

Universidad Nacional del Nordeste

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura

Proyección de la saturación de las tecnologías de transmisión
DWDM disponibles en el diseño de redes troncales de las redes de
transporte de datos e internet

Autor: Julián I. Veglia. Ingeniero Electricista

Director: Magister Reinaldo J. Scappini

Año 2018

Índice General

Índice General	II
Índice de figuras	IV
Índice de tablas.....	V
Abreviaturas	VI
Resumen General.....	VIII
Abstract	VIII
1 Definición de la problemática	1
1.1 Introducción:	1
1.2 El tráfico en las redes de datos.....	2
1.3 Definición de la problemática	4
2 Hipótesis y objetivos	5
2.1 Hipótesis planteadas	5
2.2 Objetivos	5
2.3 Material y métodos	5
3 Antecedentes.....	7
3.1 Esquema de un sistema de transmisión por fibra óptica	7
3.2 Las limitaciones de la fibra óptica	8
3.2.1 Tipos de fibras ópticas.....	8
3.2.2 Atenuación	9
3.2.3 Dispersión cromática	9
3.2.4 Dispersión por modo polarización (PMD).....	10
3.2.5 Efectos no lineales	10
3.3 Técnicas de modulación	12
3.3.1 Modulación de intensidad	12
3.3.2 Modulación de fase.....	13
3.3.3 Modulación QAM	14
3.3.4 Multiplexación por polarización	16
3.4 Transmisión	17
3.5 Recepción	18
3.6 Degradación de la señal óptica.....	18
3.7 Asignación de canales y filtrado óptico	21
3.8 Interfaces de clientes.....	22
3.9 Diseño de un enlace DWDM.....	23
3.9.1 Consideraciones de diseño.....	26
3.10 Resiliencia	27

4	Resultados Obtenidos.....	29
4.1	La capacidad de transporte	29
4.2	Aplicabilidad de los sistemas DWDM.....	32
4.3	Métodos para aliviar la saturación y resiliencia	35
4.3.1	Utilización de nodos caché	35
4.3.2	Distribuir los puntos de interconexión IXP.....	38
4.3.3	Mejora en la resiliencia	39
4.4	Marco del diseño de un enlace	39
4.5	Diseño de un nuevo enlace para un nuevo nodo de la red núcleo.	40
4.6	Resiliencia del enlace	43
4.7	Análisis de los resultados	46
5	Aportes y Conclusiones	49
5.1	Evaluar la capacidad de transporte de los sistemas de transmisión DWDM .	49
5.2	Determinar el límite de aplicabilidad de las tecnologías DWDM actuales y en desarrollo en el diseño de las redes troncales de datos	50
5.3	Analizar métodos para aliviar la saturación de las redes troncales	50
5.4	Analizar métodos para mejorar la resiliencia de las redes	51
5.5	Proponer un marco de diseño de una conexión troncal entre equipos de transporte de datos e internet a partir de la proyección de tráfico de datos	51
5.6	Líneas futuras.....	52
	Bibliografía.....	53
	Apéndice.....	55
A.1	Grilla de canales DWDM de la ITU-T.....	55
A.2	Esquemas de las estaciones del enlace proyectado	56
A.3	Mediciones con OTDR.....	58
A.4	Especificaciones del hardware de un transponder.....	60

Índice de Figuras

Figura 1.1. Topología tradicional de una red de transporte de datos.....	2
Figura 1.2. Evolución de tráfico en Internet.....	3
Figura 1.3 Conexión de larga distancia entre dos routers	4
Figura 3.1. Esquema de un sistema de transmisión por fibra óptica	7
Figura 3.2. Atenuación por km en función de la longitud de onda en una fibra óptica ..	9
Figura 3.3. Dispersión cromática	10
Figura 3.4. Esquema de un modulador Mach-Zehnder	12
Figura 3.5. Constelación para PSK y DPSK.....	14
Figura 3.6. Constelación para QPSK y DQPSK	14
Figura 3.7. Constelación para 16QAM.....	15
Figura 3.8. Constelación para 8QAM	15
Figura 3.9. Multiplexación por polarización	16
Figura 3.10. Modulador y receptor DP-QPSK	17
Figura 3.11. Ubicación de un amplificador Raman + EDFA	19
Figura 3.12. Degradación de la señal óptica debido al ruido ASE.....	20
Figura 3.13. Capacidad de la fibra óptica en función la potencia inyectada	21
Figura 3.14. Esquema de un LT	24
Figura 3.15. Esquema de un FOADM.....	25
Figura 3.16. Esquema de un nodo ROADM A/D	25
Figura 3.17. Esquema de un nodo OLA.....	26
Figura 4.1. Efecto de la limitación por potencia inyectada.....	29
Figura 4.2. Proyección de la saturación para una fibra óptica	34
Figura 4.3. Proyección de la saturación para una fibra óptica	36
Figura 4.4. Escenario 1 para ubicación del nodo caché	37
Figura 4.5. Escenario 2 para ubicación del nodo caché	37
Figura 4.6. Escenario 3 para ubicación de los nodos caché.....	38
Figura 4.7. Reducción del tráfico troncal con IXP regionales	39
Figura 4.8. Topología reducida en saltos	39
Figura 4.9. Esquema de la traza del enlace Corrientes - Posadas.....	41
Figura 4.10. Esquema de conmutación a nivel OTN y fotónico	43
Figura 4.11. Esquema de conmutación óptica	44
Figura 4.12. Esquema de protección de re-encaminamiento	45

Índice de tablas

Tabla 3.1. Capacidad máxima teórica de la modulación M-QAM (canales de 50GHz)	16
Tabla 3.2. Comparativo de los sistemas de modulación	22
Tabla 4.1. Capacidades máximas para las modulaciones DP-QPSK y DP-16QPSK ..	31
Tabla 4.2. Distancias máximas para cada modulación.....	33
Tabla 4.3. Parámetros de diseño del enlace	41
Tabla 4.4. Resumen de información del diseño	42
Tabla 4.5. Verificación de los niveles de OSNR	42
Tabla 4.6. Asignación de canales para el tráfico	43
Tabla 4.7 Estimación de la latencia en el enlace directo	45

Abreviaturas

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
APC	Automatic Polarization Control
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ATM	Asynchronous Transport Mode
BER	Bit Error Rate
BOL	Beginning Of Life
BNG	Border Network Gateway
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CD	Chromatic Dispersion
CDN	Content Delivery Network
CWLD	Continuous Wave Laser Diode
DSF	Dispersion Shift Fiber
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DP-QPSK	Dual-Polarized Quadrature Phase Shift Keying
DPSK	Diferential Phase Shift Keying
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EOL	End Of Life
FEC	Forward Error Correction
FOADM	Fixed Optical Add Dropp Multiplexer
FPM	Four Photon Mixing
FTTC	Fiber To The Curb
FTTH	Fiber To The Home
FWM	Four Wave Mixing
GVD	Group-Velocity Dispersion
HFC	Hybrid Fiber Coaxial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFWM	Intrachannel Four-Wave Mixing
IOT	Internet of things
ISI	InterSymbol Interference
ISP	Internet Service Provider

ITU	International Telecommunication Union
IXP	Internet Exchange Points
IXPM	Intrachannel Cross Phase Modulation
LPF	Low Pass Filter
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NZDS	Non-Zero Dispersion Shift
ODF	Optical Distribution Frame
OLA	Optical Line Amplifier
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSPF	Open Shortest Path First
OTDR	Optic Time Domain Reflectometer
OTN	Optic Transport Network
OTU	Optic Transport Unit
PBC	Polarization Beam Combinator
PBS	Polarization Beam Splitter
PC	Polarization Control
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PMD	Polarization Mode Dispersion
PSK	Phase Shift Keying
ROADM	Reconfigurable Optical Add Dropp Multiplexer
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDFEC	Software Defined Forward Error Correction
SE	Spectral Efficiency
SPM	Self Phase Modulation
SSMF	Standard Single Mode Fiber
SRS	Stimulated Raman Scattering
VOD	Video On Demand
XPM	Cross Phase Modulation
WSS	Wavelength Selective Switch

Resumen General:

La red internet se compone de equipos interconectados en su mayoría mediante enlaces de fibra óptica, cuya capacidad de transporte se creía inagotable hasta hace pocos años. El tráfico de Internet crece en los últimos años a un ritmo exponencial saturando rápidamente la capacidad de transporte de información de los sistemas de transporte de fibras ópticas instalados, en particular en la capa de núcleo de la red, donde ocurre la mayor concentración de tráfico. A este ritmo, un enlace de fibra óptica con sistema DWDM, no podrá en poco tiempo suministrar la capacidad de transporte que demanda el crecimiento del tráfico. Este trabajo muestra como las limitaciones de la fibra óptica y las técnicas de transporte de información han llegado a un crecimiento limitado que acota la capacidad de transporte de una fibra óptica, y propone un marco para el diseño de un enlace de un vínculo entre dos routers considerando las características del crecimiento del tráfico, su contenido y los métodos para mitigar la saturación, aplicados al diseño de un enlace de transporte de información mediante la tecnología DWDM.

Abstract:

The internet network is composed of equipment mostly interconnected by fiber optic links, the transport capacity of which was believed to be inexhaustible until a few years ago. Internet traffic has grown at an exponential rate in recent years, rapidly saturating the information transport capacity of installed fiber optic transport systems, particularly in the core layer of the network, where the highest concentration of traffic occurs. At this rate, a fiber optic link with a DWDM system will not be able to supply the transport capacity demanded by traffic growth in a short time. This work shows how the limitations of fiber optics and information transport techniques have reached a limited growth that restricts the transport capacity of an optical fiber, and proposes a scheme for the design of a link between two routers considering the characteristics of traffic growth, its content and the methods to mitigate the saturation, applied to the design of an information transport link using DWDM technology.

1 Definición de la problemática

1.1 Introducción:

La red Internet se ha vuelto omnipresente en la actualidad, con la posibilidad de acceder desde múltiples dispositivos y mediante diferentes redes de acceso con tasas de bits variables de acuerdo al método técnico de acceso y la disponibilidad de la oferta comercial. La mayor demanda de acceso a Internet produjo el aumento de la oferta en las redes tradicionales y sobre todo en la red de telefonía móvil, además de mayores tasas de bits en los accesos. Este aumento de la capilaridad de los accesos, tanto en cantidad como cada vez mayores tasas de bits, genera concentraciones de tráfico en los primeros equipos de acceso, pero sobre todo en los equipos de interconexión interurbanos o de larga distancia.

En los inicios de la red Internet, la interconexión entre los equipos (routers y servidores) que conforman las redes de datos (Internet es una red de datos) se realizaba mediante los sistemas de transmisión disponibles que fueron diseñados originalmente para la red telefónica, con protocolos de transmisión pensados para la comunicación de voz con circuitos dedicados. Los equipos de datos, por lo tanto, tuvieron que adaptarse a los protocolos de transporte desarrollados para la red telefónica como PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy, Jerarquía Digital Asíncrona), SDH (Synchronous Digital Hierarchy, Jerarquía Digital Síncrona) y ATM (Asynchronous Transport Mode, Modo de Transporte Asíncrono). En esta etapa el tráfico de datos era apenas un porcentaje menor del tráfico total dominado por la telefonía. A modo de ejemplo, una conexión de apenas 155Mbit/s (la menor de la jerarquía de equipos SDH) es capaz de transportar 1890 comunicaciones telefónicas simultáneas de larga distancia que, para el criterio de diseño de la red telefónica de entonces, excedía con creces la necesidad de tráfico telefónico interurbano de una ciudad de 400.000 habitantes. Sin embargo, hoy existen ofertas de acceso a internet hogareño que superan esta tasa de transporte. A medida que el tráfico de datos fue creciendo, también evolucionó la tecnología de los equipos de la red de datos, tanto en capacidad de procesamiento como en interfaces con mayores tasas de bits y demandando más capacidad de transporte en los equipos de transmisión. Los equipos de transmisión tuvieron que adaptarse a la mayor demanda y a protocolos de comunicaciones más eficaces para las redes de datos. A medida que evolucionó la demanda de conexiones también evolucionó la forma en que se comunican los equipos de datos, al punto de absorber a la red telefónica: Los protocolos tradicionales como ATM perdieron protagonismo al no poder adaptarse rápidamente a cada vez mayor volumen de información transportada, al contrario de Ethernet que evolucionó incorporando mejoras que permitieron usarlo en los equipos de transmisión en forma nativa, simplificando la interconexión con los equipos de datos.

Para la interconexión de larga distancia entre equipos de datos se usan equipos de transporte, que también tuvieron su desarrollo desde los primeros equipos de radioenlace, a los modernos equipos de transmisión mediante fibras ópticas. Estos equipos tuvieron su evolución a medida que el desarrollo tecnológico permitió aumentar la capacidad de transporte de información y a su vez tener la versatilidad de adaptarse a los protocolos e interfaces de los equipos que interconectan. Este desarrollo permitió que el rápido crecimiento de las conexiones de usuarios a Internet, y su lógica consecuencia del aumento del tráfico que cursan los equipos troncales que conforman la red, puedan transportar esta mayor demanda de tráfico, por lo menos hasta ahora.

1.2 El tráfico en las redes de datos

Las redes de acceso para las conexiones de usuarios pertenecen normalmente a una empresa proveedora de acceso a Internet (ISP Internet Service Provider, Proveedora de Servicios de Internet), con una estructura topológica de equipos propia de la estrategia del negocio de cada empresa. Estas empresas son a su vez clientes mayoristas de otras empresas que ofrecen la interconexión a otros ISP nacionales e internacionales, donde el tráfico tiene su mayor concentración.

En cada ISP hay uno o varios equipos que cursan la mayor concentración del tráfico de información. El análisis del tráfico que cursan estos equipos permite tener una base de diseño de la evolución de las redes propias del ISP y de interconexión con otros ISP.

La topología tradicional de una red de transporte de datos se puede observar en la figura 1.1. donde las conexiones de los usuarios (no dibujadas) se ubican en la capa de acceso, seguida de una capa de agregación que concentra los accesos de una zona geográfica, y luego una de concentración, que es la que se conecta a la capa de núcleo.

En esta topología se observa que los equipos que ocupan la parte superior de la topología, la capa de núcleo (normalmente con redundancia de equipos), cursarán la mayor concentración de tráfico. A su vez son los que tendrán a su cargo la interconexión internacional o con otros ISP.

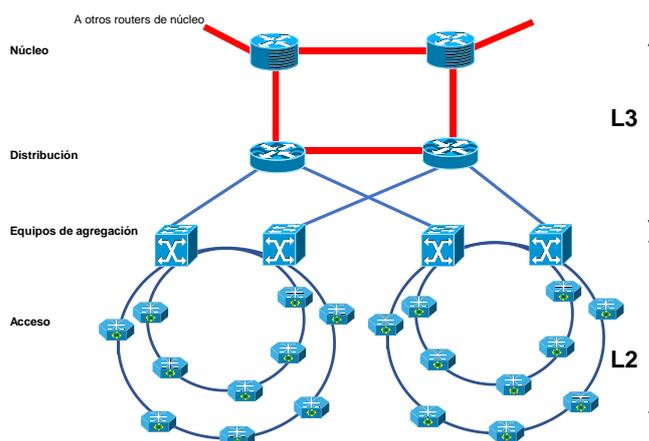


Figura 1.1. Topología tradicional de una red de transporte de datos [1]

En el caso de los ISP de un mismo país es común que se defina un punto común de interconexión de todos los ISP para evitar que la comunicación entre usuarios de distintos ISP ocupe recursos internacionales que tiene un costo de uso mayor. Este punto común se denomina Punto Regional de Interconexión de Internet (IXP, Internet Exchange Points). En Argentina la Cámara Argentina de Internet (CABASE) [1] publicó en su informe de Setiembre de 2017 [1] que el tráfico en el IXP creció 72% entre enero y julio de 2017 (figura 1.2). En este gráfico también se observa que el tráfico tiene una tendencia exponencial de crecimiento, que implica que la capacidad de transporte de las redes de interconexión tenga que aumentar rápidamente para evitar la saturación.

La información de tráfico real de los ISP es difícil de obtener, debido a que se considera información confidencial por una cuestión de estrategia del negocio de cada empresa. Para tener una referencia que sea representativa del tráfico real, se toma la información de CABASE (Cámara Argentina de Internet) medida en los IXP.



Figura 1.2. Evolución de tráfico en Internet [2]

Otra información de especial importancia es el desagregado de la información que compone el tráfico, que de acuerdo con el informe de CABASE, el tráfico con Google, Netflix y Facebook concentra casi un 80% de la demanda, y el restante 20% para otras fuentes.

Además, la mayor parte del tráfico corresponde a contenidos audiovisuales (películas, series, videos musicales, y otros contenidos de video, incluido video en vivo), con proyección sostenida de crecimiento.

Una característica del tráfico que merece destacarse, es que el tráfico del usuario es esencialmente asimétrico, es decir el tráfico hacia el usuario es varios órdenes de magnitud mayor al tráfico originado por el usuario, salvo en proveedores de contenido, en los cuales la situación se invierte. Esta asimetría no se compensa totalmente en las conexiones troncales, donde también se presenta esta asimetría.

La característica del tráfico provoca la rápida saturación de los sistemas de transporte de larga distancia, los cuales deben ampliarse o actualizarse para atender la demanda creciente. Para aumentar la capacidad de transporte de los sistemas de larga distancia se requiere poder incrementar la tasa de transferencia de información a través de los equipos de fibra óptica, y es allí a donde se enfoca este trabajo, en cómo satisfacer la demanda de la capacidad de transporte y a partir de la característica del tráfico y de los límites prácticos que impone el medio físico y la tecnología, aplicado al diseño de un enlace.

El futuro promete incrementar el desafío que representa la demanda actual, ya que al crecimiento exponencial del tráfico que se evidencia de la proyección de la curva histórica del tráfico, se suman los sistemas que van a demandar grandes tasas de transferencia para poder operar:

- Video digital 4K y 8K
- Sistema de telefonía móvil de quinta generación (5G), que promete entregar hasta 1 GB/s por usuario
- Juegos en línea de alta definición
- Mayor oferta de contenidos “live”
- Internet de las cosas (IOT, Internet of things)
- Nuevos oferentes de VOD (Video On Demand, Video a demanda), a Netflix se suma Amazon, Disney y otros locales de cada país.
- Nuevos servicios en la nube

1.3 Definición de la problemática

Para interconectar en largas distancias los routers que conforman la red de transporte de datos se utilizan equipos de transmisión mediante fibras ópticas. El esquema básico es el de la figura 1.3.

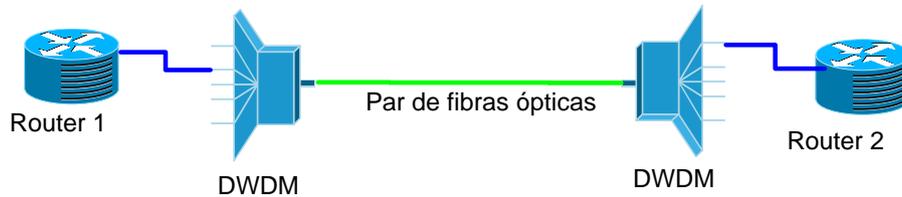


Figura 1.3 Conexión de larga distancia entre dos routers

Para poder transportar mayor cantidad de información los equipos de transmisión evolucionaron desde tasas del orden de 155MB/s a 10GB/s, con una modulación de la señal óptica OOK (On Off Keyed, Desplazamiento encendido apagado), y de sistemas de una sola longitud de onda a sistemas DWDM (Dense Wave Division Multiplexing, Multiplexación por división de longitud de onda), donde la información se transporta en cada fibra óptica mediante un conjunto denso de longitudes de onda que permite incrementar la capacidad de transporte de la fibra óptica hasta el orden del terabit, tomando como referencia una grilla de 25THZ de separación y una tasa de 10GB/s por cada longitud de onda. Los sistemas DWDM actuales utilizan canales normalizados separados 50GHz en los que se inyecta la información con complejos sistemas de modulación para ampliar la capacidad de transporte.

Esta tasa de transporte de información es insuficiente para la demanda actual de tráfico y el crecimiento previsto. De aquí surge el primer punto de análisis de este trabajo, que es estimar el límite práctico de información que se puede transportar por una fibra óptica para tener una referencia de la cota máxima para el diseño del enlace. En segundo término, que se puede hacer para aliviar o evitar la saturación de tráfico en enlace, y por último, cómo afecta al diseño de un enlace de alta tasa de transporte, aplicado al diseño de un enlace práctico.

2 Hipótesis y objetivos

2.1 Hipótesis planteadas

El rápido crecimiento de la demanda de tráfico de las redes de datos e internet, ha provocado la necesidad de ampliar en forma continua la capacidad de transporte de los sistemas de interconexión de los equipos que conforman las redes de datos. La demanda actual no sería posible de satisfacer con otros medios de interconexión que no sea a través de enlaces mediante fibras ópticas. La forma de transmitir información por la fibra óptica ha ido evolucionando para atender esa demanda creciente desde modulaciones básicas OOK y una sola señal o canal por fibra óptica hasta sistemas de modulación más avanzados y sistemas DWDM que permiten multiplexar varios canales en una sola fibra óptica. En este marco surge la cuestión:

- Hasta donde es posible ampliar la capacidad transporte de una sola fibra óptica, es decir existe un límite máximo práctico.
- Es factible aplicar a la tecnología DWDM esquemas de modulación usados en otros medios de transmisión.
- Que se puede implementar como alivio a la saturación de los sistemas de transporte existentes.

2.2 Objetivos

- Evaluar la capacidad de transporte de los sistemas de transmisión DWDM
- Determinar el límite de aplicabilidad de las tecnologías DWDM actuales y en desarrollo en el diseño de las redes troncales de datos
- Proponer un marco de diseño de una conexión troncal entre equipos de transporte de datos e internet a partir de la proyección de tráfico de datos actual y el proyectado
- Analizar métodos para mejorar la resiliencia de las redes
- Analizar métodos para aliviar la saturación de las redes troncales

2.3 Material y métodos

El estudio de la capacidad de transporte de la fibra óptica se analizó en base a siguientes tópicos: Los tipos de modulación de la luz inyectada en la fibra óptica, las recomendaciones que fija estándares de los organismos incumbentes (ITU-T, IEEE, etc.) y el análisis de la respuesta de la fibra óptica al paso de la señal óptica.

El diseño parte de la información de la traza existente. Se realizaron mediciones mediante OTDR (Optic Time Domain Reflectometer, Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo) para obtener el estado real de las fibras a utilizar y la degradación de la señal en cada span. Se utilizó un OTDR de la marca EXFO modelo FBT200 con Módulo MultiTest (OLTS) FTB-7300 que permite realizar mediciones con distintos

grados de resolución, mediante el ajuste del ancho del pulso desde 5ns a 2,5 μ s, con posibilidad de elegir la longitud de onda y con un alcance de 260km. En el apéndice se puede observar el reporte de la medición con su correspondiente tabla de eventos.

El estudio de los métodos para aliviar la saturación se tomó sobre dos efectos: La reducción del tráfico de contenido predecible usando sistemas de almacenamiento local (Cache) y de la ubicación de los mismos.

3 Antecedentes

3.1 Esquema de un sistema de transmisión por fibra óptica

Las etapas que componen un sistema de transmisión de información digital a través de una fibra óptica es el que se muestra en la figura 2.1 [3], que corresponde a la transmisión en uno de los sentidos. Se requiere otro esquema igual e invertido para el otro sentido, ocupando una fibra óptica en cada caso.

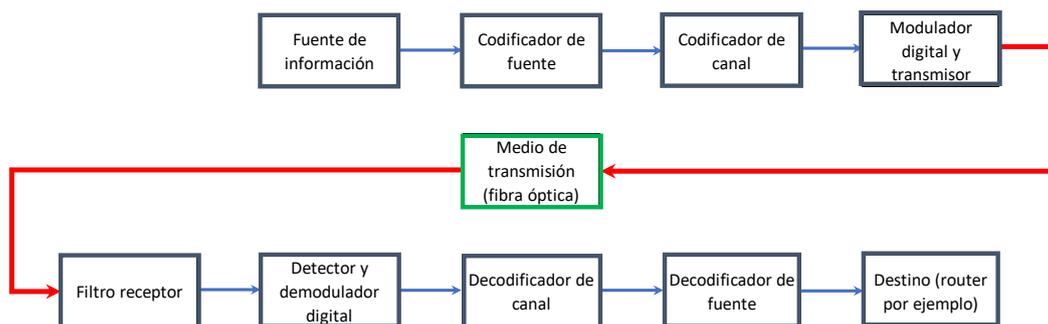


Figura 3.1. Esquema de un sistema de transmisión por fibra óptica

- La fuente de información es la encargada de proveer la información digital que se va a transmitir al destino, que para el caso en estudio puede ser un puerto del router.
- El codificador de fuente se usa para eliminar parte de la redundancia que introduce la fuente, comprimiendo el código inicial.
- El codificador de canal agrega redundancia a la información digital inicial para que en la recepción se puedan aplicar sistemas de detección y eventualmente corrección de los errores que se puedan producir en la detección producto de la distorsión de la señal durante su propagación.
- El modulador digital produce la modulación digital que se inyecta en la fibra óptica y es una etapa fundamental que define el rendimiento del enlace en cuanto a la tasa de bits y a la distancia alcanzable. La señal que se propaga por la fibra óptica proviene de una fuente monocromática de luz láser de bajo ancho espectral.
- El medio de transmisión es la fibra óptica que actúa como medio confinado para el transporte de los fotones que conforman la señal óptica inyectada. El rendimiento puede variar según el tipo de fibra óptica utilizada y el tipo de modulación.
- El filtro receptor es el encargado de atenuar el ruido generado en etapas previas y durante la propagación de la señal.
- El detector y el demodulador digital realizan la conversión óptica a eléctrica permitiendo recuperar la información de la codificación digital de la información.
- El decodificador de canal y el decodificador de fuente recupera la información codificada verifica y corrige errores en los bits recibidos (mediante técnicas FEC

- Forward Error Correction, Corrección de Error en Arribo -, por ejemplo) para entregarlos al destino.

En el tránsito de la información por las distintas etapas se puede introducir distorsiones, acumulación de ruido, restricciones físicas del medio y del método de modulación empleado que limitan la capacidad máxima de la tasa de transporte de información. A continuación, se repasan brevemente estos efectos.

3.2 Las limitaciones de la fibra óptica

Hasta el momento no se conoce un medio o soporte físico capaz de transportar información a mayor velocidad que la fibra óptica. Sin embargo, la fibra óptica está lejos de ser un medio perfecto, presenta efectos lineales y no-lineales que afectan al transporte de la información.

3.2.1 Tipos de fibras ópticas

Las fibras ópticas comerciales se clasifican en multimodo y en monomodo [4].

Las fibras multimodo sólo se ocupan para enlaces locales y bajas velocidades de transporte.

Las fibras monomodo han evolucionado con la demanda de mayores velocidades de transmisión, y a medida su uso se hacía masivo, la ITU-T fue definiendo las características físicas que describen cada tipo de fibra monomodo.

- SSMF (Standard Single Mode Fiber, Fibra Monomodo Estándar) definida en recomendación ITU G652-C [5]. Usadas en redes locales y de acceso a clientes. Atenuación de 0,2 dB/km y 17 ps/km de dispersión cromática.
- SSMF (Standard Single Mode Fiber, Fibra Monomodo Estándar) sin pico de agua definida en recomendación ITU G652-D [5]. Usadas en redes de larga distancia. Atenuación 0,2 dB/km y 3 ps/km de dispersión cromática a 1550nm. También conocida como SMF (Single Mode Fiber, Fibra Monomodo).
- DSF (Dispersion Shift Fiber, Fibra dispersión cero) definida en la recomendación ITU G653 [6]. Muy utilizada para los enlaces de larga distancia por su baja dispersión cromática y su baja atenuación de 0,25 dB/km en 1550 nm. Se dejó de utilizar debido a que la fibra NZDS tiene mejor comportamiento en los sistemas DWDM.
- NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shift Fiber, Fibra de Dispersión No Cero) definida en la recomendación ITU G655 [7]. La introducción de los sistemas DWDM, que usan múltiples canales de transmisión, producen dificultades en la recepción por el ruido debido al efecto no-lineales (ASE, four wave mixing, FWM). Los fabricantes de fibra óptica encontraron que manteniendo la dispersión en un valor bajo aproximadamente constante pero no nulo a 1550nm, se reduce el ruido por los efectos no lineales de la fibra.

Las principales penalidades que introduce la fibra en la transmisión de los impulsos ópticos son [2]:

- Lineales: atenuación, dispersión cromática (CD) y dispersión por modo de polarización (PMD)

- No lineales como emisión estimulada de Raman (SRS), emisión estimulada de Brillouin (SBS), emisión estimulada amplificada (ASE), automodulación de fase y mezclado de cuatro ondas (FWM)

3.2.2 Atenuación

La fibra óptica tiene una respuesta variable en función de la longitud de la onda de la luz que se utilice para transportar la información. Esta curva de atenuación internacionalmente se clasifica en bandas como se puede observar en la figura 2.2.

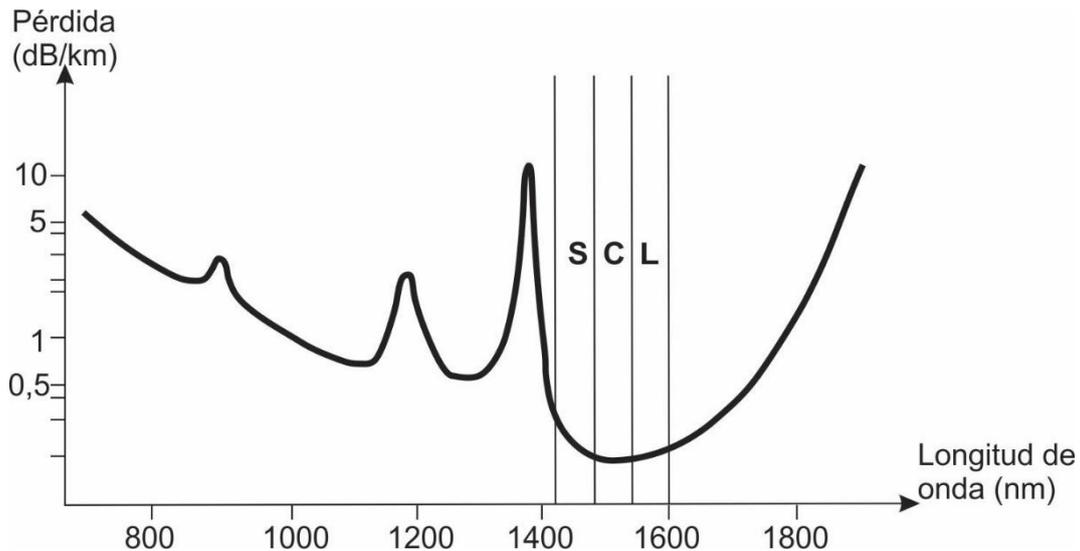


Figura 3.2. Atenuación por km en función de la longitud de onda en una fibra óptica

La línea llena indica la pérdida o atenuación que sufre la señal óptica al atravesar la fibra óptica. Esta curva tiene leves diferencias para los distintos tipos de fibra, pero en general todas comparten tres *ventanas* de menor atenuación que son las viables para la transmisión de información. La primera, alrededor de los 850nm, ya no se utiliza por su alta atenuación. La segunda denominada Banda O por la ITU-T, centrada en los 1310nm se usa para las transmisiones locales y de clientes, pero debido a su alta atenuación no es viable para largas distancias. El pico de atenuación observado alrededor de los 1400nm corresponde a la absorción producida por el ion hidroxilo, denominado por eso *pico de agua*. La tercera ventana es la única dibujada en la figura, y se compone de tres bandas, S, C y L.

La zona de menor atenuación se produce en las bandas C (1550nm) y en menor grado en las bandas S y L. La banda C es la que se utiliza para las transmisiones de los sistemas DWDM, y para poder aprovechar al máximo esta parte del espectro de la fibra óptica, se divide en canales como se describe en la sección 3.7.

3.2.3 Dispersión cromática

Los impulsos de luz de diferentes longitudes de onda viajan a diferentes velocidades en el interior de la fibra óptica, esto provoca que los pulsos de luz se vayan ensanchando a medida que se propagan por la fibra, y pueden llegar a solaparse produciendo errores de lectura en el receptor.

Por otro lado, el modo de propagación de los pulsos de luz tiene una respuesta en dispersión que puede ser positiva o negativa, como se observa en la figura 2.3. Las fibras monomodo estándares tienen una dispersión nula a 1310nm y las fibras NZDS lo tienen a 1550 mediante el agregado de cierto dopaje en la fabricación de la fibra óptica.

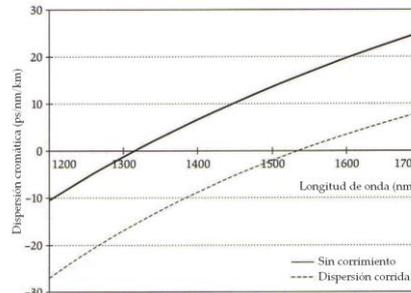


Figura 3.3. Dispersión cromática [3]

3.2.4 Dispersión por modo polarización (PMD)

La fibra óptica puede presentar cierta asimetría en la polarización del núcleo, lo que provoca que las componentes verticales viajen a una velocidad diferente a la de las componentes horizontales del campo eléctrico de los pulsos de luz. Esta diferencia se traduce en un ensanchamiento del pulso de luz que es proporcional a la longitud de la fibra, por esta razón el fabricante proporciona este parámetro en picosegundos por kilómetro (ps/km). Esta dispersión se conoce como PMD (Polarization mode dispersion, Dispersión por modo de polarización).

3.2.5 Efectos no lineales

La interacción de la luz que viaja por la fibra óptica puede provocar efectos no-lineales que tienen origen en dos fenómenos: La interacción de los fotones con alguno de los modos de vibración del material, que puede provocar dos tipos de dispersión:

- La dispersión estimulada de Raman SRS (Stimulated Raman Scattering). Tiene su origen en los que se denomina *fonones ópticos*, que son las vibraciones que se generan por la interacción entre los fotones de la luz que inciden sobre la estructura cristalina de la fibra y las vibraciones características de los átomos y moléculas de la misma. En el efecto Raman, si un fotón de la radiación incidente tiene una frecuencia ν_i tiene interacción con fonones de la estructura que tiene una frecuencia de vibración ν_m , se producen radiaciones de dos componentes espectrales, la componente resta de las frecuencias $\nu_i - \nu_m$ denominada componente Stokes, y la componente suma $\nu_i + \nu_m$ denominada componente anti-Stokes. Si alguna de estas componentes cae en la banda de algunos de los canales adyacentes, se genera un ruido de diafonía que no se puede eliminar mediante el filtrado.

- La dispersión estimulada de Brillouin SBS (Stimulated Brillouin Scattering). Se produce por la interacción de los fotones incidentes con los *fonones acústicos* que son las vibraciones de la estructura producto del campo óptico que transita la fibra óptica. Esto da lugar a una onda acústica que viaja en sentido contrario y provoca alteraciones periódicas en el índice de refracción. A partir de las variaciones del índice de refracción, se generan dos consecuencias, la primera es que pueden producirse cierta dispersión espacial en la onda óptica, y la segunda es que pueda producirse variaciones instantáneas según la propagación de la onda acústica (efecto Doppler), sin embargo, este último efecto tiene bajo impacto para la grilla de canales de la ITU-T G694.1, porque sólo afecta para separaciones de canales menores a 20GHz.

El otro fenómeno tiene su origen en el *Efecto Kerr* que es el efecto de cambio del índice de refracción debido a la intensidad óptica. Este efecto introduce cambios en la fase de los campos electromagnéticos de la radiación que viaja por la fibra. En los sistemas DWDM se suma la complicación de la transmisión simultánea de varios canales, lo que puede derivar en perturbación sobre sus fases. Del efecto Kerr se derivan efectos no-lineales producto de la interacción de la propagación de las señales y del ruido ASE:

- Automodulación de fase SPM (Self Phase Modulation) ocurre cuando las variaciones de la intensidad del impulso óptico provocan variaciones de fase del campo eléctrico de la onda que transita la fibra. Esta automodulación se presenta cuando la intensidad de la señal es suficiente para estimular el efecto Kerr.
- Modulación de fase cruzada XPM (Crossf Phase Modulation) similar a SPM, ocurre en un canal que sufre variaciones de fase debido a las variaciones de la intensidad de otros canales del DWDM. Se traduce como un ensanchamiento del espectro óptico del canal y su efecto disminuye si los canales están más separados y a medida que aumenta la velocidad en la transmisión, debido a que los pulsos son más cortos y tienen menor probabilidad de períodos de alineación de pulsos entre distintos canales.
- Mezclado de cuatro ondas o de cuatro fotones FWM (Four Wave Mixing) o FPM (Four Photon Mixing) se produce por la interacción o mezcla de tres señales distintas que generan una nueva señal de una frecuencia que será una combinación lineal de las otras tres. En general, si hay N canales, se producirán $M=0,5(N^3-N^2)$ nuevas señales que pueden coincidir con otros canales del DWDM.
- Efectos no lineales intracanal IXPM (Intrachannel Cross Phase Modulation) y IFWM (Intrachannel Four-Wave Mixing). Estos efectos son producto del ensanchamiento de los pulsos ópticos de un mismo canal, y es el efecto predominante para velocidades superiores a los 40GB/s. El IXPM se refiere a la modulación de fase que sufre un pulso como consecuencia de las variaciones de la intensidad de los pulsos adyacentes, mientras que el IFWM es un efecto que para ciertas condiciones hace que tres pulsos que interactúan entre sí, generen un cuarto pulso de amplitud aleatoria. En los sistemas de modulación de intensidad si este puso coincide con un cero puede producir un error en la recepción. En los sistemas de modulación de fase se traduce como una variación de fase o *jitter*.

3.3 Técnicas de modulación

La capacidad de conmutación de los componentes optoelectrónicos es una de las principales limitantes de las velocidades alcanzables en la fibra óptica. Las tecnologías de modulación más usadas son la de modulación directa del láser y los moduladores de Mach-Zehnder.

Mientras que el primero se usó hasta velocidades de 10GB/s, para velocidades superiores el modulador de Mach-Zehnder (MZM) [3] tiene mejor rendimiento y permite realizar modulaciones de fase independientes de la intensidad de la señal luminosa, ya que evita saltos de la intensidad luminosa de la señal en la fibra óptica que pueden estimular la radiación espontánea (debido al efecto Kerr) y en consecuencia aumentar el ruido en la propagación.

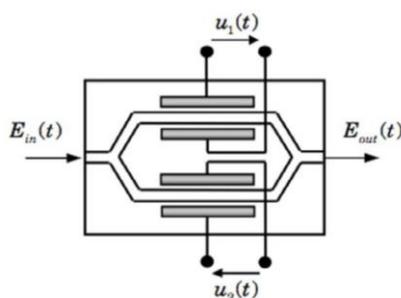


Figura 3.4. Esquema de un modulador Mach-Zehnder [3]

El modulador de Mach-Zehnder se basa en la utilización de materiales electroópticos, como el Niobato de Litio, que puede modular la intensidad y la fase de una señal óptica al aplicársele una tensión en la dirección correcta de su estructura cristalina. Un esquema de su estructura se puede observar en la siguiente figura 2.4.

A continuación, se describen brevemente los sistemas de modulación más representativos, dejando sin mencionar aquellos que no son aplicables al tema en estudio, como la modulación en frecuencia [4].

3.3.1 Modulación de intensidad

La información a ser transmitida se usa para modular la intensidad de la señal óptica. Se destacan NRZ (No Return to Zero) RZ (Return to Zero), CSRZ (Carrier Suppressed Return to Zero), DB-PSTB (Duo Binary Phase-Shaped Binary Transmission), CSRZ (Carrier Supressed Return to Zero) y ASK (Amplitude Shift Keying) [3]

- NRZ usa la modulación OOK, es la forma más simple de generar y transmitir, asigna el 1 a un pulso de luz, y el cero a la ausencia de luz. Su nombre hace referencia a que durante una secuencia seguida de bits en 1 la señal no retorna a cero, lo que dificulta la detección del sincronismo. El pulso ocupa todo el ancho del bit, y tiene una eficiencia espectral SE (Spectral Efficiency) de 1b/s/Hz. Tiene baja aplicación en altas velocidades de transmisión debido al solapamiento por el ensanchamiento debido a la CD y PMD.

- RZ es similar a NRZ excepto que retorna a cero cuando transmite un bit "1", facilitando el problema de sincronismo ante una secuencia de unos, pero no resuelve el problema de una secuencia de ceros. Tiene una eficiencia espectral $0,5b/s/Hz$ debido a que ocupa el doble de ancho de banda que NRZ.
- CSRZ Es una variante del RZ, donde para una secuencia de unos se utiliza una inversión el campo entre dos bits 1 consecutivos, generando inversiones de fase de 180° entre los mismos. En esta modulación el símbolo emitido depende tanto de la información a transmitir como del último bit transmitido, es decir es una modulación con memoria. Su diagrama espectral es similar al de RZ, pero sin la portadora central (de allí su nombre), lo que le da una mejor tolerancia a los efectos no-lineales de la fibra óptica.
- DB-PSTB es una modulación en la que PSTB es una de las formas de transmitir la información. Cuando se transmite un "1" no se altera ni la amplitud ni la fase aún con una secuencia de varios "1", pero en cada cero se realiza una inversión de fase a la mitad del intervalo. Su principal ventaja es que es más tolerante a la CD.
- ASK es una modulación en paso de banda, al contrario de las anteriores que son en banda base. En su forma más simple emite un pulso de luz para transmitir un 1 y no emite para transmitir un cero, de esa forma tiene la misma eficiencia espectral que NRZ y los mismos problemas de sincronismo. Para modulaciones multinivel (M-ASK) la eficiencia espectral aumenta en función de $SE = \log_2 M$ (B/s/Hz), pero puede favorecer la aparición de efectos no lineales que reduce la distancia eficiente del enlace.

3.3.2 Modulación de fase

La modulación de fase es la que ha tenido más desarrollo en las comunicaciones ópticas, debido a que la señal transmitida no tiene variaciones de intensidad, es decir, tiene una envolvente constante, permitiendo tener una eficiencia espectral razonable sin estimular los efectos no-lineales de las variaciones de intensidad. La señal de banda base que viene codificada en alguno de los formatos NRZ, RZ o CSRZ se utiliza para variar la fase de una señal de luz láser constante. Como sufre menos afectación por la CD y el PMD es la más utilizada en los sistemas de transmisión DWDM.

- PSK (Phase Shift Keying) y DPSK (Differential Phase Shift Keying) Asigna dos estados posibles de fase a la codificación de la información. En la modulación PSK se asigna la fase 0 para transmitir un cero, y la fase π para transmitir un uno. En la modulación DPSK se codifica con un cambio de fase cada vez que se quiere transmitir un 1. De esta forma un cero no introduce cambio de fase y un 1 produce una variación de π . Las dos modulaciones tienen la misma eficiencia espectral y la misma tolerancia frente a las características de la fibra. En la figura 2.5 se observa la distribución de la constelación de los dos de la fase.

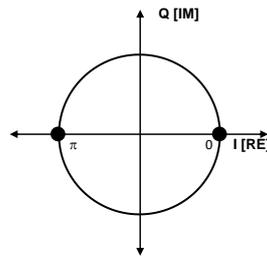


Figura 3.5. Constelación para PSK y DPSK

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) y DQPSK (Diferencial Quadrature Phase Shift Keying). Aumentando la cantidad de símbolos se puede incrementar la eficiencia espectral sin perder las ventajas que ofrece la modulación de fase en cuanto a su tolerancia sobre los efectos de la fibra óptica. La única penalidad es un leve aumento en la OSNR.

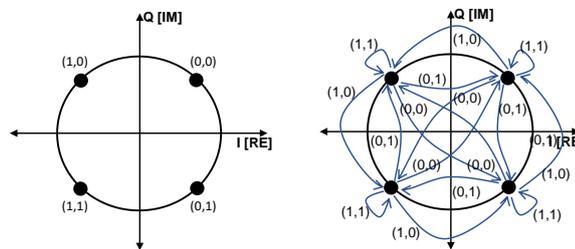


Figura 3.6. Constelación para QPSK y DQPSK

En el caso de la modulación QPSK asigna los símbolos $\{0,0; 0,1; 1,0; 1,1\}$ a las fases $\{-\pi/4; \pi/4; 3\pi/4; 5\pi/4\}$, en cambio, la modulación DQPSK asigna la información a transiciones de fase como se observa en la figura 2.6. A modo de ejemplo, para transmitir un (0,0) se realiza un cambio de fase de $+\pi/4$, en cambio para transmitir un (1,1) no se cambia la posición del símbolo actual. La principal ventaja de QPSK y DQPSK es que duplican la SE de BPSK a $2b/s/Hz$.

3.3.3 Modulación QAM

La combinación de modulación de fase y de modulación de amplitud o de intensidad, permite incrementar la eficiencia espectral y poder transmitir tasas de información mayores, pero requerirá mayores niveles de OSNR en recepción. Por ejemplo, pasar de QPSK a 16QAM (como se observa en la figura 2.7) duplica la eficiencia espectral, pero requiere un receptor capaz de discriminar múltiples niveles de intensidad, que se dificulta debido al ruido de los efectos no-lineales que se producen por las variaciones de la intensidad de la señal.

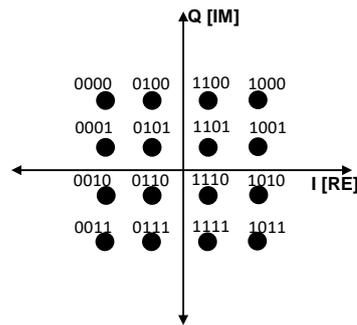


Figura 3.7. Constelación para 16QAM

Un caso de particular interés por su aplicación en comunicaciones ópticas es el de 8QPSK formado por dos niveles de amplitud de QPSK, pero desfasados entre sí.

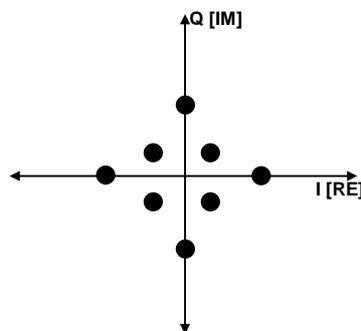


Figura 3.8. Constelación para 8QAM

La ventaja de esta constelación que se observa en la figura 2.7, es que tiene sólo dos niveles de amplitud, y al tener las fases desplazadas disminuye la penalización en la OSNR [3].

En general una modulación M-QAM proporcionará una capacidad en bits/s definida por la fórmula de Hartley [3] expresada en la ecuación (1), donde R es la tasa de bits, B es el ancho de banda del canal en Hz y M el número de símbolos de la modulación.

$$R = 2B \log_2(M) \quad (1)$$

Considerando la canalización de los sistemas de transporte DWDM actuales que usan canales de 50GHz y la capacidad de la banda C de la fibra óptica que permite hasta 88 canales (80 es la cantidad definida por la ITU-T G694.1), la ecuación (1) permite obtener la capacidad máxima teórica para cada modulación M-QAM de una fibra óptica, expresada en la tabla 3.1. para valores de M de 4 a 64 símbolos.

Aunque estos valores de la capacidad de la tabla 3.1 son teóricos y algunos imposibles de alcanzar definen un límite superior dado por la modulación. La capacidad real es mucho menor debido a la presencia de ruido y otras distorsiones de la fibra óptica como se verá en secciones posteriores.

Tabla 3.1. Capacidad máxima teórica de la modulación M-QAM (canales de 50GHz)

Cantidad de símbolos (M)	Capacidad por canal (GBits/s)	Capacidad para 80 canales (TBits/s)	Capacidad para 88 canales (TBits/s)
4	200	16	17,60
8	300	24	26,40
16	400	32	35,20
32	500	40	44,00
64	600	48	52,80

La modulación NRZ-OOK había llegado a su límite en los 40GB/s, por lo tanto, los desarrollos se orientaron a los nuevos objetivos, 100GB/s, 200GB/s y 400GB/s. Una tasa de 1000GB/s (1TB/s) en cada canal por ahora es sólo una especulación teórica.

3.3.4 Multiplexación por polarización

Si la luz proveniente de la fuente láser se polariza antes de pasar por los moduladores, proporciona la posibilidad de duplicar la información transmitida sin aumentar la complejidad del modulador. Para ello se realizan dos polarizaciones en cuadratura una respecto de la otra, como puede verse en la figura 3.9, y luego de ser moduladas por el método correspondiente se vuelven a combinar para inyectarse en la fibra óptica. Esta técnica ha tenido mucho desarrollo en los últimos años y es la base de la modulación de 100GB/s.

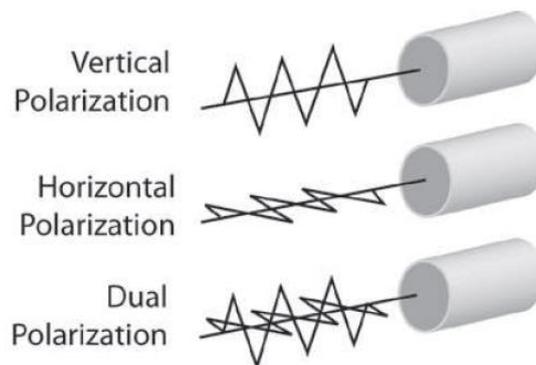


Figura 3.9. Multiplexación por polarización [3]

Su principal dificultad radica en la rotación que sufren los ejes de polarización debido a las imperfecciones de la fibra, que se puede compensar si se orienta la señal de laser local en el receptor antes de pasar a los detectores.

3.4 Transmisión

El transmisor es el encargado de construir la señal óptica que se va a inyectar en la fibra óptica al inicio del enlace. Está directamente relacionado con el tipo de modulación que se vaya a utilizar. Su estructura de bloques depende de la técnica de modificación de la fuente de luz láser en función de la modulación deseada.

Para las tasas de transmisión que se pretenden alcanzar, un problema adicional a considerar está dado por la forma en arriba el flujo de información al modulador. Por ejemplo, para transmitir a una tasa de 100GB/s la electrónica asociada al puerto del router debe ser extremadamente rápida si la información se envía en modulación OOK. Además, la electrónica del modulador debe lidiar con anchos de bits extremadamente angostos que aumentan la probabilidad de error.

Esta es una de las razones por la que la modulación de fase en combinación con la multiplexación por polarización sobresale respecto a las otras técnicas de modulación. En primer lugar, al usar dos flujos, uno por cada eje de polarización, la tasa de bits que se debe modular en cada haz polarizado es de la mitad de la tasa que se desea transmitir (50GB/s para el ejemplo analizado). En segundo lugar, para formar la modulación QPSK o DQPSK se realizan dos modulaciones BPSK por separado y luego se desfasa (se retrasa) uno de los haces en 90° antes de unirlos. Esto vuelve dividir por dos la tasa de información que debe tratar cada modulador BPSK (25GB/s para el ejemplo analizado). De esta forma la electrónica no es tan crítica y puede manejar sin dificultad una entrada de datos en OOK.

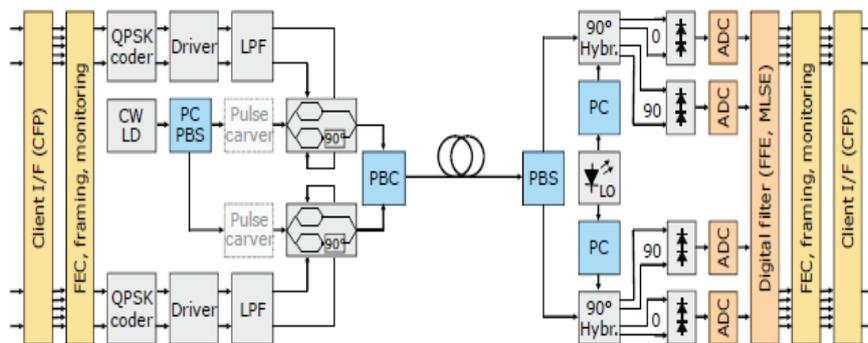


Figura 3.10. Modulador y receptor DP-QPSK [2]

Un ejemplo de un modificador y transmisor DP-QPSK se puede observar en la parte izquierda de la figura 3.10 [2], donde para lograr formar las modulaciones QPSK, la señal del láser - bloque CWLD (Continuous Wave Laser Diode, Diodo Láser de Onda Continua) - se divide en las dos polarizaciones vertical y horizontal, y luego se dirigen a moduladores que utilizan moduladores de Mach-Zehnder que es donde ingresa la información moduladora (componentes IQ que se generan a partir del flujo de información recibido en la interface del modulador). En cada modulador, la señal del láser se divide en dos, y se modula en fase BPSK, luego una de las ramas se hace pasar por un tramo que introduce un retardo de un cuarto de longitud de onda. Por último, se suman las señales moduladas de cada polarización se mezclan en el bloque PBC (Polarization Beam Combinator, Combinador de haces polarizados) para inyectar a la fibra.

El ejemplo del modulador DP-QPSK sirve como referencia de la dificultad que involucra realizar modulaciones de mayor cantidad de símbolos, sobre todo cuando la constelación incluye varios niveles de intensidad de la señal luminosa.

En la práctica, es común que la tasa de bits de la entrada de los moduladores sea levemente superior al ejemplo detallado, porque se agregan bits que luego se utilizarán en los sistemas de detección y corrección de errores. Para el ejemplo, las tasas de bit empleadas son de 112GB/s.

3.5 Recepción

Los receptores para la detección de la señal óptica recibida están contruidos en base a un fotodiodo. Se distinguen dos tipos, los receptores de detección directa y los receptores coherentes.

Los receptores de recepción directa se usaron ampliamente en los inicios de las transmisiones ópticas, y hasta velocidades de 10GB/s por su tener una configuración simple y económica, sin embargo, sólo pueden utilizarse para detectar variaciones de la intensidad o potencia de la señal óptica, por lo que no es aplicable para sistemas de modulación de fase.

Los detectores coherentes utilizan una fuente de luz láser local sintonizada a la misma longitud de onda que la señal que se quiere detectar. La señal local y la señal recibida se mezclan para obtener la señal en banda base que se aplica a un fotodiodo.

Las técnicas de recepción coherente permiten aumentar la tolerancia de la OSNR en 2dB [3], es decir, puede recuperar la información con la misma probabilidad de BER (Bit Error Rate, Tasa de error de bit) en un sistema con menor OSNR que un sistema de recepción no coherente.

En la parte de la derecha de la figura 3.10 se puede observar cómo se realiza la demodulación DP-QPSK en el receptor. En primer lugar, se divide las componentes polarizadas mediante el bloque PBS (Polarization Beam Splitter, Divisor de haces polarizados) y se dirigen al mezclador con la señal del oscilador local con la polarización correspondiente. Para lograr que el oscilador local tenga la misma orientación de la polarización que los haces incidentes, el bloque PC (Polarization Control, Control de polarización) orienta los ejes de polarización de la señal del oscilador local. A la salida del mezclador se obtienen las componentes I y Q que permiten recuperar la información recibida luego del paso por un filtro pasa bajos y los sistemas de corrección de errores en arribo (FEC). La etapa FEC permite aumentar el grado de detección logrando inclusive compensar la DC y el PMD [8].

3.6 Degradación de la señal óptica

Una vez inyectada la señal óptica va perdiendo potencia a medida que transita por la fibra óptica, por lo tanto, para evitar errores debido a la baja potencia se debe amplificar. La sensibilidad del receptor óptico se define como la mínima potencia de la señal óptica que debe recibir para una dada tasa de error BER esperada. De esta forma para enlace

de largas distancias, es necesario realizar varias amplificaciones a lo largo de todo el enlace.

Los amplificadores ópticos que se usan para amplificar la señal óptica son de tipo de fibra dopada con Erblio (EDFA) o del tipo Raman. En los dos casos estos amplificadores usan la propiedad de determinados materiales para emitir radiación en una determinada longitud de onda ante un evento que lo dispara, fenómeno que se denomina radiación estimulada. La posibilidad de emitir radiación surge de llevar a los electrones de ciertos átomos (Erblio en el caso de los EDFA) de la estructura de la fibra a un nivel de energía superior, mediante la potencia de una radiación secundaria cuya frecuencia está fuera del rango del receptor y los filtros, denominada potencia de bombeo. El paso de los fotones de la señal a amplificar dispara la radiación estimulada multiplicando en número de fotones. En el caso de los amplificadores EDFA, la radiación emitida es de la misma longitud de onda que la del fotón incidente. En el caso de los amplificadores Raman, su funcionamiento se basa en la radiación estimulada de Raman SRS, en la cual se producen dos frecuencias secundarias, una suma y otra resta. De esta forma para que sea funcional, el amplificador Raman debe contar con tantas frecuencias de bombeo como canales se quiera amplificar. La ventaja de los amplificadores Raman es que pueden obtenerse mayores niveles de amplificación que con los amplificadores EDFA.

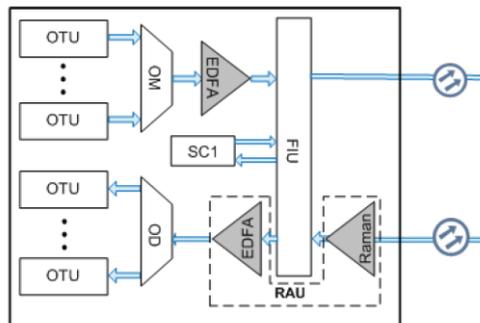


Figura 3.11. Ubicación de un amplificador Raman + EDFA [9]

Normalmente vienen integrados el amplificador Raman y a continuación un amplificador EDFA. La ganancia de estos amplificadores va desde los 30dB a 40dB. En la figura 3.11 se puede observar la ubicación de los amplificadores en un nodo terminal de línea.

Sin embargo, un efecto no deseado de la amplificación es lo que se conoce como ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission). Algunos electrones están en niveles de energía que producen radiaciones diferentes a la incidente durante la liberación de la energía de la radiación estimulada. Como existen infinitos niveles de excitación a los cuales puede pasar un electrón, al volver a su estado fundamental producirá radiaciones en un amplio espectro de frecuencias. Esta radiación espontánea será amplificada en la siguiente etapa, elevando el nivel de ruido y reduciendo la OSNR.

En la figura 3.12 se observa un ejemplo de cómo a medida que se transita por el enlace, en cada amplificación se incrementa el nivel de ruido, y se reduce progresivamente la OSNR de la señal.

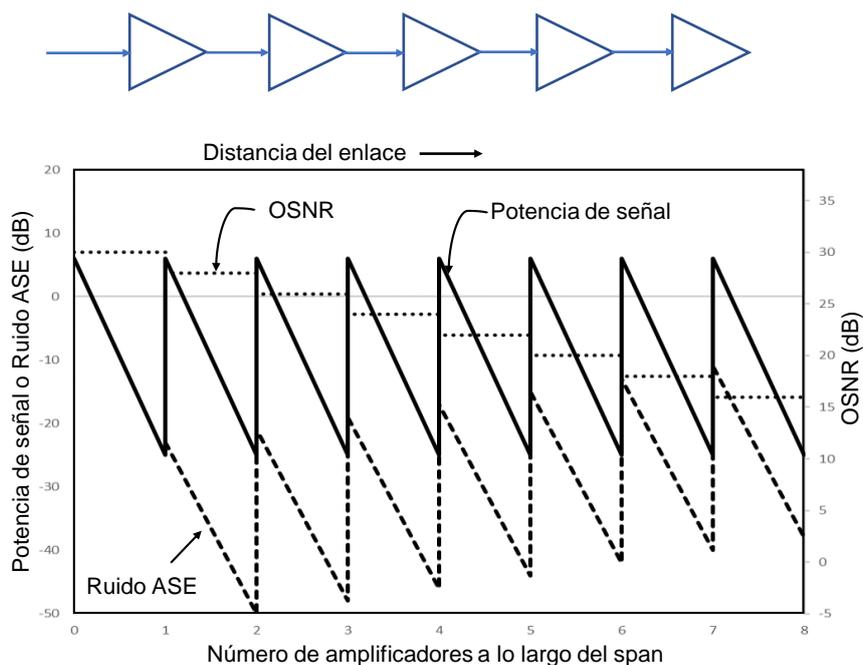


Figura 3.12. Degradación de la señal óptica debido al ruido ASE

La acumulación de ruido ASE genera otra limitación en los enlaces de muy larga distancia, como los transoceánicos, porque después de una determinada cantidad de amplificadores (la cantidad depende del tipo de modulación empleado y del tipo de fibra), la OSNR puede caer por debajo de la requerida para un enlace de estas características. La solución a este inconveniente es usar estaciones regeneradoras cada determinado número de saltos en la trayectoria del enlace.

La fórmula de Shannon para un canal con ruido gaussiano blanco (WNGC White Noise Gaussian Channel) define la máxima capacidad de un canal a partir de la OSNR mediante la fórmula $C_i = W \cdot \log_2(1 + OSNR)$, donde C_i representa la capacidad del canal en Bits/s y W el ancho de banda del canal. Tomando la canalización para los sistemas DWDM (N canales) y la multiplexación por polarización (factor 2), esta fórmula deviene en $C = 2 \cdot N \cdot W \cdot \log_2(1 + OSNR)$, que representa la máxima capacidad que puede obtenerse en un canal con ruido gaussiano. Sin embargo, considerando constante el nivel de ruido, aumentar la capacidad implica aumentar la OSNR, y como el nivel de ruido no cambia, la forma de aumentar la OSNR es aumentar el nivel de potencia o intensidad de la señal óptica.

Al considerar los efectos no-lineales de la fibra óptica, se observa que, al aumentar la intensidad de la señal inyectada a la fibra, algunos efectos se acentúan a tal punto que en vez de mejorar la OSNR la empeoran debido al aumento del ruido que se genera. Esta situación se puede observar con cierto detalle en la figura 3.13 donde que hay una potencia (que depende de cada fibra y tipo de modulación) a partir de la cual ya no es posible mejorar la OSNR con más potencia óptica.

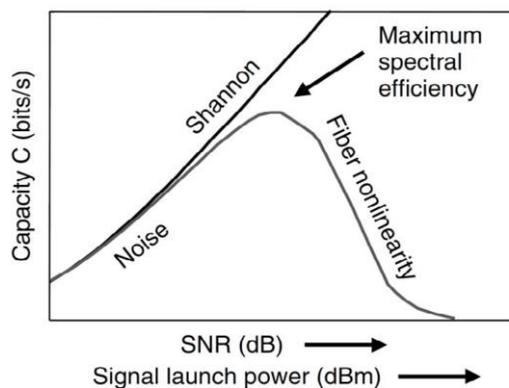


Figura 3.13. Capacidad de la fibra óptica en función la potencia inyectada [10]

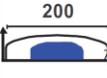
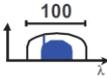
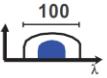
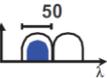
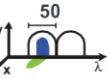
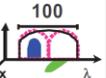
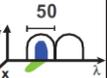
3.7 Asignación de canales y filtrado óptico

En la evolución de los primeros equipos de transmisión por fibra óptica, la forma más sencilla de aumentar la cantidad de información transportada fue la incorporación de varias señales ópticas transitando por la misma fibra. El avance en las técnicas de modulación, y la incorporación de mayor cantidad de señales llevó a la definición de canales estándares que están normalizados por la ITU-T 694.1. En esta recomendación se define la canalización a utilizar en función de la velocidad de bits que se quiera transmitir en cada canal (Ver Tabla 1 en apéndice). Esta canalización depende de la tasa de transferencia a transportar en cada canal y va desde 160 canales para una separación de 25THz y una tasa de 10GB/s o de 80 canales con 50THz de separación para tasas de transmisión mayores, ya que dependerá del tipo de modulación empleado.

La incorporación de varias señales por una misma fibra óptica impone algunos desafíos que merecen atención. En la figura 3.11 se puede observar como transita la información. La primera etapa de la formación de la señal DWDM es el *transponder*, que es básicamente un modulador como la parte izquierda de la figura 3.10, con la interface de cliente como entrada, y la salida es la señal óptica modulada en la frecuencia o longitud de onda que corresponde al canal asignado. Es decir, la longitud de onda de la señal del láser utilizado está asociada al canal asignado. Esta señal óptica se denomina en la jerga señal coloreada para indicar que transporta la información en la longitud de onda del canal asignado y no en la longitud de onda de la interface de cliente, normalmente en 1310nm. A continuación, las señales provenientes de los transponders se conectan a un sumador óptico que permite agregar los canales para poder inyectarlos en la fibra óptica del enlace.

En el equipo de recepción la señal con todos los canales se amplifica mediante el amplificador adecuado (EDFA o Raman+EDFA), y antes de pasar a las etapas de demodulación, se deben separar los diferentes canales para derivar la señal correspondiente a cada canal a su receptor. La separación de canales se realiza mediante filtros ópticos que van desde redes de difracción a los más modernos filtros basados en métodos interferométricos, como el del interferómetro de Fabry-Perot. En esta etapa también se realiza un filtrado para reducir parte del ruido acumulado en el tránsito de la señal óptica por la fibra óptica y los equipos intermedios del enlace.

Tabla 3.2. Comparativo de los sistemas de modulación [3]

Modulation format	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	PM-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	PM-QPSK
Coh. / Noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	coh.
DWDM Grid (GHz)							
Application Area	Short Reach	Short Reach	Metro	Metro	Metro	Long haul	Long Haul OIF
Product available	no	no	no	no	no	yes	yes
Power consumption and footprint	+	+	+	-	+	-	+
Critical issues	E & E/O components CD & adapt. PMD compensation	E & E/O components CD & adapt. PMD compensation	CD & adaptive PMD-comp at old fibres	CD & adaptive PMD-comp at old fibres	Opt Pol-Demux, CD & adaptive PMD-comp at old fibres	2x 50G interfaces	none ----- superior solution
Cost effective	-	-	for Metro	-	-	-	most cost-effective for long haul
Green field	-	-	-	-	-	-	yes

A modo de ejemplo, para 100GB/s la separación recomendada por la ITU-T es de 50GHz, que una separación muy estrecha cuando se trata de discriminar la señal en detrimento de las otras. Un filtrado insuficiente introduce diafonía intracanal e intercanal, y distorsión por el filtrado de la señal óptica. La elección del tipo de filtrado es fundamental para evitar efectos secundarios [3].

Tomando en cuenta los efectos descritos, la tabla 2 resume los tipos de modulaciones, ancho espectral ocupado la separación necesaria para una transmisión en 100GB/s [3]

3.8 Interfaces de clientes

La conexión entre el router y el equipo de transmisión DWDM también es parte de la problemática que interviene en el diseño de un enlace de una red troncal de datos. Las capacidades de las interfaces definidas por SDH y SONET son insuficientes para las tasas de bits actuales. La jerarquía OTN [11] (Optic Transport Network, Red óptica de transporte) definida por la ITU-T G709/Y.1331 [11] describe las características e interfaces con capacidades que van desde los 2,5GB/s para ODU-1 a los 100GB/s para ODU-4. La jerarquía OTN permite trabajar con una única interface los flujos de datos provenientes del router, los cuales utilizan el protocolo ethernet como protocolo de transporte.

Las especificaciones de las interfaces ethernet están definidas por la IEEE en sus diferentes presentaciones de 10GB/s, 40GB/s, 100GB/s y muy recientemente 400GB/s.

- En el año 2003 la IEEE 802.3ae [12] definió el estándar para las transmisiones en 10GB/s.
- En el año 2010 la IEEE 802.3ba [13] define las características de la interface 100Geth, que para la comunicación óptica está conformada por 4 longitudes de onda (en la banda de 1310nm) en las que se transmite 25GB/s en cada una utilizando OOK-NRZ.

- En el año 2017 se emitió la IEEE 802.3bs [14] que define las interfaces de 200GBeth y 400GBeth siendo hasta ahora la más alta definida por la IEEE. Para un alcance máximo de 10Km está formado por 8 longitudes de onda para la versión de 200GBeth y por 16 longitudes de onda para la interface de 400GBeth.

3.9 Diseño de un enlace DWDM

El diseño del enlace tiene directa relación con la planificación de la topología de la red de transporte de datos y con el crecimiento esperado tanto en volumen de tráfico como en nuevos vínculos que puedan ser canalizados en el tramo bajo análisis.

Las principales metas que debe cumplir el enlace son las relacionadas los niveles de potencia en recepción, OSNR, compensación de la dispersión (CD y PMD si se requiere) que aseguren la calidad del enlace (BER mínimo de diseño).

Los equipos que componen el enlace son en general costosos y existen pocas empresas que pueden proveerlos. Estas empresas en general construyen sus equipos con un diseño propietario, aunque se aseguran de cumplir las normas y recomendaciones de los organismos en cuanto las interfaces y asignación de canales, para poder tener interoperatividad entre equipos de distintos proveedores. Es necesario un cuidadoso relevamiento de las interfaces y equipos ya existentes a los que puedan conectarse los nodos que componen el enlace bajo análisis.

La oferta de distintos modelos con diferentes capacidades, permite implementar el enlace con equipos con una capacidad inicial de despliegue y realizar ampliaciones conforme el crecimiento del tráfico lo demande.

Las características de la fibra óptica a utilizar, por lo general, existente, es el punto de partida, destacando:

- El tipo de fibra, casi siempre monomodo, y si es SMF, DSF o NZDS.
- Valores reales de atenuación mediante mediciones con OTDR, y si es posible mediciones de CD y PMD.
- Se definen entonces los parámetros de diseño, (en caso de no disponer de valores reales, calcularlos en función de los datos del fabricante):
 - Atenuación óptica [dB/km]: de cada span, es decir, la atenuación entre estaciones. En caso de fibra a instalar se debe elegir la más adecuada a la distancia entre estaciones.
 - Valor de atenuación de inicio de vida (BOL) [dB]: Se refiere al valor inicial de atenuación a considerar para cada span para dimensionar los amplificadores.
 - Valor de atenuación de fin de vida (EOL) [dB]: Atenuación adicional a considerar para cada span. Este valor es para prever la atenuación adicional que se pueda presentar por envejecimiento de la fibra y por empalmes adicionales por reparaciones que pueda sufrir la fibra.
 - Pérdidas por empalmes y conexiones en distribuidores [dB]: Atenuación adicional de los conectores de los ODF.
 - Dispersión cromática (CD) [ps/nm.km]
 - Dispersión por modo polarización (PMD) [ps/sqrt(km)]

- Ubicación de las estaciones donde se instalarán los nodos con las distancias entre ellos en caso de ser necesario el cálculo de algunos de los parámetros de diseño, o se deba proyectar la instalación de un tramo de fibra óptica.

Los enlaces DWDM pueden ser del tipo punto a punto, o anillados. En el enlace punto a punto tienen una estación terminal donde comienza el enlace, estaciones intermedias con posibilidad de extracción de tráfico o simples amplificadores, y una estación de fin del enlace. Si la distancia entre los extremos es muy grande se deberá prever estaciones de regeneración en función de la acumulación de ruido ASE y la degradación de la OSNR.

Para realizar sistemas anillados, las estaciones que se intente proteger con el anillo deberán estar equipadas con nodos que puedan derivar el tráfico en las dos direcciones, y en las estaciones intermedias según la necesidad de extracción de tráfico.

Las configuraciones típicas de los nodos que componen un enlace DWDM son las siguientes:

- Equipo Terminal de Línea (LT Line Terminal): Son nodos que definen el inicio y el fin de un enlace DWDM, en el cual se inserta y extrae todo el tráfico. Son los nodos que tienen la mayor capacidad de tráfico de clientes (routers, equipos SDH, tránsitos de otros enlaces).

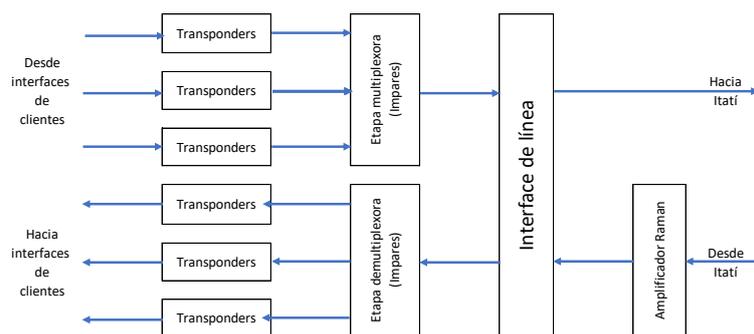


Figura 3.14. Esquema de un LT

En la figura 3.14 se puede ver el esquema básico de un terminal de línea, donde las conexiones de los clientes ingresan a las placas transponders que son los elementos encargados de realizar la conversión de frecuencia de la señal óptica recibida del cliente a la frecuencia del canal que le corresponda según la asignación que le corresponda. También realizan la modulación DP-QPSK.

- Nodos FOADM (Fixed Optical Add Dropp Multiplexer): Son nodos que permiten insertar y/o extraer canales ópticos predefinidos usando filtros pasivos sintonizados para cada longitud de onda a insertar o extraer. Tienen menor capacidad de tráfico que los nodos terminales y tiene dos vías o caminos, son más económicos por contener elementos pasivos como en la figura 3.15.

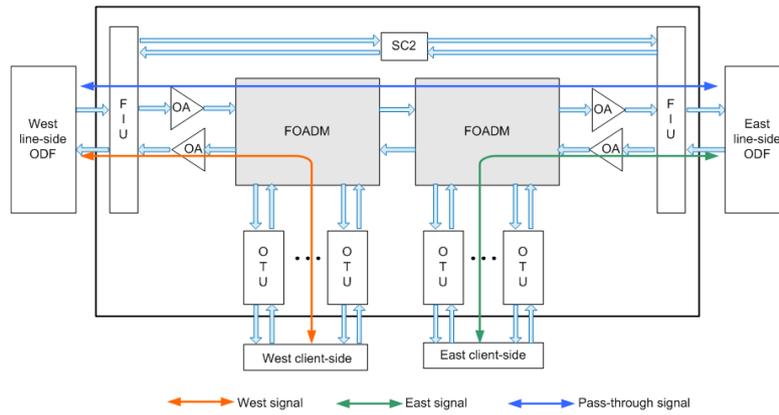


Figura 3.15. Esquema de un FOADM [9]

- Nodos ROADMs (Reconfigurable Optical Add Dropp Multiplexer): Son nodos que pueden extraer o insertar todos o parte de los canales ópticos en forma reconfigurable, es decir se puede definir desde donde y hacia donde se extrae o se inserta el canal óptico.

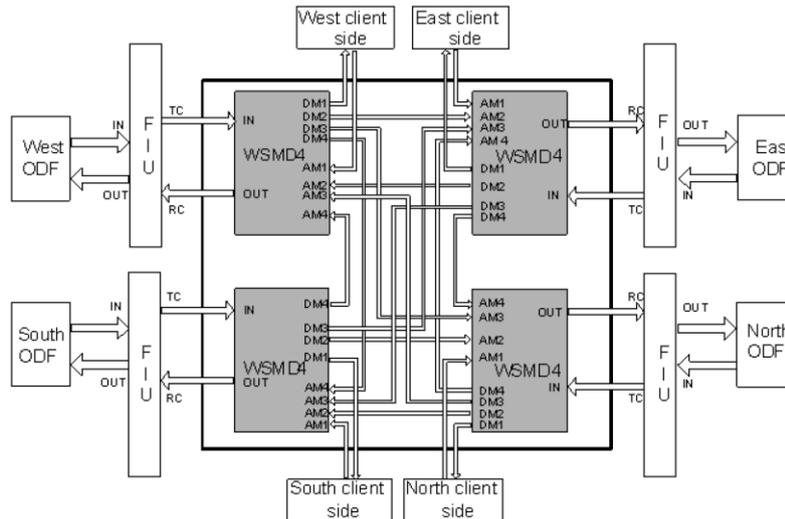


Figura 3.16. Esquema de un nodo ROADM A/D [9]

Tienen dos o más vías o caminos y su costo es más elevado debido que los elementos que lo conforman son activos. Un nodo ROADM de cuarto grado se puede ver en la figura 3.16.

- Nodos ROADM A/D (Reconfigurable Optical Add Dropp Multiplexer con Add Drop) son nodos similares a los anteriores, pero con el agregado de una matriz de conmutación y las placas necesarias para la extracción o agregado de tráfico de menor jerarquía. El ejemplo típico es el de canales de 10GB/s que se puedan encaminar por canales 100GB/s predefinidos utilizando muxponders que combinan en un mismo hardware una etapa multiplexora y un transponder.
- Nodos amplificadores ópticos (OLA Optical Line Amplifier): Se usan para amplificar la señal óptica cuando la atenuación es grande, ya sea por larga distancias o grandes pérdidas. Por lo general son amplificadores EDFA, pero para distancias mayores a 50 km se puede utilizar amplificadores RAMAN. La figura 3.17 muestra el esquema de un OLA.

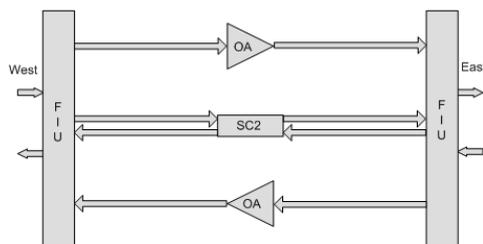


Figura 3.17. Esquema de un nodo OLA [9]

- Nodos regeneradores, que tienen como principal función recuperar la información a nivel de cliente para volver a transmitirla hacia la siguiente estación. Como esta configuración encarece mucho el enlace, se debe evitar en lo posible, o realizar en alguna de las estaciones con extracción de tráfico, en la cual parte del hardware de los nodos se puede reutilizar para la regeneración.

3.9.1 Consideraciones de diseño

A las consideraciones que dependen de la fibra óptica se le suman las siguientes que dependen de las necesidades de tráfico, la capacidad máxima del enlace y la política de ampliación de la capacidad instalada, y las interfaces de clientes que se necesite en los puntos donde se inyecta o extrae tráfico.

A partir de estos datos se define:

- Asignación de canales, donde se define cuales canales va a ser utilizados en el enlace inicial y los reservados para ampliaciones futuras. En la asignación de canales se prioriza los canales que tienen menor impacto las características de las fibras ópticas.
- Configuración del equipamiento de cada nodo, es decir si va a ser ROADM, OLA, etc.
- Previsión de fibras de compensación para DC en caso que se requiera.
- Previsión de amplificadores EDFA, o Raman + EDFA para los tramos mayores a 50km.
- Interfaces de cliente en los puntos que sean necesarios.
- Esquemas de protección si son requeridos

Sobre estos datos se realizan los cálculos de los niveles de atenuación y OSNR previendo las etapas amplificadoras necesarias para verificar si se puede cumplir con los requerimientos del diseño.

A partir de la atenuación total que presenta cada span, considerando las penalizaciones de los conectores y el envejecimiento, el amplificador debe proveer como mínimo la pérdida de potencia del span. Al considerar las cascadas de amplificadores y atenuación de cada span, la potencia de entrada del demodulador debe ser superior a la sensibilidad del receptor. Sin embargo, como los amplificadores se eligen para superar este umbral, el cálculo de la potencia de entrada al receptor no es relevante en el desempeño del enlace. Además, los amplificadores son ajustables en sus ganancias, garantizando el nivel óptimo en cada etapa. La única situación a atender sería que la atenuación del span supere la ganancia de los amplificadores Raman + EDFA, en cuyo caso habrá que prever una estación intermedia que permita agregar una etapa amplificadora.

El parámetro más relevante es la OSNR que se puede calcular a partir de la fórmula indicada en la ecuación (2), propuesta por Peter Winzer para un sistema de N vanos [3], sobre la suposición que toda la afectación de la OSNR se debe al ruido ASE de los amplificadores.

$$OSNR_{enlace} (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{1000}{hcB_{ref}} \cdot \lambda \right) + P_{inyec} (dB) - F_n (dB) - At_{span} (dB) - 10 \log_{10} (N) \quad (2)$$

Donde h es la constante de Plank, c es la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda de la señal óptica (normalmente 1550nm), y B_{ref} es el ancho de banda de referencia. El primer término vale aproximadamente 58 cuando se reemplazan los valores correspondientes.

P_{inyec} es la potencia inyectada en el primer tramo de fibra, F_n es la figura de ruido de los amplificadores, y At_{span} es la atenuación de un span.

El valor obtenido debe superar el mínimo requerido para la modulación empleada, más un margen de seguridad que por lo general se toma igual o superior a 3dB.

3.10 Resiliencia

La resiliencia es un término de origen médico que se usa en el ámbito de las redes de comunicaciones para hacer referencia a la capacidad que tiene un sistema de comunicaciones, ante un evento que lo altera (caída de un servidor, router, o corte de una fibra óptica), para redirigir el tráfico o reorganizar su estructura para intentar mantener las condiciones de funcionamiento lo más parecidas a las previas al evento.

En redes malladas de muchos nodos, el análisis de la resiliencia es complejo por las numerosas variables que intervienen. Pero en el enfoque del tema de este trabajo, interesa la resiliencia de la conexión entre dos routers de la capa de núcleo de la red de transporte de datos.

Además de la capacidad de transporte, una de las metas principales de un enlace de una red de datos es la disponibilidad, métrica que se calcula para un período de tiempo dado (un mes, un año, etc.) como la relación de entre el tiempo que puede transportar tráfico y el tiempo total del período. De acuerdo con la figura 1.3 cada vínculo ocupa un par de fibras ópticas, y la principal afectación de la disponibilidad es cuando hay un corte en el cable de fibra óptica. La reparación de un cable de fibra óptica depende del lugar donde ocurrió el evento, pero puede demorar desde un par de horas, hasta días o semanas para los casos más difíciles. Es necesario prever otros métodos para asegurar la disponibilidad mientras se repara el cable de la fibra óptica, sobre todo por la importancia jerárquica del vínculo.

Una forma de mantener la disponibilidad ante un corte del vínculo de transmisión, prever caminos alternativos, por ejemplo, mediante una configuración en anillo, donde algunos equipos que conforman el anillo deberán tener la inteligencia y el equipamiento para

redirigir el tráfico. Esto requiere que al diseñar un enlace también deba preverse el tráfico protegido, además del tráfico principal que va a transitar por el vínculo.

De esta forma, la disponibilidad tendrá un mínimo impacto, ya que la conmutación será del orden del segundo y no de horas o días como es el caso de la reparación de la fibra óptica.

Otras metas que se pueden considerar para evaluar al enlace son: la *latencia* que representa el tiempo de tránsito de la información por el enlace, el tiempo de recuperación, y la congestión que puede ser evaluada en función de los paquetes descartados y los pedidos de reenvío, o mediante el tráfico que transita en cada instante.

Para evaluar la latencia, se puede obtener una aproximación inicial del tiempo de tránsito considerando la velocidad de propagación de la señal dentro de la fibra óptica, y el tiempo de tránsito en los equipos intermedios del enlace.

El tiempo de recuperación está asociado con las secuencias de maniobras (sean automáticas o manuales) que permitirán redirigir el tráfico ante una falla en el vínculo. Normalmente la primera acción la realiza el router dependiendo del algoritmo de ruteo, luego se realizan las acciones de conmutación del flujo físico dependiendo de la disponibilidad de caminos alternativos y de las facilidades técnicas de los equipos de transmisión DWDM.

4 Resultados Obtenidos

4.1 La capacidad de transporte

Los desafíos que imponen la modulación de una señal óptica están estrechamente asociados a las limitaciones físicas que tiene el medio de transmisión: la fibra óptica. También interviene las tecnologías que permiten manipular un haz de luz para obtener sistemas complejos de modulación impensables años atrás.

La posibilidad de incrementar la capacidad de transporte de información por cada fibra óptica está asociado al rendimiento de los tipos de modulación que se pueden implementar. La adopción de un sistema en detrimento de los otros es como consecuencia del mejor desempeño en tres aspectos:

- El mejor aprovechamiento del espectro óptico que implica no sólo incrementar la eficiencia espectral, sino también la relación entre la cantidad de canales y el ancho que ocupa en el espectro.
- La eficiencia en la propagación por el medio óptico y sus limitaciones en función de la velocidad de transmisión.
- Evitar o disminuir el impacto de la distorsión no lineal de los amplificadores, donde las modulaciones de amplitud constante tienen una ventaja inherente frente a otros esquemas de modulación.

A partir de la fórmula de Shannon vista en la sección 3.6, se desprende que la OSNR es la principal limitante para el aumento de la capacidad de transporte, pero el término que $\log_2(1+OSNR)$ ya impone una limitación matemática, por más alta que sea la OSNR, el incremento en la capacidad del transporte será limitado por logaritmo, y lo que implica muy grandes incrementos en el término entre paréntesis para obtener incrementos útiles en el logaritmo. Por otro lado, para mejorar la eficiencia espectral y transportar la mayor cantidad de información se necesita usar métodos de modulación que utilicen la mayor cantidad de símbolos por baudio.

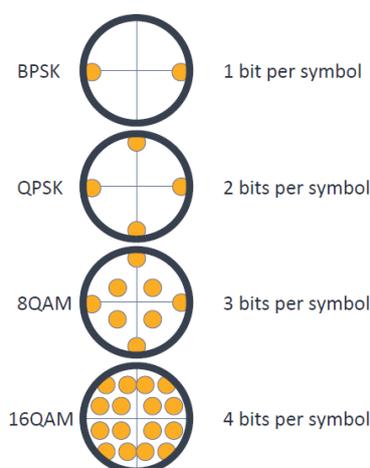


Figura 4.1. Efecto de la limitación por potencia inyectada [9]

Aumentar el número de símbolos sin empeorar el BER requiere que las amplitudes aumenten proporcionalmente a la OSNR, y es en esta parte donde la acumulación de ruido ASE (figura 3.12) define para un tipo dado de fibra la potencia óptica máxima que se puede inyectar antes que el efecto acumulativo del ruido ASE resulte en una peor OSNR, como se puede observar en la figura 4.1 donde la circunferencia en trazo grueso representa la máxima potencia óptica a inyectar en la fibra antes de que se presenten los efectos no deseados de la degradación de la OSNR por el ruido ASE (figura 3.13). Al aumentar el número de símbolos sin poder aumentar la intensidad de la potencia óptica, la OSNR tiende a disminuir debido a que disminuye la distancia entre símbolos y por lo tanto se pierde la ventaja de aumentar la cantidad de símbolos de la modulación. Este efecto, sin embargo, no es tan crítico en enlaces de corto alcance (típicamente menos de 50km) donde hay pocas etapas amplificadoras y permite para estos casos utilizar modulaciones con alta cantidad de símbolos y de esa forma obtener una capacidad elevada de transporte. Esta solución de enlaces cortos implicaría realizar regeneraciones cada pocos kilómetros, pero sería inviable desde el punto de vista de la penalidad en la latencia como se verá en la sección 4.3.

A partir de esta limitante, es que la modulación de fase (PSK) permite aumentar la eficiencia espectral sin aumentar la potencia óptica inyectada a la fibra, mediante el uso de moduladores de Mach-Zender se puede aumentar la modulación a QPSK sin modificar la intensidad de la fuente láser, o a 8QAM (como el tercer caso de la figura 4.1) que usa sólo dos niveles de intensidad y está formado por dos modulaciones QPSK desfasadas en $\pi/4$.

Aumentar la tasa de bits sin modificar la modulación puede lograrse aumentando la tasa de baudios, que tiene como principal limitante la velocidad de respuesta de los circuitos electrónicos que conforman el modulador en la etapa de transmisión, y los circuitos electrónicos de lado receptor, en los sistemas de detección coherente, los circuitos de procesamiento de señal y sistemas de corrección de errores en arribo (FEC). De esta forma para evitar tener que usar altas tasas de baudios los moduladores utilizan dos flujos de bits separados que se multiplexan usando una doble polarización (sección 3.3.4) y cada polarización mediante la modulación de dos etapas en paralelo, permitiendo de esta forma reducir a $\frac{1}{4}$ la tasa de baudio necesaria para lograr la tasa de bits global deseada.

Esta combinación de modulaciones con la multiplexación en polarización, dieron lugar a la modulación DP-QPSK adoptada por la mayoría de los fabricantes de equipos como método estándar (la ITU-T 698.2 [15]) debido a las ventajas sobre otros métodos de modulación [3], porque permite duplicar la eficiencia espectral respecto a OOK-NRZ acotando el efecto de las distorsiones no lineales que impactan en medias y largas distancias.

Para mejorar la detección en la recepción, el uso de receptores coherentes permite obtener detecciones confiables con una OSNR menor, lo que permite usar spans más largos entre OADM o entre repetidores. La detección coherente se complementa con algoritmos cada vez más eficientes de corrección de errores en arribo (FEC), lo que permite una ganancia adicional de entre 2dB y 3dB adicionales. El uso de sistema de FEC, sin embargo, dificulta la medición de la calidad global del enlace. La baja en la OSNR que repercute en ausencia de FEC, en el aumento del BER, típicamente el aumento de 10^{-11} a 10^{-10} , con FEC el BER permanece constante en tanto el algoritmo es capaz de corregir, hasta que, superado el umbral, el salto en el BER hace que el la

degradación resulte inadmisibles, similar a un corte del enlace y por lo tanto sólo es medible el momento del salto en la degradación.

Esta estructuración de la modulación, detección y corrección de errores corresponde a lo que sucede con una señal láser modulada. Los equipos de transporte DWDM transmiten la información en un conjunto de canales en el subdivide la banda C. Dado que la banda C tiene un ancho acotado que actualmente se explota desde los 1520nm hasta los 1560nm, la cantidad de canales que se pueden implementar dentro de espacio del espectro tan estrecho, tiene dos principales limitantes. La primera es el ancho mínimo necesario de cada canal para poder transportar la información modulada, y un espacio de separación entre canales para evitar el solapamiento, es por esto que la grilla de la ITU-T-694.1, toma canales separados 50GHz (0,39nm aproximadamente). La segunda limitante está dada por la eficiencia del filtrado óptico en recepción que permita separar los canales con la mínima afectación de la señal recibida. Los filtros actuales basados en redes de difracción no son tan eficientes para señales muy próximas, por lo que los desarrollos actuales trabajan sobre filtros interferométricos.

Para evitar la interferencia entre canales adyacentes, en los primeros equipos que se usó esta modulación se reservaba un canal de guarda de la grilla de la ITU-T-694.1, lo que permite transportar por una sola fibra óptica hasta 4,0TB/s considerando los 80 canales previstos por la ITU-T, pero algunos fabricantes extienden 8 canales más en la banda C logrando de esa forma hasta 4,4TB/s. Las mejoras en la detección en arribo (FEC) [5] permitieron eliminar el canal de guarda y aprovechar todos los canales de la grilla, para alcanzar los 8,8TB/s que es el máximo que se puede obtener para esta modulación.

Aumentar la capacidad de transporte requiere el uso de amplitudes multiniveles que son muy difíciles de detectar en enlaces de larga distancia debido a la acumulación de ruido en los amplificadores lo que reduce la OSNR. Recientemente, algunos fabricantes como HUAWEI [9], reportan la disponibilidad de moduladores DP-16QPSK compatible con la grilla de la ITU-T 694.1 permitiendo lograr velocidades de 200GB/s en cada canal y llevar el máximo de información a transportar por una fibra óptica a 17,6TB/s. Estos resultados se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Capacidades máximas para las modulaciones DP-QPSK y DP-16QPSK

Modulación	Capacidad por canal (Gbits/s)	Capacidad para 80 canales (Tbits/s)	Capacidad para 88 canales (Tbits/s)
DP-QPSK	100	8	8,80
DP-16QPSK	200	16	17,60

El continuo desarrollo de mejoras en estas técnicas de transporte de información permitirá superar estos valores en poco tiempo, sin embargo, el margen de crecimiento es escaso. Las variables físicas *tiempo*, *frecuencia*, *cuadratura (m-QAM)* y *polarización*, que se pueden manipular o multiplexar para incrementar la tasa de información inyectada en cada fibra óptica está llegado a su límite.

En el dominio del tiempo inyectar mayor cantidad de información implica aumentar la tasa en baudios, y si bien hay desarrollos que permiten velocidades de hasta 52GBaudios/s, hasta ahora no hay productos comerciales con estas tasas de baudios, limitada por la tecnología de los circuitos electrónicos.

En el dominio de la frecuencia, la limitante está dada por el espectro de la banda C y la máxima cantidad de canales que se pueden acomodar en la banda C. Huawei [9] tiene desarrollados equipos que pueden operar en una grilla de 37.5GHz y de esa forma incrementar el número de canales en un 25%, aunque no respeta la grilla de canales de la norma de la ITU-T.

La otra opción en desarrollo, es la utilización de la banda L adyacente a la banda C. Esta opción permitiría casi duplicar la capacidad de transporte cada fibra óptica, sin embargo, la mayor atenuación que presenta implica desarrollar nuevos amplificadores y filtro que operen con eficacia similar a los que ya operan en la banda C.

El incremento de la tasa de información mediante modulaciones de mayor cantidad de símbolos queda limitado por lo comentado en la primera parte de este capítulo, además la eficiencia espectral se ha explotado casi al límite [26] y las investigaciones actuales han demostrado eficacia sólo en tramos cortos o con una sola longitud de onda presente en la fibra.

Otros métodos de modulación de alta eficiencia espectral como OFDM, no resultan aplicables a estas tasas de baudios debido a la gran cantidad de cálculos que requiere la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT Inverse Fast Fourier Transform) con la que se calculan los coeficientes de la modulación, y el cálculo inverso en la recepción para recuperar la información mediante la transformada rápida de Fourier (FFT Fast Fourier Transform), imposibles para los procesadores actuales para el cálculo entre un baudio y el siguiente.

Prácticamente agotadas las dimensiones en las que una señal puede modularse o multiplexarse en tiempo, frecuencia, cuadratura (QAM), polarización y espacio. Las cuatro primeras ya se han explotado casi a su límite para expandir la capacidad de la fibra óptica, quedando como única opción para ampliar la capacidad, la multiplexación en el espacio. Esto significa, básicamente, paralelismo, es decir, dividir la información a transmitir en varios caminos ópticos. Hay dos formas de incrementar los caminos ópticos, una es la evidente, es utilizar más fibras para un mismo equipo de transmisión. La otra es la utilización de fibras multinúcleo, que requerirá una completa reinstalación de todos los elementos de conexión además de los nuevos cables de fibra óptica.

Desde el punto de vista del costo de la inversión, la instalación del cable de fibra óptica es normalmente la parte más cara de la inversión del enlace, el costo del cable de fibra representa sólo una pequeña parte de la inversión total. Desde este punto de vista, conviene instalar cables con la mayor cantidad de fibras razonablemente posible, aunque esta situación sólo es aplicable al diseño de tendidos de fibras nuevas.

4.2 Aplicabilidad de los sistemas DWDM

La OSNR es la restricción más relevante en un enlace DWDM. De los diversos factores que la afectan, la acumulación de ruido ASE de los amplificadores intermedios es el factor predominante para largas distancias como se explicó en la sección 1.8.

La capacidad práctica de la fibra óptica está cerca del límite teórico asociado a los tipos de modulación. Existen factores que impiden que se pueda aumentar la velocidad de transporte de bits para una modulación dada:

- La necesidad de reservar parte del ancho del espectro asignado a cada canal para evitar la interferencia entre canales

- La máxima amplitud de la señal que impide mejorar la OSNR.
- La acumulación de ruido ASE
- La adición de bits redundantes para el procesamiento de errores, bits de formación de tramas, y bits pilotos que reducen la carga útil de la modulación
- La tecnología de los procesadores de señal (DSP Digital Signal Processor) que limita la velocidad del procesamiento de los sistemas de corrección de errores (FEC) y del pre-procesamiento de la información en la etapa de modulación para los sistemas de alta cantidad de símbolos.
- La tecnología de los filtros de separación de los canales en el receptor.

Debido a la menor degradación que tiene la señal óptica en enlaces de corto alcance, algunos fabricantes como Huawei, ofrecen soluciones basadas en sistemas de modulación de alta cantidad de símbolos y una asignación de canales *flexible*, donde tanto el ancho de cada canal como la cantidad de canales se asigna según el tipo de modulación empleado. A esto se suma los avances en la detección y corrección de errores mediante la técnica denominada software defined FEC (SD-FEC, corrección de error en arribo definido por software) que permite mejorar las prestaciones respecto FEC tradicional [5].

De esta forma, a la fecha de este trabajo, las capacidades máximas y las distancias alcanzables con las tecnologías comerciales disponibles se resumen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Distancias máximas para cada modulación [9]

Modulación	Bitrate (GB/s)	Ancho canal (GHz)	Cantidad de canales	Capacidad máxima del sistema (TB/s)	Maxima distancia enlace (km)
DP-64QAM	400	75	50	20	300
DP-16QAM	200	37,5	100	20	600
DP-16QAM	200	80	50	16	1200
DP-QPSK	200	75	53	10,6	2500
DP-QPSK	100	50	80	8	4000

Si se compara el avance histórico de las capacidades de cada canal en relación al tiempo de desarrollo que tuvo, se observa que mientras las velocidades de 100GB/s se estandarizaron alrededor de 2010, recién en 2017 se estandarizó la interface 400GBeth. El avance en la capacidad de la fibra óptica es mucho más lento que el avance de la demanda de tráfico, ya que como se señaló en el capítulo 1, sólo en un semestre de 2017 la demanda creció más del 70%. La proyección de este avance del tráfico hará que, en poco tiempo, la demanda de tráfico logre saturar la capacidad de transporte de la fibra óptica y los métodos para aliviar la saturación sólo podrán demorar o amortiguar esa saturación, ya que la capacidad de transporte de la fibra óptica creció (hasta ahora) en forma relativamente lineal en los últimos 20 años, pero la demanda de tráfico crece en forma exponencial.

En base a esta situación, la proyección del crecimiento de la tasa de transporte de una fibra óptica no podrá acompañar al crecimiento del tráfico. De acuerdo al informe de CABASE el crecimiento casi exponencial del tráfico agotará la capacidad de transporte de los actuales equipos DWDM en un lapso que dependerá de la carga actual de tráfico y de la posición del enlace en la topología de la red Internet.

Haciendo una proyección simple a partir de la información proporcionada por CABASE, podríamos especular cómo será el tráfico en los próximos años, como se observa en la figura 4.2, donde las dos líneas de proyección horizontal representan las capacidades

máximas actuales para equipos de larga distancia, y la línea exponencial representa la proyección del crecimiento del tráfico suponiendo que se mantiene la tendencia de crecimiento actual. A partir de este gráfico un vínculo que actualmente tenga una carga de 1TB/s tardará 21 meses (poco menos de dos años) en saturar la capacidad de la fibra para equipos de 8,8 TB/s, y 30 meses (dos años y medio) para saturar a equipos con capacidad de 17,6 TB/s.

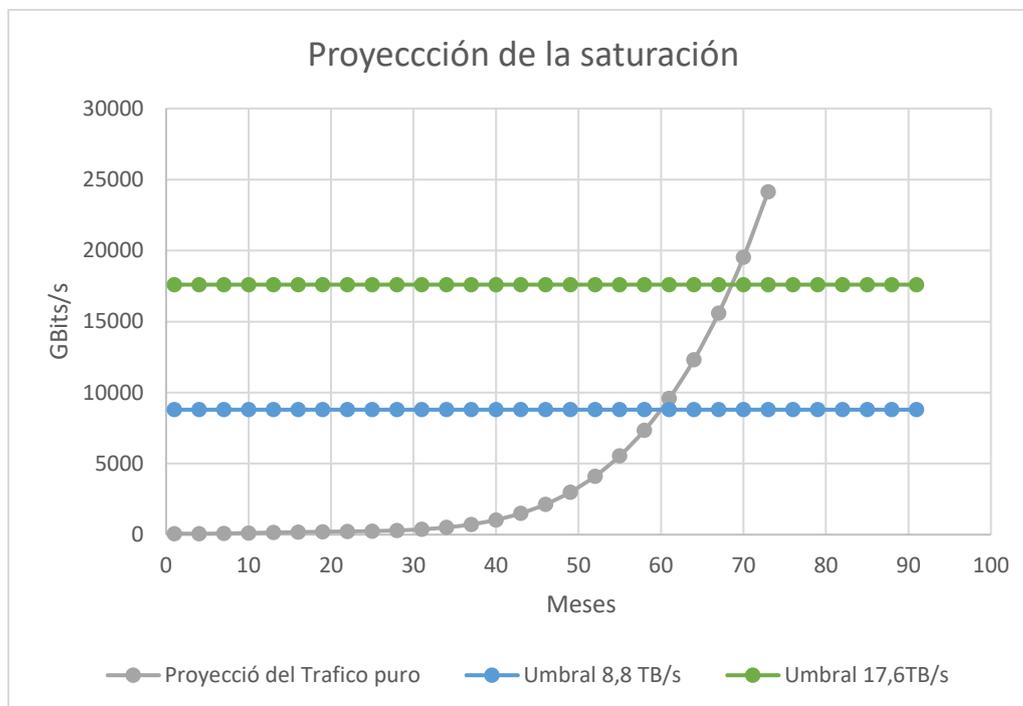


Figura 4.2. Proyección de la saturación para una fibra óptica

Esta proyección no tiene en cuenta el leve crecimiento de la capacidad de transporte de los equipos, ni las soluciones para aliviar la saturación que se tratará en la sección 4.3. Además, no hay ninguna garantía que el tráfico mantenga su comportamiento, ya que hay un efecto de saturación de las causas que provocan los cambios disruptivos en el comportamiento del tráfico (por ejemplo, el cambio disruptivo que representó las redes de pares P2P como Napster, Ares, Torrent, etc., que hoy no tienen peso en el tráfico total), pero por otro lado puede darse que algunos de los sistemas en despliegue (como la red móvil de quinta generación o 5G) acelere la tendencia y acorten los plazos.

A esto hay que sumarle el problema que significa para los operadores el continuo despliegue de equipos de transmisión de mayores capacidades y la instalación de nuevos tramos de fibra óptica ya sea en ampliación o reemplazo de las saturadas, o para el despliegue de nuevos enlaces. La secuencia del análisis, la decisión de inversión, la compra de los equipos, la instalación, la configuración, las pruebas funcionales y la habilitación para la explotación genera una demora de tiempo en la que la demanda de tráfico está muy por encima de la capacidad de transporte de la red.

Las necesidades de los equipos de clientes de interfaces de cada vez mayores tasas de transferencias llevaron a los fabricantes a evaluar el transporte en 400GB/s. La alta OSNR [3] necesaria para la modulación en un canal hace inviable el transporte en medias y largas distancias, pero para un solo span puede ser técnicamente viable, pero a un alto costo de complejidad en los transponders, ya que se debe construir

moduladores de Mach-Zehnder que deben reproducir amplitudes multiniveles a partir de señales de modulación con una alta velocidad de arribo.

Una alternativa para poder transportar un único flujo de 400GB/s sin usar modulaciones de alta cantidad de símbolos y a la vez poder usarlos en medias y largas distancias es la utilización de los denominados *supercanales*.

Los supercanales son arreglos que usan varias portadoras de 100GB/s o 200GB/s para formar grupos que se tratan como una sola señal modulada al momento de transmitir por la fibra óptica. Este arreglo, sin embargo, trae como consecuencia salirse de la grilla de la ITU-T 694.1 y reducir la capacidad de la fibra óptica, lo que implica que sean soluciones propietarias de cada fabricante, con la consiguiente pérdida de la interoperatividad. Por ejemplo, los transponders comerciales disponibles para 400GB/s se basan en 2 portadoras de 200GB/s con modulación DP-8QAM o de 4 portadoras de 100GB/s con modulación DP-QPSK.

4.3 Métodos para aliviar la saturación y resiliencia

4.3.1 Utilización de nodos caché

En los sistemas de distribución de contenidos (CDN Content Delivery Network) se utilizan servidores de almacenamiento denominados nodos cache en varios puntos de la red de distribución, que conservan una copia de los contenidos que forman parte de su oferta. Las solicitudes de contenidos por parte de los usuarios se resuelven en el servidor más cercano al usuario desde el contenido almacenado, reduciendo la ocupación del vínculo principal y aumentando la velocidad de respuesta al requerimiento del contenido.

En el análisis del tráfico se vio que cerca del 80% del tráfico corresponde a contenidos audiovisuales, con predominio de Netflix, Youtube (Google) y Facebook, que representan casi el 75% de este tráfico. La mayoría de estos contenidos no son *live* (en directo), lo que permite la utilización de nodos cache.

Esta solución reduce el tráfico en el vínculo principal entre un 80% y un 90% dependiendo de los contenidos y la granularidad (tamaño de los archivos). Pero los proveedores de contenidos (por ejemplo, Netflix) bloquean el acceso a sus contenidos en cuanto detectan que están siendo almacenados. Además, queda el problema del re-entramiento hacia los nodos de almacenamiento en vez de enrutar hacia los servidores los proveedores de contenido.

La solución a esta dificultad es la realización de acuerdos entre los proveedores de contenidos y las empresas de los ISP. Mediante este acuerdo, la empresa del ISP proporciona a la empresa proveedora de contenidos un espacio físico en sus edificios y el vínculo hacia sus redes, logrando un beneficio mutuo.

Para la empresa proveedora de contenido disminuye la latencia al usuario y se evita los reclamos por congestión, mala calidad de video (por ejemplo) y caída de servicio ante una falla en el vínculo troncal. Además, conserva la gestión de sus contenidos, evitando el fraude o la copia ilegal de los mismos.

Para la empresa del ISP reduce el costo de sus redes al evitar sobredimensionar los vínculos de sus redes, que representaría un gasto varias veces mayor que el costo del espacio cedido. La reducción de demanda de tráfico que pueda lograr la empresa del

ISP dependerá de los acuerdos que pueda realizar con las empresas proveedoras de contenidos.

La reducción en el tráfico de los vínculos principales también prolonga el período en que se producirá la saturación de la capacidad de la fibra. Tomando la referencia de un promedio del 70% en la reducción del tráfico (parte del tráfico de los caché hacia los vínculos principales se mantiene para actualización de contenidos), y volviendo a proyectar los datos de tráfico, resulta el gráfico de la figura 4.3, donde se observa que para el mismo ejemplo planteado anteriormente de un vínculo de 1TB/s que ya tenga nodos caché, el período de saturación para el primer umbral es de 36 meses (3 años) y 48 meses (cuatro años) para el segundo umbral. Si el vínculo no tenía previamente nodos caché, la saturación se prolonga 10 meses más a 46 meses para el umbral de 8,8Tb/s y 58 meses para el de 17,6Tbe.

Asumiendo que el vínculo principal se sature y se haya implementado la ampliación del vínculo incorporando un segundo enlace DWDM, la saturación de este segundo enlace se producirá en menor tiempo que el primero debido a la naturaleza exponencial del tráfico. El segundo enlace se saturará en aproximadamente nueve meses sin nodos caché (para un segundo enlace de 17,6Tb/s) y en doce meses con nodos chache.

Estas proyecciones tienen cierto grado de error por cuanto no se puede extrapolar con exactitud el comportamiento del tráfico futuro, sobre todo en lo que se refiere al tráfico provocado por el comportamiento de las personas, como en el caso de Facebook, que pasó en poco tiempo a tener cientos de millones de usuarios, y tuvo en freno estrepitoso a raíz de los escándalos por la fuga de información. Aun así, Facebook es uno de los mayores consumidores de tráfico en la red. Otro ejemplo de lo impredecible del tráfico es la irrupción de redes sociales de contenidos que se imponen rápidamente entre los usuarios como el caso de Tik Tok.

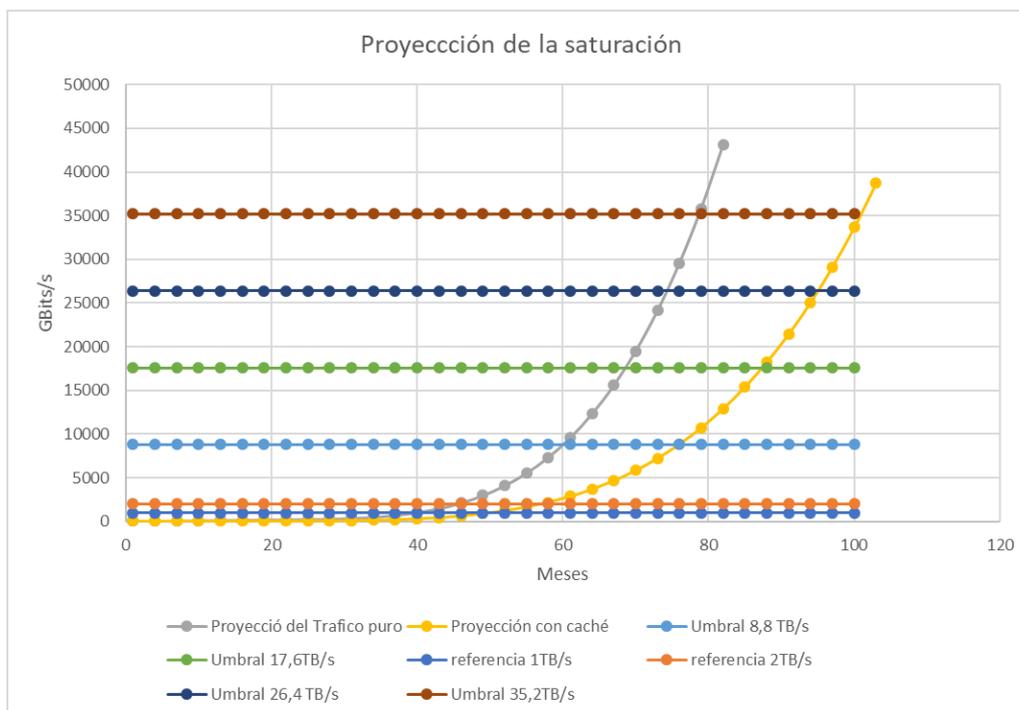


Figura 4.3. Proyección de la saturación para una fibra óptica

Esta proyección no puede tomarse en forma absoluta porque está modelada para una curva de evolución de tráfico determinada, pero indica la reducción en los tiempos de saturación de los enlaces futuros y la fuerte dependencia de los nodos de almacenamiento de contenido. Además, evidencia la necesidad de anticiparse a la saturación por el tiempo que se requiere para implementar el nuevo enlace de ampliación.

La ubicación del nodo caché también influye en el alivio de la saturación, como se puede apreciar en los siguientes escenarios, tomando como referencia a dos routers de núcleo ubicados en la ciudad de Corrientes y el otro en la ciudad de Posadas. En la figura 4.4 se plantea el escenario 1 de la instalación de un nodo caché (de Netflix, por ejemplo)

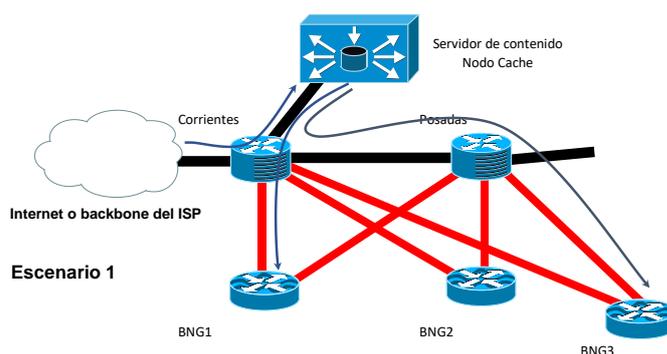


Figura 4.4. Escenario 1 para ubicación del nodo caché

La reducción del tráfico entre el router de núcleo en Corrientes y la nube es inmediata, quedando un remanente para la actualización y almacenamiento de nuevos contenidos. El vínculo entre Corrientes y Posadas no tiene ninguna mejora, ya que provenga de la nube o del nodo caché en Corrientes, el tráfico es el mismo.

En la figura 4.5 se propone el segundo escenario, en el que el nodo caché se instala en Posadas en vez de en Corrientes. La reducción de tráfico ahora afecta al vínculo hasta Posadas con el consiguiente ahorro en la inversión o en la ampliación del vínculo.

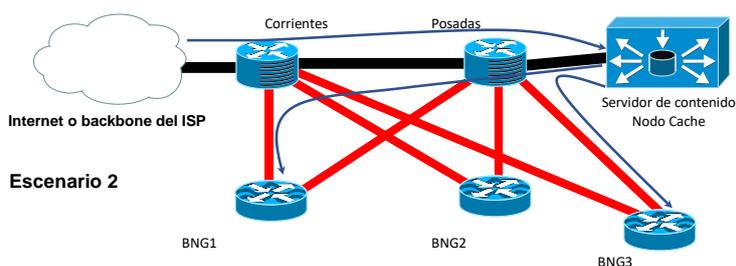


Figura 4.5. Escenario 2 para ubicación del nodo caché

Para llegar a Corrientes, el tráfico del contenido almacenado en el nodo caché tiene que transitar el vínculo desde Posadas hacia Corrientes. Una primera impresión podría indicar se ocupan recursos del enlace y que por lo tanto no hay mejora, pero como los vínculos se dimensionan para un tráfico simétrico, y el tráfico de los contenidos audiovisuales es altamente asimétrico, la ocupación de recurso se hará sobre un vínculo subocupado en relación al otro sentido del enlace, es decir ocupa la fibra que transmite hacia Corrientes, sin sobrecargar la fibra que transmite hacia Posadas.

En la figura 4.6 se puede observar el tercer escenario en el que se prevé un nodo caché para cada router BNG.

En este caso se favorece la disminución de tráfico entre los routers de núcleo y los router BNG (vínculos dibujados en rojo), pero a costa de un leve aumento del tráfico de actualización de los nodos caché. Esta propuesta empeora levemente el tráfico entre los routers de la capa del núcleo y a la vez aumenta la complejidad de la administración de los nodos caché al tener mayor número de equipos a administrar. Además, tiene la ventaja adicional de poder respaldarse entré sí, es decir, el efecto de una falla en uno de los nodos caché puede ser minimizado por el aporte de los otros nodos reduciendo el impacto en la red troncal y en el usuario.

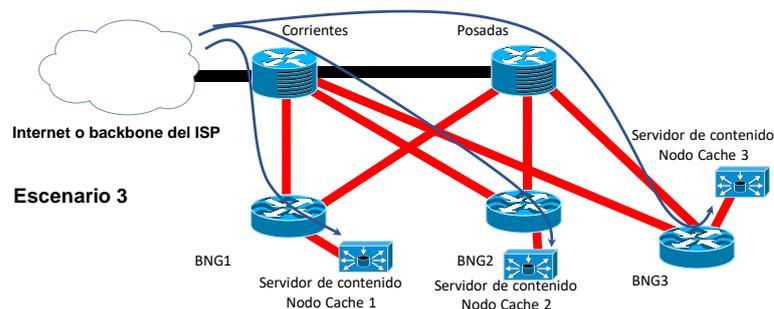


Figura 4.6. Escenario 3 para ubicación de los nodos caché

Como los vínculos entre los equipos BNG y los routers de núcleo no están tan comprometidos en tráfico respecto de la capacidad de la fibra óptica, la conveniencia de esta topología dependerá de una cuestión económica y estratégica, más que una cuestión técnica.

4.3.2 Distribuir los puntos de interconexión IXP

Otra forma de reducir la saturación en los vínculos troncales es acercar al usuario los puntos de interconexión entre ISP. La economía de escala de cantidad de usuarios y proveedores determinará la cantidad y ubicación de los IXP regionales. Para los ISP de mayor tamaño la reducción de tráfico no será tan grande como la reducción que se obtiene con los nodos cache de los grandes proveedores de contenido, pero para los ISP de menor tamaño permite la posibilidad de incorporar nodos caché conectados al IXP que contribuyen a reducir el tráfico desde los proveedores mayoristas.

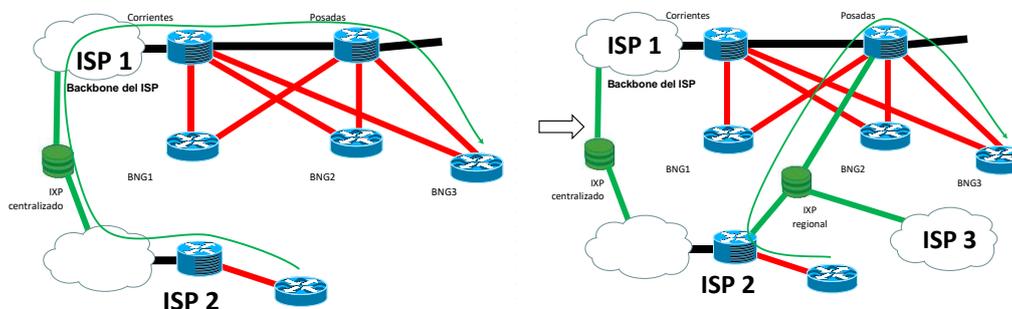


Figura 4.7. Reducción del tráfico troncal con IXP regionales

En la figura 4.7 se observa un ejemplo de la reducción del tráfico en los troncales de los ISP para una transferencia de video, por ejemplo, pero a costa de aumentar el número de vínculos regionales en los routers de la red troncal.

4.3.3 Mejora en la resiliencia

Para mejorar la resiliencia se hace necesario un cambio en la topología migrando del modelo la capa de acceso en anillo a una capa de acceso en estrella con los equipos de la capa superior, y una topología mallada con nivel de decisión en capa 3 para la parte superior. La exigencia del usuario hacia los proveedores de acceso a Internet es de mayor velocidad de conexión y también de menor latencia. Debido a que la mayor incidencia en la latencia es el tránsito por los conmutadores o switches y los routers, la tendencia actual es reconfigurar la topología de la red para reducir la cantidad de saltos en el enrutamiento, como se observa en la figura 4.8.

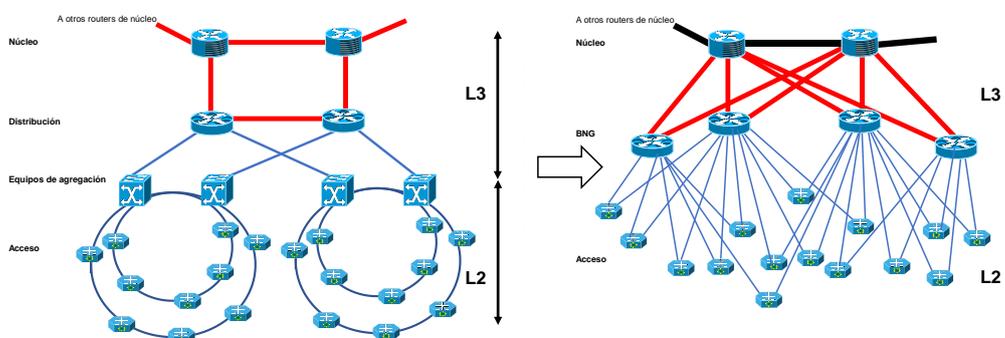


Figura 4.8. Topología reducida en saltos

En esta topología el enrutamiento sólo tiene dos saltos hasta la capa de núcleo, reduciendo notablemente la latencia al tener que atravesar menos elementos de decisión y disminuyendo la penalidad adicional durante los re-enrutamientos producidos por eventos en los vínculos de interconexión. Los equipos de conexión a cliente, como DSLAMs ADSL, equipos FTTC, FTTH y HFC no están dibujados y concentran su tráfico en la capa de acceso. Cada equipo de acceso está conectado al menos a dos equipos BNG (Border Network Gateway, Puerta de enlace de frontera de red) de capa 3 de enrutamiento, esto proporciona una mejor redundancia de vínculos, pero encarece notablemente el tendido de las redes. Los equipos BNG también tienen al menos doble vínculo con la capa de núcleo, y la capacidad de su matriz de conmutación debe ser elevada, al igual que los recursos de interfaces para interconectarse con las dos capas de la topología.

4.4 Marco del diseño de un enlace

Los análisis precedentes demuestran la interdependencia de los distintos factores a ponderar en el diseño de un enlace de fibras ópticas mediante la tecnología DWDM. Se propone tomar en consideración todos estos factores para determinar la capacidad inicial del diseño:

- En primer lugar, la topología de la red define la importancia del enlace a diseñar y define la capacidad de los enlaces alternativos que permitan derivar el tráfico.
- En segundo lugar, los métodos de reducción de tráfico existentes o proyectados, son indispensables para el dimensionamiento de la capacidad inicial necesaria, y desde el punto de vista económico ya que un equipo terminal de línea con capacidad inicial de 1TB/s puede costar entre 1 y 2 millones de dólares (a valores actuales), mucho más que la inversión que se necesitaría para instalar los nodos caché CDN.
- En tercer lugar, la proyección de la saturación del enlace a partir del tráfico proyectado en función de la disponibilidad de nodos cache (o el proyecto de instalación a futuro) permite estimar el tiempo en el cual se requiera instalar más enlaces, tomando en cuenta que, si parte de la capacidad de transporte del enlace se reserva como alternativa para otro vínculo, el tiempo se reduce en función de la capacidad vacante reservada para la resiliencia.
- En función de la capacidad definida en los puntos anteriores, definir la cantidad de enlaces necesarios en función de la distancia del enlace y de la distancia máxima que cada capacidad puede operar para dimensionar los elementos del enlace que puedan satisfacer la OSNR necesaria, implementando los métodos que permitan derivar el tráfico ante una falla en el enlace.

4.5 Dimensionamiento de un nuevo enlace para un nuevo nodo de la red núcleo.

Este diseño realizado como parte de este trabajo para una empresa de telecomunicaciones, forma parte de un análisis de propuestas del proyecto para expandir la red de núcleo que actualmente tiene uno de sus nodos en la ciudad de Corrientes, con un nuevo nodo en la ciudad de Posadas, donde se instalará un nuevo router de la red núcleo el cual se conectará mediante enlaces de al menos dos trazas distintas que permitan respaldarse entre sí.

El objetivo del dimensionamiento de este enlace es el proyecto de estudio de una etapa de un sistema de enlaces DWDM que proveerán la conectividad directa y de protección a los routers que componen el tope jerárquico de enrutamiento de la red de transporte de datos para la ampliación de una red considerando las opciones disponibles y proyectando las segurizaciones necesarias para asegurar una resiliencia mínima con la menor latencia.

El enlace a proyectar es un enlace entre las ciudades de Corrientes y Posadas para proveer una capacidad inicial de 300GB/s por enlace con capacidad de ampliar a futuro como mínimo a 1600GB/s (1,6TB/s) en un período de 3 años, datos obtenidos en base al tráfico actual de 105GB/s (sin nodos caché) y proyectado sobre la base de la instalación en corto plazo de los nodos caché de los proveedores de contenidos más importantes.

Tomando la proyección de saturación del enlace (con nodos caché) sobre la tendencia de la curva de tráfico de CABASE, el enlace tendría un período de vida antes de la saturación de 5,5 años sin tomar en cuenta la reserva para el tráfico producto de la resiliencia, y de 4,5 años reservando la mitad de la capacidad del enlace para el tráfico producto de la resiliencia, por lo que no hace falta prever enlaces en paralelo para el período considerado.

Ya existe un enlace DWDM entre los extremos en estudio, pero de 10GB/S en cada canal óptico y con equipos OADM en cada estación, proyectado originalmente para realizar la conectividad de acceso de los sitios intermedios. No será necesario por lo tanto proyectar la instalación o tendido de fibras ópticas en el enlace principal del diseño, y además se asegura la disponibilidad de estaciones equipadas con los requerimientos de energía y refrigeración para albergar a los equipos a instalar. Existe también enlaces desde los extremos hacia otros destinos y enlaces en proyecto, lo que permitiría realizar protecciones en anillo al finalizar todas las etapas.

Los cálculos de los enlaces ópticos se realizaron considerando los distintos tipos de fibra óptica disponibles, la atenuación real medida de las fibras ópticas para el enlace y los siguientes parámetros de diseño de la tabla 4.2:

Tabla 4.3. Parámetros de diseño del enlace

Atenuación adicional	1 dB/Span
Atenuación ODF	0,5 dB
Atenuación envejecimiento	0,04 dB/km
PMD G.652 y G.653	0,5 ps/vkm
PMD G.655	0,2 ps/vkm
Dispersión Cromática G.652 @ 1550 nm	17 ps/nm.Km
Dispersión Cromática G.653 @ 1550 nm	2,7 ps/nm.Km
Dispersión Cromática G.655 @ 1550 nm	6 ps/nm.Km
Margen OSNR EOL	3 dB

Las empresas proveedoras de equipos ofrecen equipos con capacidad de 100GB/S por cada canal, usando la grilla de la recomendación G694.1. La modulación de línea que usan es DP-QPSK que requiere para su correcto funcionamiento una OSNR de 13,5dB y constituye la principal meta para garantizar la calidad del enlace. El nivel de sensibilidad sólo se evalúa para proyectar el tipo de amplificador a utilizar siendo más restrictiva la OSNR que el nivel de potencia recibido.

El enlace proyectado es un enlace tipo exprés, que significa que los canales ópticos no podrán accederse en las estaciones intermedias, y por lo tanto en las estaciones intermedias sólo habrá amplificadores ópticos (OLA) y sólo en los extremos habrá ROADMs.

El esquema del enlace es el que se muestra en la figura 4.2.

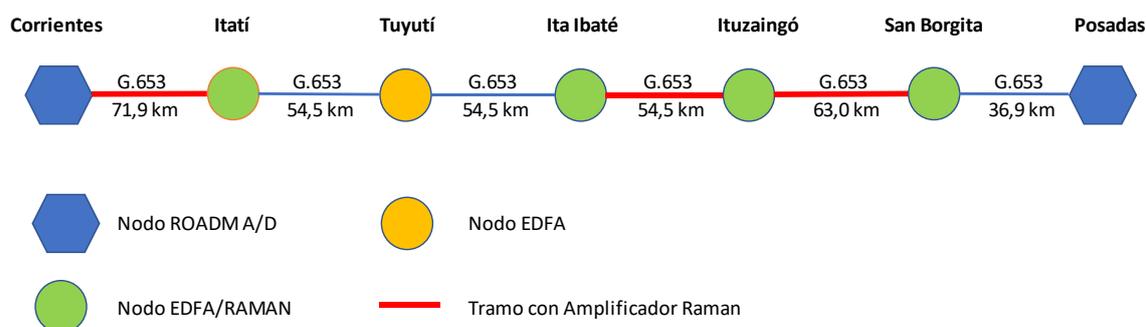


Figura 4.9. Esquema de la traza del enlace Corrientes - Posadas

En las estaciones Corrientes y Posadas los equipos serán ROADM A/D que significa que además contarán con la posibilidad de agregar/bajar tráfico y mediante el agregado de transponders-multiplexores se podrá agregar tráfico de menor jerarquía, en este caso canales de 10GB/s.

La fibra óptica entre las estaciones es existente del tipo G.653 con una antigüedad de más de 15 años y se prevé un margen de la OSNR de 3dB por encima de la OSNR necesaria a EOL. El trabajo previo incluye la medición de los parámetros de atenuación en cada estación y la selección de las fibras en mejores condiciones. En la tabla 4.3 se resumen la información para el diseño del equipamiento de cada estación.

Tabla 4.4. Resumen de información del diseño

Sitio A	Sitio B	Tipo estación sitio A	Tipo fibra óptica	Distancia (km)	Atenuación de la FO (dB)	Atenuación ODF (dB)	Atenuación adicional (dB)	Atenuación BOL (dB)	Atenuación envejec. (dB)	Atenuación EOL (dB)
Posadas	San Borgita	ROADM	G.653	36,9	13,2	1	1	15,2	1,5	16,7
San Borgita	Ituzaingó	OLA	G.653	63,0	16,0	1	1	18,0	2,5	20,5
Ituzaingó	Itá Ibaté	OLA	G.653	78,7	20,0	1	1	22,0	3,1	25,1
Itá Ibaté	Tuyutí	OLA	G.653	54,4	14,3	1	1	16,3	2,2	18,5
Tuyutí	Itatí	OLA	G.653	54,5	14,0	1	1	16,0	2,2	18,2
Itatí	Corrientes	OLA	G.653	71,9	18,0	1	1	20,0	2,9	22,9
Corrientes		ROADM								

La OSNR BOL se obtiene a partir de la evaluación de la OSNR indicada en la sección 3.9.1 ecuación (2) tomando la referencia de la potencia inyectada igual a -6dB por canal para evitar activar los efectos no lineales de la fibra óptica y con una figura de ruido de los amplificadores de 5dB. El detalle de la evaluación de la OSNR se resume en la tabla 4.4.

Tabla 4.5. Verificación de los niveles de OSNR

Sitio A	Posadas
Sitio B	Corrientes
Distancia (km)	359,4
OTS Hops	6
Penalidad OSNR (dB)	2,42
OSNR BOL (dB)	21,07
OSNR EOL (dB)	18,65
OSNR requerido (dB)	13,5
Margen OSNR BOL (dB)	7,57
Margen OSNR EOL (dB)	5,15
FO CD (ps)	NC
FO DGD (ps)	1,9

La penalidad adicional en la OSNR proyectada tiene en cuenta los otros efectos de la fibra óptica que no sean del ruido ASE. De esta forma al fin de vida (EOL) el margen de la OSNR es de 5,15dB que supera el valor requerido de diseño de 3dB por encima de la OSNR requerida en las especificaciones.

La configuración mínima de los nodos ROADM (ver apéndice) incluye el equipamiento para multiplexar y demultiplexar hasta 40 canales correspondientes a el uso de los canales impares de los 80 disponibles en la banda C, reservando en esta primera etapa

los canales pares como espacio de guarda para minimizar la interferencia entre canales. La asignación de canales se detalla en la tabla 4.5.

Tabla 4.6. Asignación de canales para el tráfico

Sitio A	Sitio B	Bitrate OCh	N° Ch	Frecuencia OCh (THz)	A equipar
Posadas	Corrientes	100G	7	195,75	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	9	195,65	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	11	195,55	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	13	195,45	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	15	195,35	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	17	195,25	Inicial reserva
Posadas	Corrientes	100G	19	195,15	Inicial reserva
Posadas	Corrientes	100G	21	195,05	Inicial
Posadas	Corrientes	100G	23	194,95	Inicial
Posadas	Corrientes	100G	25	194,85	Inicial
Posadas	Corrientes	100G	27	194,75	Inicial reserva
Posadas	Corrientes	100G	29	194,65	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	31	194,55	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	33	194,45	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	35	194,35	Futura ampliación
Posadas	Corrientes	100G	37	194,25	Futura ampliación

Este esquema permite ampliar fácilmente a futuro la capacidad de transporte del enlace agregando los transponders correspondientes a los canales a ampliar o en caso de muxponders debe verificarse que no se supere la capacidad de la matriz de conmutación.

4.6 Resiliencia del enlace

La posibilidad de tres planos de reconfiguración de los caminos que se pueden utilizar para establecer el vínculo entre routers proporciona una gran flexibilidad al momento de definir la estrategia para amortiguar los efectos de un evento (corte del cable de fibra óptica, por ejemplo) que afecte al vínculo principal entre los routers que componen la capa de núcleo de la red de transporte de datos.

En la figura 4.10 se destacan los planos de reconfiguración de la capa de transporte, es decir los que están incluidos en el equipo DWDM.

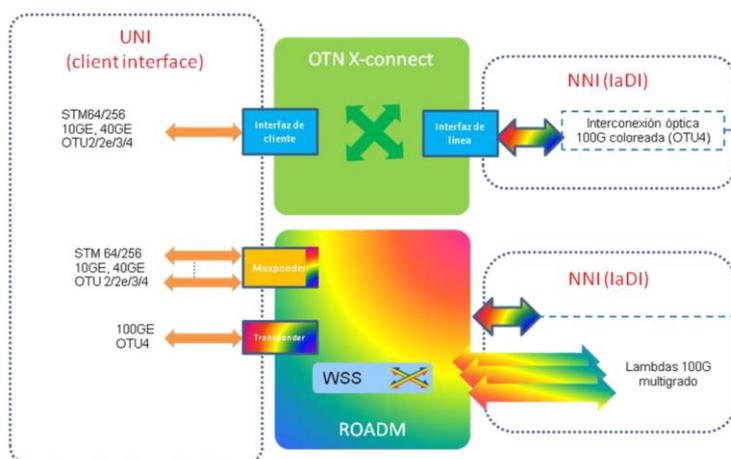


Figura 4.10. Esquema de conmutación a nivel OTN y fotónico [9]

La primera reacción será la modificación de las prioridades de ruteo en cuanto se detecta la falla del vínculo. Esta estrategia proporciona gran velocidad de reacción ante el evento, pero no asegura el funcionamiento óptimo, debido a que la ruta alternativa podría saturarse aumentando la pérdida de paquetes y la latencia.

El operador deberá entonces analizar en función de las opciones de conmutación en la capa OTN o en la capa fotónica el re-encaminamiento (provisional) del canal OTN o del canal óptico. Un detalle de la conmutación en la capa óptica (o fotónica) se puede ver en la figura 4.11. La conmutación en esta capa se realiza mediante la matriz WSS (Wavelength Selective Switch) que permite interconectar en una configuración todos contra todos, las señales coloreadas que ingresan en cada elemento del WSS.

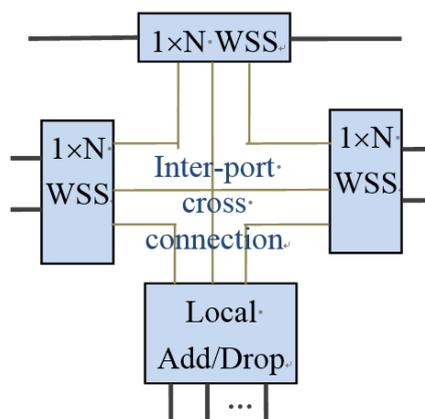


Figura 4.11. Esquema de conmutación óptica [8]

La posibilidad de re-encaminar por completo el canal óptico implica reservar canales del enlace DWDM para contingencias, lo que eleva el costo del enlace y aparece en una primera vista como una capacidad ociosa. Sin embargo, como la conmutación se realiza en etapas intermedias del equipo DWDM, no es necesario hardware adicional para las interfaces de cliente, pero requiere el hardware para la conmutación en la capa OTN, el cual puede haber sido previsto para la agregación de conexiones de cliente de menor jerarquía como por ejemplo vínculos de 10GB/s.

También se deberá tener en cuenta que los nodos sobre los cuales se pretende re-encaminar los vínculos deberán tener facilidades de hardware similares para poder recibir y derivar adecuadamente los flujos de información.

Para el caso de estudio, se prevé la protección mediante enlaces existentes y por medio de un enlace a futuro para proveer una protección en doble anillo. La posibilidad de re-encaminar está sujeta a la disponibilidad de canales vacantes, o de canales que tengan baja ocupación como se observa en la figura 4.12.

Otro elemento a considerar es que al re-encaminar se produce una penalidad adicional en la latencia, aun cuando no haya saturación en la nueva ruta. Esto se debe al recorrido de una mayor longitud óptica y mayor cantidad de saltos por los que transita la información.

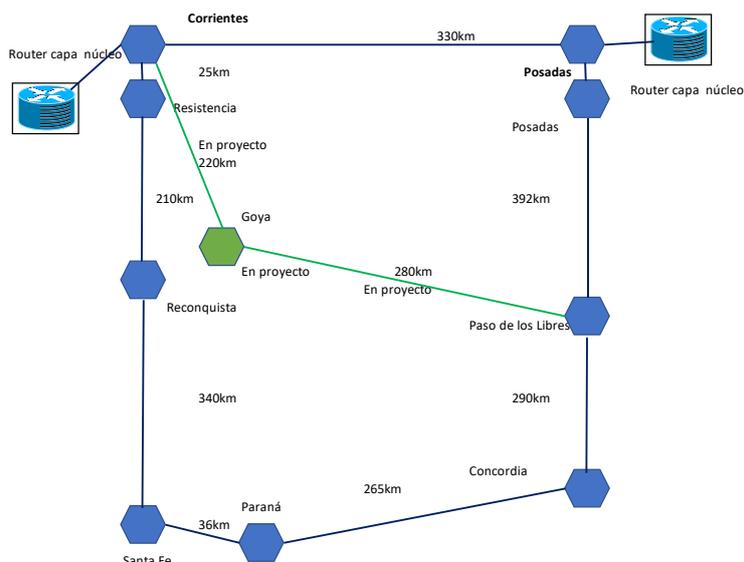


Figura 4.12. Esquema de protección de re-encaminamiento

La estimación de la latencia que introduce el enlace se calcula en base al tiempo de tránsito en las fibras entre estaciones, las fibras de los compensadores de la CD, y los tiempos de tránsito en amplificadores y estaciones OADM. Para el enlace en estudio la penalidad de latencia que introduce es de 2ms como se observa en la tabla 4.6.

Tabla 4.7 Estimación de la latencia en el enlace directo

Elemento	cantidad	Latencia unitaria	Latencia (us)
Fibra tendida	360km	5 us/km	1800
Estaciones OADM	2	100 us	200
Estaciones amplificadoras	5	0,2 us	1
Total			2001

La latencia del camino de contingencia depende del cierre del anillo. La penalidad adicional para derivar el tráfico hacia Corrientes por el enlace inferior del anillo es de 4,8ms adicionales a los que usaría el enlace directo. La penalidad mediante el enlace proyectado a futuro es de 1,26ms adicionales.

Ante un evento que impida el funcionamiento del camino principal, derivar el tráfico por el camino de contingencia más largo representa un aumento en la latencia en el tránsito de la información de 240%, mientras que, por el camino más corto proyectado, el aumento de la latencia es de 160%.

4.7 Análisis de los resultados

El rápido crecimiento del tráfico de los últimos años ha empujado el desarrollo de métodos y tecnologías para incrementar la tasa de información transportada en cada fibra óptica.

Incrementar la cantidad de información transportada por una fibra óptica requiere el uso de técnicas de modulación avanzadas que permitan minimizar los efectos que producen las limitaciones físicas de la fibra óptica, así como los efectos no lineales que se producen al incrementar la potencia de la señal óptica inyectada en la fibra óptica.

La modulación de fase reduce la penalidad del ruido producido por los efectos no-lineales de la fibra debido a que se modula sobre una intensidad de envolvente constante. La combinación de la modulación de fase con la multiplexación por polarización permite la transmisión de 100GB/s a partir de 4 flujos de información de 25GB/s, que supone una ventaja adicional en el tratamiento de la señal de banda base, ya que permite trabajar tasas de bits en los moduladores que no son tan altas para la electrónica disponible.

La penalidad en la OSNR de los sistemas de modulación M-QAM de $M > 8$ reduce la aplicación de estas modulaciones a tramos cortos de fibra debido a que la OSNR requerida para la demodulación no es posible de conseguir en tramos largos y para una grilla de canales densa, por lo menos con las tecnologías hoy disponibles.

La utilización de receptores con detección coherente permite aumentar la tolerancia a la OSNR entre 2dB y 3dB, pero esto implica que el receptor es técnicamente más complejo debido a que es necesario un láser local que oficia de oscilador local en la detección coherente de cada canal.

La utilización de dos haces polarizados permite la multiplexación de dos flujos modulados por una misma fibra, reduciendo la tasa de bits en cada haz modulado, pero agrega la complicación de necesitar un bloque de compensación de la polarización que permite orientar la polarización del láser local con la orientación de la señal recibida, para la adecuada operación de la detección.

La transmisión de múltiples portadoras potencia la posibilidad del ruido debido a los efectos no lineales y del ruido ASE. La potencia de la señal de un único canal está limitada para evitar o minimizar el efecto Kerr y el ruido ASE, pero en un sistema DWDM que se inyectan varias señales simultáneamente, la suma de las potencias de los canales individuales agrega una complicación extra. Algunos canales pueden funcionar como potencia de bombeo en los amplificadores EDFA y Raman. Esto provoca que a la salida de los amplificadores algunas frecuencias se vean favorecidas con una mayor amplificación que otras que perdieron parte de su potencia en el efecto de bombeo. La reducción de la potencia inyectada por canal reduce este efecto, pero reduce también la potencia recibida en el receptor, obligando a utilizar amplificadores de mayor ganancia en algunos casos. Para evitar que los canales menos favorecidos tengan menor calidad de recepción se realiza una ecualización que consiste en modular individualmente la potencia de cada canal en el transmisor para obtener en el receptor canales que tengan aproximadamente la misma amplitud de potencia óptica.

Las técnicas para fabricar los moduladores y demoduladores, y la secuencia histórica en que se produjeron los avances tecnológicos llevó a la modulación DP-QPSK a convertirse en el estándar de referencia para la construcción de los equipos de

transmisión DWDM con capacidad para transmitir hasta 80 canales de 100GB/s en forma simultánea.

El avance en las técnicas de modulación para lograr tasas de transporte superiores de 200GB/s y 400GB/s no ha podido igualar en alcance y confiabilidad al conseguido para 100GB/s con la modulación DP-QPSK. Las técnicas de modulación con mayor cantidad de símbolos junto con la asignación flexible de la grilla de canales de la banda C ha permitido obtener sistemas comerciales de corto y mediano alcance en 400GB/s y 200GB/s.

Las técnicas actuales y en desarrollo están aproximándose al límite teórico de la fibra óptica como medio físico, estableciendo una cota superior para la capacidad de la fibra. La evolución histórica de las técnicas que permiten incrementar la capacidad de transporte de la fibra óptica tiene menor velocidad que la evolución de la demanda de tráfico que crece en forma exponencial, lo que llevará en poco tiempo a saturar la capacidad de transporte de la fibra óptica.

La demanda de mayor capacidad de transporte continúa incrementándose y los nuevos servicios y las tecnologías en desarrollo o en despliegue van a acrecentar la demanda. En particular, el advenimiento del video 4K y 8K, y tecnologías de acceso móvil como 5G, requieren tasas de transferencias elevadas de por sí. Si bien hay algunas técnicas que permiten atenuar los efectos de esta demanda, su crecimiento exponencial hará que, en un mediano o corto plazo, el incremento de la cantidad de información que se puede transportar por una sola fibra no será suficiente. La solución que parece más inmediata en este caso es disponer caminos ópticos en paralelo, con tantas fibras como sea necesario.

La topología de las redes de los ISP se modificó para dos propósitos, por un lado, tener algún grado de resiliencia, y por el otro para disminuir la latencia. El mayor aporte a la latencia está dado por el procesamiento en los equipos enrutadores de capa 2 y capa 3, mientras que la latencia que introduce el tránsito de la información sobre el vínculo de fibra óptica está sujeta al número de estaciones amplificadoras, OADM y repetidoras, y al propio tránsito de la información sobre la fibra óptica. Como la latencia que introduce el tránsito por el enlace DWDM no es posible disminuir, sólo queda modificar la topología para disminuir en número de saltos desde el equipo de acceso hasta la capa de núcleo. Esto obliga a una estructura en estrella en la capa de acceso y la vinculación a la capa de núcleo con el nivel de redundancia que permita la continuidad del servicio. Esta topología requiere mayor número de vinculaciones, encareciendo la red del ISP, aumentando la importancia del diseño de los enlaces entre los nodos enrutadores.

La incorporación de nodos caché produce un impacto de gran importancia en el tráfico total. La disminución permite evitar o demorar la congestión, prolongar la vida útil de un enlace, y realizando la elección adecuada de los equipos DWDM, realizar la inversión en etapas, ampliando canales a medida que se produce la necesidad.

El análisis de la proyección de la saturación de la tecnología DWDM indica que los períodos de saturación están en el mismo orden de magnitud que el tiempo necesario para realizar el conjunto de tareas necesarias para el despliegue, por lo que una falta de previsión o una mala decisión puede terminar en una congestión anticipada o en un gasto adicional para corregirla.

La proyección de la saturación a partir del tráfico actual (o estimado para el caso de un vínculo nuevo) y la presencia de nodos cache (actuales o futuros) permite establecer la

usabilidad del enlace DWDM, definiendo el período de vida útil del mismo antes de la saturación y permitiendo el marco de referencia para el diseño del enlace.

Estas consideraciones permiten proponer una secuencia en el diseño de los nuevos vínculos entre routers, considerando previamente estos parámetros antes del diseño técnico del enlace DWDM

- El tráfico actual y su tendencia, en el caso de la ampliación de un enlace existente, o una estimación del tráfico en caso de un vínculo nuevo
- La existencia de nodos caché, o su instalación en el futuro
- La disponibilidad de fibras tendidas o su instalación si fuera necesario, tanto para el enlace principal, como para la redundancia de camino óptico
- Prever la vida útil del enlace en función de la saturación de la tecnología DWDM
- Dado que a la fecha no hay equipamiento que permita varios flujos DWDM usando fibras en paralelo, se deberá prever enlaces en paralelo hasta cubrir la demanda esperada.

En la etapa del diseño, se usó la tecnología estándar basada en DP-QPSK y la canalización de ITU-T 694.1 que proporciona hasta 80 canales de 100GB/s permite asegurar la interoperatividad del equipo de transmisión con los equipos clientes (routers) y con otros equipos de transmisión de otros proveedores. Por lo tanto, establecidas las condiciones del diseño, y luego de verificar la viabilidad de la OSNR para la cantidad de spans previstos, se definen las frecuencias y el hardware de inicio de vida del enlace. Completado el diseño, los valores de cálculo cumplen los requerimientos de potencia de recepción y de la OSNR, siendo este el parámetro que asegura la calidad del enlace en cuanto a tasa de error (BER).

La calidad de una conexión también se mide por la disponibilidad y la latencia. Resulta evidente que un incidente que afecte a la continuidad óptica de la fibra no es posible de salvar sobre el mismo enlace, por lo que se previeron tres niveles de re-encaminamiento a través de otros enlaces disponibles. El primer encaminamiento lo realiza el propio router a través de sus tablas de ruteo (por ejemplo, OSPF (Open Shortest Path First, sistema abierto de enrutamiento por camino más corto primero), el segundo mediante la conmutación eléctrica usando la matriz OTN, de mucha utilidad para re-encaminar vínculos de menor jerarquía. El último nivel que se realiza a nivel óptico, permite re-enrutar la señal coloreada (es decir a nivel del canal DWDM mediante el sistema WSS) por otros caminos. Este método tiene la ventaja de no modificar las tablas de ruteo del router, siendo transparente para el mismo, pero con una penalidad mínima en la latencia que depende del camino elegido.

Para asegurar una alta posibilidad de disponibilidad, se prevé la segurización mediante un doble anillo, uno de los cuales está en servicio y el otro se encuentra en etapa de proyecto.

La utilización de nodos caché permite reducir el tráfico previsible que podría sobrecargar el enlace. La reducción efectiva depende en gran parte del consumo de los usuarios, pero con la información de una carga de tráfico cercana al 80% concentrada entre Google, Netflix y Facebook, permitiría reducir al 30% la carga del enlace con nodos caché de los tres proveedores de contenido. La mejor ubicación de los nodos caché permite optimizar la cantidad de nodos reduciendo la inversión total.

5 Aportes y Conclusiones

Este trabajo está orientado a obtener el marco de referencia para el diseño de un enlace DWDM para la interconexión entre equipos de la capa de núcleo de la red internet. Los aspectos a considerar como base del diseño se agrupan en los siguientes objetivos que fueron declarado en el capítulo 2:

- Evaluar la capacidad de transporte de los sistemas de transmisión DWDM
- Determinar el límite de aplicabilidad de las tecnologías DWDM actuales y en desarrollo en el diseño de las redes troncales de datos
- Proponer un marco de diseño de una conexión troncal entre equipos de transporte de datos e internet a partir de la proyección de tráfico de datos actual y el proyectado
- Analizar métodos para aliviar la saturación de las redes troncales
- Analizar métodos para mejorar la resiliencia de las redes

Se expone en los siguientes puntos como el aporte del trabajo contribuye al alcance de cada objetivo.

5.1 Evaluar la capacidad de transporte de los sistemas de transmisión DWDM

El diseño del enlace parte de la premisa que se debe poder transportar todo el tráfico demandado, el cual por la ubicación en la topología de la red puede llegar a superar la capacidad de transporte de un enlace de un par de fibras ópticas. En este marco es de importancia conocer hasta donde puede transportar información una fibra óptica, a partir de las facilidades y limitaciones de la tecnología DWDM disponible, y las características de medio de transmisión, la fibra óptica.

La fórmula de Shanon proporciona un límite teórico que está lejos en la práctica de la capacidad real. El análisis de los sistemas de modulación, y el rendimiento espectral acotan aún más la capacidad de transporte. Las limitaciones del comportamiento físico de la fibra óptica impone un límite a la potencia óptica que se puede inyectar, lo que reduce la posibilidad de utilizar sistemas de modulación QAM de varios niveles de intensidad, debido a la acumulación de ruido ASE, esto deja como el método más eficiente para aumentar la eficiencia espectral al DPQPSK, esta técnica permitió el transporte de 100GB/s en cada canal en forma sustentable, lo que la volvió el estándar de la producción comercial de los equipos DWDM.

Por otro lado, el ancho espectral aprovechable de la fibra óptica (banda C) sólo permite una cantidad acotada de canales de 50GHZ -hasta 88 canales- dependiendo de la modulación empleada y el alcance previsto del enlace, la máxima tasa de transporte disponible comercialmente al momento de este análisis, 8,8 TB/s y con un alcance de 4000 km, que se obtiene mediante la modulación DP-QPSK con una grilla de 88 canales, a los 20TB/s con un alcance de 600km usando DP-16QAM.

Los desarrollos en curso para mejorar la capacidad de transporte, como algoritmos de FEC más eficientes, por ahora sólo prometen incrementos marginales que no serán suficientes para la velocidad esperada de crecimiento del tráfico.

El mayor aporte de este análisis al diseño de enlaces, es que muestra que la mejora en los desarrollos tecnológicos comerciales de mayor capacidad de transporte, en corto o mediano plazo no podrán servir de solución a la saturación inminente de los vínculos

troncales sin incurrir en mayores costos de inversión, y por lo tanto es conveniente aplicar otros métodos para satisfacer la demanda de tráfico.

Este análisis asume como cumplido el objetivo de evaluar la capacidad de transporte de la fibra óptica, en cuanto definir una cota superior en la capacidad de transporte, en base a lo expuesto en el capítulo 4, sección 4.1 y tabla 4.1, y el crecimiento limitado en la capacidad de transporte a futuro en base al análisis del capítulo 4 sección 4.1.

5.2 Determinar el límite de aplicabilidad de las tecnologías DWDM actuales y en desarrollo en el diseño de las redes troncales de datos

En la misma línea del primer objetivo, cada vínculo de interconexión tiene características particulares en cuanto a su longitud, cantidad de estaciones de intermedias, tipos de fibras instaladas o proyectadas, etc., que pueden ser favorables para una configuración o ser un obstáculo insalvable en otros.

La aplicabilidad máxima está determinada por la longitud máxima del enlace, ya que la necesidad de utilizar etapas amplificadoras cada tanto, genera la acumulación del ruido ASE, lo que reduce la tasa máxima de transferencia de información que la tecnología puede proveer. La distancia máxima entre etapas amplificadoras dependerá de la ganancia máxima de los amplificadores ópticos. En este aspecto, los amplificadores en base a efecto Raman tiene mejor respuesta que los amplificadores EDFA, pero complica y encarece la instalación del enlace.

La utilización de todos los canales requiere el ajuste en campo de la ecualización de la potencia inyectada a cada canal, sobre todo, en función de la fibra utilizada. En la medida que se mejore la tecnología de filtrado y detección, la OSNR necesaria será menor permitiendo tramos de mayor longitud o menos amplificadores ópticos, lo que simplificará el diseño del enlace a menor cantidad de componentes.

Este análisis muestra que hay una capacidad máxima de transporte en función de la longitud del vínculo entre equipos. La mayor dificultad se presenta en los vínculos de longitudes mayores a 1000 km puesto que varias estaciones intermedias y la consecuente acumulación de ruido ASE y disminución de la OSNR.

Este análisis asume como cumplido el objetivo de evaluar el límite de aplicabilidad de las tecnologías DWDM actuales y en desarrollo en el diseño de las redes troncales de datos, en base a la influencia del ruido ASE expuesto en el capítulo 4.2, sección 4,2 que se resume en la tabla 4.2.

5.3 Analizar métodos para aliviar la saturación de las redes troncales

La reducción del tráfico en los vínculos troncales es por ahora el mejor método para mitigar la inminente saturación de la tecnología DWDM. El análisis del contenido del tráfico de los vínculos troncales indica que la mayor reducción se logra mediante nodos CDN en posiciones más próximas a la demanda, pero requiere acuerdo con los grandes proveedores de contenidos para la instalación de nodos caché en los edificios de los grandes ISP. Para los ISP de menor tamaño la saturación de la capacidad de la fibra no es un problema inminente, pero permite ahorrar tráfico en sus vínculos troncales. Por su tamaño puede no ser viable el acuerdo con los grandes proveedores de contenidos, la mejor propuesta es instalar nodos caché junto con los IXP regionales. Un complemento de este método muestra que la característica asimétrica permite instalar los nodos caché a los puntos más alejados y usar el vínculo de sentido contrario que está más aliviado para derivar el tráfico de los CDN hacia los usuarios en los puntos de concentración. En menor grado de aporte a la reducción del tráfico, la utilización de IXP

regionales permite reducir parte del tráfico entre los distintos proveedores de acceso a internet.

La demanda a futuro por parte de los usuarios de tasas de transferencias cada vez mayores viene acompañada por el despliegue de nuevas ofertas de contenidos de alta definición o de alta tasa de transferencia, nuevas tecnologías de acceso con mayor de mayor capacidad hacia el usuario como la tecnología 5G para el acceso móvil y la tecnología FTTH para las conexiones cableadas. Esta tendencia implica que la topología de la red migrará a una arquitectura de contenidos lo más distribuidos que sea posible, y además con la mayor cantidad de interconexiones regionales ya no como una forma de reducir la saturación, sino como la única forma de satisfacer esa demanda, ya que la tecnología de los enlaces no podrá crecer al ritmo de la demanda del tráfico.

Este análisis asume como cumplido el objetivo de evaluar los métodos para aliviar la saturación, en base a lo expuesto en el capítulo 4 sección 4.3 que se resume en la figura 4.3 y los aportes de menor alivio a la saturación observados en las figuras 4.5 y 4.7.

5.4 Analizar métodos para mejorar la resiliencia de las redes

En este trabajo el análisis de la resiliencia está acotado a los métodos para derivar el tráfico ante una falla en un vínculo, y el incremento en la latencia como consecuencia de nuevo camino de la información, dado que el diseño de vínculos troncales no tiene una estructura densamente mallada que permita análisis más complejos.

La necesidad de los ISP de la disponibilidad de servicio de conectividad en las redes troncales obliga a diseñar los vínculos de interconexión entre los routers de la red troncal con al menos un posible camino alternativo que permita derivar todo o la mayor parte del tráfico del vínculo principal. Las tecnologías actuales proporcionan 3 planos con los cuales trabajar ante un evento, de los cuales uno lo proporciona el router mediante su algoritmo de ruteo, y los otros dos forman parte de la tecnología de los equipos de transporte DWDM, que permiten derivar tráfico mediante la conmutación de tramas a nivel eléctrico en el plano OTN, o la conmutación en el plano óptico mediante los sistemas WSS. El incremento mínimo en la latencia producto de la conmutación puede obtenerse por el tiempo de tránsito de la información por la red, y puede usarse como un parámetro más para asignar el costo del enlace que usan los algoritmos de ruteo.

Este análisis asume como cumplido el objetivo de evaluar los métodos para mejorar la resiliencia de las redes, en base lo expuesto en el capítulo 4 secciones 4.3.3 y 4.6.

5.5 Proponer un marco de diseño de una conexión troncal entre equipos de transporte de datos e internet a partir de la proyección de tráfico de datos

El diseño tradicional de un vínculo normalmente se basa en satisfacer la OSNR para un tipo de enlace seleccionado de acuerdo a la demanda de tráfico esperada como principal objetivo de diseño. Los análisis precedentes demuestran que el comportamiento y contenido del tráfico resulta determinante para el diseño optimizado en función de la capacidad de transporte acotada de la fibra óptica.

La proyección de la saturación de la tecnología DWDM advierte que la demora en la saturación está en el mismo orden de magnitud que el tiempo necesario para el despliegue de un enlace.

La proyección de la saturación a partir del tráfico actual (o estimado para el caso de un vínculo nuevo) y la presencia de nodos cache (actuales o futuros) permite establecer la

usabilidad del enlace DWDM, definiendo el período de vida útil del mismo antes de la saturación y permitiendo el marco de referencia para el diseño del enlace, como demuestran las proyecciones del capítulo 4, sección 4.3.1, figura 4.3.

Una vez tomados en consideración los efectos de la proyección de la saturación, el diseño de un enlace de transporte DWDM requiere tomar en consideración todas las restricciones de la tecnología y las limitaciones de la fibra óptica para garantizar el transporte de la demanda de tráfico. Las especificaciones relativas al métodos de modulación/detección, en especial la relación señal a ruido óptico (OSNR) según lo explicado en el capítulo, 3 sección 3.6, figura 3.1 y el capítulo 4, sección 4.2, tabla 4.1. Junto con la información técnica de los fabricantes de equipos en lo que hace a la sensibilidad, sistemas de amplificación y corrección de errores en arribo (FEC), constituyen la base para el proyecto de un enlace DWDM.

La aplicación del marco del diseño del enlace queda expresada en el capítulo 4, sección 4.4, tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, y 4.6; y las figuras 4.9 y 4.12, en donde el diseño satisface los requerimientos de tráfico actual y proyectado.

Este trabajo permite comprobar que el dimensionamiento del enlace en base a las opciones de la tecnología actual, es sólo el último paso para la implementación de un vínculo de transporte de datos, y que el comportamiento histórico del tráfico y su proyección, y en especial su contenido son fundamentales para optimizar el diseño del vínculo.

5.6 Líneas futuras

La necesidad de ampliar el espectro de la fibra óptica podría realizarse mediante la utilización de la banda L en combinación con la banda C, que si bien tiene mayor atenuación podría aprovecharse con las precauciones y los equipos adecuados.

El procesamiento de la señal en arribo FEC ha producido mejoras que han permitido hacer viables modulaciones y enlaces que parecían imposibles unos años atrás. La continua mejora en los algoritmos y el desarrollo del hardware para llevarlo a cabo representa hoy el mayor desafío para poder seguir ampliando la capacidad de la fibra óptica.

La fuerte influencia de los nodos cache CDN provoca la migración hacia una red cada vez más distribuida, donde la administración de un mayor número de nodos, la administración de la actualización de los contenidos y la protección de la información almacenada se presentan como desafíos hacia el futuro.

La topología de contenidos distribuidos obliga a sobrecargar a los routers con cada vez mayor cantidad de interfaces, y con tasas de transferencia mayores, con la posibilidad de llegar a un límite a la capacidad de seguir ampliando la cantidad de interfaces y capacidad de ruteo de cada router. El arreglo matricial de routers en cada nodo para el enrutamiento en etapas surge como medio para paliar este efecto.

Bibliografía

- [1] CABASE. “*Estado de Internet en Argentina y la Región*” Setiembre de 2017. [Online] <https://www.cabase.org.ar/wp-content/uploads/2017/09/CABASE-Internet-Index-II-Semestre-2017.pdf>
- [2] Piotr Rydlichowski, Piotr Turowicz “*Coherent Data Transmission in Optical DWDM Systems*” 2012 [Online] http://www.pwt.et.put.poznan.pl/PWT_2012/PWT_202012_3247.pdf
- [3] Eugen Lach, Wilfried Idler “*Modulation formats for 100G and beyond*” Available online 26 August 2011
- [4] Stallings, William, *Comunicaciones y Redes de Computadoras*, Madrid: Prentice Hall, 2004.
- [5] Recomendación ITU-T G652 2005 [Online] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/es>
- [6] Recomendación ITU-T G653 2006 [Online] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653/es>
- [7] Recomendación ITU-T G655 2006 [Online] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/es>
- [8] Jie Liu, Kangping Zhong, Zhenhua Dong, Changjian Guo, Alan Pak Tao Lau, Chao Lu, Yan Zhao Lu. “*Signal power distribution based modulation format identification for coherent optical receivers*”. *Optical Fiber Technology*. Volume 36, July 2017, Pages 75-81
- [9] Huawei Technologies Co., Ltd. “*White Paper on Technological Developments of Optical Networks*” 2016 [Online] [https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/white paper/White-Paper-on-Technological-Developments-of-Optical-Networks.pdf](https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/white%20paper/White-Paper-on-Technological-Developments-of-Optical-Networks.pdf)
- [10] P. P. Mitra and J. B. Stark, “*Nonlinear limits to the information capacity of optical fiber communications*” *Nature* 411(6841), 1027–1030 (2008).
- [11] Recomendación ITU-T G709/Y.1331. 2003 [Online] www.itu.int/Frec/Fdologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.709-200303-S!!PDF-S
- [12] Estándar IEEE P802.3ae 10 Gb/s Ethernet. 2003 [Online] <http://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/>
- [13] Estándar IEEE P802.3ba 100 Gb/s Ethernet. 2010 [Online] <http://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/>
- [14] Estándar IEEE P802.3bs 200 Gb/s and 400 Gb/s Ethernet. 2017 [Online] <http://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/>
- [15] Recomendación ITU-T G698.2. 2007 [Online] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2/en>
- [16] Peter Winzer, Rene-Jean Essiambre. “*Advance Optical Modulation Formats*”. May 2006. *Proceedings of the IEEE* Vol 94, N°5
- [17] Optical Internetworking Forum (OIF), “*100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document*”, November 2010. [Online] www.oiforum.com/wp-content/uploads/FOIF-FD-100G-DWDM-01.0.pdf

- [18] IEEE P802.3bs Task Force, <http://www.ieee802.org/3/bs/index.html>
- [19] F. Chang, K Onohara, and T. Mizuochi; “*Forward error correction: A powerful & Indispensable Technology for Ultra High Speed Transmission*”. 2014 [Online] https://www.suboptic.org/wp-content/uploads/2014/10/SubOptic2010_Presentation_Tutorial-5_Part-B_rev4_note.pdf
- [20] Recomendación ITU-T G694.1 2002 [Online] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-l/es>
- [21] Eiselt, Nicklas; Wei, Jinlong; Griesser, Helmut; Dochhan, Annika; Eiselt, Michael; Elbers, Jörg-Peter; Vegas Olmos, Juan José; Tafur Monroy, Idelfonso. “*First Real-Time 400G PAM-4 Demonstration for Inter-Data Center Transmission over 100 km of SSMF at 1550 nm*” Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2016 DOI: 10.1364/OFC.2016.W1K.5
- [22] Infinera Corporation White Paper. “*Super-Channels: DWDM Transmission at 100Gb/s and Beyond*”. Wavelength Magazine, 1/2/2013 [Online] https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/2013winter-Wavelength_Magazine.pdf
- [23] OIF 400G White Paper. “*Technology Options for 400G Implementation*” July 2015. [Online] <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-Tech-Options-400G-01.0.pdf>
- [24] Huawei Technologies Co., Ltd. “*Key Technologies in Open Optical Transmission Systems*” March 2017 [Online] <https://www.ofcconference.org/getattachment/7c5d676c-efa1-4b6f-bda9-503618e2776d/Key-Technologies-in-Open-Optical-Transmission-Syst.aspx>
- [25] J.H. Sinsky et al., “*A 107-Gbit/s Optoelectronic Receiver Utilizing Hybrid Integration of a Photodetector and Electronic Demultiplexer*”. January 2008 Journal of Lightwave Technology, vol. 26
- [26] R.-J. Essiambre, G. J. Foschini, G. Kramer, and P. J. Winzer, “*Capacity limits of information transport in fiberoptic networks*” Phys. Rev. Lett. 101(16), 163901 (2008)

Apéndice

A.1. Grilla de canales DWDM de acuerdo con ITU-T G694.1

Canalización óptica (50 GHz)		
N° OCh	Frecuencia	Longitud de onda
	[THz]	[nm]
1	196,05	1529,16
2	196,00	1529,55
3	195,95	1529,94
4	195,90	1530,33
5	195,85	1530,72
6	195,80	1531,12
7	195,75	1531,51
8	195,70	1531,90
9	195,65	1532,29
10	195,60	1532,68
11	195,55	1533,07
12	195,50	1533,47
13	195,45	1533,86
14	195,40	1534,25
15	195,35	1534,64
16	195,30	1535,04
17	195,25	1535,43
18	195,20	1535,82
19	195,15	1536,22
20	195,10	1536,61
21	195,05	1537,00
22	195,00	1537,40
23	194,95	1537,79
24	194,90	1538,19
25	194,85	1538,58
26	194,80	1538,98
27	194,75	1539,37
28	194,70	1539,77
29	194,65	1540,16
30	194,60	1540,56
31	194,55	1540,95
32	194,50	1541,35
33	194,45	1541,75
34	194,40	1542,14
35	194,35	1542,54
36	194,30	1542,94
37	194,25	1543,33
38	194,20	1543,73
39	194,15	1544,13
40	194,10	1544,53

Canalización óptica (50 GHz)		
N° OCh	Frecuencia	Longitud de onda
	[THz]	[nm]
41	194,05	1544,92
42	194,00	1545,32
43	193,95	1545,72
44	193,90	1546,12
45	193,85	1546,52
46	193,80	1546,92
47	193,75	1547,32
48	193,70	1547,72
49	193,65	1548,11
50	193,60	1548,51
51	193,55	1548,91
52	193,50	1549,32
53	193,45	1549,72
54	193,40	1550,12
55	193,35	1550,52
56	193,30	1550,92
57	193,25	1551,32
58	193,20	1551,72
59	193,15	1552,12
60	193,10	1552,52
61	193,05	1552,93
62	193,00	1553,33
63	192,95	1553,73
64	192,90	1554,13
65	192,85	1554,54
66	192,80	1554,94
67	192,75	1555,34
68	192,70	1555,75
69	192,65	1556,15
70	192,60	1556,55
71	192,55	1556,96
72	192,50	1557,36
73	192,45	1557,77
74	192,40	1558,17
75	192,35	1558,58
76	192,30	1558,98
77	192,25	1559,39
78	192,20	1559,79
79	192,15	1560,20
80	192,10	1560,61

A.2. Esquemas de las estaciones del enlace proyectado

Estación Corrientes

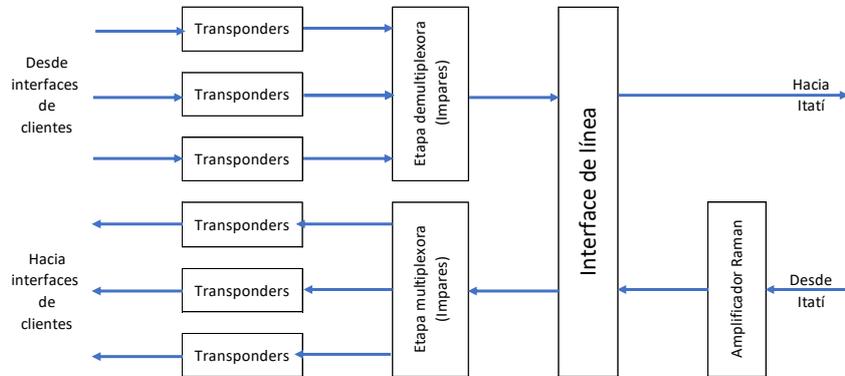


Figura A.1. Esquema Terminal de línea Corrientes

Estación Itatí

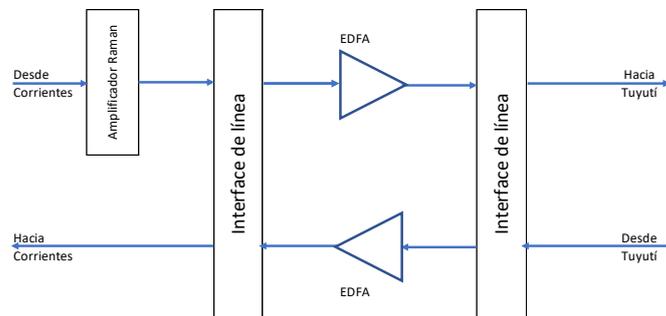


Figura A.2. Esquema Estación Itatí

Estación Tuyutí

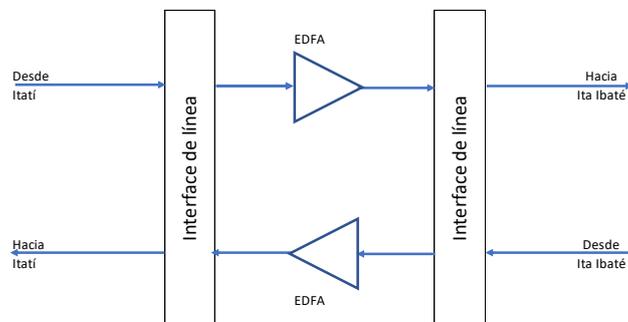


Figura A.3. Esquema Estación Tuyutí

Estación Ita Ibaté

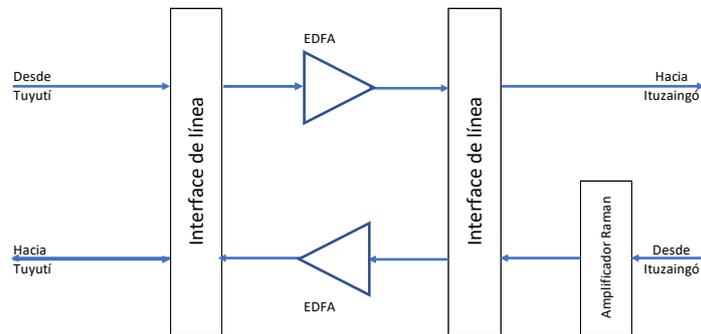


Figura A.4 Esquema Estación Ita Ibaté

Estación Ituzzaingó

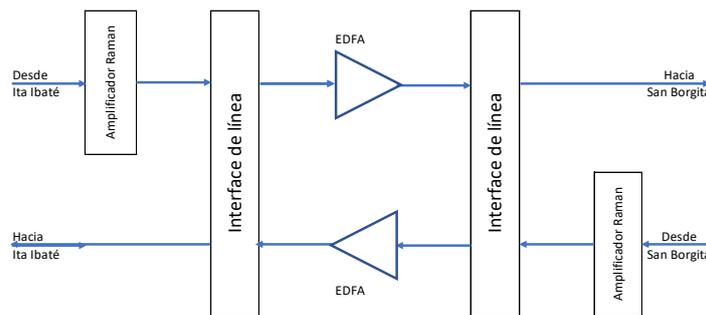


Figura A.5. Esquema Estación Ituzzaingó

Estación San Borghita

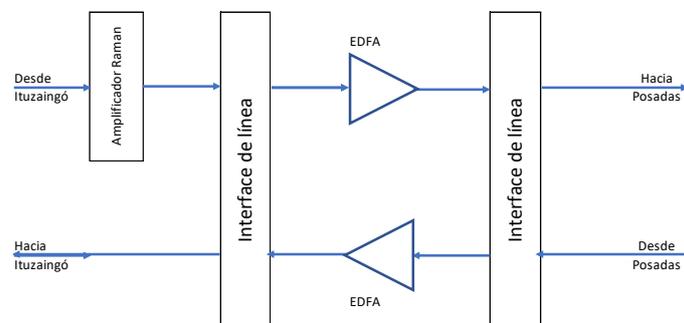


Figura A.6. Esquema Estación San Borghita

Estación Posadas

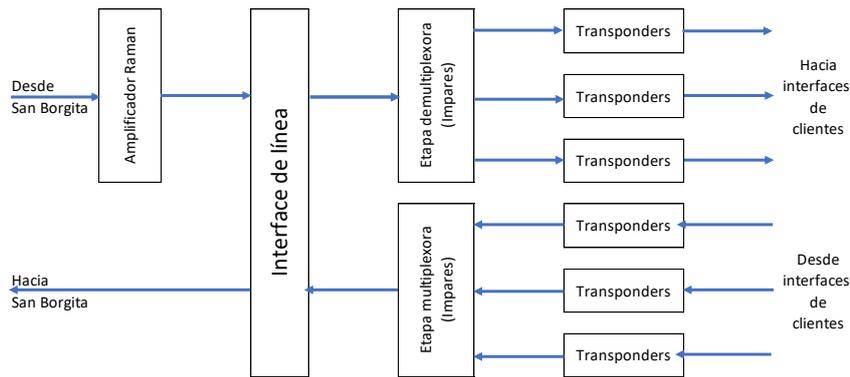


Figura A.7 Esquema Terminal de línea Posadas

A.3. Mediciones con OTDR EXFO FTB200



ESPECIFICACIONES *	
Pantalla	Pantalla táctil, color, 640 x 480 TFT 163 mm (6 7/16 pulgadas)
Interfaces	USB A principal USB B remoto RJ-45 LAN 10/100 Mbit/s Compact Flash Puerto conector de sonda de inspección de fibra (video)
Almacenamiento	Interno 80 MB (Flash) Memorias extraíbles USB de 1 GB y 2 GB (opcionales) Tarjetas Compact Flash (opcional)
Baterías ^b	Recargables de ion Litio 8 h de funcionamiento según Bellcore TR-NWT-001138
Alimentación	Adaptador de CA/CC, entrada 100-240 VCA, 50-60 Hz, 2 A máx., salida: 24 VCC, 90 W

ESPECIFICACIONES GENERALES		
Temperatura	operativa	-5 °C a 50 °C (23 °F a 122 °F)
	almacenamiento ^c	-40 °C a 70 °C (-40 °F a 158 °C)
Humedad relativa	0 % a 95 % sin condensación	
Tamaño (A x A x L)	322 mm x 197 mm x 109 mm (12 1/16 pulgadas x 7 7/8 pulgadas x 4 1/4 pulgadas)	
Peso	2,5 kg (5,4 lb)	
Vibración	< 1,5 g a 10 Hz a 500 Hz (en los tres ejes principales)	
Choque mecánico	< 760 mm en seis lados y en ocho bordes principales (según GR-196-CORE)	

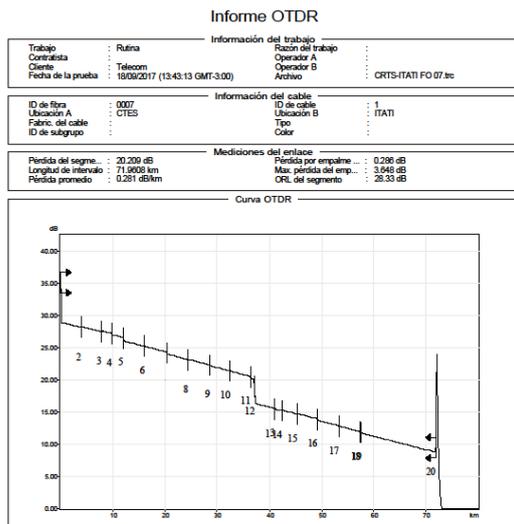
ACCESORIOS			
FP1	Sonda de inspección de fibra FP1 200X	GP-2017	Batería de repuesto de FTB-200
FP5	Sonda de inspección de fibra FP5 400X	GP-2019	Capacidad estándar de micro-unidad USB
GP-10-072	Funda de transporte semi-rígida de FTB-200	GP-2021	Cargador de repuesto de CA (precisa de adaptador/cargador externo de CA).
GP-302	Ratón USB	(A-E-I-J-S-U)	Especificación: A-América del Norte, E-Europa, I-India, J-Japón, S-Australia y Nueva Zelanda, U-Reino Unido
GP-308	Adaptador / Inversor de coche de CC		
GP-2001	Teclado USB	GP-2023	Cinta de transporte de repuesto
GP-2011	Tarjeta WiFi de Ethernet Compact Flash	GP-2024	Cinta de ajuste a la cintura de repuesto
GP-2012	Tarjeta Bluetooth Compact Flash	GP-2025	Tapa de baterías de repuesto
GP-2014	Tarjeta de memoria de 1 GB Compact Flash	GP-2027	Impresora portátil
GP-2015	Tarjeta de memoria de 2 GB Compact Flash	GP-2028	Kit de cable de seguridad de ordenador
GP-2016	Cable de LAN RJ-45 de 10 pies		

ESPECIFICACIONES DEL MEDIDOR DE POTENCIA PM-200 ^a	
Longitudes de onda calibradas (nm)	850, 1300, 1310, 1490, 1550, 1625, 1650
Rango de potencia (dBm)	10 a -86 (InGaAs) 26 a -64 (GeX)
Incertidumbre (%) [*]	+5 % ± 3 pW (InGaAs) +5 % ± 0.4 nW (GeX)
Resolución de pantalla (dB)	InGaAs 0.01 = máx a -76 dBm 0.1 = -76 dBm a -86 dBm 1 = -86 dBm a mín
	GeX 0.01 = máx a -54 dBm 0.1 = -54 dBm a -64 dBm 1 = -64 dBm a mín
Rango de anulación automática ^f	Máx. potencia a -63 dBm para InGaAs Máx. potencia a -40 dBm para GeX
Detección de tono (Hz)	270/1000/2000

LOCALIZADOR VISUAL DE FALLOS (VFL) (OPCIONAL)
Láser, 650 nm ± 10 nm
CW
P _o de salida ordinario en 62,5/125 µm: 3 dBm (2 mW)

- Notas**
- Todas las especificaciones son válidas a 23 °C (73 °F).
 - El tiempo estándar de recarga es de 3 h. Temperatura de recarga: 0 °C a 35 °C (32 °F a 95 °F).
 - Sin incluir las baterías internas. Temperatura máxima de almacenamiento de baterías: 60 °C (140 °F).
 - A 23 °C ± 1 °C, 1550 nm y conector FC. Con módulos en modo inactivo. Funcionamiento por baterías.
 - Hasta 5 dBm.
 - Para ±0,05 dB, desde 18 °C hasta 28 °C.

Ejemplo de un par de las mediciones efectuadas con OTDR en el primer span, para la selección de las fibras ópticas a utilizar en enlace y para obtener los valores para el diseño.



Informe OTDR

Tabla de eventos

Nº	Ubicación (km)	Tipo de evento	Pérdida (dB)	Ref. (dB)	Atenuación (dB/km)	Cumulativo (dB)
1	0.0000	Nivel de inyección	0.779	-30.7		0.000
2	3.9303	Falla positiva	-0.123			0.779
3	7.9372	Falla positiva	0.938			1.456
4	9.9462	Falla no reflexiva	-0.139			1.396
5	12.0717	Tramo de fibra (1.0060 km)	0.410			1.706
6	16.1705	Falla no reflexiva	0.175			1.940
7	20.3356	Tramo de fibra (4.0888 km)	0.496			2.367
8	24.4467	Falla no reflexiva	0.521			2.918
9	28.8047	Tramo de fibra (4.1549 km)	0.813			3.731
10	32.5452	Falla no reflexiva	0.024			3.755
11	36.4755	Tramo de fibra (4.1851 km)	0.876			4.631
12	37.0778	Falla no reflexiva	0.281			4.912
13	41.1613	Tramo de fibra (4.1141 km)	0.936			5.848
14	42.3710	Falla positiva	-0.104			5.743
15	45.2652	Falla no reflexiva	0.001			5.743
16	46.2159	Falla no reflexiva	0.113			5.856
17	53.3708	Tramo de fibra (3.9405 km)	0.308			6.164
18	57.4339	Falla no reflexiva	0.033			6.197
19	57.8789	Tramo de fibra (3.6303 km)	0.873			7.070
20	71.9608	Falla reflexiva	0.310			7.380

A : 0.5005 km, 28.934 dB	B : 0.7507 km, 28.781 dB
a : 0.2502 km, 28.858 dB	b : 1.0010 km, 28.730 dB
Distancia de A a B : 0.2503 km, 0.055 dB	ORL de A a B : 46.93 dB
Reflectancia 3-p. : *****	Atan. LSA A a B : 0.135 dB/km
Pérdida piemp. 4-p. : -0.011 dB	

Longitud de onda : 1550 nm (SM-9um)	Configuración de prueba y cable :	Tiempo de pulso : 2 min 0 s
Nombre de archivo : CRTS-ITATI FO 07.toc		Duración de pulso : 10 µs
Hardware : FTB-1300D-24HD-EI		Factor de escala : 0.05 %
Número de serie : 425167		Umbral de pérdida del : 0.010 dB
Software : SIO		Umbral de reflectancia : -72.0 dB
Rango : 80.0000 km		Umbral de tral de fibra : 5.000 dB
IOR : 1.468325		
RBS : -31.97		

Firma :
EXPO E. O. Engineering Inc.

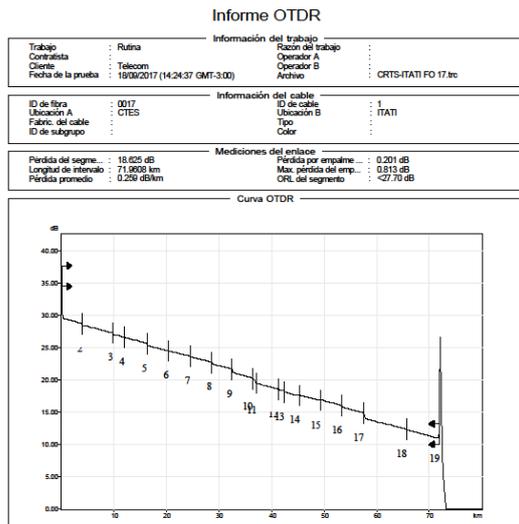
Fecha : 24/02/2018
Página 1 / 2

Firma :
EXPO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 24/02/2018
Página 1 / 2

La primera corresponde a una fibra con una alta atenuación intermedia producto de un empalme mal realizado y que permite descartarla.

La segunda corresponde a una fibra en buenas condiciones para usarse en el enlace.



Informe OTDR

Tabla de eventos

N°	Ubicación (km)	Tipo de evento	Pérdida (dB)	Refi (dB)	Atenuación (dB/km)	Cumulative (dB)
1	0.0000	Nivel de inyección	---	>-29.4		0.000
2	3.0610	Tramo de fibra (3.0610 km)	0.811		0.205	0.811
3	9.8780	Falla no reflexiva	0.254			1.065
4	12.0482	Tramo de fibra (5.9159 km)	1.259		0.213	2.324
5	16.2194	Falla no reflexiva	0.217			2.542
6	20.2000	Tramo de fibra (2.1863 km)	0.435		0.201	2.977
7	24.4006	Falla no reflexiva	0.043			3.020
8	28.5942	Tramo de fibra (4.1702 km)	0.836		0.200	3.856
9	32.5248	Falla no reflexiva	0.350			4.212
10	36.4806	Tramo de fibra (4.0635 km)	0.870		0.215	5.088
11	37.0727	Falla no reflexiva	0.051			5.139
12	41.1786	Tramo de fibra (3.1945 km)	0.894		0.206	5.927
13	42.3659	Falla no reflexiva	0.053			5.974
14	45.2901	Tramo de fibra (4.0637 km)	0.880		0.210	6.834
15	49.1853	Falla no reflexiva	0.237			7.071
16	53.3249	Tramo de fibra (3.9405 km)	0.805		0.204	7.877
17	57.4339	Falla no reflexiva	0.546			8.423
18	66.0227	Tramo de fibra (3.6559 km)	0.173		0.227	8.597
19	71.9038	Falla no reflexiva	0.456			9.053
20	71.9038	Tramo de fibra (2.5211 km)	0.573		0.292	9.776
21	71.9038	Falla no reflexiva	0.081			9.949
22	71.9038	Tramo de fibra (4.1039 km)	0.910		0.222	10.630
23	71.9038	Falla no reflexiva	0.083			10.940
24	71.9038	Tramo de fibra (1.1893 km)	0.249		0.209	11.272
25	71.9038	Falla no reflexiva	0.193			11.435
26	71.9038	Tramo de fibra (2.8942 km)	0.573		0.198	12.007
27	71.9038	Falla positiva	-0.100			11.906
28	71.9038	Tramo de fibra (3.0252 km)	0.784		0.200	12.682
29	71.9038	Falla positiva	-0.086			12.596
30	71.9038	Tramo de fibra (4.1396 km)	0.873		0.211	13.470
31	71.9038	Falla no reflexiva	0.262			13.732
32	71.9038	Tramo de fibra (4.1090 km)	0.919		0.224	14.651
33	71.9038	Falla no reflexiva	0.813		0.208	15.464
34	71.9038	Tramo de fibra (3.2598 km)	1.720		0.208	17.194
35	71.9038	Falla no reflexiva	0.080			17.274
36	71.9038	Tramo de fibra (6.2681 km)	1.301		0.217	18.625
37	71.9038	Falla reflexiva	---	-17.2		18.625

Información de marcadores			
A	: 0.5005 km, 29.456 dB	B	: 0.7507 km, 29.400 dB
a	: 0.2502 km, 29.451 dB	b	: 1.0010 km, 29.393 dB
Distancia de A a B	: 0.2503 km, 0.006 dB	ORL de A a B	: 48.04 dB
Reflexancia 3-p	:	Aten. LSA A a B	: 0.148 dB/km
Pérdida p/emp. 4-p	: 0.003 dB		

Configuración de prueba y cable			
Longitud de onda	: 1550 nm (SM-28)	Tiempo adquis.	: 2 min 0 s
Nombre de archivo	: CRTS-ITATI FO 17.trc	Duración de pulso	: 10 µs
Hardware	: FTB-73000-234B-E3	Factor helic.	: 0.00 %
Número de serie	: 425167	Umbral de pérdida del...	: 0.010 dB
Software	: SIO	Umbral de reflectancia	: -7.0 dB
Rango	: 80.0000 km	Umbral de final de fibra	: 5.000 dB
ORL	: 1.49325		
RBS	: -81.87		

Firma :
EPO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 24/02/2018
Página 11/2

Firma :
EPO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 24/02/2018
Página 11/2

A.4. Especificaciones del hardware de un transponder.

Optical Module	Integrated, On-board		
Fiber type	Single-mode fiber-optic (SMF, ITU-T G.652)		
Connector type	Duplex LC/UPC connector		
Wavelength range	Extended C-band, 1528.773 nm (196.10 THz) to 1568.362 nm (191.35 THz)		
Wavelength grid	12.5 GHz or 50 GHz		
Number of DWDM channels	96 (50-GHz spacing) or 128 (37.5-GHz spacing)		
Tx output power (on)	-12 to 1.5 dBm, 0.1 dB steps, +/-1 dB accuracy		
Tx output power (off)	≤ -40 dBm		
Wavelength accuracy	+/-1.8 GHz		
Tx output optical signal-to-noise ratio (OSNR)	≥ 36 dB		
Tx channel tuning time	≤ 90 seconds across C-band		
Laser safety	IEC 60825-1 Class 1		
Modulation	16 QAM, 8 QAM, quadrature phase shift keying (QPSK)		
Forward error correction (FEC)	SD-FEC		
Modulation formats	100 Gbps QPSK	150 Gbps 8 QAM	200 Gbps 16 QAM
Optical carriers	Single-Carrier		
Line rate	136.66 Gbps	205 Gbps	273.33 Gbps
Baud rate	34.17 Gbaud		
Payload	1 x 100GBASE-R Ethernet	½ [3 x 100]GBASE-R	2 x 100GBASE-R Ethernet
FEC code	Turbo Product Code (TPC) with soft-decision, 25% OH		
Pre-FEC BER threshold	~3.4e-2 pre-FEC BER for 1e-15 post-FEC BER		
Net coding gain (NCG)	11.6 dB	-12 dB	12.3 dB
Periodical training sequence	Yes		
Differential coding	Configurable		
Rx input power range	-18 dBm to 0 dBm		
Rx input power range (unamplified/dark-fiber applications)	-32 dBm to 0 dBm	-27 dBm to 0 dBm	-25 dBm to 0 dBm
Rx overload power	+17 dBm		
Minimum OSNR (typical)	10.5 dB	15.0 dB	18 dB
Minimum OSNR (worse-case, EOL)	11.5 dB	16.0 dB	19.5 dB
Chromatic Dispersion (CD) tolerance	+/- 70,000 ps/nm	+/- 45,000 ps/nm	+/- 30,000 ps/nm
Polarization Mode Dispersion (PMD) tolerance	30 ps mean DGD	20 ps mean DGD	15 ps mean DGD
Polarization tracking speed	100 krad/s	50 krad/s	50 krad/s