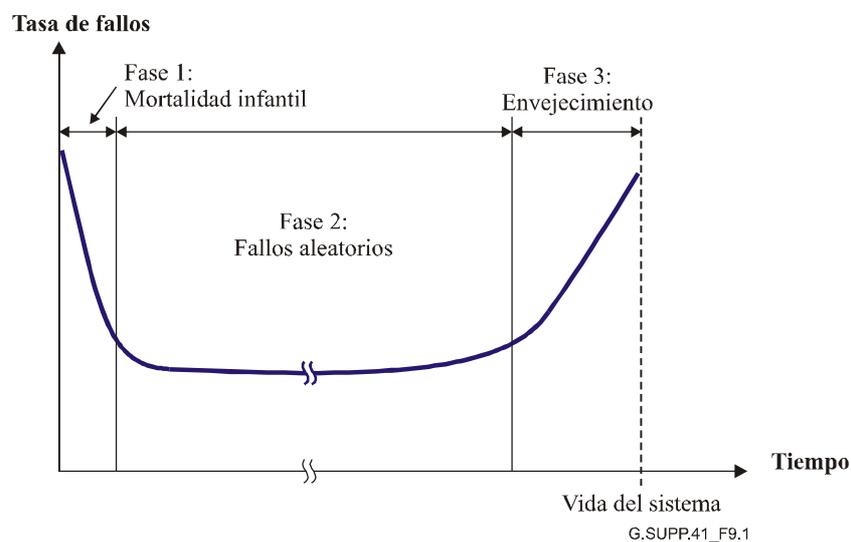


Figura 9-1 – Comportamiento característico de la tasa de fallos durante la vida de un sistema

9.2.2 Fiabilidad de la planta húmeda

La planta húmeda es más crucial que la planta seca en términos de fiabilidad, debido a que su MTTR es mayor. Los valores característicos del MTTR son de alrededor de 2 semanas para las reparaciones en la planta húmeda y de 2 horas para los de la planta seca. Desde el punto de vista de la fiabilidad, ésta es la razón por la cual el FIT de las bombas láser utilizadas en los repetidores es importante para el sistema. Por ejemplo, los valores típicos del FIT en amplificadores de redes

terrestres se encuentran entre 1000 y 10 000 mientras que en amplificadores submarinos se encuentran entre 10 y 100 (son menores en cerca de 2 órdenes de magnitud).

El diseño de sistemas submarinos extremadamente fiables es tal que la probabilidad de que ocurra un fallo por desgaste durante la vida del sistema es prácticamente nula y la probabilidad de un fallo aleatorio se reduce al mínimo posible.

Los repetidores son los equipos más delicados dado que contienen componentes electrónicos, ópticos y opto-electrónicos. Se debe también tener presente que cualquier daño interno, independientemente de su origen, puede afectar directamente la calidad de la transmisión. Como consecuencia se deben tomar las precauciones necesarias para evitar y reducir el riesgo de fallos. En particular, un fallo óptico que ocurra en una fibra específica no debe afectar la calidad de funcionamiento de las otras fibras. En la Rec. UIT-T G.976 se presentan las pruebas que se deben realizar antes y durante la instalación del cable.

i) Requisitos generales

Se pueden obtener valores pequeños de FIT mediante la utilización de componentes altamente protegidos, un control riguroso de las materias primas, un diseño simple y robusto, un proceso cuidadoso de manufactura y un control de calidad minucioso.

Es evidente que se requieren condiciones de prueba que permitan acelerar el tiempo para fallos de una manera predecible y comprensible. También se reconoce que los sistemas incluyen varios procesos de manufactura y de ensamblaje diferentes y que se debe someter a prueba cada uno de ellos. Se debe atribuir cada fallo a un solo mecanismo de fallo y no se debe correlacionar con una posible interacción entre el dispositivo que es objeto de prueba y el propio procedimiento de prueba. Los requisitos de fiabilidad hacen que sea necesario utilizar pruebas aceleradas tanto para lograr mayor economía como por razones de viabilidad técnica.

ii) Redundancia

Por lo general se utilizan configuraciones redundantes para alcanzar la fiabilidad exigida y reducir por consiguiente el FIT de los subsistemas. Por ejemplo, normalmente se usan configuraciones redundantes de láseres de bomba para garantizar el cumplimiento de las metas de fiabilidad del amplificador.

9.2.3 Ejemplo de cálculo de fiabilidad

En el caso de un repetidor diseñado para el esquema de cuatro bombas en redundancia, si se supone que el tiempo de vida de las bombas es de 25 años, la probabilidad de fallo (suponiendo una tasa de fallos constante) es la siguiente:

$$p = 1 - e^{-21,9 \times 10^{-5} FIT} \quad (9-1)$$

En la ecuación 9-1 anterior se utiliza un mismo valor de FIT (definido para 10^9 dispositivos) para las cuatro bombas. El valor $21,9 \times 10^{-5}$ que aparece en la ecuación 9-1 proviene de:

$$\frac{25 \text{ años} \times 365 \text{ días} \times 24 \text{ horas}}{10^9 \text{ dispositivos}} = 21,9 \times 10^{-5} \text{ h/dispositivo} \quad (9-2)$$

En la figura 9-2 se muestra el número de bombas que fallan durante los 25 años del tiempo de vida del sistema para el caso de un cable transatlántico característico (con 150 repetidores) y con un solo par de fibra. Se supone que el valor típico de FIT para una bomba láser submarina es de 25. El número de bombas que fallan se calcula mediante el producto entre p y el número total de bombas.

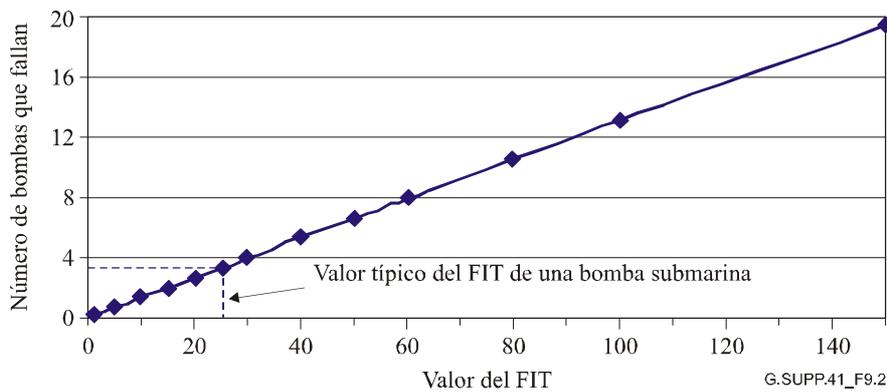


Figura 9-2 – Estimación del número de bombas que fallan durante 25 años, para el caso de un enlace transatlántico característico compuesto por un par de fibra y 150 repetidores con cuatro bombas cada uno

Estos fallos ocurren aleatoriamente en cualquier parte de la línea de transmisión, lo que significa que no se puede dar ninguna indicación acerca del repetidor o repetidores afectados ni acerca de la penalización sobre la transmisión.

Si suponemos que la probabilidad de fallo de una bomba láser es p , y si N es el número total de bombas (cuatro veces el número de repetidores), se puede expresar la probabilidad de que ocurra exactamente un fallo en todo el sistema.

Denótese cada bomba mediante la variable aleatoria X_i ($X_1 \leq X_i \leq X_N$). Se tienen por lo tanto N variables aleatorias que cumplen con la siguiente ley:

- i) la bomba X_i se encuentra averiada ($X_i = 0$) con una probabilidad $p(X_i = 0) = p$;
- ii) la bomba X_i funciona ($X_i = 1$) con una probabilidad $p(X_i = 1) = 1 - p(X_i = 0) = 1 - p$.

El número estimado de bombas averiadas es $N \cdot p$ (véase la figura 9-2) y la varianza es $Np(1 - p)$. Esta ley de probabilidad cumple con la Ley Binomial, y la probabilidad de que fallen exactamente n bombas durante la vida del sistema es:

$$P(n, N) = \frac{N!}{(N - n)!n!} p^n (1 - p)^{N - n} \quad (9-3)$$

Si se supone que ya hay una bomba fallada en el repetidor, la probabilidad de que falle una segunda bomba en el mismo repetidor es:

$$P_2(N) = P(1,3) = 3p(1 - p)^2 \quad (9-4)$$

Si se utilizan el mismo sistema típico que el de la figura 9-2 y la ecuación 9-4 para calcular esta probabilidad, el valor de MTBF entre el primer y el segundo fallo en un mismo repetidor es el que se representa en la figura 9-3. ¡El MTBR para un FIT típico igual a 25 es de más de 1500 años!

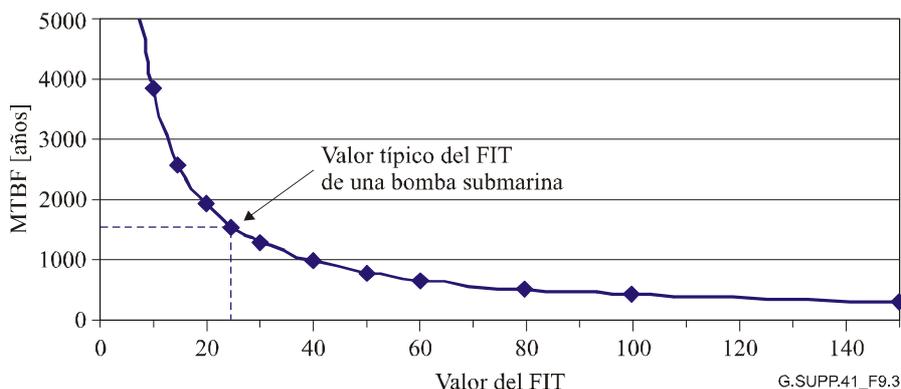


Figura 9-3 – El MTBF para el fallo de la segunda bomba en un mismo repetidor de un enlace transatlántico típico compuesto por un par de fibra y 150 repetidores con cuatro bombas redundantes cada uno

9.3 Avería externa

En las secciones de cable por lo general ocurren averías externas. De hecho, las principales causas de los fallos son las agresiones ocasionadas por la pesca a profundidad, la pesca de arrastre, las corrientes marinas, los fenómenos geológicos (como los temblores y los volcanes) y las fallas térmicas debidas a la sobrecarga. La causa de casi el 90 por ciento de los fallos son las actividades pesqueras y las anclas de los barcos. Para proteger el cable contra este tipo de eventualidad se puede enterrar la planta húmeda en aguas poco profundas, salvo en zonas rocosas en las que las condiciones del lecho marino no lo permiten. Además se elige una ruta de cable que evite en lo posible los peligros geológicos.

En caso de fallo en la planta húmeda son necesarias las operaciones marinas en las que se moviliza un buque cablero para las reparaciones. La sección dañada de cable se corta, luego se extrae y se reemplaza a bordo. Se calcula que el tiempo medio de reparación (MTTR) es de 1 a 3 semanas, dependiendo de la ubicación de la avería, la profundidad del mar, la disponibilidad del buque, el origen del daño y las condiciones climáticas, las que pueden obligar a reducir el ritmo de las operaciones marinas.

En la medida de lo posible se mejora la disponibilidad de la red, mediante la diversificación de rutas, para minimizar así el efecto que este tipo de fallos podría tener sobre el tráfico (en la cláusula 6 se examinan las topologías de redes submarinas). En caso de que un fallo en la planta húmeda produzca una pérdida de transmisión, el tráfico se reencamina a través de un trayecto de protección.

9.4 Localización de averías

En la mayoría de los casos, un diseño cuidadoso no evita que ocurran fallos inesperados. Para minimizar la interrupción del tráfico se necesita un diagnóstico y una reparación de fallos rápidos. Por lo tanto, se deben supervisar los parámetros claves (utilizando un mecanismo de supervisión) y se deben utilizar estos parámetros para detectar y localizar las averías repentinas o progresivas.

Tal como se indica en la Rec. UIT-T G.976, se pueden realizar algunas pruebas en funcionamiento y otras con el sistema apagado, dependiendo de las prestaciones que se utilicen (medios para la supervisión de repetidores o medios externos como OTDR, OTDR coherente, mediciones sobre el conductor como la capacitancia y la resistencia, etc.). Se pueden utilizar estas pruebas para ubicar e identificar con precisión el tipo de avería. Por lo general se utiliza OTDR para verificar la calidad del cable entre el TTE y el primer repetidor sumergido y COTDR para la localización de fallos en el sistema lejano de repetidores.

Desde el buque se pueden utilizar, durante la reparación, técnicas electrónicas (cuando éstas son aplicables) para determinar la ruta del cable. Estas técnicas permiten extraer oportunamente la sección averiada del cable o el equipo sumergido averiado.

10 Consideraciones relacionadas con la actualización

Esta cláusula queda en estudio.

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
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedia
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedia
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