



TECH pedia



SISTEMAS Y REDES ÓPTICOS

MICHAL LUCKI

Título: Sistemas y redes ópticos
Autor: Michal Lucki
Traducido por: Santiago Silvestre
Publicado por: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Dirección de contacto: Technická 2, Praha 6, Czech Republic
Número de teléfono: +420 224352084
Print: (only electronic form)
Número de páginas: 43
Edición: Primera edición, 2017

ISBN 978-80-01-06259-3

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



El presente proyecto ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea.

Esta publicación (comunicación) es responsabilidad exclusiva de su autor. La Comisión no es responsable del uso que pueda hacerse de la información aquí difundida.

NOTAS EXPLICATIVAS



Definición



Interesante



Nota



Ejemplo



Resumen



Ventajas



Desventajas

ANOTACIÓN

Este material didáctico describe las redes ópticas, como las redes ópticas de acceso, la tecnología FTTx, Las Redes Ópticas activas / pasivas, sistemas ópticos utilizando Wavelength Division Multiplexing: DWDM, CWDM. Introduce parámetros y regímenes de trabajo de las redes ópticas, incluidas las cuestiones de mantenimiento del sistema (OTDR, empalme) y la recuperación de la señal (EDFA, SOA, amplificadores Raman, compensación de la dispersión).

OBJETIVOS

El estudiante aprenderá a distinguir entre diferentes implementaciones de redes ópticas y evaluar si la red cumple con los criterios básicos estándar. El alumno adquirirá conocimientos sobre la planificación del sistema óptico, la recuperación de la señal óptica y el mantenimiento de la red.

LITERATURA

- [1] L. Bohac, M. Lucki, Optické komunikační systémy, skripta ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04484-1.
- [2] G. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [3] M. Sivalingam, Krishna and S. Subramaniam, Optical WDM Networks: Principles and Practice. Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [4] B. Woodward, Bill, E. Husson, Fiber Optics Installer and Technician Guide. Alameda, CA, USA: Sybex, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [5] F. Lam, Cedric, Passive Optical Networks: Principles and Practice. Burlington, MA, USA: Academic Press, 2007. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [6] N. Dutta, Q. Wang, Semiconductor Optical Amplifiers. Singapore, SGP: World Scientific & Imperial College Press, 2006. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [7] I. Kaminov, T. Li, A. Willner, Optical Fiber Telecommunications VB, Systems and Networks, Elsevier, 2008, ISBN 978-0-12-374172-1.
- [8] M. Skop, M. Petrasek, J. Petrasek a P. Bocek, Synchronní digitální hierarchie SDH a WDM, ČTU, Prague, 2001. ISBN 80-01-02284-6.
- [9] M. Yasin, S. Harun, H. Arof, Recent Progress in Optical Fiber Research, Intech, Rijeka, 2012, ISBN 978-953-307-823-6.

- [10] R. Freeman, Fiber Optic Systems for Telecommunications, Wiley series in telecommunications and signal procesing, 2002, ISBN 0-471-41477-8.
- [11] M. John Senior, Optical Communications Principles and Practise. Prentice Hall, 1992, ISBN 0-13-635426-2.
- [12] Saeckinger, Eduard. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.

Indice

1	Recomendaciones ITU-T actuales para sistemas ópticos de transmisión	7
1.1	Recomendaciones para PON del ITU y el IEEE.....	7
1.2	Recomendaciones para PON de alcance extendido	9
2	Sistemas con multiplexado por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing - CWDM y DWDM)	10
2.1	Idea general de multiplexado	10
2.2	Redes CWDM y DsWDM.....	11
3	Tipos de redes ópticas, sus arquitecturas y parámetros (OTH, FTTx)	12
3.1	Arquitectura FTTx.....	12
3.2	Redes de acceso.....	13
3.3	Jerarquía de transmisión óptica	15
4	División de fibras ópticas e instalación de enlaces de fibra óptica	16
4.1	Objetivo	16
4.2	Procedimiento.....	18
5	Tet de enlaces ópticos mediante el uso de reflectómetro óptico de dominio temporal	22
5.1	Reflectómetro óptico de dominio temporal.....	22
6	Regeneración de señales en redes ópticas utilizando enlaces EDFAs	25
6.1	Erbium Doped Fibre Amplifiers/ Amplificadores de fibra dopada con Erbio	25
7	Amplificadores Semiconductores (SOA) y amplificadores Raman	28
7.1	Amplificadores Ópticos Semiconductores	28
7.2	Amplificador Raman	30
8	Compensadores de dispersion para enlaces de fibra óptica	32
8.1	Dispersión en fibras ópticas	32
8.2	Compensación de dispersión	35
8.3	PMD – Polarización Modo Dispersión	38
9	Convergencia y actualización de las redes ópticas	39
9.1	Convergencia y actualización de las redes ópticas.....	39
10	Conclusión	43

1 Recomendaciones ITU-T actuales para sistemas ópticos de transmisión

1.1 Recomendaciones para PON del ITU y el IEEE



La ITU (*International Telecommunication Union*) publicó la recomendación para *Passive Optical Networks* (**PON/ Redes ópticas pasivas**), incluyendo Reach Extended PON. Existen distintas opciones de clases de atenuación, alcance, longitud de onda y velocidad de transmisión.



PON - Passive Optical Networks (Redes ópticas pasivas, uno de los conceptos a los que se dirige este módulo). Es una red multipunto que se puede clasificar de acuerdo a la funcionalidad de los componentes que se incluyen para la división de las señales ópticas. Se utilizan componentes pasivos (por supuesto, además de los láseres como fuentes de símbolos ópticos), en donde el nivel de potencia disminuye gradualmente con la distancia desde las fuentes de láser.

Recomendaciones básicas para Passive Optical Networks – comparación de los estándares del IEEE e ITU-T.

Recomendación	10GEPON IEEE 802.3av (2009)	EPON del IEEE 802.3ah (2004)	GPON de ITU-T G.984 (2003)	XG-PON de ITU-T G.987 (2010)
Opciones de velocidad de transmisión	10G/10G simétrica o asimétrica	1G/1G simétrica	1.25G/1.25G simétrica, 2.5G/1.25G asimétrica, 2.5G/2.5G simétrica	10G/2.5G asimétrica
Velocidad de transmisión en la capa física	10.3125 Gbps, 1.25 Gbps	1.25 Gbps	1.24416 Gbps, 2.48832 Gbps	9.95328 Gbps, 2.48832 Gbps
Clases de atenuación	PR10, PRX10, PR20, PRX20, PR30, PRX30	PX10, PX20	Class A, B, B+,C	Clase Nominal 1, 2, Clase Extendida 1, 2
Longitudes de onda [nm]	Downstream 1575-1580 Upstream 1260-1280 or 1260-1360	Downstream 1480-1500 Upstream 1260-1360	Downstream 1480-1500 Upstream originally 1260-1360, newly 1290- 1330	Downstream 1575-1580 Upstream 1260-1260
Alcance físico [km]	≤10, ≤20	≤10, ≤20	≤20	≤20 (future ≤40)
Max. relación de división	1:16, 1:32 (futura 1:64, 1:128)	1:16, 1:32	1:64 (propietaria 1:128)	1:256

1.2 Recomendaciones para PON de alcance extendido

Una red óptica pasiva puede utilizar amplificadores ópticos en ciertos casos para aumentar el alcance, sin la necesidad de construir una vasta infraestructura de componentes activos

Recomendaciones para GPON de alcance extendido con amplificadores permitidos

Clase GPON	Rango de distribución óptico de la red [dB]	Rango de atenuación del proveedor al usuario [dB]	Max. alcance físico (capa física) [km]
Clase B+	13-28	13-28	40
Clase C	15-30	15-30	40
Clase C+	17-32	17-32	60

2 Sistemas con multiplexado por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing - CWDM y DWDM)

2.1 Idea general de multiplexado

La idea general de cómo aumentar la capacidad de velocidad de bit y la información de un sistema es transmitir información en muchos canales (longitudes de onda) al mismo tiempo. Las redes de larga distancia con capacidad de decenas de Tbps deben operar con cientos de canales, cada uno funcionando a una velocidad de decenas de Gbps.



i

DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing* requiere del uso de un estrecho espectro de fuentes de radiación, que son *Distributed Feedback Lasers (DFB)*. Además, la longitud de onda central debe ser estable (generalmente se sabe que la longitud de onda del láser es sintonizable con la temperatura); para este propósito se recomienda el uso de refrigeración DFB, donde la temperatura de operación se fija entre 20 y 30 ° C.



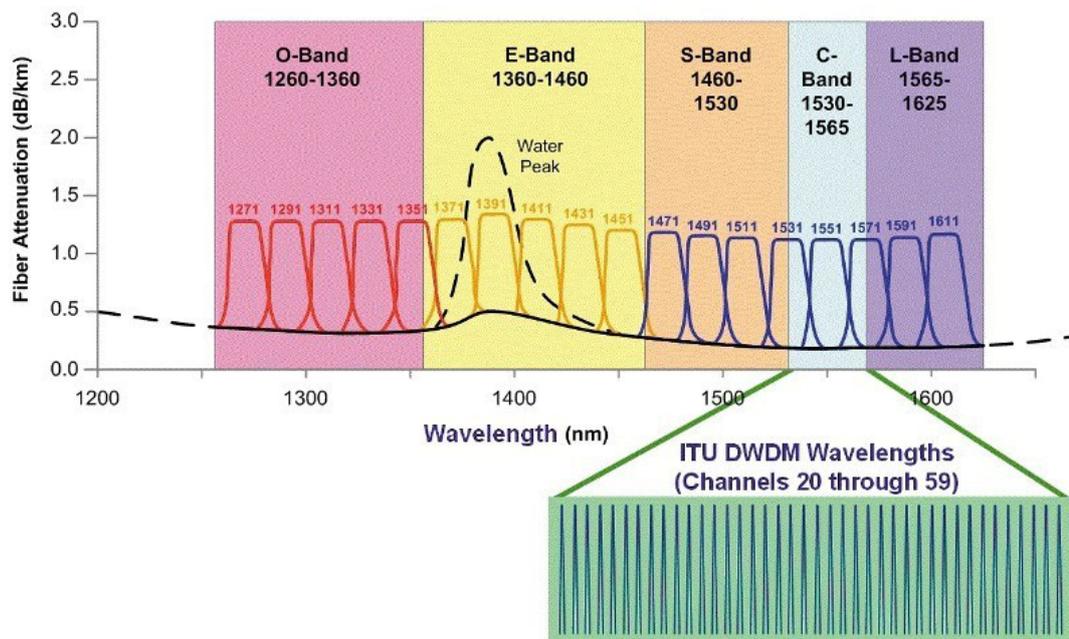
i

Las redes metropolitanas pueden operar a mayores velocidades de bit. **CWDM** - *Coarse Wavelength Division Multiplexing* utiliza de 4 a 16 canales, con un espaciado de 20 nm, lo que permite el uso de láseres con un mayor espectro de longitudes de onda de emisión, como los láseres Fabry-Perot, o DFB no refrigerados. Por tanto son más económicos.

2.2 Redes CWDM y DsWDM

Espaciado de red en sistemas CWDM y DWDM

Tecnología	CWDM	DWDM – redes regionales	DWDM – redes de larga distancia
Número de canales (longitudes de onda)	4-16	32-80	80-160
Bandas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espaciado de canal	20 nm o más (2500 GHz o más)	0.8 nm, 100 GHz	0.4 nm o menos – 0.2 nm o 0.1 nm, (50 GHz o menos)
Capacidad de transmisión por canal	1.5 Gbps	10 Gbps	10-40 Gbps
Capacidad de la Fibra	20-40 Gbps	100-1000 Gbps	Decenas de Tbps
Tipo de láser	DFB no refrigerado o FP	DFB refrigerado	DFB refrigerado
Alcance	50-80 km	100 km	1000 km
Coste	Bajo	Alto	El más alto



Longitudes de onda de operación CWDM y DWDM (ejemplo).

3 Tipos de redes ópticas, sus arquitecturas y parámetros (OTH, FTTx)

3.1 Arquitectura FTTx

FTTx (*Fibre to the ...cabinet, curb, building, office, home*) – red de acceso óptica basada en fibra óptica. Todas las redes ópticas FTTO y FTTH o soluciones híbridas FTTE_x, FTTC_{ab}, FTTC, FTTB.

Soluciones híbridas

En general:

- Las fibras ópticas se combinan con líneas simétricas metálicas para ADSL2+ VDSL2.
- Las fibras ópticas se combinan con cables coaxiales para *Cable TV* (CATV).
- Combinación con redes inalámbricas.
-
- **FTTE_x** (*Fibre to the Exchange*) – las fibras ópticas se terminan en la central telefónica local, el multiplexor DSLAM divide la señal para las líneas metálicas existentes y proporcionar **xDSL** (*Digital Subscriber Line*). FTTE_x es la más común de las soluciones utilizadas actualmente, pero no es una red óptica de acceso completa.
- **FTTC_{ab}** (*Fibre to the Cabinet*) – las fibras ópticas se terminan en un divisor exterior.
- **FTTC** (*Fibre to the Curb*) – las fibras ópticas alcanzan un grupo de edificios.
- **FTTB** (*Fibre to the Building*) – las fibras ópticas alcanzan edificios específicos, pueden terminarse dentro de las cajas de los teléfonos particulares o pueden seguir con una conexión inalámbrica.

Soluciones totalmente ópticas

- **FTTO** (*Fibre to the Office*) – Las fibras ópticas terminan en oficinas de clientes importantes con gran necesidad de capacidad y velocidad de transmisión.
- **FTTH** (*Fibre to the Home*) – Las fibras ópticas se terminan en el socket del usuario final.

3.2 Redes de acceso

OAN - *Optical Access Networks/ Redes ópticas de acceso*

- Transmisión simplex mediante **SDM** (*Space Division Multiplexing*), se usa una fibra para cada dirección de transmisión.
- Transmisión duplex con **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing/ multiplexado por división de longitud de onda*), todas las señales se transmiten en una fibra, una dirección de transmisión está en el área de los 1310 nm, la dirección opuesta en 1550 nm.
- Transmisión duplex mediante **FDM** (*Frequency Division Multiplexing/ multiplexado por división en frecuencia*), las señales se transmiten en una fibra, las direcciones de transmisión están alrededor de una longitud de onda y separadas por un espaciado frecuencial.
 - Recorrido corto – max. atenuación 16.5 dB en CWDM, min. atenuación 5 dB, alcance 30 – 50 km para P2P.
 - Largo recorrido – max. atenuación 25.5 dB en CWDM, min. atenuación 14 dB, alcance 50 – 80 km para P2P.
 - La atenuación típica para elementos de red CWDM es de 3.5 – 7.5 dB. EDFA puede extender el alcance.

Redes ópticas activas

AON - *Active Optical Networks/Redes ópticas activas*. Utilizan elementos activos de red para interconectar elementos de la red como amplificadores.



Por otro lado, existen *Reach Extended PON (REPON)*, que utilizan *Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA)*.

Redes ópticas pasivas



PON - *Passive Optical Networks/ Redes ópticas pasivas*: Son redes multipunto que pueden clasificarse de acuerdo a la funcionalidad de sus componentes. Estos pueden ser splitters/divisores o *Array Waveguide Gratings (AWG)*. En WDM, las señales se dividen por filtrado óptico utilizando multiplexores llamados add-drop.

- **BPON** - *Broadband PON* - 622.04 Mbps añadidos, dos fibras para ambas direcciones de transmisión o una fibra combinada con WDM: 1260 - 1360 nm – uplink, 1480 - 1500 nm – downlink. Opcionalmente 1539 - 1565 nm – para 16 + 16 DWDM canales con un espaciado de canal de 0.8 nm, 1550 - 1560 nm – en caso de distribución de vídeo.

- **GPON** - *Gigabit PON* - ITU-T G.984 – con velocidad nominal de 1.244 y 2.488 Gbps (max. 128 usuarios).
- **EPON** - *Ethernet PON*. Conexión óptica: P2MP. 1.25 Gbps siguiendo 1000BASE-PX. Para upstream (de usuario a proveedor), se usa una longitud de onda de 1310 nm, para downstream, es de 1490 nm. Tipo 1 – max. alcance de 10 km. Tipo 2 – max. alcance de 20 km.

3.3 Jerarquía de transmisión óptica



OTH – *Optical Transport Hierarchy/ Jerarquía de transmisión óptica*. Se denomina **OTM** (*Optical Transport Module*). La opción más simple (nivel cero) no realiza multiplexado en longitud de onda. El transporte óptico de los módulos se denomina OTM-n.m, donde n es el número de canales (longitudes de onda operativas) y m representa el tipo de señal. Se pueden multiplicar distintas velocidades básicas; combinaciones potenciales se refieren a OTM-n.123 (2.5; 10; 40 Gbps).

Jerarquía de transmisión óptica. OTH –transporte de módulos sin multiplexado

Nivel de jerarquía	Velocidad de transmisión [Mbps]	Puede transmitir STM-N
OTM-0.1	2488.32	STM-16
OTM-0.2	9953.28	STM-64
OTM-0.3	39813.12	STM-256



Un **STM** es un *Módulo de transporte síncrono*, una unidad básica de transporte en **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*). N indica la multiplicación de la unidad básica de capacidad.

Transporte óptico de módulos con multiplexado de longitud de onda

Nivel de jerarquía	Velocidad de transmisión [Mbps]	Permite transmitir
OTM-n.1	n x 2488.32	n x STM-16
OTM-n.2	n x 9953.28	n x STM-64
OTM-n.3	n x 39813.12	n x STM-256

4 División de fibras ópticas e instalación de enlaces de fibra óptica

4.1 Objetivo

Los empalmes de fibras son necesarios para establecer conexiones permanentes entre lugares distintos.



Las soluciones más flexibles están disponibles en forma de conectores, los empalmes ofrecen menores pérdidas en comparación y son por lo tanto útiles en los casos en que las fibras no necesitan ser separadas después de unirse. Por ejemplo, se pueden usar para reparar fibras dañadas.

Esta es una razón por la cual se usa generalmente al instalar fibras un margen extra de la fibra - si una sección se daña, la longitud extra se puede usar para cerrar la brecha y hacer un empalme.



Divisor óptico – Fujikura 18s.

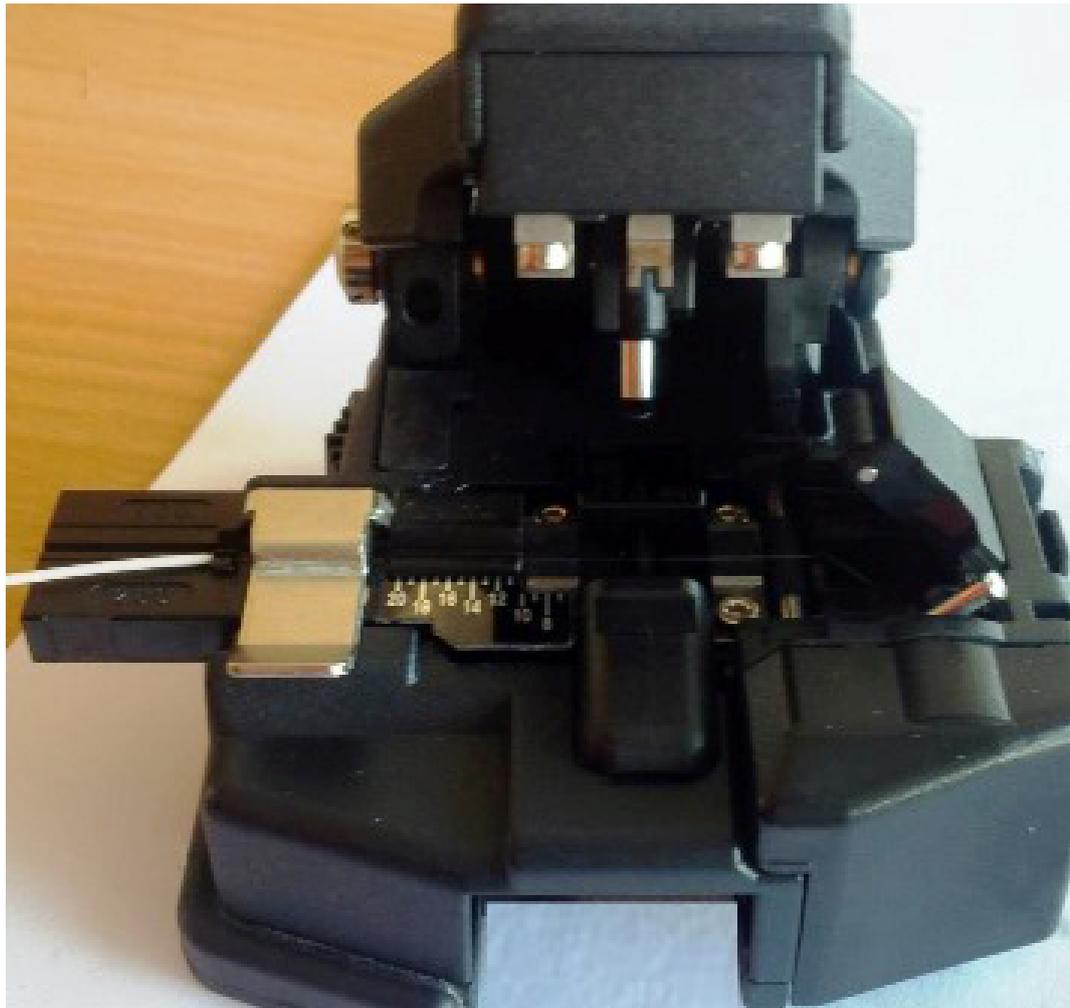


El equipamiento necesario para empalmar dos fibras es el siguiente:

- Las dos fibras;
 - Strippers para eliminar la capa de recubrimiento(s);
 - Una cuchilla para cortar la fibra limpiamente;
 - Un alineador para alinear las fibras correctamente y unirlas.
 - Alcohol isopropyl para limpiar las fibras, y tejido para eliminar el exceso de alcohol.
-

4.2 Procedimiento

- Dos longitudes de alrededor de 100 mm deben cortarse a partir de un carrete de fibra.
- En primer lugar, utilizando los separadores, las capas de revestimiento primario y secundario de la fibra se eliminan hasta aproximadamente 50 mm de cada extremo, dejando sólo el revestimiento y el núcleo intacto.
 - Un tejido con alcohol isopropílico debe ser utilizado para limpiar cualquier recubrimiento restante del revestimiento expuesto.
- El núcleo de la fibra expuesta y el revestimiento se deben cortar limpiamente utilizando la cuchilla, para asegurar una superficie plana y no en ángulo.
- La fibra debe ser colocada en la ranura en V de la cuchilla de tal manera que el extremo de la fibra debe extenderse suficientemente para alcanzar el lado opuesto de la cuchilla de modo que la fibra se reduciría en lugar de doblarse.
- La fibra se fija entonces en posición usando un clip de resorte (plata, a la izquierda del marco).
 - El mecanismo de la parte inferior de la cuchilla debe ser oprimido y la parte superior rebajada para escindir la fibra. Es fundamental no utilizar la fuerza excesiva para esto, ya que la calidad del corte puede verse comprometida.

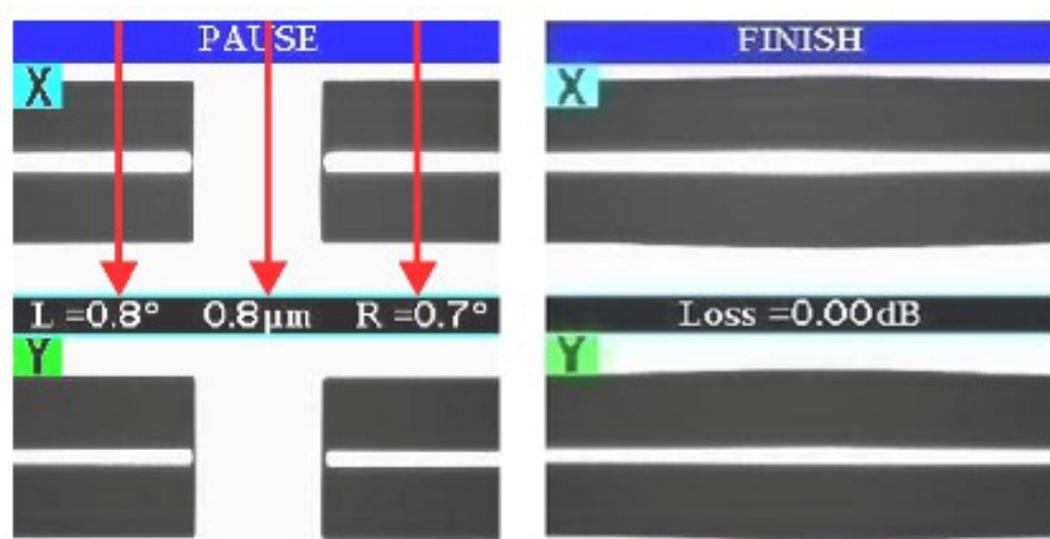


Cuchilla con fibra preparada para ser cortada.

- Después de que ambos han sido cortados con éxito, podemos pasar al empalme real de las fibras.
- Los dos extremos de las fibras se colocan en las ranuras en V de la empalmadora.
 - Es importante que ningún revestimiento permanezca sobre la fibra en las partes donde se nivela la altura – si es así, el ángulo del extremo de la fibra puede ser aumentado, disminuyendo la calidad de corte y el empalme. Los extremos de las fibras deben estar lo más cerca posible de los electrodos, pero no deben superponerse a la línea central entre ellos. Cuando las fibras están colocadas correctamente, deben ser sujetadas en su lugar y la cubierta del empalmador se pueden cerrar.
- El empalmador entonces debe estar encendido, y el botón 'Set' presionado - entonces afinar el empalmador puede afinar el posicionamiento de las fibras para tratar de alinear sus ejes y llevarlos lo más cerca posible.



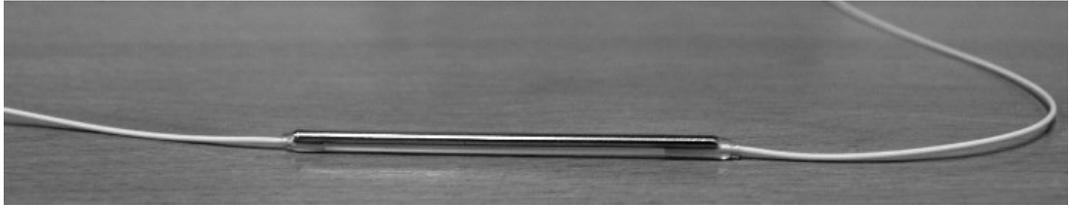
Empalmador con fibras colocadas cerca de los electrodos en el centro, sujetos por abrazaderas de muelle.



Brecha para el ajuste automático mediante el empalmador de las fibras empalmadas.



Si la colocación y / o la calidad de corte es particularmente mala, el empalmador mostrará una advertencia en la pantalla y las fibras se puede quitar y reposicionar o volver a cortar. Si las condiciones son satisfactorias el botón 'Set' se puede presionar de nuevo y se iniciará el proceso de empalme. Se aplica un voltaje entre los electrodos y los extremos de las fibras se empalman.



Aspecto final del empalme con el revestimiento de protección.

5 Tet de enlaces ópticos mediante el uso de reflectómetro óptico de dominio temporal

5.1 Reflectómetro óptico de dominio temporal

Un *reflectómetro óptico de dominio temporal (OTDR)* es un dispositivo de medición que puede ser utilizado para caracterizar los sistemas de comunicación ópticos. Mediante la medida de la intensidad de luz retro dispersada Rayleigh desde una fuente (típicamente un láser pulsado) en el dominio del tiempo, el OTDR puede aproximar la distancia recorrida por la luz, dado que el índice de refracción de la fibra es conocido.



De ese modo es capaz de identificar la atenuación de diferentes longitudes de la fibra, y la posición de componentes de red, por ejemplo, empalmes o conectores. La identificación y localización de defectos en el sistema de comunicación óptica es la principal motivación para el uso de OTDR.



Reflectómetro óptico de dominio temporal



El OTDR debe ser conectado al extremo de una fibra óptica del orden de decenas de kilómetros de longitud y con un número de empalmes y conectores a lo largo de esa longitud.

- El OTDR puede ser configurado para producir pulsos de 1550 o 1310 nm de longitud de onda central, y duraciones de pulso de 10ns a 10us.
- Existe un compromiso entre la profundidad y la resolución de la medida, que está determinada por la duración del pulso de penetración.
- Los pulsos más cortos tienen tanto como una mejor resolución espacial y una profundidad de penetración peor.
- Se prefiere variar la duración del pulso para cada aplicación, idealmente la mayor resolución se consigue manteniendo al mismo tiempo los datos en profundidad.
- Pueden existir fibras para las que no se logra la claridad adecuada a grandes profundidades



-
- Una solución simple a este problema es conectar el OTDR en el extremo opuesto de la fibra.
-

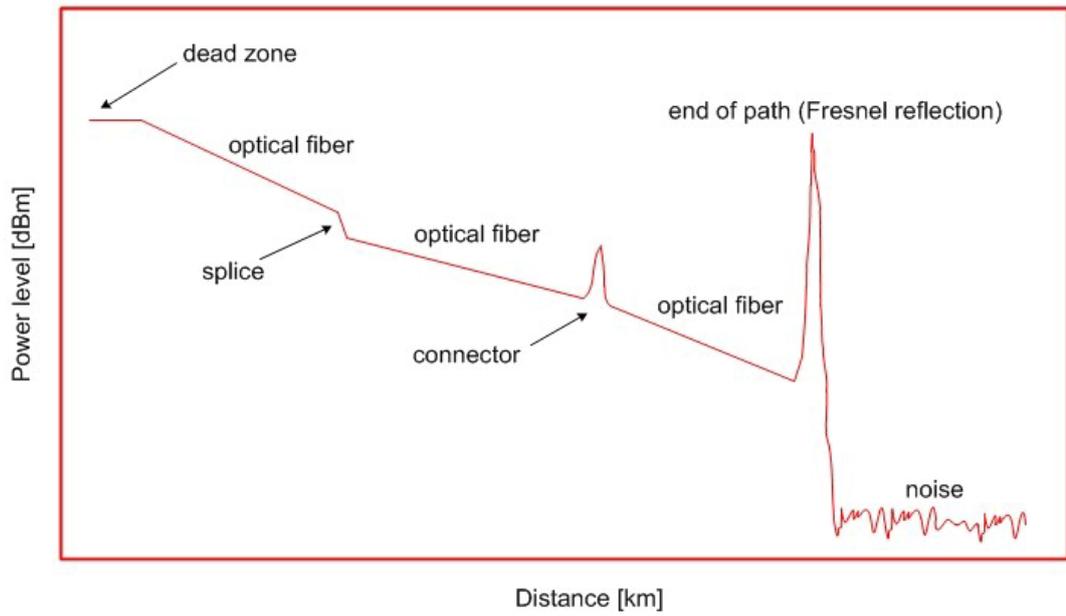
Interpretación de los datos medidos

Los resultados que aparecen en la pantalla obtenidos con el OTDR se muestran en la figura.

- El OTDR permite identificar los componentes de la red: conectores y empalmes debido a la forma del perfil de atenuación.
- Una fuerte caída de corta duración indica un empalme.
- Un pico local, se observa en los conectores, con una mayor bajada en el lado derecho de la cima.

Esto es debido al mejor acoplamiento óptico de empalmes; los máximos locales observados en los conectores son consecuencia del aumento de la reflexión posterior debido a la mala calidad de la unión.

El pico es un artefacto debido a las suposiciones hechas en el sistema (específicamente, la suposición de que una copia de intensidad de reflexión se puede utilizar como análogo de atenuación) y por lo tanto la atenuación del conector no está relacionada con la altura del pico, sino más bien con la pérdida de potencia desde el principio hasta el final del pico.



Resultados que aparecen en la pantalla obtenidos con el OTDR



Conectores y empalmadores en un diagrama OTDR.

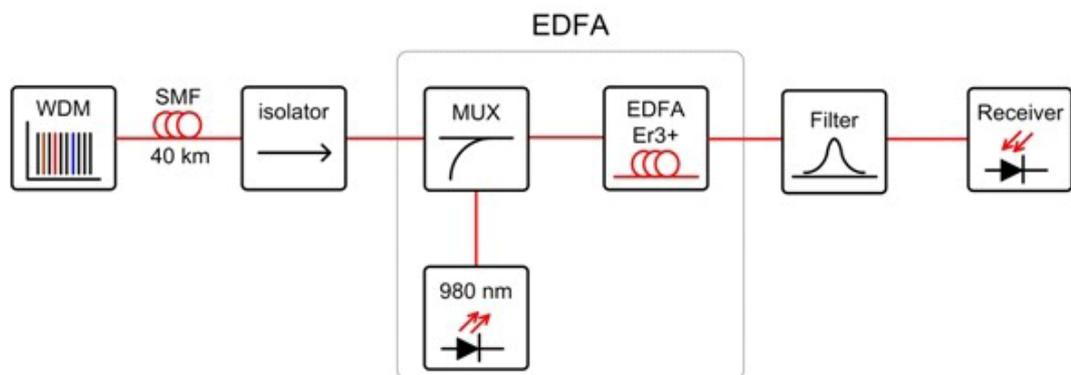
6 Regeneración de señales en redes ópticas utilizando enlaces EDFAs

6.1 Erbium Doped Fibre Amplifiers/ Amplificadores de fibra dopada con Erbio

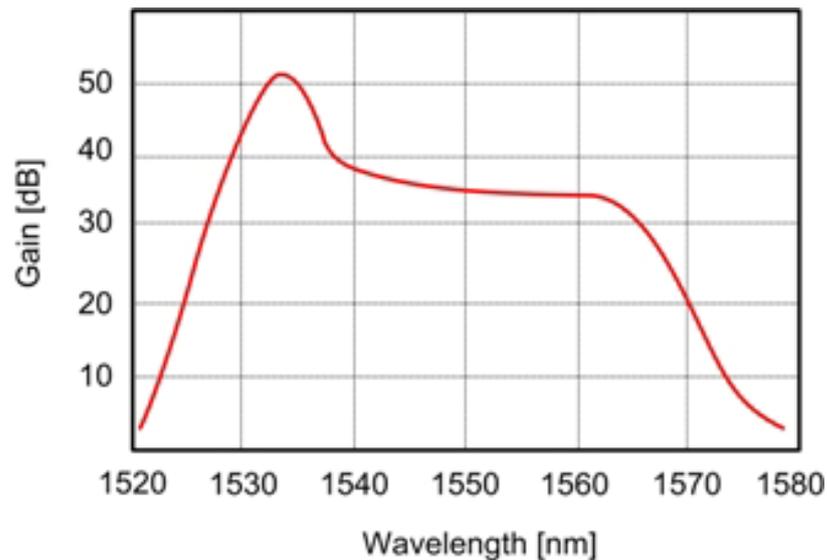
Las fibras dopadas se utilizan a menudo como amplificadores ópticos dentro de las redes ópticas. El Erbio es el dopante más común. - los *Erbium Doped Fibre Amplifiers (EDFAs)* son los amplificadores más comunes de este tipo. Los EDFAs están bombeados por un diodo láser con una longitud de onda central de 980 nm que se multiplexa con la señal portadora en la fibra. La radiación de bombeo excita los iones de dopante a lo largo de la longitud del amplificador.

$E=m \cdot c^2$

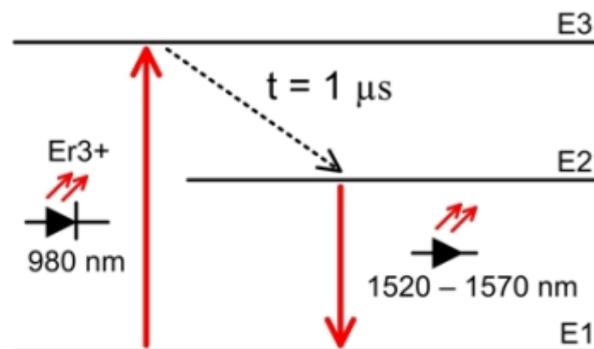
Los iones de erbio excitados se someten a una relajación rápida, no radiativa, a una banda de energía más baja, después de lo cual experimentan una relajación lenta radiativa a su estado fundamental. Los tiempos de decaimiento relativos de estos estados son críticos para el logro de la inversión de población - un requisito previo para alta estimulación y generar emisión espontánea, que, en consideraciones más prácticas, se manifiesta como una alta relación señal-ruido y una mayor eficiencia de amplificación.



EDFA operando como amplificador en línea.



Longitudes de onda de operación y ganancia de un EDFA.



Modelo de energía de un EDFA.

Esta solución incluye una fuente láser *distributed feedback* (**DFB**), un módulo de bombeo a 980 nm, un multiplexor, un EDFA y un analizador espectral. Las salidas del láser DFB y del módulo de bombeo se combinan mediante el uso de un multiplexor y se transmiten a través del EDFA.

Ventajas:



- Amplio rango de operación (C+L band – 1530 nm hasta 1680 nm).
- Gran ganancia, de 20 a 50 dB (hoy día superar los 20 dB no es necesario para evitar la aparición de fenómenos no lineales no deseados como *Four Wave Mixing* (**FWM**) en redes de muy alta velocidad).
- Construcción – una fibra utilizando bombeo óptico.
- Ganancia relativamente plana para redes ópticas transparentes utilizando **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*).
- Bajo coste.

- Aplicaciones como amplificador en línea.
-

Desventajas:

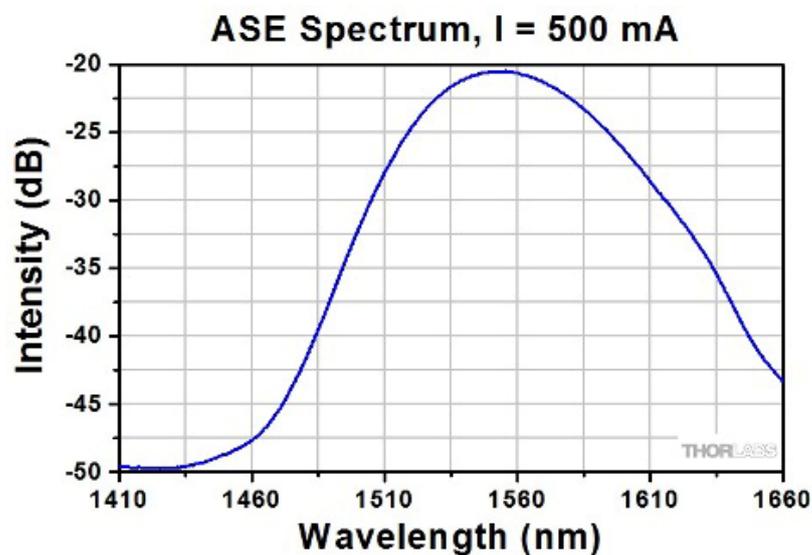


- Ruido **ASE** (*Amplified Spontaneous Emission*).
 - No se puede utilizar como un refuerzo debido a la supresión de ganancia (saturación).
 - No se puede usar como preamplificador sin filtros especiales.
-

7 Amplificadores Semiconductores (SOA) y amplificadores Raman

7.1 Amplificadores Ópticos Semiconductores

Un *Amplificador óptico semiconductor (SOA)* utiliza un semiconductor como medio de ganancia y, como tal, realiza un bombeo eléctricamente. Se pueden comparar a los diodos láser, con la advertencia de que los espejos finales se sustituyen con capas anti-reflexión. La señal es amplificada por emisión estimulada en la capa activa excitada eléctricamente.

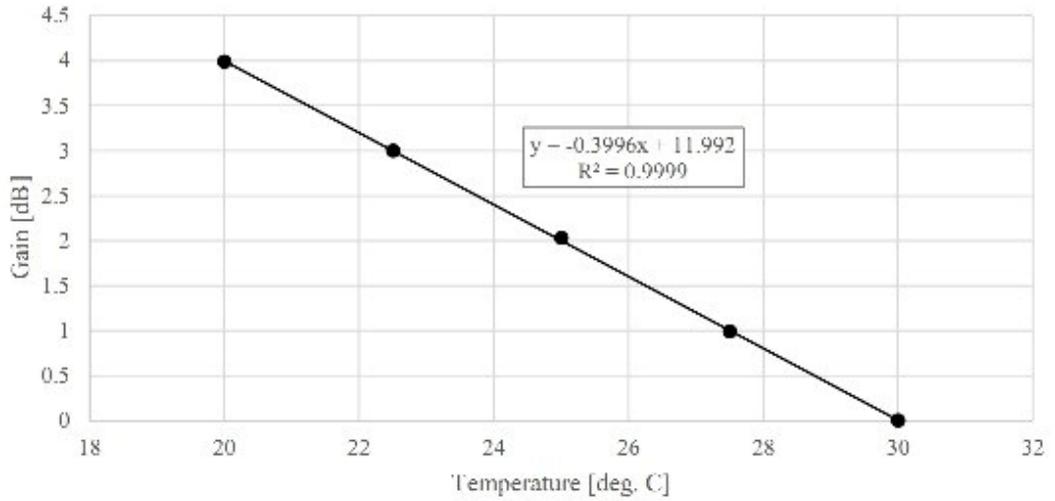


Característica espectral de un SOA.



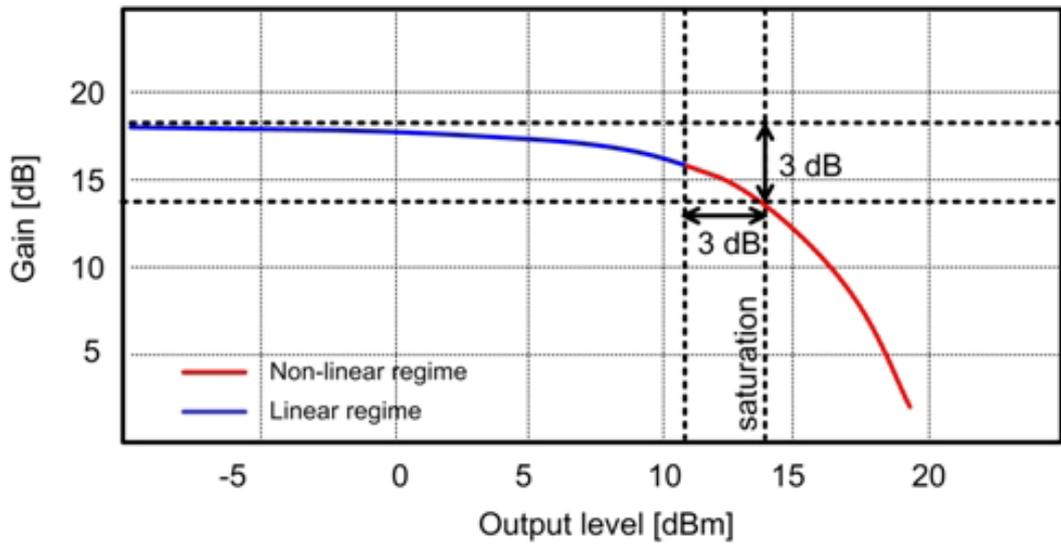
Las aplicaciones prácticas que resultan de este efecto son confusas debido a la lenta naturaleza de control de temperatura. Sin embargo, se puede observar al menos que la temperatura debe ser mantenida estable con el fin de proporcionar la amplificación coherente, y que mínimos de temperatura resultan en una amplificación máxima.

Temperature Dependence of Gain in an SOA



Dependencia con la temperatura de la ganancia de un SOA.

La clasificación de los regímenes lineales y no lineales de la SOA es útil, ya que es generalmente indeseable operar el amplificador en el régimen no lineal.



Régimen lineal y no lineal del SOA.

7.2 Amplificador Raman

La amplificación Raman utiliza el *Stimulated Raman Scattering (SRS)*.

$$E = m \cdot c^2$$

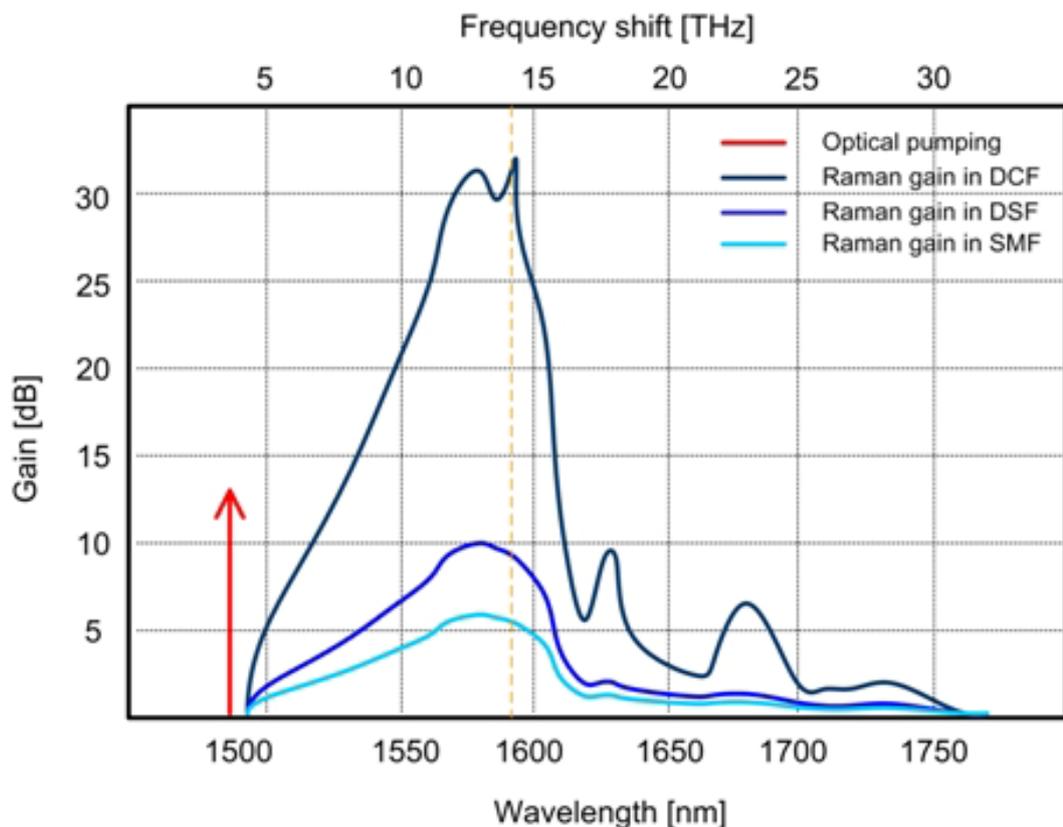
Un fotón de longitud de onda más larga induce la dispersión inelástica de un fotón de longitud de onda más corta de la bomba (longitud de onda madre) en una fibra óptica. Otro fotón se produce a la longitud de onda desplazada en aproximadamente 100 nm (válido para las fibras de telecomunicaciones estándar).

Este fenómeno se utiliza con éxito para la construcción de un amplificador óptico. Si la bomba Raman se encuentra a nivel local, donde se ha de lograr la ganancia, lo llamamos amplificador:

- **LRA** – *Lumped Raman Amplifier*.

Sin embargo, puesto que la SRS se acumula a lo largo de toda la fibra, es más óptimo colocar la bomba Raman en el extremo opuesto de una fibra:

- **DRA** – *Distributed Raman Amplifier*.



Ganancia Raman en diferentes tipos de fibras ópticas: Single Mode Fibre (SMF), Dispersion Shifted Fibre (DSF) y Fibra de Dispersión compensada (DCF).



Amplificadores comerciales disponibles EDFA, SOA y Raman.



El efecto Raman no siempre se desea. En sistemas DWDM, SRS puede producir interferencias entre canales de transmisión. La diafonía Raman o crosstalk es un efecto generalmente indeseable, los efectos ópticos no lineales en las redes se producen debido a las imperfecciones en la fibra. Se trata de un efecto de dispersión inelástica de fotones (es decir, hay un cambio en la energía fotónica). En términos prácticos, esto se traduce en diafonía entre canales y una migración de potencia del canal de las longitudes más cortas de onda a las longitudes de onda más largas (o desde frecuencias más altas a las frecuencias más lentas).

8 Compensadores de dispersion para enlaces de fibra óptica

8.1 Dispersión en fibras ópticas



La dispersión provoca la extensión de pulso o compresión de impulso (si la dispersión es negativa) en el dominio del tiempo. Puede provocar interferencia inter simbólica. Si dos pulsos consecutivos representan un nivel lógico 1, el espacio entre dos impulsos indica un nivel lógico 0, si los dos pulsos se cubren entre sí parcialmente, el decodificador no será capaz de reconocer el símbolo "0".



La unidad de dispersión tiene unidades de [ps / nm] (picosegundos / nanómetros), pero en la fibra óptica, donde la longitud de las estructuras ópticas es un parámetro clave, la dispersión se refiere a la unidad de longitud y se expresa como [ps / nm / km]. La dispersión de 1 ps / nm / km indica que el retardo entre el componente de mayor frecuencia de un impulso óptico y el más lento, con un ancho de banda de 1 nm, será de 1 ps después de 1 km.

Dispersión cromática

La dispersion cromática tiene dos componentes: dispersión material y dispersión de longitud de onda.

La Dispersión Material (DMat) se debe a la anchura de banda de una fuente de láser, que no es infinitamente estrecha. En la práctica, no hay luz monocromática ideal (con ancho de banda muy estrecho). La luz emitida y el pulso transmitido contienen dos componentes de frecuencia (que se corresponden con muchos colores similares). Cada componente de frecuencia se caracteriza por la constante de fase específica de la propagación - el índice de refracción es distinto para cada color específico. Cada componente de frecuencia (cada color) se propaga luego a velocidad de fase diferente y alcanza el extremo de una fibra en un instante de tiempo diferente.

- La dispersión Material está presente tanto en fibras mono modales como en fibras multimodo.
- La dispersión Material puede ser positiva o negativa.

Dispersión de longitud de onda (WD) es causada por el cambio de forma del modo en cierta distancia y está estrictamente asociada con la geometría de la guía de ondas, lo que provoca el cambio de velocidad de grupo (la forma del pulso conjunto "envolvente") como una función de longitud de onda. Es una herramienta adecuada para ajustar la propiedad de dispersión de una fibra, porque por el diseño adecuado de los parámetros geométricos que describen su guía de ondas, se puede especificar el valor de la dispersión de guía de ondas, que es responsable de la dispersión total.

- La dispersión de longitud de onda es siempre negativa, por eso puede usarse para compensar la dispersión material.



Solución: El uso de *Dispersion Compensating Fibres/ Fibras con compensación de dispersión (DCF)* o fibras de rejilla especial.

Dispersión Modal

Cuando se tiene dispersión modal (MD) cada uno de los haces pasa a través de la fibra a su salida a lo largo de una trayectoria diferente. La trayectoria más corta es para el haz que se propaga a lo largo del eje de simetría de la fibra, el camino más largo se refiere al haz que exhibe el número máximo de reflexiones en la interfaz núcleo / revestimiento. Con el aumento del ángulo de entrada NA, existe un mayor número de reflexiones durante la propagación y la trayectoria general de un haz es cada vez mayor. Los haces particulares (modos) llegan al extremo de la fibra en diferentes instantes de tiempo y son detectados como superposición; el resultado es un impulso de corriente prolongado en la salida de un detector.

- La dispersión modal sólo está presente en las fibras multimodo (sólo hay un modo en fibras monomodo, por lo que no puede tener en cuenta la diferencia entre dos modos), es por lo general de unos pocos ns / nm / km.



No está causada por velocidades distintas de componentes particulares (haces, modos) – todos están guiados a la misma velocidad de grupo y fase = la dispersión modal no es función de la longitud de onda.

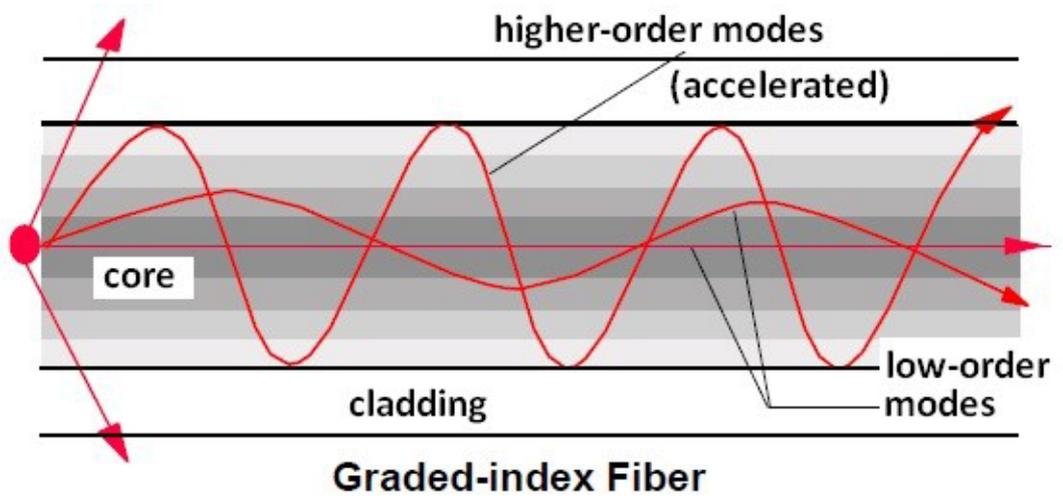
Fibras multimodo de índice gradual



Solución: disminuir la velocidad para trayectorias cortas y aumentar la velocidad para trayectorias largas.



En las fibras multimodo de índice gradual: *Multi-mode Graded Index (MM-GI)* el índice de refracción del núcleo no es constante; disminuye gradualmente en función de la distancia desde el centro del núcleo. El material más denso está en el centro de un núcleo, la capa a su alrededor es menos densa. Cuanto mayor es la distancia desde el núcleo, más se reduce el índice de refracción inferior de un material. Hay refracción en el acoplo de las capas y, finalmente, el haz se refleja en la capa específica o en el límite entre la última capa núcleo y el revestimiento. El haz que se propaga a lo largo de eje de simetría tiene la trayectoria más corta, pero su velocidad es lenta, debido a que el centro de un núcleo es un material de alto índice. Por otro lado, los haces de propagación a lo largo de las trayectorias más largas están siguiendo un índice más bajo, un material "rápido".

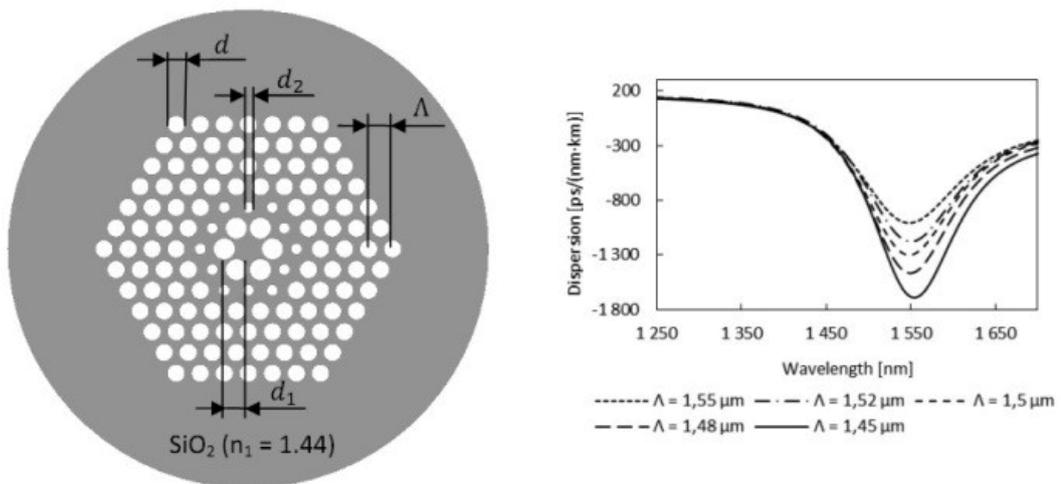


Dispersión en fibras multimodo de índice gradual.

8.2 Compensación de dispersión

Fibras de dispersión compensada

Las fibras de dispersión compensada : DCFs (*Dispersion Compensating Fibres*) son específicas para parámetros de dispersión negativos bajos ~ -100 ps/nm/km, hasta ~ -10000 ps/nm/km (hay muchos artículos con informes de una amplia gama de valores teóricos), para compensar la acumulación de dispersión. Las DCF difieren de las SMF estándar, por lo que hablamos de su geometría y composición del material. Las DCF más maduras se basan en fibras de cristales fotónicos (PCF).

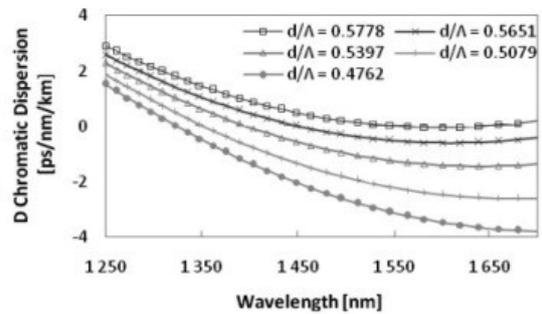
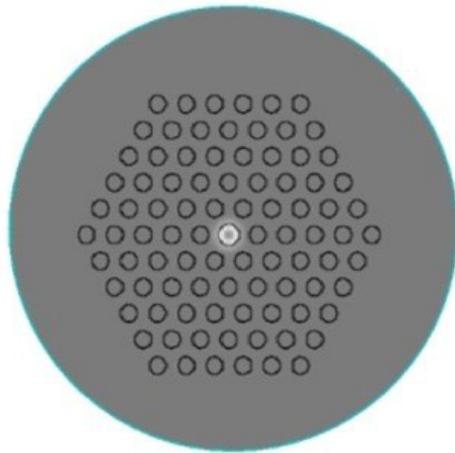


Muestra de la sección transversal de una DCF madura y su parámetro de dispersión en longitud de onda.

Algunas DCF están diseñadas para funcionar a una longitud de onda específica, la evolución de la dispersión de longitud de onda, con un mínimo y dos longitudes de onda de *dispersión cero* (ZDW).



Las DCF para sistemas DWDM tienen que ser capaces de compensar la dispersión en todos los canales a la vez. La banda ancha DCF tiene un fuerte parámetro dispersión negativa disponible en todas las ventanas de telecomunicaciones, en el que las fibras son transparentes. La dispersión en longitud de onda de dichas DCF reproduce la pendiente inversa de una fibra estándar para compensar un amplio espectro de longitudes de onda de funcionamiento.



Dispersión en DCFs.

Fibras graduales de Bragg

Otra posibilidad es utilizar fibras graduales de Bragg : *fibre Bragg grating* – **FBG** en la fibra alrededor del núcleo (atención: no tratamos con fibras micro estructuradas de Bragg).

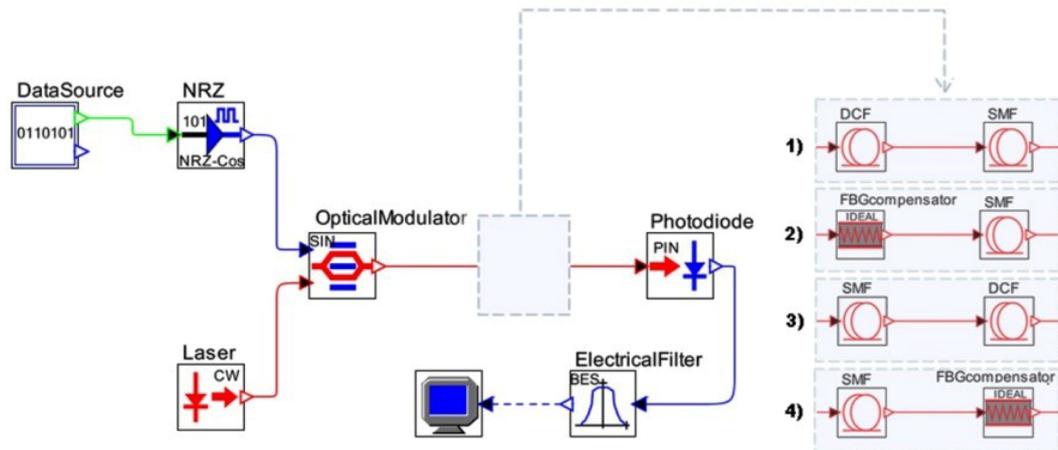
Desventaja



- Funciona en longitudes de onda específicas. Uno puede sintonizar la rejilla (su periodo), pero para muchos canales DWDM no es suficiente. Muchos canales = muchas rejillas.
- La rejilla se puede ajustar, pero la división de longitud de onda DWDM múltiplex contiene muchos canales, una rejilla no es suficiente un solo rallado no es suficiente.
- Muchas longitudes de onda = muchas rejillas

Esquemas de compensación

Son posibles distintas opciones de compensación: antes o después de la compensación. Para decidir, cuál es la opción adecuada para una determinada red, se recomienda llevar a cabo la simulación numérica de una red específica.



Esquemas de compensación para redes ópticas.

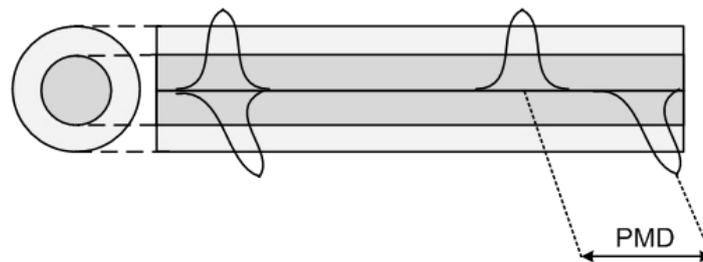
Durante la realización de compensación de la dispersión, se debe prestar atención a no obtener dispersión cero. Por un lado la dispersión cero significa que no hay propagación de impulsos, pero por otro lado, conduce a un fenómeno no lineal conocido como **FWM - Four Wave Mixing**. La dispersión cero es una de las pocas condiciones que la originan.

8.3 PMD – Polarización Modo Dispersión

La **PMD** – *Polarización Modo Dispersión* se origina debido a las diferencias en índice de refracción para diferentes polarizaciones (polarización significa prácticamente oscilaciones del vector E o H en la dirección específica), o en otras palabras, a causa de diferente índice de refracción para el eje "x" y el eje "y". No es la llamada eje rápido y el eje lento. Tal material se denomina un entorno anisotrópico. La PMD es generalmente pequeña - par de picosegundos, sin embargo, puede ser un problema para los sistemas de transmisión de alta velocidad.



La búsqueda de soluciones óptimas es difícil, porque PMD es un proceso aleatorio. Correctores electrónicos específicos de polarización se utilizan para recibir correctamente los datos. Para evitar PMD, se utilizan fibras birrefringentes especiales con una asimetría importante.



PMD en una fibra óptica.

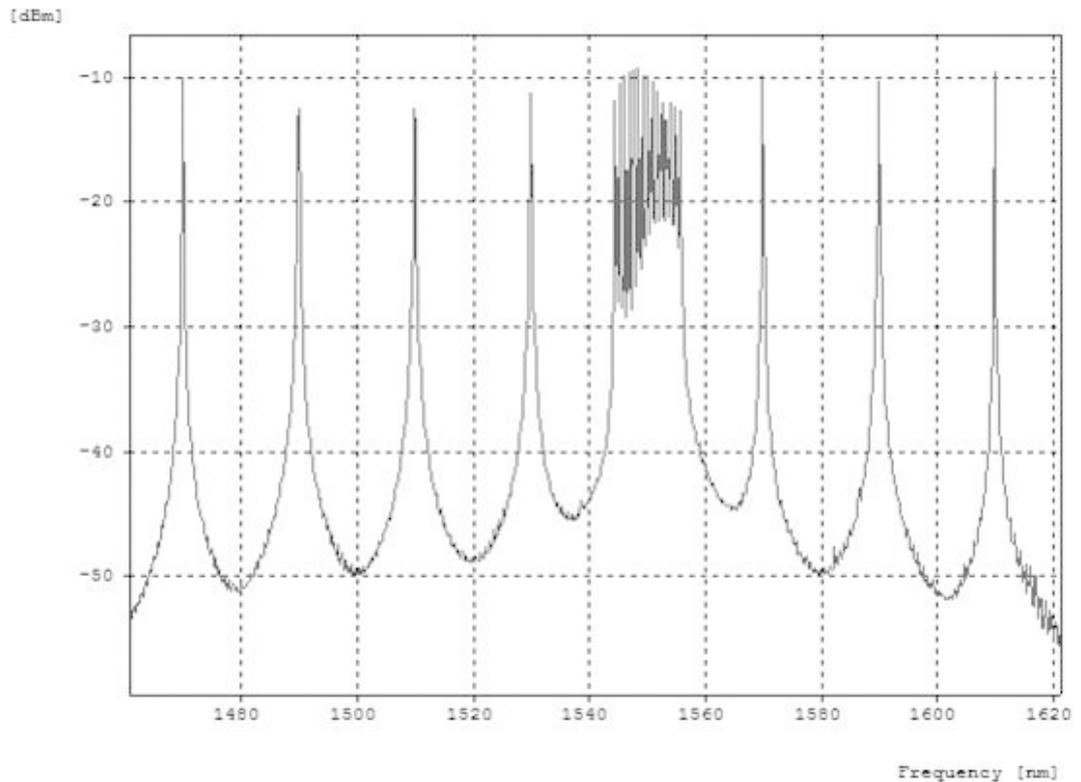
9 Convergencia y actualización de las redes ópticas

9.1 Convergencia y actualización de las redes ópticas

La demanda de mayores tasas de capacidad de información y bits requiere la actualización de más sistemas de los sistemas ópticos existentes o que se ejecutan en una fibra. La coexistencia de los sistemas ópticos se refiere a las redes CWDM y DWDM que comparten la infraestructura óptica pasiva.

DWDM sobre CWDM

- CWDM
 - 8x10 Gbps canales - 1470 nm - 1610 nm.
- CWDM/DWDM
 - Reemplaza el canal 5 en CWDM (1550 nm).
 - DWDM con 15x10 Gbps canales con espaciado de 100 GHz.
 - Factor Δ Quality modificado menos de 0.1 dB.

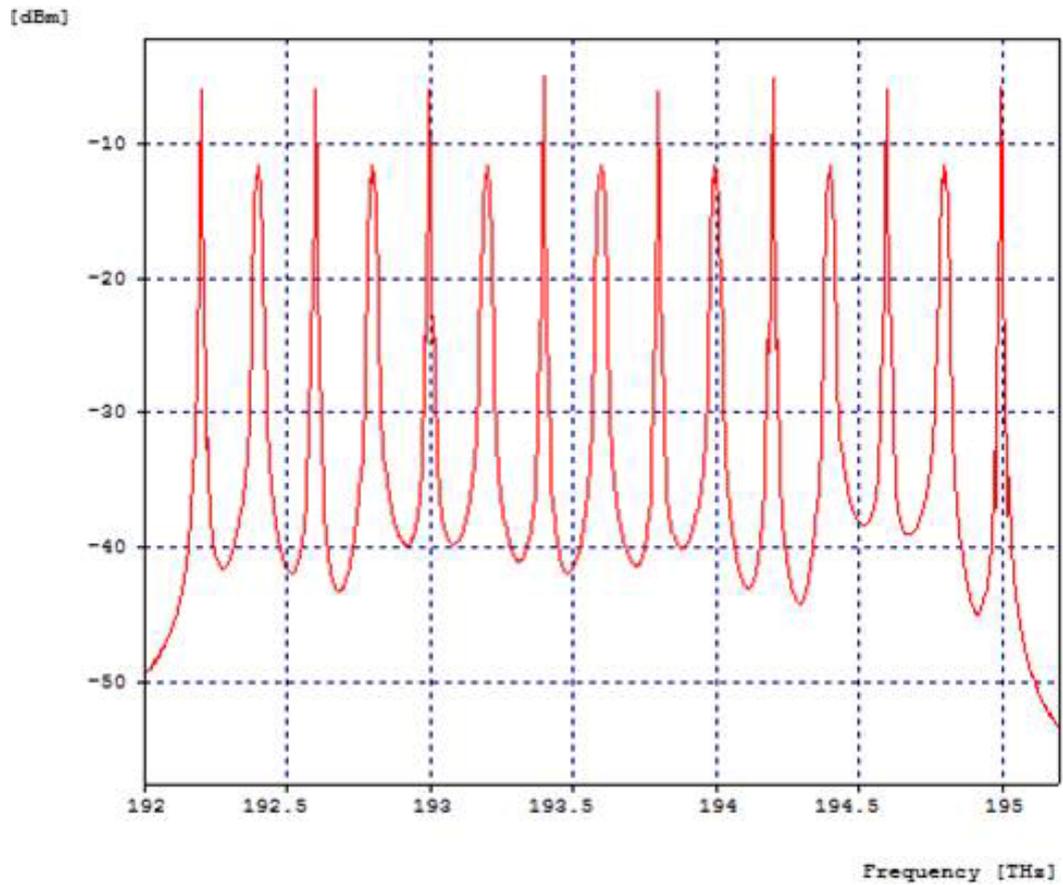


Solución para DWDM sobre sistema CWDM – espectro de canal.

Soluciones híbridas

DWDM 10G/40G híbrido

- Inicialmente sistema 10G DWDM
 - 15x10 Gbps, NRZ-OOK, espaciado de 50 GHz.
 - 6x80km SSMF (amplificadores de fase dual, post-compensación).
- DWDM 10G/40G híbrido con de canal intercalado
 - Combinación con Sistema de 7x40 Gbps.
 - Modulación Duobinaria, formatos de modulación P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Influencia de los canales de 10 Gbps sobre los canales de 40 Gbps.
 - *Problema: Cross Phase Modulation (XPM).*

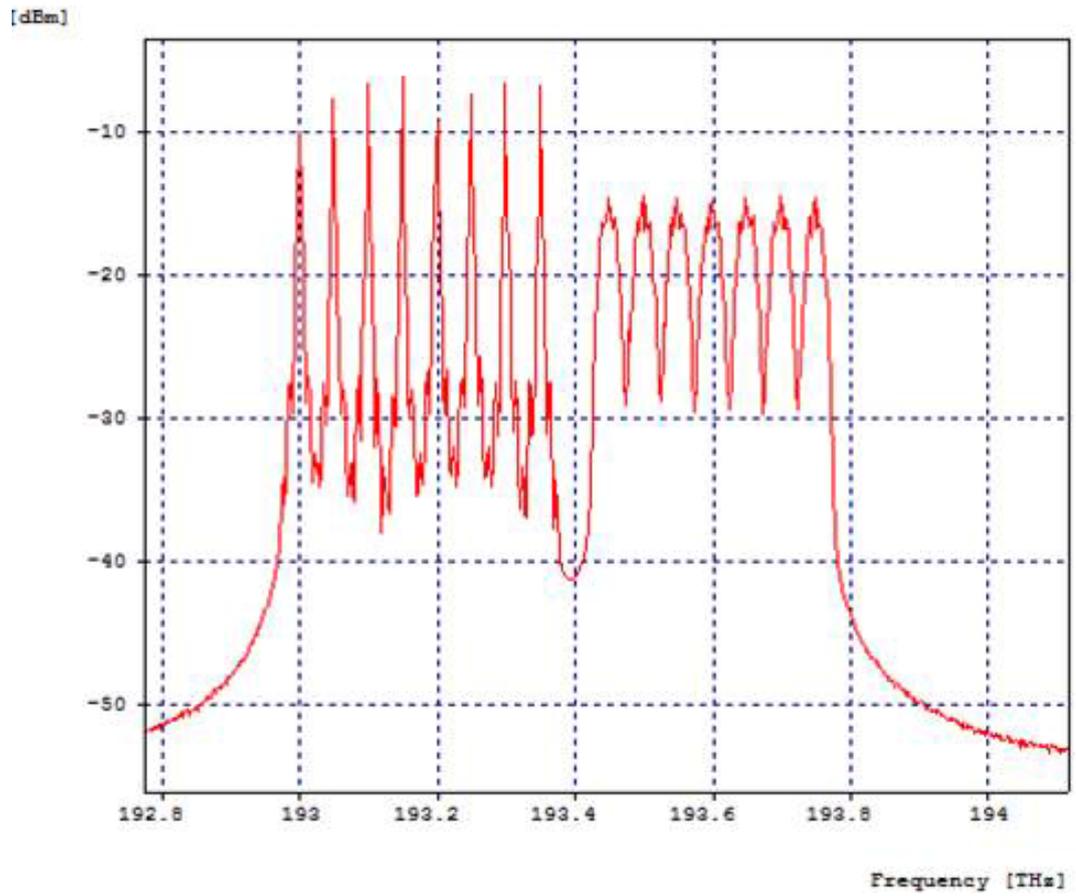


Espectro óptico de DWDM con canal intercalado.

DWDM 10G/40G híbrido con banda de seguridad



La división espectral de 10G y 40G de la banda de seguridad puede ayudar a la reducción de la modulación de fase cruzada del sistema 10G.



Banda segura (100 GHz) dividida en dos sistemas (RZ-DQPSK y P-DPSK 40G).

10 Conclusión



Las FTTx involucran redes ópticas, dependiendo de la capacidad de red y alcance que cubren:

- *Las redes ópticas pasivas: Passive Optical Networks (PON)* – son baratas, pero las velocidades de bit están alrededor de 10 Gbps y el alcance de la fibra puede ser sólo de decenas de kilómetros.
 - *Las redes ópticas activas: Active Optical Networks (AON)* – permiten conseguir altas velocidades de bit, sobre 1 Tbps usando sistemas DWDM :
 - Resolver la topología, atenuación, dispersión y problemas no lineales – planificación de red.
 - Velocidad de canal mínima de 100 Gbps.
 - Trabajar al menos a 40 G DWDM sobre 10 G DWDM.
 - Potencial o convergencia de los diferentes sistemas con diferentes especificaciones.
-