

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS VERIDATE SOLA NODIS IMPONETUR VIRILISTOGA, 1948

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

Rediseño del *backbone* de la red de las entidades de la defensa del territorio central

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría en Telemática

Autora: Ing. Heidy Veitía Pérez

Tutor: Dr. C. Miguel Mendoza Reyes

Santa Clara, Cuba

2016

"Año 58 de la Revolución"

CONSULENTRANABLETTRANSPARENCIA

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Autora: Ing. Heidy Veitía Pérez

heidyvp@edu.cu

Tutor: Dr. C. Miguel Mendoza Reyes

mmendoza@uclv.edu.cu

Santa Clara, Cuba

2016

"Año 58 de la Revolución"

PENSAMIENTO

Todo parece imposible hasta que se hace.

Nelson Mandela

DEDICATORIA

... a mami, papi y Leidita

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por sus desvelos y amor constantes

Al claustro de profesores de la maestría en Telemática por sus enseñanzas

> A mi tutor, al profe Arcos y a Chinea por su ayuda desinteresada

A mis amigos y vecinos cercanos por su constante preocupación A mis compañeros de trabajo, los de antes y los de ahora, por el apoyo

A Uudiel por su comprensión

A la Revolución y las FAR por la oportunidad

Gracias.

Resumen

En la actualidad el notable crecimiento de los servicios de voz, de datos y video ha conllevado a que los proveedores de servicios de telecomunicaciones exploten y aumenten las capacidades existentes de las redes de transporte con el mínimo indispensable de recursos económicos. En las redes de transporte ópticas actuales los estándares como SONET / SDH no satisfacen las necesidades, se implementan nuevas arquitecturas que aprovechan la infraestructura desplegada y hacen frente a las diferentes demandas. En esta investigación se propone rediseñar el backbone de la red existente en las entidades de la defensa en el territorio central mediante el empleo de la tecnología OTN la cual satisface las demandas con un alto grado de calidad. Para realizar esta propuesta se consideran las características de la fibra óptica, los diferentes estándares de fibra óptica recogidos por la ITU-T y los elementos que caracterizan la transmisión a través de ella. Se analiza la evolución y tendencia de las redes de transporte ópticas y los modelos más empleados en la actualidad. Se introduce la tecnología WDM y el estándar OTN finalizando con el diseño del backbone de la red y su simulación.

ÍNDICE

Introducc	sión	. 1
Capítulo	1. Caracterización de las redes basadas en fibra óptica	.6
1.1	La fibra óptica	.6
1.2	Elementos que definen el comportamiento de la fibra óptica	.7
1.2.1	Atenuación	.7
1.2.2	Ancho de banda	. 8
1.2.3	Dispersión	.9
1.2.4	Efectos no lineales.	10
1.3	Fibras ópticas estandarizadas por la ITU-T	11
1.4	Tecnologías WDM	12
1.4.1 Aproxima	Multiplexación por División Aproximada de Longitudes de Onda ada (CWDM)	13
1.4.2	Multiplexación por División de Longitudes de Onda Densa (DWDM) 14).
1.4.3	Componentes de los sistemas WDM.	14
1.4.3.1	Transpondedores.	14
1.4.3.2	Multiplexor/ Demultiplexor óptico	15
1.4.3.3	Amplificador óptico	16
1.4.3.4	Multiplexor óptico de adición/extracción	17
1.4.4	Topologías xWDM	17
1.5	Redes de transporte óptico.	18
1.5.1	Arquitectura de la red óptica	19
1.5.2	Tendencias de la arquitectura de una red óptica.	20
1.6	Red de transporte óptico (OTN)	21
1.6.1	Capas de una OTN.	21
1.6.1.1	Capa de canal óptico.	21
1.6.1.2	Capa de sección de multiplex.	22
1.6.1.3	Capa de transmisión óptica	22
1.7	Conclusiones del capítulo	23
Capítulo ópticas	2. Identificación de los elementos que permiten evaluar las redes	25

2.1 redes ópti	Presentación de algunos de los proveedores de equipamiento para cas a nivel mundial2	25		
2.1.1	Alcatel 1625 Lambda Extreme Transport	25		
2.1.2	Ciena 6500 Series	26		
2.1.3	ONS 15454 MSTP de Cisco	27		
2.1.4	OptiX OSN 6800 Intelligent Optical Transport Platform de Huawei2	28		
2.1.5 OTN/ WD	OptiX OSN 8800 Intelligent Optical Transport Platform Integrating M/ SDH de Huawei	29		
2.2	Elementos a tener en cuenta en el diseño	30		
2.2.1	Longitud del enlace y atenuación.	30		
2.2.2	Dispersión.	31		
2.2.3	Efecto de las no linealidades	33		
2.2.4	OSNR	34		
2.3 elementos	Parámetros que permiten evaluar los sistemas WDM a partir de los sistemas wDM a partir de los	35		
2.3.1	Factor Q	35		
2.3.2	BER	36		
2.3.3	Diagrama o patrón de ojo.	37		
2.4 OptiSyste	Presentación del <i>software</i> de simulación de redes ópticas <i>m</i> .	37		
2.5	Conclusiones del capítulo	39		
Capítulo 3	3. Diseño y evaluación de una red WDM.	10		
3.1	Selección del fabricante	10		
3.2	Topología, configuración y tipo de fibra a emplear	10		
3.3	Cálculos teóricos de los elementos de diseño de la red	12		
3.4	Resultados de las simulaciones	13		
3.5	Valoración económica para la red propuesta	18		
3.6	Conclusiones del capítulo	19		
Conclusio	nes5	50		
Recomen	daciones	52		
Referencias bibliográficas5				
Glosario de términos				
Anexos				

Anexo A	
Anexo B	61
Anexo C	62
Anexo D	63
Anexo E	65

Introducción

En las últimas décadas, el notable crecimiento de internet y las demandas cada vez mayores por parte de los usuarios de capacidad de comunicaciones para diversas aplicaciones han constituido un reto para los proveedores de servicio [1]. En estas condiciones, teniendo en cuenta su notable ancho de banda, la calidad y las grandes distancias de comunicación, la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión más importante para el desarrollo de las telecomunicaciones [2, 3].

En la fibra óptica, con el empleo de la multiplexación se pueden experimentar servicios de mayor complejidad; los métodos de multiplexación, permiten un mejor aprovechamiento del ancho de banda y la utilización de la convergencia permite en la misma fibra enviar varios servicios de una manera más rápida [3, 4].

Los sistemas de multiplexación por división de longitudes de onda (WDM) permiten la transmisión simultánea de señales utilizando diferentes longitudes de onda (canales ópticos) por una misma fibra óptica, logrando así un mejor aprovechamiento de la capacidad del medio de transmisión [3-5].

La tecnología WDM, a pesar de existir desde hace varios años, es hoy en día uno de los temas de mayor interés dentro del área de la infraestructura de redes ópticas. WDM se ha consolidado como una de las tecnologías favoritas, debido a las enormes ventajas de aprovechamiento del ancho de banda, la velocidad de transmisión, las bajas pérdidas y de la infraestructura del cableado de la fibra óptica existente [6].

Las redes ópticas a nivel mundial han migrado hacia una nueva arquitectura de red en la que juega un papel importante la WDM por lo que son cada vez más las que la utilizan para ofrecer multiservicios.

Aparejado a los avances en el desarrollo del *hardware* han surgido nuevos estándares capaces de mitigar los desafíos existentes. Tal es el caso del estándar de la unión internacional de telecomunicaciones (ITU-T) G.709 comúnmente llamada la red de transporte óptico (OTN) o tecnología de recubrimiento digital [7].

1

La OTN combina la flexibilidad y la capacidad de gestión del estándar SDH con la transparencia y capacidad de la tecnología WDM logrando combinar múltiples redes y servicios tales como SONET / SDH tradicional, Ethernet, protocolos de almacenamiento y video sobre una infraestructura común. Además reduce significativamente los gastos de capital para la inversión (CapEx) y los de operación y mantenimiento (OpEx), convirtiéndose en la solución apropiada para integrar las tecnologías de redes de nueva generación.

El *backbone* de la red de las entidades de la defensa del territorio central es metro Ethernet. El mismo emplea un diseño estructurado con el empleo de VLAN (*virtual local access network*) que seccionan los diferentes servicios que se ofrecen tanto para video (videoconferencia y video bajo demanda VoD), voz (VoIP) y datos así como Internet y los servicios asociados a la nube computacional, con la desventaja de que todos compiten sobre el mismo ancho de banda que en este caso es de 1 Gbps. Además, se presentan frecuentemente tormentas de *broadcast* que provocan el *shutdown* de los puertos de los equipos provocando interrupciones en la red, lo mismo es producto de que cada uno de los servicios no tiene la misma posibilidad de acceder a los recursos de la red.

Todo ello nos lleva al problema científico que consiste en:

 ¿Cómo solucionar los problemas existentes de funcionamiento en el backbone de la red metro Ethernet de las entidades de la defensa en el territorio central con el empleo de la tecnología OTN?

En ese mismo sentido el objetivo general de la investigación es:

• Rediseñar el *backbone* de la red de las entidades de la defensa en el territorio central con el empleo de las tecnologías OTN.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean como objetivos específicos:

1. Caracterizar las tendencias en el desarrollo de las redes de transporte óptica (OTN).

2

- 2. Identificar los elementos que permiten evaluar el comportamiento de las redes de transporte ópticas.
- Diseñar una red de transporte óptica que satisfaga las necesidades existentes del backbone de la red de las entidades de la defensa en el territorio central.
- 4. Desarrollar escenarios apropiados de simulación para el estudio del comportamiento de la red propuesta.

Para organizar la investigación, en este trabajo se plantean como tareas científicas:

- Revisión de la bibliografía técnica especializada relacionada con la fibra óptica y las tendencias actuales de las redes de transporte ópticas enfatizando en el estándar G.709 de la ITU-T.
- Investigación de los aspectos fundamentales de las tecnologías de multiplexación por longitud de onda y de los elementos que componen un sistema WDM.
- Determinación de los principales proveedores a nivel mundial de equipamiento WDM y su factibilidad para el entorno en que se propone implementar.
- 4. Identificación de los elementos que caracterizan el comportamiento de sistemas WDM.
- 5. Definición de los parámetros que permiten evaluar el funcionamiento de sistemas WDM.
- Profundización en el conocimiento de la herramienta de simulación *Optisystem 7.0*, atendiendo a las características y potencialidades que posee.
- Rediseño del backbone de la red de las entidades de la defensa en el territorio central teniendo en cuenta los elementos que caracterizan su comportamiento.
- 8. Evaluación y discusión de los resultados.

La investigación se desarrolló usando los siguientes métodos:

- Método teórico inductivo deductivo, hipotético deductivo y método teórico de análisis síntesis, los cuales se emplearon para la generalización de los resultados obtenidos.
- 2. La simulación se empleó como método empírico para evaluar el comportamiento de los elementos del diseño de la red propuesta.

El presente trabajo está estructurado en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía, glosario de términos y anexos.

El primer capítulo se titula "Análisis descriptivo de las redes basadas en fibra óptica", en el mismo se caracteriza la fibra óptica. Se especifican los diferentes tipos de fibra óptica teniendo en cuenta el modo de propagación de la misma y de forma particular se describen las fibras ópticas monomodos estandarizadas por la ITU-T. Se definen los elementos que influyen en el comportamiento de la fibra óptica. Se describen las tecnologías WDM. Se presentan las redes de transporte óptico y las tendencias actuales de las mismas.

En el segundo capítulo "Identificación de los elementos que permiten evaluar las redes ópticas", se describen los principales proveedores de equipamiento para redes ópticas a nivel mundial. Se definen los elementos que permiten evaluar el comportamiento de sistemas WDM y cómo se obtienen cada uno de ellos. Además se presentan las características de *Optisystem* como herramienta de simulación de redes ópticas.

En el tercer capítulo "Rediseño del *backbone* de la red de las entidades de la defensa del territorio central", se realiza la propuesta de la red a implementar en las entidades de la defensa del territorio central. Se define en primer lugar el proveedor de equipamiento. Se presentan las diferentes características de la red que se propone. Se realizan los cálculos teóricos que corresponden a cada uno de los parámetros que permiten definir el comportamiento del *backbone* de la red así como las simulaciones mediante el *Optisystem*. Se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante las simulaciones en cada una de las secciones de transmisión óptica.

4

En las conclusiones se destaca el cumplimiento de los objetivos previstos en esta investigación. Las recomendaciones están encaminadas a enriquecer futuras investigaciones sobre el tema.

Capítulo 1. Caracterización de las redes basadas en fibra óptica.

En el presente capítulo se caracteriza la fibra óptica. Se especifican los diferentes tipos de fibra óptica teniendo en cuenta el modo de propagación de la misma y de forma particular se describen las fibras ópticas monomodos estandarizadas por la ITU-T. Se definen los elementos que influyen en el comportamiento de la fibra óptica. Se describen las tecnologías WDM. Se presentan las redes de transporte óptico y las tendencias actuales de las mismas.

1.1 La fibra óptica.

La fibra óptica desde el punto de vista físico es una guía de onda, totalmente dieléctrica, constituida por dos cilindros concéntricos vítreos de diferentes índices de refracción: cilindro interior (núcleo) y cilindro exterior (revestimiento). Es un elemento bidireccional y reversible por lo que cualquiera de sus dos extremos puede emplearse para emitir o recibir y viceversa [3, 8-10].



Figura 1.1 Estructura básica de una fibra óptica. Elaboración propia.

El modo de propagación de la luz en el interior de una guía de onda no es más que las diferentes velocidades y direcciones asociadas a todas las longitudes de onda que permiten que la radiación de la propagación se ordene de cierta forma [11, 12].

La fibra óptica atendiendo al modo en que se propaga se clasifica en: monomodo y multimodo. La cantidad de modos de propagación (N) se pueden obtener a partir del parámetro de frecuencia normalizada o número V. El mismo permite conocer si un modo en particular puede propagarse por la fibra [8, 12].

$$V = \frac{2\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} \tag{1.1}$$

Donde:

 n_1^2 : índice de refracción del núcleo.

 n_2^2 : índice de refracción del revestimiento.

d: diámetro del núcleo.

 λ : longitud de onda de la luz.

La condición de régimen monomodal va a estar dada por los siguientes valores de V:

<i>V</i> < 2.405	para fibras	ópticas	con perfi	l del índice	escalonado SI.

V < 3.5 para fibras ópticas con perfil del índice gradual GI.

 $\lambda > \lambda_c$ donde λ_c es la longitud de onda de corte que define la operación de la fibra en régimen monomodal y depende del diseño de la fibra.

1.2 Elementos que definen el comportamiento de la fibra óptica.

Varios son los elementos que limitan el alcance y despliegue de las redes de transporte ópticas. En el diseño de este tipo de redes es de vital importancia tenerlos en consideración, siendo los mismos:

- Atenuación
- Ancho de banda
- Dispersión
- No linealidades de la fibra óptica

1.2.1 Atenuación.

Se define como la pérdida de la potencia de luz a medida que la señal se propaga por la fibra, esta degradación de la señal puede limitar la distancia a la que se puede propagar la señal.

Los factores primarios que afectan a la atenuación en las fibras ópticas son la longitud de la fibra y la longitud de onda de la luz. En la figura 1.2 se muestra la

pérdida en dB/Km por longitud de onda debido a la dispersión Rayleigh, la absorción intrínseca y la atenuación total.



Figura 1.2 Pérdidas producidas en la fibra por los diferentes factores. Tomado de [13]. La atenuación en fibra se compensa con el uso de amplificadores ópticos que trabajan en la banda C y L fundamentalmente. Una tabla que relaciona el rango de longitudes de onda que comprende cada banda o ventana de trabajo es especificado en el anexo A así como se ilustra el espectro electromagnético.

1.2.2 Ancho de banda.

Capacidad de respuesta en frecuencia hasta el punto donde la potencia de la señal de salida disminuye 3 dB con respecto al máximo. El ancho de banda está relacionado con [14]:

- Dispersión modal
- Dispersión cromática
- Perfil del índice.

$$B = -\frac{0.18738}{\left[\left(\sigma_m L^R\right)^2 + \left(\frac{L\Delta\lambda}{2.35}\right)^2 (M-G)^2\right]^{1/2}}$$
(1.2)

Donde:

L: longitud en Km.

 $\Delta \lambda$: ancho espectral de la fuente óptica en nm.

 $(\sigma_m L^R)^2$: corresponde a la dispersión modal.

 $\left(\frac{L\Delta\lambda}{2.35}\right)^2 (M-G)^2$: corresponde a la dispersión cromática la cual se compone de: $\left(\frac{L\Delta\lambda}{2.35}M\right)^2$: dispersión material siendo M el coeficiente de dispersión

 $\left(\frac{22.35}{2.35}M\right)$: dispersión material siendo M el coeficiente de dispersión material.

 $\left(\frac{L\Delta\lambda}{2.35}G\right)^2$ dispersión por guía de onda siendo G el coeficiente de dispersión por guía de onda.

Los sistemas WDM son afectados fundamentalmente por la dispersión cromática si se tiene en cuenta que en su mayoría se establecen sobre fibra óptica monomodo en la que prevalece el modo cromático y depende esencialmente del ancho espectral de la fuente óptica $\Delta\lambda$, entonces:

$$B_T = B_C = \frac{0.18738}{\frac{L\Delta\lambda D}{2.35}}$$
(1.3)

Siendo D la dispersión en ps /(nm.km).

1.2.3 Dispersión.

Ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra. El resultado de la dispersión es una distorsión de la señal que limita la longitud del enlace, el ancho de banda de la fibra y produce errores en la decodificación [8, 15]. Los dos tipos de dispersión que afectan a los sistemas WDM son la dispersión cromática y la dispersión por el modo de polarización (PMD):

La dispersión cromática: se puede corregir para alcanzar distancias de miles de kilómetros y tasas binarias del orden de los Gbps. Esto se logra empleando fibras con mínima dispersión en la banda C o introduciendo fibras compensadoras de la dispersión (DCF) que trabajen en la misma banda de la fibra escogida. Además, el DCF se caracteriza por coeficiente de dispersión alto y negativo (en el orden de los -85 a los – 100 ps/nm km); mayor atenuación, no linealidad y tiene un amplio ancho de banda [15-18].

<u>PMD:</u> efecto de dispersión óptico, que limita la calidad de la transmisión a altas velocidades, por encima de los 10 Gbps [18]. La fibra óptica no es perfecta y los dos modos sufren un retraso que provoca un ensanchamiento de la señal, aumentando la incertidumbre en la detección de los símbolos. Como

consecuencia se incrementa la probabilidad de error de bit (BER) en la transmisión [16, 19].

1.2.4 Efectos no lineales.

Efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda. Atentan contra la calidad de la transmisión y el alcance de los enlaces. Son producto principalmente de los altos valores de potencia de la señal cuando se requieren transmisiones a altas velocidades y la pequeña área efectiva de la fibra óptica A_{eff} [20, 21].

Considerando que el índice de refracción del vidrio depende de la potencia óptica a través del material [22]:

$$n = n_o + \frac{n_2 P}{A_{eff}} \tag{1.4}$$

Donde:

n_{0:} índice de refracción del núcleo de la fibra óptica de nivel óptico bajo.

n_{2:} coeficiente del índice de refracción no lineal.

P: potencia óptica.

A_{eff}: área efectiva del núcleo de la fibra óptica en m².

Por tanto se puede decir que las no linealidades se eliminan cuando minimizo la potencia o maximizo el área efectiva. En la práctica se maximiza el área efectiva en el proceso de fabricación [22, 23].

Aunque existen otros, en [20, 21] se describen los efectos no lineales que afectan principalmente a la transmisión WDM en las fibras ópticas siendo estos:

- SPM (Auto modulación de fase).
- XPM (Modulación cruzada de fase).
- FWM (Mezclado de cuatro ondas).

<u>SPM:</u> este fenómeno surge debido a que el índice de refracción de la fibra induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. De esta forma, las diferentes partes del pulso sufren diferentes

desplazamientos de fase (chirp), que modificarán los efectos de dispersión sobre el pulso.

<u>XPM:</u> produce una alteración de la fase de las longitudes de onda la cual deteriora la relación señal a ruido óptica. La penalidad del sistema por el efecto de la XPM es mayor con la reducción del espaciamiento entre canales y el aumento del número de estos. La XPM se reduce con el empleo de fibras con mayor área efectiva y menor índice de refracción no lineal.

<u>FWM</u>: se origina por la naturaleza no lineal del índice de refracción de la fibra óptica. Ocurre cuando se propagan señales de frecuencia muy parecida generando nuevas frecuencias [24].

La FWM aumenta con la longitud de la fibra. FWM es muy severa en sistemas WDM ya que en estos se emplea el mismo espaciamiento en frecuencia por lo que las portadoras generadas tendrán el mismo espaciamiento que las del sistema original provocando interferencias y diafonías que van a degradar la calidad de la señal.

La magnitud de FWM también se va a ver afectado por la dispersión. Su magnitud es inversamente proporcional a la dispersión de la fibra por lo que es mayor en el punto de cero dispersión como se muestra en 1.3.



Figura 1.3 Eficiencia FWM en fibra óptica monomodo. Tomado de [20].

1.3 Fibras ópticas estandarizadas por la ITU-T.

La ITU-T ha estandarizado en [25] un conjunto de fibras monomodo, de las cuales las de mayor utilización en sistemas WDM se relacionan:

- Recomendación G.652 Fibra óptica monomodo estándar: λ = 1310 nm y λ = 1550 nm [26].
- Recomendación G.653 Fibra óptica monomodo con dispersión desplazada (*dispersion-shifted*): λ =1550 nm y λ =1310 nm [27].
- Recomendación G.655 Fibra óptica monomodo con dispersión desplazada no nula (NZ-DSF: Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) [28].

La fibra óptica G.652 es la más barata y fue la primera que se desplegó en las redes públicas para la transmisión de señales, representa el mayor por ciento de las fibras instaladas a nivel mundial. La G.652 es la fibra instalada en la red nacional de fibra óptica de Cuba. Optimizada para los sistemas WDM.

En [26] se describe la fibra monomodo G.652 cuya longitud de onda de dispersión nula está situada en torno a 1310 nm y que puede utilizarse en 1550 nm. En esta región la atenuación es cerca de un 40 % menor que en los 1310 nm, pero la dispersión cromática es alta (17 ps / nm km) en comparación con la de otras fibras que trabajan en estas misma longitud de onda, por lo que en sistemas de transmisión a altas velocidades es necesario compensarla mediante el empleo de DCF.

La G.652 puede utilizarse en enlaces WDM hasta 10 Gbps con un espaciado entre canales de 100 / 50 / 25 / 12.5 GHz [29] . Para velocidades de 40 Gbps y superiores se agudizan los efectos de las no linealidades y es necesario utilizar otras técnicas avanzadas de modulación.

1.4 Tecnologías WDM.

En los sistemas que requieren grandes velocidades de transmisión se ha adoptado la tecnología WDM, que permite aprovechar la capacidad de transporte del medio físico: la fibra óptica.

WDM es una tecnología que multiplexa varias señales ópticas sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, usando luz procedente de un láser si se emplean fibras ópticas monomodo o LED cuando se utilizan fibras ópticas multimodo. Como otras técnicas de multiplexado la WDM necesita un espaciamiento entre los canales para evitar interferencias entre estos [30-34]. La mayoría de los sistemas WDM operan en

cables de fibra monomodo aunque algunos sistemas pueden operar sobre fibra multimodo [31].

WDM tiene la posibilidad de amplificar todas las longitudes de onda a la vez sin convertirlas a señales eléctricas, además incorpora la ventaja de transportar señales de diferentes velocidades y tipos simultáneamente y transparentemente sobre fibra o sea independientemente del protocolo o su velocidad [35].



Figura 1.4 Sistema WDM. Tomado de [32].

1.4.1 Multiplexación por División Aproximada de Longitudes de Onda Aproximada (CWDM).

Los planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división aproximada de longitud de onda se aprobaron en la Recomendación de la ITU-T G.694.2 de diciembre del 2003. CWDM se diseñó para permitir la transmisión simultánea de varias señales ópticas a 2.5 Gbps sobre una fibra monomodo con la suficiente separación para permitir el uso de emisores ópticos no refrigerados. El espacio entre dos longitudes de onda adyacentes es de 20 nm (2500 GHz). Puede utilizar hasta 18 longitudes de onda definidas en el intervalo de 1270 a 1610 nm alcanzando una distancia aproximada de unos 80 km [36, 37].

Al ser una tecnología menos compleja los componentes ópticos de CWDM presentan menor costo; aunque limitada en cuanto a capacidad y distancia, se adapta perfectamente a las necesidades de las redes empresariales y metropolitanas de corta distancia. Se beneficia de dos características

esenciales: mayor espaciamiento de longitudes de onda y mayor espectro óptico [38].

De esta forma, como se específica en [36, 38] con CWDM se pueden utilizar láseres con un mayor ancho de banda espectral y no estabilizada.

1.4.2 Multiplexación por División de Longitudes de Onda Densa (DWDM).

En [39] se define los planes espectrales, características y aplicaciones de la multiplexación por división de longitud de onda densa. DWDM pertenece a la categoría WDM de banda angosta y está diseñado para un espaciamiento entre canales de 100 GHz (~0.8 nm o menor) aunque, se pueden emplear espaciamientos entre canales no uniformes. Según [37] debido a este espaciamiento, DWDM puede acoplar ocho o más canales dentro de la banda de los 1550 nm. Puede alcanzar comunicaciones de cientos de kilómetros.

En [40] se analiza que DWDM no es solo una técnica para aprovechar la capacidad de una red de fibra óptica, se emplea como una tecnología robusta en el *backbone* de redes multiservicios y redes de acceso móvil, que permite satisfacer el crecimiento en volumen y complejidad que presentan los servicios de telecomunicaciones.

Las características fundamentales de estos sistemas unidas a las de CWDM se muestran en el anexo C.

1.4.3 Componentes de los sistemas WDM.

Un nodo WDM está compuesto básicamente por los transpondedores (OTU), los multiplexores ópticos (OMUX), demultiplexores ópticos (ODMUX) y los amplificadores ópticos (OA).

1.4.3.1 Transpondedores.

El transpondedor es un dispositivo óptico el cual adapta la señal proveniente del cliente a una longitud de onda acorde a la Recomendación G.694.1 para su transmisión en la fibra óptica.

Está compuesto por varios módulos entre los que se encuentran los láseres y los fotodetectores. En el transpondedor se implementa el estándar OTN

definido en la Recomendación G.709 de la ITU-T. En él se adicionan bytes de cabecera para realizar corrección de errores y para administración y gestión de la red. Monitorea la calidad de la señal de entrada y de salida a la red [41].

Emisor de luz o fuente de luz: dispositivo en el lado transmisor que se encarga de convertir la señal eléctrica en pulsos de luz. Este proceso de conversión o modulación se puede realizar a través de la modulación externa de una onda continua de luz o usando un dispositivo que puede generar luz modulada directamente.

Con WDM el emisor de luz que se utiliza es el láser semiconductor que tiene un buen rendimiento, longitud de onda precisa, un ancho del espectro estrecho, suficiente potencia y control de los cambios abruptos en la frecuencia del láser con relación a su frecuencia central conocido como chirp.

Cuando los láseres semiconductores son modulados directamente, el chirp puede llegar a ser un factor limitador a altas velocidades (por encima de 10 Gbps). Por otro lado, la modulación externa ayuda a limitar el chirp.

Los tipos de láseres semiconductores habituales son: láseres monolíticos *Fabry-Perot* y los de realimentación distribuida (DFB: *distributed feed- back*). Siendo el segundo tipo el empleado en aplicaciones WDM [7].

<u>Fotodetector</u>: empleado en el lado del receptor para recuperar las señales transmitidas. Se utilizan fundamentalmente dos tipos: el fotodiodo PIN (PIN: *positive intrinsic negative*) y el fotodiodo de avalancha (APD: *avalanche photo diode*).

En el fotodiodo PIN la luz es absorbida en vez de emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. En el APD la ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación, tiene mayor sensibilidad de recepción y a la temperatura, mayor exactitud y pueden tener requerimientos de intensidad mayores [41-43].

1.4.3.2 Multiplexor/ Demultiplexor óptico.

El multiplexor (OMUX) dispositivo de derivación con dos o más puertos de entrada y un puerto de salida en el que la señal luminosa en cada puerto de entrada se limita a una gama de longitudes de onda previamente seleccionada y la salida es la combinación de las señales luminosas procedentes de los puertos de entrada. Mientras que el demultiplexor (ODMUX) realiza el proceso inverso.

Los OMUX y ODMUX pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal [23].

Varias son las técnicas que se pueden emplear para la implementación de los OMUX y ODMUX entre las más populares se encuentran los interferómetros como el de *Mach – Zenhder, Michelson* y *Sagnac*. La selección por parte de los fabricantes se basa en el tipo de aplicación en el que se desee emplear, la cantidad de lambdas a multiplexar / demultiplexar y la razón de bits de cada una de estas.

1.4.3.3 Amplificador óptico.

El amplificador óptico (OA) se utiliza en las redes WDM para compensar la atenuación en los enlaces evitando la complejidad del empleo de repetidores para regenerar la señal. El OA ha hecho posible el poder amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO (*optical electric optical*) aumentando así la fiabilidad del sistema de transmisión [41].

Se pueden destinar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la demultiplexación, dado que ambos procesos introducen pérdidas en el sistema. Son dispositivos independientes del formato de modulación de la señal óptica y su velocidad.

Los amplificadores ópticos que se emplean en los sistemas WDM pueden ser de tipo *Booster* (BA), preamplificador (PA) y amplificador de línea (LA) [35].

Los amplificadores ópticos más empleados en sistemas WDM según la tecnología que emplean en su fabricación son [35]:

- Amplificadores de Fibra dopada (DFA).
- Amplificadores Raman.

Los amplificadores ópticos EDFA trabajan en las bandas C y L. Para el empleo en sistemas de larga y ultra larga distancia se emplean los amplificadores Raman, estos permiten amplificar longitudes de onda de sistemas WDM que utilicen las bandas de trabajo S, C y L [37, 44].

1.4.3.4 Multiplexor óptico de adición/extracción.

Un multiplexor óptico de adición/ extracción (OADM) cuenta con funcionalidades para extraer una o varias longitudes de onda de una señal compuesta, recibida en el puerto de entrada y enviarlas a un puerto de extracción. Además inserta una o varias longitudes de onda presentes en los puertos de inserción hacia el puerto de salida para formar parte de la señal compuesta resultante.

Se ubican en puntos intermedios, lo que permite topologías de redes punto a multipunto, anillos y mallas. Se clasifican en fijos (FOADM) y reconfigurables (ROADM) o sintonizables.

Como se explica en [41] el FOADM inserta / extrae las longitudes de onda y estas se mantienen hasta que el operador intervenga en el sistema y lo cambie físicamente. Por su parte el ROADM selecciona dinámicamente las longitudes de onda y los cambios en la configuración se realizan a través de un terminal de gestión.

Existen varias tecnologías para la fabricación de los ROADM, entre ellas se encuentran el Bloqueador de longitudes de onda (WB), el conmutador PLC (*Planar Lightwave Circuit*) y el conmutador selectivo de longitud de onda (WSS). Esta última es la más empleada por los fabricantes debido a la mayor flexibilidad que brinda a la hora de seleccionar las lambdas, es la más costosa.

1.4.4 Topologías xWDM.

En las redes de xWDM se pueden encontrar las siguientes topologías de red: punto a punto, anillo, malla y combinaciones de estas.[35]

<u>Topología punto a punto:</u> se puede implementar con o sin OADM. Presentan velocidades de canales entre 10 y 40 Gbps, alta integridad y confiabilidad de la señal, y rápida restauración de trayectoria. Se aplican en redes de larga y ultra larga distancia donde la distancia entre transmisor y receptor puede ser varios

cientos de kilómetros combinando multiplexores terminal óptico (OTM) con amplificadores de línea ópticos (OLA).

<u>Topología de anillo:</u> los anillos son las arquitecturas más comunes encontradas en áreas metropolitanas y en tramos de unas pocas decenas de kilómetros.

Con el uso de OADM, las topologías de anillo permiten a los nodos tener acceso a los elementos de red, tales como *routers, switches* y servidores por lo cual las longitudes de onda que se generen en un nodo pueden ser extraídas en cualquiera de los elementos que componen la red. En este tipo de topología se pueden emplear esquemas de protección para el tráfico estableciendo rutas alternativas entre los nodos.

<u>Topología de malla:</u> es la más robusta, versátil, escalable y orientada a proteger el servicio dado el gran número de posibles trayectorias entre dos nodos. Establece rutas de protección, permite balancear el tráfico y así evitar congestiones o cuellos de botella. La escalabilidad radica en la posibilidad de insertar y eliminar nodos en la red de forma dinámica con la menor afectación de servicio posible. Requiere mayor cantidad de protocolos para el manejo del tráfico y la administración de la red.



Figura 1.5 Combinación de las topologías malla, punto a punto y anillo. Elaboración propia.

1.5 Redes de transporte óptico.

Una red óptica es aquella red conformada por nodos que se encuentran interconectadas entre sí mediante un medio de transmisión en este caso la fibra óptica. La transmisión debe de ser por medio de la fibra óptica pero la conmutación puede ser de tipo óptico, eléctrico o híbrido.

1.5.1 Arquitectura de la red óptica.

En una red óptica los nodos implementados sobre plataformas SONET/SDH o ATM pueden proporcionar la variedad de servicios demandados, cada servicio con un modelo de tráfico diferente, calidad de servicio (QoS) y capacidad.



Figura 1.6 Arquitectura de una red óptica. Tomado de [45].

Con SONET/SDH esta provisión de servicios es compleja y de larga duración. La planificación y el análisis de las redes, el aprovisionamiento de multiplexores, la reconfiguración mediante Sistemas *Cross-Conect* Digitales (DCS), la verificación de caminos y circuitos y la creación del servicio puede tardar varias semanas, a diferencia de los equipos WDM.

WDM proporciona valor añadido, por su rápido y flexible aprovisionamiento de protocolos, transparente en cuanto a la velocidad, centralización de datos, servicios protegidos, junto a la posibilidad de ofrecer nuevas y más altas velocidades a menor costo.

El subsistema de multiplexación debe llevar a cabo la conformación de los paquetes y el múltiplex basado en ATM, en SONET o la combinación de los dos, donde la combinación ATM/ SONET se beneficiará de las ventajas de ambos sistemas.

La capa WDM proporciona la flexibilidad para mapear el tráfico generado en las longitudes de onda múltiple y la topología básica es un anillo de fibra óptica que interconecta varios puntos de acceso que usan los canales ópticos.

1.5.2 Tendencias de la arquitectura de una red óptica.

En la actualidad los operadores migran a redes donde el protocolo IP es el sustrato para el intercambio de información y permite dotar a la red de cierta inteligencia. Por lo tanto el desarrollo de las redes de transporte óptico se está moviendo de una topología de red de transmisión pura a una red de valor añadido.

Para la red de transmisión pura los operadores centran sus esfuerzos en factores como la distancia, la velocidad y la capacidad mientras que para la red de valor añadido se centran en la posibilidad de explotar las capacidades de multiservicios, la alta eficiencia en el uso de los recursos y la inteligencia de la red.

Se han desarrollado diversos modelos que persiguen obtener la red de valor añadido con altos niveles de integración. El modelo al cual tienden las redes de transporte ópticas está compuesto por dos capas.

En este modelo juega un papel determinante el estándar OTN para la transmisión y enrutamiento de las señales entre los diferentes nodos que conforman la red.

En este tipo de red el enrutamiento y la conmutación se realizan a nivel óptico mediante los *cross* conectores interconectados por fibras que constituyen las topologías de nivel físico y los *routers* IP interconectados por *lighpaths* constituyen el nivel virtual [46]. La principal característica de este modelo es la independencia que presenta con respecto a las redes de transporte [47].



Figura 1.7 Modelo de red de transporte óptica inteligente. Tomado de [46].

1.6 Red de transporte óptico (OTN).

La OTN combina la flexibilidad y la capacidad de gestión del estándar SDH con la transparencia y capacidad de la tecnología WDM logrando combinar múltiples redes y servicios tales como SONET / SDH tradicional, Ethernet, protocolos de almacenamiento y video sobre una infraestructura común.

El estándar OTN describe un modelo operativo común para la administración, supervisión y mantenimiento de las redes de transporte. Reduce significativamente los gastos de capital para la inversión (CapEx) así como de operación y mantenimiento (OpEx).

Su principal aplicación se encuentra en el manejo de señales en el dominio óptico. Brinda la posibilidad de realizar el aislamiento de errores de una forma rápida.

Permite gran transparencia a la hora de la fabricación de los equipos puesto que pueden desconocer las características de las señales clientes y eliminar los componentes electrónicos requeridos para la conversión entre los dominios eléctrico y ópticos.

1.6.1 Capas de una OTN.

Una red de transporte óptica consta de tres capas: la capa de canal óptico (OCh), de sección de multiplex óptico (OMS) y de sección de transmisión óptica (OTS) [48].

1.6.1.1 Capa de canal óptico.

Proporciona la interconexión de redes extremo a extremo para el transporte de señales clientes con variedad de formato. Ejecuta el proceso de tara de canal óptico para asegurar la integridad de la información. Esto no es más que el proceso de monitoreo del canal óptico mediante informaciones generadas por el nodo fuente y extraídas por el de destino [48].

En esta capa también se ejecutan las funciones de operación y mantenimiento del canal óptico para garantizar la provisión de conexiones, el intercambio de parámetros de calidad de servicio y el estado de la red.

1.6.1.2 Capa de sección de multiplex.

Ofrece la funcionalidad para la interconexión de redes ópticas. Asegura la integridad de la información adaptada a la sección de multiplex.

La información proveniente de la capa de canal óptico es adaptada a la capa de sección de multiplex y se le agrega una cabecera que se utiliza en la terminación de camino de la sección de multiplex óptico. La información característica de esta sección se le denomina unidad multiplex óptica de orden n (OMU-n). En la terminación de camino de esta capa se realiza la evaluación de la calidad de la transmisión y la detección e indicación de defectos de transmisión [49].

1.6.1.3 Capa de transmisión óptica.

En esta capa se lleva a cabo el transporte de la señal proveniente de la OMS entre puntos de acceso. Se definen las características físicas de la interface: frecuencia o longitud de onda de la portadora, niveles de potencia de la fuente, características de la relación señal a ruido [48].

La señal característica de esta capa es el módulo de transporte óptico de orden n (OTM-n). Esta sección está conformada físicamente por un multiplex óptico de orden n y un canal de supervisión óptico (OSC) generado en esta misma capa.

• Encapsulado de la señal cliente.

Existen diversos criterios o enfoques sobre cómo se debe transmitir la señal cliente a través de una red de transporte óptica.

Uno de ellos se refiere a transmitir la señal cliente en su formato original asignándole una determinada longitud de onda y enviar la información necesaria para su operación y mantenimiento (OAM) en otra longitud de onda de manera independiente.

Esta variante tiene grandes desventajas ya que en el proceso de transmisión la señal cliente y la señal OAM no necesariamente experimentan los mismos fenómenos al transitar por longitudes de ondas diferentes.

El otro criterio responde al tratamiento de la señal cliente como una señal de carga útil digital y encapsularla en una trama incluyendo las facilidades OAM,

las cuales van a ser insertadas en la cabecera de dichas tramas, este proceso se conoce como encapsulado digital. En la figura 1.8 se puede apreciar el proceso de encapsulado de una señal cliente independiente de su formato.



Figura 1.8 Proceso de encapsulación de una señal cliente. Elaboración propia.

• Velocidades de las unidades de transporte óptico.

En la Recomendación G.709 se encuentran estandarizadas, 4 velocidades o razones de bits para las OPU / ODU / OTU. Para hacer referencia a ellas de manera general se denotan como la unidad seguida del índice k, los valores que puede tomar el índice k son 1; 2; 3; 4 [7].

En la tabla 1.1 se muestran las distintas razones de bits para cada uno de los valores de *k* en las señales OTU y la correspondiente al área de carga útil de la OPU.

Valor de k	Velocidad de la OTUk	Velocidad del área de carga útil de la OPU
1	255 / 238 x 2.5 Gbps	2.5 Gbps
2	255 / 237 x 10 Gbps	238 / 237 x 10 Gbps
3	255 / 236 x 40 Gbps	238 / 236 x 40 Gbps
4	255 / 227 x 100 Gbps	238 / 227 x 100 Gbps

Tabla 1	1.1	Velocidades	de	las	οτυ	v	SU	carga	útil
		VCIOCIAAACS	uc	143	010	y	Ju	carga	um

1.7 Conclusiones del capítulo.

La fibra óptica se presenta como el medio físico a emplear si se tiene en cuenta las amplias posibilidades de la misma siendo la fibra monomodo G.652 la de mayor empleo en los sistemas de comunicaciones actuales. Sin embargo, en su despliegue y diseño se deben tener en cuenta parámetros como la atenuación, el ancho de banda, la dispersión y las no linealidades los cuales restringen su utilización.

Para un mayor aprovechamiento del ancho de banda de la misma se emplean las tecnologías de multiplexación. Las de mayor empleo a nivel mundial son CWDM y DWDM, las que se despliegan en redes metropolitanas y de larga distancia respectivamente. CWDM es más económica pero con ella solo se alcanzan distancias menores a los 80 km mientras DWDM permite la utilización de una mayor cantidad de longitudes de onda, distancias superiores y velocidades de transmisión de hasta 100 Gbps.

Las redes de transporte óptica han evolucionado hacia redes de valor añadido con altos niveles de integración de funcionalidades de multiplexación, enrutamiento, gestión y supervisión lo cual permite que las redes WDM manejen señales de diversos protocolos y razones de bits independientes del tráfico.

Capítulo 2. Identificación de los elementos que permiten evaluar las redes ópticas.

En el capítulo se describen los principales proveedores de equipamiento para redes ópticas a nivel mundial. Se definen los elementos que permiten evaluar el comportamiento de redes ópticas y cómo se obtienen cada uno de ellos. Además se presentan las características de *Optisystem* como herramienta de simulación de redes ópticas.

2.1 Presentación de algunos de los proveedores de equipamiento para redes ópticas a nivel mundial.

El desarrollo de las redes de telecomunicaciones y de forma particular el de redes de fibra óptica se encuentra en ascenso vertiginoso. En ello tienen vital importancia los aportes de los fabricantes de estas tecnologías. En este campo se destacan *Alcatel - Lucent, Huawei y Ciena* según datos extraídos de [50].



Figura 2.1 Líderes en el mercado del hardware de redes ópticas. Tomado de [50].

Varias plataformas de diversos fabricantes han sido desarrolladas para su empleo en las redes DWDM. Entre ellos se encuentran el *Alcatel 1625 Lambda Extreme Transport, Ciena* 6500 Series, ONS 15454 MSTP de Cisco, OptiX OSN 6800 y el OSN 8800 de Huawei.

2.1.1 Alcatel 1625 Lambda Extreme Transport.

Diseñado para redes de larga y ultra largas distancias con una gran capacidad de transporte de señales [51].

Puede transmitir a 2.5 / 10 / 40 Gbps en la banda L extendida. Procesa hasta 128 longitudes de onda a 10 Gbps (1.28 Tbps) alcanzando 4000 km y 64 longitudes de onda a 40 Gbps llegando a los 1000 km sin regeneración eléctrica. La separación entre canales ópticos es de 50 GHz cuando la velocidad es menor de 10 Gbps y 100 GHz cuando opera a 40 Gbps.

Los transpondedores son sintonizables lo que reduce los costos y brinda mayor flexibilidad. Utiliza algoritmos de corrección de errores EFEC (*enhanced forward error correction*) y UFEC (*Ultra forward error correction*).

Es compatible con las fibras G.652 y G.655 (*FITEL TrueWave y Corning – LEAF*). Los amplificadores empleados son del tipo Raman y presenta módulos compensadores de dispersión cromática integrados al sistema.

Está diseñado para un desempeño como ROADM en topología de malla con protección 1 + 1 proporcionando gran capacidad y flexibilidad. Garantiza una calidad del servicio alta con un BER de 10⁻¹⁶.

Presenta un sofisticado algoritmo para la gestión del desempeño y de las fallas a través del recuperador digital y un canal de supervisión a 155 Mbps. Esto permite la detección automática de fallos, su aislamiento y restablecimiento, el monitoreo de las condiciones internas del sistema y el estado de las señales de entrada.

2.1.2 Ciena 6500 Series.

El Ciena 6500 series [52] soporta interfaces DWDM a 2.5 / 10 / 40 / 100 Gbps mientras que para CWDM cuenta con interfaces a 2.5 Gbps. Las interfaces para las velocidades de 40 y 100 Gbps se basan en la óptica coherente, específicamente en la detección coherente, modulación DP – QPSK (*dual polarization quadrature phase shift keying*) y avanzadas técnicas de procesamiento digital de señales para maximizar el retorno aumentando en 10 veces la capacidad de tráfico de la red existente.

Soporta hasta 88 longitudes de onda empleando la banda de trabajo C de la fibra óptica con espaciamientos de 50 / 100 GHz. La matriz de *cross* conexión de bajo

26

orden tiene capacidad de 20 Gbps y 80 Gbps mientras la de alto orden 160 Gbps y 640 Gbps. Diseñado para fibras G.652 y G.655.

Compensa electrónicamente la dispersión, eliminando el empleo de compensadores fijos y los amplificadores asociados. Incluye ROADM basados en la tecnología WSS que permite una inserción, extracción y *passthrough* de longitudes de onda con gran flexibilidad. Además permite la restauración óptica.

Puede asumir protecciones 1 + 1 MSP (*multiplexing section protection*), 1 + 1 lado línea OTN, 1 + 1 a nivel de transpondedores y SNCP (*subnetwork connection protection*). Para el tráfico Ethernet permite protecciones punto a punto, multipunto a multipunto y anillo de protección Ethernet (G.8032).

Permite el arranque automático mediante la función servicio en línea y prueba automática (SLAT), el aprovisionamiento punto a punto, la visualización y solución de problemas a través de todas las capas, el monitoreo centralizado de fallos, eventos y desempeño, el autodescubrimiento de la topología de la red, el monitoreo de la potencia de cada uno de los canales a la salida de los amplificadores ópticos y la ecualización dinámica de esta.

2.1.3 ONS 15454 MSTP de Cisco

El Cisco ONS 15454 MSTP (*Multi Service Transport Platform*) descrito en [53] es un sistema DWDM de nueva generación con funcionalidades ROADM que brinda una gran flexibilidad.

Soporta 128 longitudes de onda utilizando las bandas de trabajo C y L con un espaciado de 50 y 100 GHz. Puede ser utilizado en redes metropolitanas y de larga distancia alcanzando los 2000 km sin regeneración eléctrica. Para esto emplea amplificadores ópticos tipo Raman y EDFA.

Esta plataforma permite multiplexar, transportar, proteger y monitorear servicios desde 100 Mbps hasta 40 Gbps de diversos formatos. Los transpondedores para el procesamiento de estas señales son sintonizables en toda la banda de trabajo del sistema y emplean técnicas FEC y EFEC.

27
Monitorea los servicios usando la tecnología del recubridor digital con un canal de servicio óptico integrado para garantizar la fiabilidad del servicio. Realiza el autodescubrimiento de la topología de la red. Los anillos pueden estar compuestos por hasta 20 nodos. Cuenta con un sistema de control automático de la potencia óptica. Además suprime rápidamente el transiente en caso de corte en la fibra óptica.

2.1.4 OptiX OSN 6800 Intelligent Optical Transport Platform de Huawei.

El OptiX OSN 6800 de Huawei [54] es empleado en el *backbone* de redes de larga distancia, en áreas de *backbones*, en redes locales, en las capas de convergencia y del núcleo de redes metropolitanas. Integra diversas funciones de cualquier granularidad en el rango de 100 Mbps a 40 Gbps, ASON, manejo y protección.

En aplicaciones DWDM utiliza la banda C con un espaciamiento entre longitudes de onda de 100 GHz para 40 longitudes de onda, con velocidades de 2.5 / 5 / 10 / 40 Gbps. Aunque la capacidad total del sistema es de 80 canales con una separación de 50 GHz y velocidades de 10 / 40 Gbps. Para redes CWDM emplea velocidades hasta de 5 Gbps con un máximo de 80 km de transmisión.

Soporta servicios de la jerarquía SDH, SONET, Ethernet, SAN, OTN y de video, implementados mediantes tarjetas. La configuración de los mismos se realiza a través de la creación automática de trayectos ópticos punto a punto.

Realiza el descubrimiento automático de los elementos de red y de la topología de esta. Los transpondedores cuentan con técnicas FEC y AFEC (*advanced forward error correction*). Cuenta con un canal de supervisión óptica a 16 Mbps.

El OptiX OSN 6800 soporta la transmisión hibrida de señales a 10 Gbps, señales coherentes y no coherentes a 40 Gbps, señales coherentes a 100 Gbps y cualquier combinación de estas. Esto permite a las redes aumentar su capacidad sin afectar los parámetros de su implementación y la protección de la inversión mientras se satisfacen las demandas de ancho de banda.

Utiliza las fibras G.652, G.654 y la G.655 LEAF y amplificadores EDFA y Raman.

Emplea modulación DQPSK para 100 GHz y 50 GHz de separación entre longitudes de onda en transmisiones a 40 Gbps. Además en transmisiones a 10 Gbps emplea modulación NRZ para 50 GHz y 100 GHz de separación entre canales respectivamente.

Provee protección a nivel de equipamiento y a nivel de red. Entre ellas protección de línea óptica, de canal óptico, SNCP y Ethernet.

2.1.5 OptiX OSN 8800 Intelligent Optical Transport Platform Integrating OTN/ WDM/ SDH de Huawei

El OptiX OSN 8800 descrito en [55, 56] se localiza en el núcleo de las áreas de *backbone* metro y regional para ofrecer integración multiservicios y transporte eficiente con una perfecta conexión *end to end*. Permite la combinación de un nivel óptico dinámico y un nivel eléctrico flexible en una arquitectura propia y novedosa.

A nivel óptico puede configurarse con 40 y 80 longitudes de onda espaciadas a 100 y 50 GHz respectivamente, 10/ 40 /100 Gbps OTU y 10*10 Gbps OTU. En CWDM soporta 8 longitudes de onda 2.5 / 5 Gbps. A nivel eléctrico posibilita el empleo de unidades de datos ópticos ODU_k de varios niveles, muxponder y convergencia de nivel 2 (L2). Implementa OAM basado en OTN.

Emplea amplificadores EDFA, RAMAN y configuraciones de EDFA + RAMAN.

Se pueden configurar protección para el equipamiento y la red como protección de línea, de canal óptico y de datos y SNCP.

Funciones como el mapeo, multiplexación, *cross* conexión, cabecera embebida, protección y OAM se potencian en el nuevo sistema.

Los transpondedores del lado del cliente pueden manejar longitudes de onda de 850 /1310 /1550 nm. Para WDM, entre otras, cuenta con técnicas FEC y AFEC.

Agrega funciones de ejecución y monitoreo de alarmas y soporta fibra G.652, G.653 y G.655.

2.2 Elementos a tener en cuenta en el diseño.

Para el diseño del *backbone* de la red se deben tener en cuenta varios elementos. Tomando en consideración que los mismos basan su funcionamiento en la fibra óptica se hace necesario analizar el comportamiento de la capa óptica por lo que en su diseño no se pueden pasar por alto el comportamiento de:

- Atenuación.
- Dispersión.
- Efecto de las no linealidades (XPM, SPM y FWM).
- Relación señal a ruido óptica (OSNR).

2.2.1 Longitud del enlace y atenuación.

El cálculo de la longitud y la atenuación entre segmentos de una red constituyen elementos a tener en cuenta ya que en función de ellos se determinan las distancias entre los nodos de la red y si se requieren amplificadores de línea ópticos. Estos parámetros se relacionan a través de la ecuación del cálculo de enlace que está dada por la siguiente expresión:

$$L(Km) = \frac{\left[L_{Tramo} \left(P_{T_x} - S - M - n_c \alpha_c - P_{IS} - IL\right)\right]}{\alpha_{FO} L_{Tramo}}$$
(2.1)

Siendo:

L_{Tramo}: longitud de la bobina de cable de fibra óptica en km.

N_c: es el número de conectores en el enlace.

 α_c : atenuación en dB introducida por los conectores.

IL: perdidas en dB introducida por los elementos que conforman el nodo.

M: margen de operación del sistema.

P_{Tx}: potencia del transmisor óptico en *dBm*.

S: sensibilidad del receptor óptico en *dBm*.

 α_{FO} : coeficiente de atenuación de la fibra óptica en *dB/ km*.

P_{IS}: penalización por Interferencia Intersímbolo en dB.

De forma práctica en un segmento de la red la atenuación de la señal óptica AL en dB se calcula:

$$AL(dB) = L\alpha_{FO} + M + n_c\alpha_c + IL$$
(2.2)

2.2.2 Dispersión.

Como se analizó la dispersión cromática es uno de los elementos que afectan la fibra óptica. En el diseño de un sistema WDM se hace necesario calcular la dispersión del enlace para definir si es necesario o no la utilización de técnicas de compensación y su ubicación.

En este cálculo influyen los valores de dispersión de la fibra óptica empleada, la característica de dispersión acumulada que presentan los receptores ópticos así como la velocidad de operación de cada una de las longitudes de onda de la sección.

La dispersión cromática para cada sección de multiplexación óptica (OMS) se calcula por la siguiente expresión:

$$D(^{ps}/_{nm}) = L \times CoeficienteCD$$
(2.3)

Donde:

L: distancia en km.

Coeficiente CD: coeficiente de dispersión cromática en la ventana de trabajo en ps/nm km.

La distancia limite de dispersión se puede calcular a través de la expresión:

Distancia limite dispersión = $\frac{D}{Coeficiente CD}$ (2.4)

La tabla 2.1 relaciona las distancias que se pueden alcanzar sin el empleo de módulos compensadores de la dispersión (DCM) teniendo en cuenta dispersión cromática para las diferentes velocidades de transmisión:

 Tabla 2.1 Distancias de la OMS sin DCM para las diferentes velocidades. Tomado de [57]

Velocidades de	D (ns/nm)	Longitud OMS	sin DCM (km)
transmisión (Gbps)		G.652 (20 ps/nm km)	G.655 (6 ps/nm km)
40	-400~400	-20~20	-67~67
10	800	40	133
5	6400	320	1067
2.5	12800	640	2133

Para velocidades iguales o superiores a 5 Gbps se debe tener en cuenta el efecto de la PMD.[3] Una medida de la PMD en un enlace es el retardo de grupo diferencial (DGD), este se calcula a partir de la ecuación:

 $DGD(ps) = L \times Coeficiente PMD$

(2.5)

En la tabla 2.2 se presenta para la jerarquía OTN los valores permisibles de PMD en pico segundo y las distancias que se pueden lograr en los enlaces según los diferentes valores del coeficiente PMD conocido como PMD_Q para fibra óptica G.652.

Tabla 2.2 Valores de tolerancia de PMD para cada una de las velocidades definidas en la OTH. Tomado de [3].

Velocidad de transmisión (Gbps)	PMD Tolerancia (ps)	Distancia (km) (0.5 ps∕√km)	Distancia (km) (0.2 ps∕√km)	Distancia (km) (0.1 ps∕√km)
10	10	400	3000	>4000
40	2.5	25	80	400

En la tabla 2.3 se especifican los diferentes módulos compensadores de la dispersión ofrecida por *Huawei Technologies,* las distancias que compensan, las pérdidas y la DGD para la fibra óptica G.652.

 Tabla 2.3 Especificaciones para los DCM. Tomado de [57].

Tipo de Fibra	Tipo de DCM	Distancia que compensa (km)	Pérdidas de inserción (dB)	DGD para DCM (ps)
G.652	S	5	<2.3	<0.3
	Т	10	<2.8	<0.3
	А	20	<3.1	<0.4
	В	40	<4.5	<0.5
	С	60	<5.8	<0.6
	D	80	<7.1	<0.7
	Е	100	<8.2	<0.8
	F	120	<9	<0.8

En la investigación se analiza la dispersión al igual que en [16]. En el artículo referenciado los autores estudian el comportamiento de la dispersión cromática teniendo en cuenta la dispersión después de la fibra óptica y luego de la compensación que introduce el DCM, en todos los casos esta disminuye, lo cual se espera que ocurra en el diseño a proponer.

2.2.3 Efecto de las no linealidades.

Para los sistemas WDM en general varias son las no linealidades presentes en el medio que se deben tener en consideración y de forma particular si el sistema a diseñar tiene una velocidad mayor a 2.5 Gbps.

Uno de los factores a tener en cuenta a la hora del diseño es la potencia de transmisión de cada uno de los canales ópticos para disminuir la XPM. Para un sistema con *N* canales y una penalización para cada canal menor de 1 *dB* se debe satisfacer la condición:

$$P(mW) < \frac{21}{N}$$
 (2.6)

Otra de las no linealidades que afectan los sistemas WDM como se comentó anteriormente es FWM. Para un sistema de M canales el número máximo posible de portadoras resultantes del efecto del FWM es N y se define mediante la expresión:

$$N = \frac{1}{2}M^2(M-1)$$
(2.7)

En [21] y [22] sugieren aumentar el espaciamiento entre canales o disminuir la potencia de las longitudes de onda a transmitir por la fibra óptica.

Los elementos explicados se toman en consideración en el diseño que se propone, por lo que se emplea en el sistema el mayor espaciamiento entre canales estandarizado siendo este igual a 100 GHz y la mínima potencia que no afecte la relación señal a ruido del sistema.

33

2.2.4 OSNR.

Se emplea para medir el grado de acumulación de ruido (ASE: *Amplifier Spontaneous Emission*) de los amplificadores de línea durante todo el trayecto y se define como la relación de la potencia de la señal a potencia de ruido en una señal de una banda cercana [3].

Constituye uno de los pasos más importantes del diseño de una red DWDM ya que permite alcanzar una determinada BER. La OSNR se utiliza para monitorear y caracterizar el desempeño de los amplificadores ópticos y se degrada después de cada etapa de amplificación óptica. Por definición la Relación Señal a Ruido se obtiene de la siguiente expresión:

$$OSNR = \frac{P_S}{P_{ASE}}$$
(2.8)

En la expresión P_s es la potencia óptica a la entrada del amplificador y P_{ASE} es la potencia de ruido generada en dicho amplificador. Esta potencia de ruido puede calcularse de la expresión:

$$P_{ASE} = -58 + NF_i - G_i$$
 (2.9)

Siendo *NF*_i la figura de ruido del amplificador y G_i su ganancia ambas en dB.

Para un sistema de N elementos en una red DWDM con i segmentos la OSNR se calcula mediante la ecuación:

$$\frac{1}{OSNR_{TOTAL}} = \sum_{i=0}^{N} \frac{1}{OSNR_i}$$
(2.10)

Cada una de las etapas o segmentos de la red presenta una relación señal a ruido óptica definida por:

$$OSNR_{I} = \frac{P_{in_{i}}}{NF_{i}hv\Delta f}$$
(2.11)

Siendo P_{ini} potencia de la señal a la entrada del amplificador óptico *i* en dBm, *h* la constante de Planck y *v* es la frecuencia central de la señal óptica.

$$OSNR(dB) = 58 + P_{in_i} - L(dB) - NF(dB) - 10\log N$$
(2.12)

Donde:

L: es la atenuación del tramo en dB.

N: el número de nodos de la red.

En diseños prácticos se obtienen para la OSNR valores comprendidos entre 40 dB y 50 dB, aunque se considera 30 dB como un valor adecuado. En el diseño a proponer se tomarán estos como valores de referencia a obtener.

2.3 Parámetros que permiten evaluar los sistemas WDM a partir de los elementos de diseño.

Las figuras de calidad o de mérito en redes WDM dan una medida del funcionamiento de estas, a través de ellas podemos analizar si nuestro diseño es acertado y cumple con los parámetros deseados. Las figuras de calidad utilizadas para evaluar los escenarios son la BER y el factor Q.

2.3.1 Factor Q.

Representa la OSNR en el circuito de decisión del receptor en unidades de voltaje o corriente para un sistema de comunicación binaria y permite el análisis simplificado de la ejecución de un sistema. Relaciona los niveles bajos y altos de SNR de un sistema. Se relaciona directamente con el BER y mientras más elevado es su valor mejor será el BER. En la práctica son aceptados valores de Q entre 6 y 7 dB, lo cual se espera obtener [2, 58].

En términos de voltaje o corriente el factor Q se puede calcular de la siguiente manera [58-60]:

$$Q = \frac{\mu_H - \mu_L}{\sigma_L + \sigma_H}$$
(2.12)

Donde:

 $\mu_{\rm H}$ y $\mu_{\rm L}$: valores medios de voltaje o corriente de las marcas / espacios (1/0) en el receptor.

 $\sigma_L y \sigma_H$: desviación estándar del ruido.

A partir del factor Q el BER puede mejorarse:

- Aumentando la diferencia entre los niveles altos y bajos en el numerador del factor Q.
- Disminuyendo los términos de ruido en el denominador del factor Q.

2.3.2 BER.

Una de las figuras de calidad de las redes ópticas es la BER. La razón de error de bits hace referencia al número de bits erróneos dividido por el total de bits transferidos durante un intervalo de tiempo. En transmisión digital, una cadena de datos puede ser alterada por el ruido, la distorsión o errores de sincronización [58].

Proporciona el límite superior de la señal debido a la ocurrencia de la degradación de la misma en el receptor.

La probabilidad de error (P_e) es el valor de expectación de BER, esta puede considerarse como un estimado aproximado de P_e . En un canal de ruido, BER puede expresarse en función de la relación normalizada portadora a ruido como se muestra en 2.13 y 2.14:

$$\frac{E_b}{N_0}$$
 (2.13)

Donde:

```
E<sub>b</sub>: energía por bit.
```

No: densidad espectral de potencia de ruido.

Donde:

E_s: energía por modulación de símbolo.

No: densidad espectral de ruido.

En función de la relación portadora a ruido BER se expresa según [58-60]:

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right)$$
(2.15)

En función del factor Q se puede obtener a partir de la ecuación 2.6:

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty e^{-Q^2/2} dQ \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-Q^2/2}$$
(2.16)

Los sistemas de comunicaciones ópticos se encuentran diseñados con BER que oscilan entre 10⁻⁹ y 10⁻¹² aunque en la actualidad los sistemas alcanzan hasta 10⁻¹⁶.

2.3.3 Diagrama o patrón de ojo.

Aunque no es una figura de calidad propiamente se puede relacionar con el comportamiento de la distorsión en el sistema. Se emplea para visualizar cómo la forma de onda empleada para enviar múltiples bits de datos puede acarrear errores en la interpretación de estos bits [58, 61].



Figura 2.2 Características de un diagrama de ojo. Tomado de [58].

La abertura vertical del ojo indica en cantidad la diferencia en los niveles de la señal es decir la diferencia entre la llegada de un bit errado o no. La mayor diferencia ocurre entre un 1 y un 0.

La abertura horizontal del ojo indica la cantidad de *jitter* presente en la señal.

Un diagrama de ojo abierto corresponde a la señal de distorsión mínima. La distorsión de la forma de onda de la señal debido a la interferencia intersímbolo y el ruido aparecen cuando el diagrama de ojo está cerrado.

2.4 Presentación del software de simulación de redes ópticas OptiSystem.

Los sistemas de comunicaciones ópticas han incrementado su complejidad a lo largo de los años y el proceso de diseño y análisis de estos sistemas que incluyen

normalmente equipos no lineales y fuentes de ruido no Gaussiano es altamente complicado por lo que como resultado estas pruebas pueden ejecutarse eficientemente solo con la ayuda de avanzadas herramientas de *software*.

OptiSystem es uno de las herramientas de simulación que presenta el paquete de *software* de la compañía canadiense *Optiwave*, academia líder en productos de este tipo. Integra el diseño, pruebas y la optimización de todo tipo de funciones de nivel físico de redes ópticas de banda ancha como conexiones ópticas virtuales [62, 63].

En él se puede diseñar, probar y optimizar cualquier tipo de enlace óptico a nivel físico y analizar las redes ópticas de banda ancha de los sistemas de larga distancia LAN y MAN.

Posee una biblioteca que incluye un centenar de componentes validados con el objetivo de obtener resultados comparables con las aplicaciones reales. *OptiSystem* maneja diversos formatos de las señales ópticas y eléctricas y calcula estos utilizando algoritmos apropiados que permiten la exactitud y la eficiencia requerida en la simulación.

Con el objetivo de predecir el comportamiento del sistema *OptiSystem* calcula parámetros tales como BER y el factor Q usando análisis numéricos o técnicas analíticas para sistemas limitados por la interferencia intersímbolo y el ruido.

Con este software se pueden obtener herramientas de visualización avanzadas en el caso de señales ópticas encontramos analizadores del espectro óptico, así como la representación de estas en el dominio del tiempo, analizadores de polarización de las señales y medidores de la potencia óptica, en el caso de las señales eléctricas tenemos osciloscopios, analizadores del espectro RF, diagramas de patrones de ojos y analizadores de la BER, y también se incluyen para aplicaciones WDM analizadores que nos dan la potencia óptica, el ruido y la relación señal a ruido óptica por canal.

38

2.5 Conclusiones del capítulo.

A nivel mundial se han desarrollado varias plataformas de tecnologías DWDM siendo los proveedores con mayor despliegue *Huawei*, Alcatel – Lucent, Cisco y Ciena. Estas plataformas responden a las arquitecturas de la OTN lo cual permite un manejo de señales de todo tipo entre las que se incluyen Ethernet y las IP. Su implementación reduce los costos de inversión, operación y mantenimiento por parte de los operadores y proveedores de servicio.

El diseño de la capa óptica de una red xWDM para su correcta configuración debe tomar en cuenta elementos como la atenuación y longitud del enlace, efecto de las no linealidades y la OSNR, por lo que su análisis es de vital importancia. La evaluación de los mismos puede llevarse a cabo a través de las figuras de calidad o mérito BER y factor Q.

La simulación constituye un paso importante como factor previo a la implementación práctica. El software de simulación *Optisystem*, es rápido y económico y es capaz de darnos una visión global de la actuación de un sistema real reduciendo los riesgos de inversión.

Capítulo 3. Diseño y evaluación de una red WDM.

En el capítulo se realiza la propuesta para rediseñar el *backbone* de la red de las entidades de la defensa del territorio central. Para la implementación de la misma se define en primer lugar el proveedor de equipamiento y se justifica el por qué de su elección. Se presentan las diferentes características de la red que se propone como topología de la red, configuración, tipo de fibra, particularidades de los sitios y de las secciones de transmisión óptica.

Se realizan los cálculos teóricos que corresponden a cada uno de los parámetros que permiten definir el comportamiento del *backbone* de la red así como las simulaciones mediante el *Optisystem*. Se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante las simulaciones en cada una de las secciones de transmisión óptica en cuanto a OSNR, factor Q, BER y dispersión.

3.1 Selección del fabricante.

Para la selección del equipamiento se apostó por el proveedor Huawei *Technologies* debido a su gran prestigio a nivel mundial por sus soluciones compactas y altamente fiables. Además es líder desde 2010 en el mercado mundial de los sistemas de transmisión por fibra óptica. Está presente en diversas partes del mundo con formidables resultados, en países como China, Alemania, Rusia, España, Francia, Corea del Sur, Brasil, Chile, el continente africano y Cuba.

Huawei ha desarrollado equipamiento para las aplicaciones tanto metropolitanas como de larga distancia.

Es el principal proveedor de equipamiento de telecomunicaciones y primer socio comercial estratégico de Cuba. Su presencia en el país se remonta ya a más de 15 años y ha desarrollado importantes proyectos de telecomunicaciones entre los que se encuentra el tendido y despliegue de la red nacional de fibra óptica (FON), la red ASON y la Red IP / MPLS.

3.2 Topología, configuración y tipo de fibra a emplear.

La red que se propone va estar compuesta por 10 sitios interconectados mediante la fibra óptica monomodo G.652 D en topología de anillo.

En su implementación se propone el empleo de las plataformas OptiX OSN 6800 y OptiX OSN 8800 T16 para las configuraciones ópticas y eléctricas respectivamente. De esta familia se pueden encontrar equipos mucho más avanzados y de mayor capacidad como el OptiX OSN 8800 T32 y OptiX OSN 8800 T64 pero por razones de presupuesto no se eligieron. El trabajo de este equipamiento se basa esencialmente en el empleo de tarjetas para las diferentes funciones las cuales son insertadas según los requerimientos del diseño.



Figura 3.1 Configuración de la red propuesta. Elaboración propia

Como transponder se proponen las tarjetas LSX y LOA. Los transponder LSX del lado del cliente reciben una señal que puede ser de los siguientes servicios 10 GE LAN/ WAN/ STM-64/ OC-192/ OTU2/ OTU2e/ FC1200 y entregan al lado WDM una longitud de onda OTU2/OTU2e mientras que los LOA pueden recibir ocho señales *any rate* (100 Mbps a 2.5 Gbps) y entregar una OTU2.



Figura 3.2 Formato de la OTU de conversión de longitudes de onda LSX. Tomado de [56].

Con este equipamiento la *cross* conexión puede ser a través de las unidades tributarias y las unidades de línea o mediante la *cross* conexión de la propia plataforma.

Cuando se realiza mediante tarjetas que se insertan al equipamiento la *cross* conexión se dice que es del tipo distribuida y cuando se emplea la del propio equipamiento es centralizada y se emplea cuando se requiere, por ejemplo, que dos sistemas de 40 longitudes de onda se interconecten en un sistema de 80 longitudes de onda.

En el diseño se propone la *cross* conexión distribuida a través de la tarjeta de acceso tributaria TN54TOA en conjunto con la tarjeta de línea TN52NS2. La TN54TOA permite el procesamiento de los ocho servicios *any rate* y la TN52NS2 procesa la OTU2(e).



Figura 3.3 Formato de la unidad de línea TN52NS2. Tomado de [56].

La unidad de interface de fibra (FIU) se propone colocar una en cada dirección, los amplificadores ópticos OBU en el sentido de recepción y OAU en el sentido de transmisión, los multiplexores M40V y los demultiplexores D40V con atenuación variable por software en la entrada y la salida respectivamente.

En el caso de los FOADM se propone emplear los multiplexores/ demultiplexores de adición/sustracción MR8V uno en cada dirección y para las configuraciones ROADM los WSMD4.

Los servicios se proponen configurar de manera tal que por la longitud de onda 192.1 THz se gestionarán los servicios de videoconferencia y VoD, y por 192.2 THz los servicios de voz y datos.

3.3 Cálculos teóricos de los elementos de diseño de la red.

A partir de la ecuación 2.2 se calcula la atenuación existente entre cada una de las secciones de transmisión óptica de los segmentos de la red DWDM. La fibra

empleada es la G.652 D que posee un coeficiente de atenuación $\alpha_{FO} = 0.22$ ${}^{dB}/_{km}$ en los 1550 nm. Se asume en cada segmento dos conectores con una pérdida $\alpha_c = 0.5$ dB y un margen para el enlace M = 3 dB.

Por su parte, la FIU a través de la cual se multiplexan las longitudes de onda de trabajo provenientes del amplificador óptico y el canal de supervisión óptica, presenta una pérdida por inserción α_{IL} =1 dB. Aplicando la ecuación 2.2 se obtienen los valores de atenuación para cada segmento como se muestran en la tabla 3.1.

Se calcula la dispersión acumulada siguiendo la ecuación 2.5. A partir de la distancia entre los segmentos se define el DCM a emplear.

Para la obtención de la OSNR se emplea el procedimiento que se describe en el anexo D.

Origen	Destino	Distancia (km)	Atenuación (dB)	Dispersión acumulada (ps/nm)	DCM a emplear	OSNR (dB)
Sitio 1	Sitio 2	75	21.5	1275	D	37.87
Sitio 2	Sitio 3	100	27	1700	E	35.08
Sitio 3	Sitio 4	60	18.2	1020	С	38.95
Sitio 4	Sitio 5	70	20.4	1190	D	38.39
Sitio 5	Sitio 6	70	20.4	1190	D	38.39
Sitio 6	Sitio 7	50	16	850	В	39.34
Sitio 7	Sitio 8	80	22.6	1360	D	37.55
Sitio 8	Sitio 9	90	24.8	1530	D	36.47
Sitio 9	Sitio 10	88	24.36	1496	D	36.71
Sitio 10	Sitio 1	65	14.3	1105	С	38.69

Tabla 3.1	Parámetros	del diseño	de la	capa óptica	. Elaboración	Propia
. a.oa. 0		ao: a.oo		oupu opuou		

3.4 Resultados de las simulaciones.

El sistema propuesto responde a una tecnología DWDM de 40 longitudes de onda con una velocidad de transmisión de 10 Gbps y 100 GHz de separación entre longitudes de onda. De las 40 longitudes de onda se emplean solo dos debido a que estas son las posibilidades que brindan los transponder escogidos. La frecuencia de las mismas es de 192.1 THz y 192.2 THz respectivamente.



En la figura 3.4 se muestra el diseño de una de las secciones de transmisión óptica, el mismo fue empleado para cada una de las secciones de igual forma.

Figura 3.4 Esquema de la red montado en Optisystem 7.0 para una sección de transmisión óptica entre dos sitios. Elaboración propia.

La topología propuesta se simuló con ayuda del *software Optisystem* 7.0. Las simulaciones se realizaron para cada una de las secciones de transmisión óptica por separado y en cada una se simuló la transmisión hacia y desde el sitio siguiente, después de 10 iteraciones los resultados son los que se muestran en las tablas 3.2 y 3.3.

Ubicación	Distancias (km)	Frecuencias (THz)	OSNR (dB)	Q	BER (10 ⁻¹²)
Sitio 1-Sitio 2	75	192.1	35.402	6.824	4.3818
	75	192.2	35.328	7.275	0.1723
Sitio 2 Sitio 2	100	192.1	30.374	6.833	4.1481
51110 2-51110 5	100	192.2	30.390	6.730	8.4677
Sitio 2 Sitio A	60	192.1	34.655	7.235	0.2285
51110 5-51110 4	00	192.2	34.652	7.603	0.0141
Sitio 4-Sitio 5	70	192.1	37.038	7.331	0.1140
		192.2	36.980	7.726	0.0055
Sitio 5-Sitio 6	70	192.1	36.963	7.986	0.0068
		192.2	37.033	7.680	0.0079
Sitio 6 Sitio 7	50	192.1	37.136	7.941	0.0009
51110 0-51110 7		192.2	37.144	7.351	0.0954
Citie 7 Citie 0	80	192.1	36.009	7.425	0.0555
51107-51108		192.2	36.007	7.124	0.5207
Sitio 9 Sitio 0	00	192.1	34.692	6.927	2.1476
51110 8-51110 9	90	192.2	34.633	6.848	3.7311
Sitio 9-Sitio 10	88	192.1	34.699	6.877	3.0312
5110 5-5110 10	00	192.2	34.992	7.228	0.2425
Sitio 10 Sitio 1	65	192.1	38.088	7.770	0.0383
3110 10-3110 1	65	192.2	38.051	8.490	0.0001

Tabla 3.2 Resultados de las simulaciones realizadas en la dirección de este a oeste. Elaboración propia.

Tabla 3.3 Resultados de las simulaciones realizadas en la dirección de oeste a este.Elaboración propia.

Ubicación	Distancias (km)	Frecuencias (THz)	OSNR (dB)	Q	BER
Sitio 2-Sitio 1	75	192.1	35.415	7.1772	0.3551
	/5	192.2	35.332	7.3335	0.1118
	100	192.1	30.377	6.5847	22.781
51110 3-51110 2	100	192.2	30.388	6.6545	14.195
Sitio 4 Sitio 2	60	192.1	34.654	7.0307	1.0040
51110 4-51110 5	00	192.2	34.654	7.5047	0.0301
Sitio 5-Sitio 4	70	192.1	37.039	7.6311	0.0116
		192.2	36.983	7.2670	0.1830
Sitio 6-Sitio 5	70	192.1	36.972	7.5138	0.0281
		192.2	37.043	7.3379	0.1073
Sitio 7-Sitio 6	50	192.1	37.138	8.3104	0.0004
		192.2	37.138	7.3590	0.0909
Sitia 9 Sitia 7	80	192.1	36.008	6.8620	3.3948
51110 8-51110 7		192.2	36.008	7.6573	0.0094
Sitio 9-Sitio 8	90	192.1	34.692	6.5068	38.312
5110 5-5110 8	30	192.2	34.633	6.4728	48.088
Sitio 10-Sitio 9	88	192.1	34.919	7.4810	0.0367
2110 10-2110 2	00	192.2	34.911	6.8370	4.0411
Sitio 1-Sitio 10	65	192.1	38.077	7.6547	0.0094
Sitio 1-Sitio 10	65	192.2	38.041	8.2089	0.0001

Los datos obtenidos en la simulación cumplen con los requisitos de diseño analizados en la investigación. El factor Q calculado para cada una de las longitudes de onda y las secciones de multiplexación oscila entre 6.824 y 8.490 garantizando una *BER* en el orden de 10^{-11} a 10^{-16} .

Tomando en consideración que la OSNR no se degrada al pasar por un número menor de amplificadores, los resultados obtenidos son favorables ya que los criterios de diseño plantean que la OSNR deben oscilar desde los 30 y 50 dB, lo cual se cumple en el diseño propuesto. Además la OSNR es mayor en todas las secciones que el factor Q en dB, el cual oscila entre los 17 dB y 18 dB.

Con el objetivo de reducir la dispersión introducida por la fibra óptica G.652 D, se aplican técnicas de compensación de la dispersión. En cada uno de los segmentos se redujo la dispersión cromática que introduce la fibra óptica, en la tabla 3.4 se muestran los resultados para los sitios 1 y 6. Se comporta de igual forma para los restantes sitios.

Ubicación	Distancias (km)	Frecuencias (THz)	Dispersión de la fibra óptica (ps/nm)	Dispersión del DCM (ps/nm)
Citic 1 Citic 2	75	192.1	1.0424 10 ⁷	$9.7428\ 10^{6}$
Sitio 1-Sitio 2	/5	192.2	$1.1716\ 10^7$	$8.4728\ 10^{6}$
Sitio 2-Sitio 1	75	192.1	1.0924 10 ⁷	$9.2427\ 10^{6}$
		192.2	1.1930 10 ⁷	$9.8757\ 10^{6}$
Sitia 6 Sitia 7	50	192.1	$7.7820\ 10^{6}$	$7.7810\ 10^{6}$
51110 0-51110 7		192.2	3.6607 10 ⁶	3.6603 10 ⁶
Citie 7 Citie C	50	192.1	$6.1361\ 10^{6}$	$6.1358\ 10^{6}$
51110 7-51110 0	50	192.2	1.2256 10 ⁷	7.9319 10 ⁶

Tabla 3.4 Resultados de la dispersión obtenida en la dirección de este a oeste. Elaboración propia.

En las figuras 3.5 y 3.6 se observa el espectro de la señal transmitida y recibida por una longitud de onda para el sitio 2, en cada uno de los sitios se comporta de igual forma. Además, se muestran las componentes de ruido para esta misma señal en la figura 3.7 y los diagramas de ojo correspondientes a los sitios 2 y 10 en la figura 3.8.



Figura 3.5 Espectro de la señal conformada en el transmisor para 192.1 THz en el sitio 2 de la red. Elaboración propia.



Figura 3.6 Espectro de la señal recibida en el demultiplexor para 192.1 THz y 192.2 THz en el sitio 2 de la red. Elaboración propia.



Figura 3.8 Componente de ruido de la señal recibida en el demultiplexor para 192.1 THz y 192.2 THz en el sitio 2 de la red. Elaboración propia.



Figura 3.8 Diagrama de ojo de la señal recibida procedente de los sitios 2 y 6 para 192.1 THz. Elaboración propia.

3.5 Valoración económica para la red propuesta.

El despliegue de una red donde se emplean las tecnologías de multiplexación por longitud de onda constituye todo un reto desde el punto de vista económico aunque los beneficios del despliegue que acarrea son incuestionables. El valor inicial de la inversión en esta tecnología es considerablemente alto teniendo en cuenta los precios ofrecidos por los fabricantes. A pesar de ser una tecnología costosa los beneficios que ofrece una red basada en DWDM justifica el gasto de capital inicial. Un factor favorable radica en que la red propuesta explota la misma infraestructura existente en la actualidad y la misma fibra óptica G.652 D y una vez instalada y puesta en operación los costos disminuyen incluyendo los asociados a la operación. Además de utilizar un número reducido de fibras es muy fácil aumentar los servicios sin tener que hacer grandes cambios en el sistema. Se podrán gestionar diversos servicios de diferentes clientes con un mejor aprovechamiento de los recursos de la red.

Una tabla que relaciona los costos asociados al equipamiento se muestra en el anexo E.

3.6 Conclusiones del capítulo.

La red que se propone para su empleo en las entidades de la defensa del territorio central satisface las necesidades de ancho de banda empleando una menor cantidad de fibras ópticas. Emplea el equipamiento que ofrece Huawei *technologies*. En el diseño de la red se tomo en consideración el efecto de los principales fenómenos que ocurren solamente en la capa física.

La red se diseñó en topología de anillo sobre la fibra óptica G.652 D en ella se pueden transmitir hasta 40 longitudes de onda con espaciamiento de 100 GHz a 10 Gbps con variedad de tráfico y permitiendo la compartimentación de la información requerida en entidades de este tipo.

Su implementación conlleva una elevada inversión en sus inicios si se tiene en cuenta los altos costos del equipamiento, por lo que desde un principio no se podrán implementar todas las potencialidades que ofrece el mismo. Sin embargo, a medida que la red se va explotando se irán resarciendo los gastos asociados, inclusive los relacionados con la operación y el mantenimiento.

A pesar de que *Optisystem* no permite simular algunos de los módulos incluidos en el equipamiento puede diseñarse la red propuesta, comprobar su operatividad y los parámetros de calidad.

49

Conclusiones.

En esta investigación se evalúo el rediseño del *backbone* de la red existente en las entidades de la defensa del territorio central tomando en consideración los principales elementos que afectan las redes de transporte basadas en fibra óptica y el estándar G.709.

Se expusieron los fundamentos teóricos de la fibra óptica como medio de transmisión, de las tecnologías WDM y de las redes de transporte basadas en fibra óptica, analizándose sus características, funcionamiento y las tendencias actuales a nivel mundial; lo que constituyó componente teórico fundamental para poder desarrollar la investigación.

Se identificaron que los elementos fundamentales para evaluar el comportamiento de las redes de transporte ópticas, fueron la atenuación y la longitud del enlace, la dispersión cromática que introduce la fibra óptica, el efecto de las no linealidades y la OSNR. Se determinaron de forma análoga los métodos para lograr una favorable actuación de los mismos.

Se determinaron los principales proveedores a nivel mundial de equipamiento WDM para redes de transporte ópticas *Alcatel - Lucent, Ciena, Cisco y Huawei.* Se definieron como los equipamientos a emplear el OptiX OSN 6800 y el OptiX OSN 8800 teniendo en cuenta que Huawei constituye el primer socio comercial en la esfera de las telecomunicaciones de Cuba desde hace más de 15 años, con una cartera de precios y facilidad de pagos que no brinda ningún otro proveedor. Además, el prestigio y la calidad de los productos que ofrece son altos internacionalmente.

En la investigación se propone el empleo de una red DWDM en topología de anillo sobre la fibra óptica G.652 D en la que se pueden transmitir hasta 40 longitudes de onda con espaciamiento de 100 GHz a 10 Gbps con variedad de tráfico.

Se hace un mejor empleo de los recursos de la red utilizando una menor cantidad de fibras ópticas y satisface las necesidades de ancho de banda que demandan las nuevas aplicaciones y servicios existentes. Se garantiza la

50

fiabilidad y compartimentación de la información que se requiere en entidades de este tipo. Además, se encuentra garantizado el posible crecimiento de la red para nuevas aplicaciones y servicios.

El empleo de esta tecnología implica realizar una cuantiosa inversión inicial, por lo que desde un principio no se podrán implementar todas las potencialidades que ofrece el equipamiento. Sin embargo, a medida que la red se va explotando se irán resarciendo los gastos asociados, inclusive los relacionados con la operación y el mantenimiento.

La relación costo – beneficio de la aplicación de esta tecnología en el *backbone* es favorable y permite a las entidades de la defensa estar en niveles similares con el país y el mundo en cuanto a tecnología de redes de transporte se refiere.

Recomendaciones.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se recomienda:

- Realizar el diseño del *backbone* de la red que incluya todas las entidades de la defensa del país.
- Realizar el diseño de redes DWDM empleando en las simulaciones la cross conexión ya sea distribuida o centralizada a través del software que ofrece el fabricante.
- Continuar la investigación en este tema abarcando la implementación y simulación de la protección eléctrica ASON.
- Incluir elementos de esta investigación en las acciones de capacitación sobre redes ópticas planificadas por la especialidad de comunicaciones a los diferentes niveles en las entidades de la defensa.

Referencias bibliográficas.

- [1] A. Habib, & El Latif, H. A. , "Four wave mixing nonlinearity effect in wavelength division multiplexing radio over fiber system," Doctoral dissertation University of Malasia, 2007.
- [2] R. P. Sandeep Singh., Manvendr., Alok Singh, "Optimization and simulation of WDM - Rof link," *International Journal of Scientific and research publications*, vol. 2, pp. 1-6, january 2012 2012.
- [3] J. B. Rivero, "DWDM. Introducción a la tecnología.," ed: Centro Nacional de capacitación, ETECSA, 2009.
- [4] José A. Martín Pereda. (2004). Sistemas y redes ópticas de comunicaciones. ed: Pearson Prentice Hall.
- [5] S. Das, & Zahir, E., "Modeling and Performance Analysis of RoF System for Home Area Network with Different Line Coding Schemes Using Optisystem," *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System, IJEECS,* vol. 3, pp. 6-11, August 2014.
- S. K. Swain, "Analysis of WDM network based on EDFA pumping and dispersion compensation using optisystem," Doctoral dissertation, National Institute of Technology Rourkela, 2012.
- [7] ITU-T, "Recommendation G.709. Interfaces for the Optical Transport Network (OTN): UIT-T," 2009.
- [8] C. DeCusatis. (2002). Handbook of fiber optic data communication (Second Edition ed.).
- [9] ETECSA, "Curso de fibra óptica " 1998.
- [10] J. Hayes. (2001). Fiber Optics: Technician's Manual (2nd ed.).
- [11] J. Hernando Rábanos, Sistema de comunicaciones. Transmisión en línea vol. 1 cap. 5.
- [12] C. DeCusatis, *Fiber optic data ccommunication: technological trends and advances* 2nd ed., 2001.
- [13] CISCO. (2001, Introducción al DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing). 78.
- [14] D. M. a. Mendoza, "Párametros de la fibra óptica," 2013.

- [15] Thin Thin Naing, "Optimized dispersion mapping scheme for five channel WDM system," *International Journal of Scientific and research publications,* vol. 4, mayo 2014.
- [16] P. K. R. Manjari Sharma, Renu Chaudhary, Amit Sharma,, "Analysis on Dispersion Compensation in WDM Optical Network using Pre, Post and Symmetrical DCF based on Optisystem," *MIT International Journal of Electronics and Communication Engineering* vol. 4, pp. 58-63, 2014.
- [17] S. K. Swain, "Analysis of WDM network based on EDFA pumping and dispersion compensation using Optisystem," Master of Technology in Communication and Signal Processing, Department of Electronics & Communication Engineering, National Institute of Technology Rourkela, 2012.
- [18] W. J. Bo-ning HU, Wang Wei, Rui-mei Zhao, "Analysis on Dispersion Compensation with DCF based on Optisystem," 2nd International Conference on Industrial and Information Systems, 2010.
- [19] R. I. Telnet, "Fibra óptica para NGN- Dispersión cromática y PMD," noviembre del 2009.
- [20] Sawsan A. Abdul- Majid, "Software simulation FWM in WDM Optical Communication Systems," *Journal of Kirkuk University – Scientific Studies*, vol. 6, 2011.
- [21] P. P. Marvin Suraj Koshy, "Analysis of SPM and FWM in optical fiber communication system using Optisystem," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* vol. 3, pp. 1700-1703, marzo 2014.
- [22] M. A. Iftikhar Rasheed, Shahid Mehmood, Mahwish Chaudhary, "Analyzing the Non-linear Effects at various Power Levels and Channel Counts on the Performance of DWDM based Optical Fiber Communication System," *IEEE*, 2012.
- [23] Mishra, "Nonlinear effect of Four Wave Mixing for WDM in Radio-over-Fiber Systems," *Journal of Electronics and Communication Engineering Research*, vol. 2, pp. 1-6, 2014.
- [24] T. R. I. S.A. (2009, Fibra óptica para NGN Dispersión cromática y PMD. 26.

- [25] (2015, enero). Available: <u>http://www.itu.int/itu-t/recommendations/</u>
- [26] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," 2009.
- [27] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.653 Characteristics of a dispersionshifted, single-mode optical fibre and cable," ed, julio 2010.
- [28] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.655 Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable," ed, noviembre 2009.
- [29] T. F. M. A. Méndez;, "Specialty Optical Fibers Handbook: Elsevier Academic Press," 2007.
- [30] C. R. Arana, "multiplexación por división en longitudes de onda (WDM)," Tesis de Graduación, Universidad Francisco Marroguin, Guatemala, 2002.
- [31] S. Singh, Gupta, N., Shukla, R. P., Sharma, A., & Singh, D. U. (2012). Simulation of full duplex data transmission in ROF system using Optisystem. International Journal Of Electronics And Computer Science Engineering (IJECSE, ISSN: 2277-1956), 1(03), 916-924.
- [32] D. P. M. A.Panda, "Nonlinear Effect of Four Wave Mixing for WDM in Radio-over-Fiber Systems," Quest Journals, Journal of Electronics and Communication Engineering Research, vol. 2, pp. 01-06, 2014.
- [33] R. G. N Sangeetha, Surabhi Purwar, Akshita Singh, "Performance Analysis of FBG DEMUX based WDM System by Varying Chirp Functions and Data Rates at Different Electrical Filters," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 3, pp. 5869-5872, 2014.
- [34] E. Z. Shuvodip Das, "Performance Evaluation of WDM-RoF System Based on CO-OFDM using Dispersion Compensation Technique," International Journal of Electronics, Electrical and Computational System, IJEECS, vol. 3, pp. 6-11, August 2014 2014.
- [35] Huawei Technologies Co. (2012, WDM Principle. Available: www. huawei.com

- [36] ITU-T, "Recomendación G.694.2. : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda," 2003.
- [37] S.Rajalakshmi, "Characteristic analysis of dense WDM for long haul optical networks," *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research* vol. 3, pp. 252-256, Mayo- Junio 2014.
- [38] Ramón Jesús Millán Tejedor, "CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)," *Bit,* pp. 60-62, agosto-septiembre 2006.
- [39] ITU-T, "Recomendación G.694.1. : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división de longitud de onda densa," 2002.
- [40] N. B. S.Rajalakshmi, Vijay Charan, "Characteristic analysis of dense WDM for long haul optical networks," *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, vol. 3, pp. 251-259, may-june 2014.
- [41] I. Cisco System, "Introduction to DWDM technology," junio 2000.
- [42] Bob Bell, "Cisco and optical networking," 2013.
- [43] Z. R. Gao Yan, Du Weifeng, and Cui Xiaorong, "Point to point DWDM system design and simulation," *Proceedings of the 2009 International Symposium on Information Processing (ISIP'09),* pp. 090-092, August 21-23 2009.
- [44] S. Saha, "Optimization of gain and Bit Error Rate of an Erbium Doped Fiber Amplifier for Wdm system," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, pp. 775-779, august 2013.
- [45] A. G. T. Paspuel, "Convergencia en redes ópticas.," Facultad de ciencias de la computación y electrónica., Universidad tecnológica de América, 2010.
- [46] Filip Idzikowskia, "Dynamic routing at different layers in IP-over-WDM networks Maximizing energy savings," *Optical Switching and Networking*, 2011.
- [47] Gustavo Puerto Leguizamón, "Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica," *Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia* vol. 45, pp. 148-156, Septiembre 2008.

- [48] ITU-T, "Recomendación G.872. Arquitectura de las redes de transporte ópticas " 2001.
- [49] ITU-T, "Recomendación G.798. Características de los bloques funcionales del equipo de la jerarquía de la red óptica de transporte," 2006.
- [50] Bob BellUniversity of California Berkeley and Marie CarpenterTelecom School of Management Paris, "Cisco and optical networking," 2013.
- [51] Alcatel-Lucent. (2008, Alcatel-Lucent 1625 Lambda Extreme Transport Ultra Long-haul and Ultra High-capacity DWDM. The Next Generation of Optical Core Transport Solutions. Available: www.alcatel-lucent.com
- [52] Ciena. (2010, ACTIVFLEX 6500 PACKET OPTICAL PLATFORM. Datasheet. Available: www.ciena.com
- [53] Cisco System. (2010, Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform. Data sheet. Available: http://www.cisco.com/go/warranty.
- [54] HUAWEI TECHNOLOGIES CO.LTD, "OptiX OSN 6800 Intelligent Optical Transport Platform V100R006C01. Product Overview " 2012.
- [55] Huawei Technologies Co, "OptiX OSN 8800 Intelligent Transport Platform Integrating OTN/WDM/SDH " 2012.
- [56] Huawei Technologies Co, "OptiX 8800 Hardware description," 2013.
- [57] Huawei Technologies Co. (2012). *OptiX NG WDM Network design*. Available: www.huawei.com.
- [58] E. Z. Shuvodip Das, "Modeling and performance analysis of RoF system for Home Area Network with Different Line Coding Schemes Using Optisystem," *International journal of multidisciplinary sciencies and engineering* vol. 5, june 2014.
- [59] Optiwave Systems Inc, "BER Analyzer. Parameters," 2008.
- [60] AMERICA, "Fiber, devices and Systems for Optical Communications: McGraw-Hill Companies," 2002.
- [61] O. Semiconductor. (15 de enero del 2015). Understanding Data Eye Diagram Methodology for Analyzing High Speed Digital Signals. Available: www.onsemi.com
- [62] Y. H. Xiang Yang, "The application of OptiSystem in optical fiber communication experiments," *Proceedings of the Third International*

Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCSCT '10), pp. 376-378, 14-15 august 2010.

- [63] Tawfik Ismail, "OptiSystem: Optical communication system and amplifier design sotware," march 2014.
- [64] J. B. Rivero, "Documentación técnica del curso "Introducción a las comunicaciones por fibra ópticas", Centro de Capacitación ETECSA. La Habana. Cuba.," 2010.
- [65] Huawei Technologies Co, "Price schedule, tecno backone," julio 2015.

Glosario de términos

APD: fotodiodo de Avalancha (avalanche photodiode).

ATM: modo de transferencia asincrónico (asynchronous transfer mode).

CapEx: gastos de capital (capital expenditures).

FON: fibra óptica nacional.

FWM: mezclado de cuatro ondas (four wave mixing).

MPLS: multiprotocolo conmutación de etiquetas (multiprotocol label switching).

MSP: protección de sección de multiplexación (multiplexing section protection).

NZD: dispersión no nula (non zero dispersion).

OAM: operación, administración y gestión (operation, administration and management).

OpEx: gastos de operación (operation expenditures).

OTN: red de transporte óptica (optical transport network).

SAN: red de área de almacenamiento (storage area network).

SDH: jerarquía digital sincrónica (synchronous digital hierarchy).

SNCP: protección de conexión de subred (subnetwork connection protection).

SONET: redes ópticas sincrónicas (synchronous optical network).

SPM: auto modulación de fase (self phase modulation).

XPM: modulación cruzada de fase (cross phase modulation).

WAN: red de área extensa (wide area network).

WDM: multiplexación por divisón de longitud de onda (*wavelength multiplexing modulation*).

Anexos

Anexo A

Tabla A.1 Ventanas de trabajo. Elaboración propia.

Banda	Descripción	Rango de longitudes onda (n m)
0	Original	1260 a 1360
E	Extendida	1360 a 1460
S	Longitud de onda corta	1460 a 1530
С	Convencional (de erbio)	1530 a 1565
L	Longitud de onda larga	1565 a 1625
U	Longitud de onda ultracorta	1625 a 1675

Ventana de trabajo (nm)	λ de trabajo (nm)
800 a 900	850
1250 a 1350	1310
1500 a 1600	1550



Figura A.1 Espectro electromagnético. Tomado de [64].

Anexo B

Fibre attributes				
Attribute	Detail	Value		
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm		
	Range of nominal values	8.6-9.5 μm		
	Tolerance	±0.6 μm		
Cladding diameter	Nominal	125.0 µm		
	Tolerance	±l μm		
Core concentricity error	Maximum	0.6 µm		
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%		
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm		
Macrobend loss	Radius	30 mm		
	Number of turns	100		
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB		
Proof stress	Minimum	0.69 GPa		
Chromatic dispersion coefficient	λ _{0min}	1300 nm		
	λ _{ūmax}	1324 nm		
	Sumax	0.092 ps/nm ² × km		
	Cable attributes			
Attribute	Detail	Value		
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km		
	Maximum at 1383 nm ±3 nm (Note 3)	0.4 dB/km		
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km		
PMD coefficient	M	20 cables		
(Note 4)	Q	0.01%		
	Maximum PMD _Q	0.20 ps/√km		

Tabla B.1 Atributos de ITU-T G.652 D. Tomado de [26].

NOTE 1 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm.

NOTE 2 – This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm. In this case, the cable cut-off wavelength should not exceed 1250 nm.

NOTE 3 – The average attenuation coefficient at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range of 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing. The hydrogen ageing is a type test that shall be done to a sampled fibre, according to [IEC 60793-2-50] regarding the B1.3 fibre category.

NOTE 4 – According to clause 6.2, a maximum PMD_Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD_Q.

Anexo C

<u>Parámetros</u>	<u>CWDM</u>	<u>Metro</u> <u>DWDM</u>	<u>DWDM Larga</u> Distancia (LD)	<u>DWDM Ultra</u> <u>larga Distancia</u> <u>(ULD)</u>
Estándar (UIT-T)	G.694.2		Recomendación G.	694.1
Aplicaciones	Acceso y MAN	MAN	WAN	WAN
Distancia (Km)	Hasta 80	40 - 300	Hasta 3000	3000 a 12000
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	S	, C, L
Espacio entre canales (nm)	20 (2500 GHz)	0.8 (100 GH	z) 0.4 (50 GHZ) 0.8 (100 GHz)	0.20 (25 GHz) 0.4 (50 GHZ) 0.8 (100 GHz)
Capacidad por canal (Gbps)	2,5 Gbps	hasta 10 Gbp	os 10 y	40 Gbps
Canales por fibra	Máximo de 18 Típico de 4-16	32- 80	40-160	80-160
Tipos de láser	DFB sin enfriamiento	DFB con enfriamiento		ento
Tecnologías de filtros	TFF	TFF, AWG, FBG		
Amplificación óptica	Ninguna	EDFA EDFA + RAMA		
Costo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

Tabla C.1 Características generales de los sistemas WDM. Elaboración propia.

Anexo D

El método que se describe en este anexo permite hacer el cálculo de forma precisa a partir de los valores de atenuación de cada tramo y las ganancias de cada amplificador óptico. Este método de cálculo se utiliza frecuentemente en el diseño de redes DWDM por proveedores de servicio de telecomunicaciones a nivel mundial como es el caso de Huawei *Technologies*.

En la figura E – 1 se muestra un diagrama correspondiente a las distintas etapas de amplificación de la señal óptica en una red transporte.



Figura E – 1. Cadena de amplificadores ópticos de una red de transporte. Elaboración Propia.

Para el cálculo de la OSNR en el punto Rn a partir del diagrama de la figura anterior el primer paso consiste en calcular la potencia de ruido para cada amplificador óptico. Esta se obtiene mediante la expresión:

$$P_{ASEi_t}(dB) = -58 + NF_i + G_i \tag{D1}$$

Donde NF_i es la figura de ruido y G_i es la ganancia de cada amplificador, ambas en dB.

Posteriormente se halla la componente de ruido óptica total P_{ASET} en miliWatts a través de la expresión D2.

$$P_{ASEi_{t}} = 10^{[0.1(P_{ASE_{1}}-L1+G2-L2+G3-L3+G4-\ldots L_{n}-1+Gn)]} + 10^{[0.1(P_{ASE_{2}}-L2+G3-L3+G4-\ldots L_{n}-1+Gn)]} + 10^{[0.1(P_{ASE_{1}})]} (D2)$$

Esta P_{ASET} se lleva a valores en dBm mediante D3.
El cuarto paso es determinar el valor de potencia de la señal óptica en el punto deseado, en este caso Rn. Esto se obtiene a través de un balance de potencia del sistema con los valores de atenuación de los trayectos y las potencias de los transmisores.

Finalmente se obtiene el valor de la relación señal a ruido óptica en el punto Rn hallando la diferencia entre la señal óptica transmitida y la potencia de ruido debido a los amplificadores.

 $OSNR (dB) = P_{Rn} - P_{ASETotal}$ (D4)

Anexo E

Tabla E.1 Precio de las principales unidades del OptiX OSN 8800 y OptiX OSN 6800 de Huawei. Tomado de [65].

Unidades funcionales del OptiX OSN 8800 T16 y OptiX OSN 6800				
Unidad	Descripción	Precio Unitario (USD)		
Rack.				
TN1B6RACK05	Rack N63B Tipo ETSI (2200*600*300mm) Sin Subrack (2*OSN 8800 T16+2*OSN 6800/8800 Plataforma Subrack).	1,066.78		
TN1B6RACK06	Rack N63B Tipo ETSI (2200*600*300mm) Sin Subrack (1*OSN 8800 T16+3*OSN 6800/8800 Platform Subrack).	1,066.78		
Subrack.				
TN1K6AFB	Ensamblaje del subrack (OSN 8800 T16).	1,500.85		
TN1K3AFB	Ensamblaje del subrack (OSN 6800).	808.21		
Unidades de Comunicación.				
TN16XCH	Alta Cross-conexión, Tarjeta del sistema de control y procesamiento del reloj.	1,672.32		
TN52SCC01	Tarjeta del sistema de control y comunicación.	790.79		
TN11PIU02	Unidad de interface de potencia.	95.16		
TN11AUX02	Tarjeta de interface del sistema auxiliar.	180.57		
TN13FIU01	Tarjeta de interface de fibra.	305.50		
TN11ST2	Unidad del canal supervisión óptica bidireccional y temporizador de la transmisión.	804.6		
Unidad Centralizada de <i>cross</i> -conexión.				

NSDS0XCOTN01	OptiX OSN 8800 OTN Función Fee.	1,009.40		
NSDS0XC36001	OptiX OSN 8800, Capacidad de cross-conexión Fee (360G) (U2000).	1,345.90		
Unidades multiplexoras				
TN11M4001	Tarjeta de multiplexación de 40 canales (C_ Even, 196.00THz~192.10THz, 100GHz,Thermal AWG,LC).	1,861.60		
TN11D4001	Tarjeta de demultiplexación de 40 canales (C Even, 196.00THz~192.10THz, 100GHz,Thermal AWG,LC).	1,861.60		
Unidades amplificadoras.				
TN12OBU103	Unidad Booster óptica de banda C (MAX -3dBm IN and 20dBm OUT, Gain 23dB).	3,165.89		
TN13OAU101	Unidad amplificadora óptica de banda C (MAX 0dBm IN and 20dBm OUT, Gain 20~31dB).	4,616.43		
TN13OAU103	Unidad amplificadora óptica de banda C (MAX -4dBm IN and 20dBm OUT, Gain 24~36dB).	4,708.73		
Módulo de compensación de la dispersión .				
TN11DCU02	Unidad de compensación de la dispersión (B, 40 Km, para G.652).	3,060.75		
TN11DCU03	Unidad de compensación de la dispersión (C, 60 km, para G.652).	4,074.30		
TN11DCU04	Unidad de compensación de la dispersión (D, 80 km, para G.652).	4,530.90		
TN11DCU05	Unidad de compensación de la dispersión (E, 100 km, para G.652).	5,654.55		
Unidades transpondedoras				
TN13LSXB	Tarjeta de conversión de la longitudes de onda a 10 Gbps.	10,331.10		
TN11LOA02	Tarjeta de conversión de la longitudes de onda 8 x ANY-rate MUX OTU2	8,890.20		

Atenuador/Adaptador			
SS-OP-ATN-LC-5	Atenuador óptico fijo, 1260nm~1620nm, 5dB, LC / P, 45dB	24.30	
SS-OP-ATN-LC-7	Atenuador óptico fijo,1260nm~1620nm, 7dB, LC / PC, 45dB	26.10	
SS-OP-ATN-LC-10	Atenuador óptico fijo,1260nm~1620nm, 10dB, LC / PC, 45dB	24.30	
SSC-OP-MVOA- D-2.5m-2.5m	Atenuador óptico tunable, Manual (Dual), 1290~1610nm, 0~30dB, 2.0dB, 40dB, 2mm*2.5m LC/PC	217.80	