

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRONICA,
COMPUTACION, INFORMACION
Y COMUNICACIONES



ESTUDIO COMPARATIVO EN BASE A COSTOS DE
ARQUITECTURAS DE CROSS-CONECTORES OPTICOS
VERSUS CROSS-CONECTORES ELECTRONICOS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRIA EN ADMINISTRACION
DE LAS TELECOMUNICACIONES

POR

ARTEMIZA DEL SOCORRO MARTINEZ LAFUENTE

MONTERREY, N. L.

JULIO 2005

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRONICA,
COMPUTACION, INFORMACION
Y COMUNICACIONES**



**ESTUDIO COMPARATIVO EN BASE A COSTOS DE
ARQUITECTURAS DE CROSS-CONECTORES ÓPTICOS
VERSUS CROSS-CONECTORES ELECTRONICOS**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRIA EN ADMINISTRACION
DE LAS TELECOMUNICACIONES**

POR

ARTEMIZA DEL SOCORRO MARTINEZ LAFUENTE

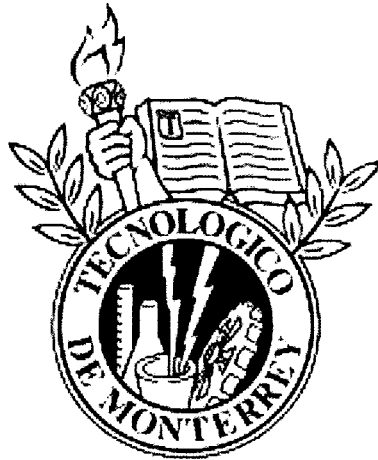
MONTERREY, N. L.

JULIO 2005

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN,
INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES**



**ESTUDIO COMPARATIVO EN BASE A COSTOS DE
ARQUITECTURAS DE CROSS-CONECTORES ÓPTICOS VERSUS
CROSS-CONECTORES ELECTRÓNICOS**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN DE LAS
TELECOMUNICACIONES**

POR:

ARTEMIZA DEL SOCORRO MARTÍNEZ LAFUENTE

MONTERREY, N.L.

JULIO 2005

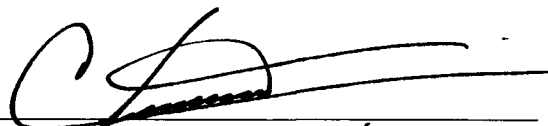
**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

**DIVISIÓN DE ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN, INFORMACIÓN Y
COMUNICACIONES**

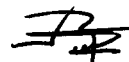
**PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN,
INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis de la Ing. Artemiza del Socorro Martínez Lafuente sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de Maestra en Administración de las Telecomunicaciones.

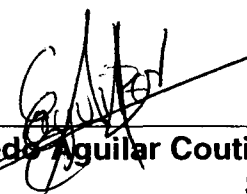
Comité de tesis:



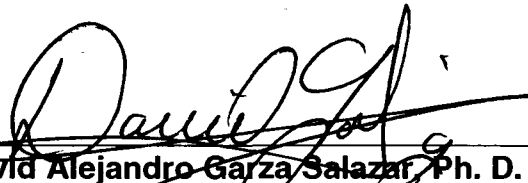
Gerardo A. Castañón Ávila, Ph. D.
ASESOR PRINCIPAL



José Ramón Rodríguez Cruz, Ph. D.
SINODAL



Artemio Alfredo Aguilar Coutiño, M. C.
SINODAL



David Alejandro Garza Salazar, Ph. D.
Director del Programa de Graduados en Electrónica,
Computación, Información y Comunicaciones
Julio 2005

**ESTUDIO COMPARATIVO EN BASE A COSTOS DE
ARQUITECTURAS DE CROSS-CONECTORES ÓPTICOS VERSUS
CROSS-CONECTORES ELECTRÓNICOS**

POR:

ARTEMIZA DEL SOCORRO MARTÍNEZ LAFUENTE

TESIS

Presentada al Programa de Graduados en Electrónica, Computación,
Información y Comunicaciones

Este trabajo es requisito parcial para obtener el grado de

Maestra en Administración de las Telecomunicaciones

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

JULIO 2005

Dedicatoria

A mis padres Ma. del Socorro y Carlos, a los cuales no les puedo expresar con palabras el agradecimiento, admiración y amor que siento por ustedes. Gracias por su incondicional apoyo y por el gran ejemplo de vida que me han dado. Gracias por enseñarme a superarme y estar buscando siempre el crecimiento en todos los aspectos. Gracias por ser tan comprensivos y buscar siempre mi bienestar. A ustedes dedico este logro profesional.

A mis hermanos Mónica y Carlos, que siempre han estado junto a mí en todo momento. Gracias por su incondicional apoyo, sus palabras de aliento y por ser mi gran ejemplo a seguir.

A mis cuñados Diego y Yolanda, por estar siempre al pendiente de todos mis logros y por sus palabras de aliento.

A mis sobrinos Carlos y Regina, gracias por ser la alegría que rejuvenece mi espíritu y me da fuerza para seguir adelante. Porque algún día alcancen esta y muchas metas más.

A Eduardo, por ser mi gran soporte en todo momento. Gracias por tu incondicional apoyo y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante. Gracias por levantarme cada vez que era difícil seguir adelante, por tu comprensión, por la fuerza y el valor que me ayudaste a no perder. Gracias por estar conmigo siempre y sobretodo gracias por tu amor. Este logro también es tuyo.

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Gerardo Castañón, por sus valiosos consejos, enseñanzas, paciencia, comprensión y apoyo en todo momento.

A mis sinodales el Dr. Ramón Rodríguez y M.C. Artemio Aguilar, por su tiempo y sus excelentes comentarios y sugerencias.

A Mónica Ramírez, muchas gracias por creer en mí, por todas tus palabras de aliento que siempre me ayudaban a seguir adelante, por escucharme y por estar al pendiente de mí.

A mis compañeros y amigos de la maestría, muchas gracias por compartir conmigo esta etapa y por todo lo que aprendí de cada uno de ustedes.

A mis amigos, que siempre han estado al pendiente de mis logros y por sus palabras de aliento.

A Dios, que me llenó de la fuerza, energía y motivación necesaria para alcanzar esta meta, muchas gracias.

Resumen

En esta tesis se analiza y compara a cuatro arquitecturas de cross-conectores. Tres de estas arquitecturas son cross-conectores ópticos y una de ellas es un cross-conector electrónico. En el caso de las arquitecturas ópticas, están formadas por componentes totalmente ópticos, es decir, las señales no se convierten nunca en señales eléctricas. Por otro lado, el cross-conector eléctrico recibe la señal óptica y la convierte en electrónica para poderla procesar, posteriormente transforma la señal de eléctrica a óptica.

El análisis realizado fue en base al costo que presentan los cuatro cross-conectores, el cual es diferente entre sí ya que los componentes que integran dichos cross-conectores son diferentes. Como se podrá observar en la tesis, el cross-conector de menor precio fue el OXC con arquitectura DSM (*Demultiplexing Switching and Multiplexing*), seguido por el cross-conector electrónico, posteriormente el OXC con arquitectura basada en PLC (*Planar Lightwave Circuit*), y por último el OXC con arquitectura B&S (*Broadcast and Select*).

Posteriormente se analizan y comparan tres topologías tipo *backbone*; la de USA, Japón y Europa, aplicando diferente OSNR y ganancia Raman. El análisis de estas redes se realizó para las cuatro arquitecturas de cross-conectores, resultando para todos los casos como la más barata, la construida con OXC con arquitectura DSM, enseguida la integrada por cross-conectores electrónicos, después la compuesta por OXC con arquitectura basada en PLC y por último la que está formada por la arquitectura B&S.

Tabla de Contenido

| | |
|---|------------|
| Dedicatoria..... | iv |
| Agradecimientos..... | v |
| Resumen..... | vi |
| Tabla de Contenido..... | vii |
| Lista de Gráficas y Figuras..... | xi |
| Lista de Tablas..... | xiv |
| Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Introducción General..... | 1 |
| 1.2. Antecedentes..... | 1 |
| 1.3. Definición del problema..... | 2 |
| 1.4. Justificación..... | 3 |
| 1.5. Objetivo..... | 3 |
| 1.6. Producto Final..... | 3 |
| 1.7. Organización del Documento..... | 3 |
| Capítulo 2. Marco Teórico..... | 5 |
| 2.1. Introducción a las telecomunicaciones..... | 5 |
| 2.2. La Fibra Óptica: Una nueva tecnología de telecomunicaciones..... | 7 |
| 2.3. Redes de telecomunicaciones..... | 9 |
| 2.3.1. Redes Ópticas..... | 9 |
| 2.3.2. Primera generación de Redes Ópticas..... | 10 |
| 2.3.3. Segunda generación de Redes Ópticas..... | 12 |
| 2.3.4. Tercera generación de Redes Ópticas..... | 12 |
| 2.3.5. WDM y DWDM..... | 13 |
| 2.4. Funcionamiento básico de la Fibra Óptica..... | 14 |
| 2.4.1. Tipos de fibras ópticas..... | 16 |
| 2.4.2. Bandas espectrales..... | 17 |
| 2.4.3. Enlace típico de fibra óptica..... | 17 |
| 2.5. Ventajas y desventajas de instalaciones ópticas..... | 18 |
| 2.5.1. Ventajas de instalaciones ópticas..... | 18 |
| 2.5.2. Desventajas de instalaciones ópticas..... | 19 |
| 2.5.3. Comparación entre instalaciones con fibra óptica y otros medios de transmisión..... | 20 |
| 2.6. Componentes Ópticos..... | 21 |
| 2.6.1. Módem Óptico..... | 21 |
| 2.6.2. Multiplexor..... | 22 |
| 2.6.3. Regeneradores..... | 23 |
| 2.6.4. Amplificadores Ópticos..... | 24 |
| 2.6.5. Generadores de luz..... | 27 |
| 2.6.6. Detección Óptica..... | 27 |
| 2.6.7. Acopladores..... | 28 |
| 2.6.8. Aisladores y circuladores..... | 30 |
| 2.6.9. Filtros..... | 31 |
| 2.6.10. Controladores de polarización..... | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6.11. Transponders..... | 31 |
| 2.6.12. Cross-conectores ópticos (OXC)..... | 32 |
| 2.7. Tendencia en los componentes ópticos..... | 33 |
| 2.8. Topologías de red..... | 34 |
| 2.8.1. Topologías lógicas..... | 34 |
| 2.8.2. Topologías físicas..... | 36 |
| 2.9. Topologías de red ópticas..... | 37 |
| 2.9.1. Arquitectura óptica de anillo..... | 38 |
| 2.9.2. Topología mesh..... | 39 |
| 2.10. Costos de cross-conectores electrónicos..... | 39 |
| 2.11. Costos y arquitectura de cross-conectores ópticos (OXC)..... | 40 |
| 2.11.1. Costos de componentes de cross-conectores ópticos..... | 41 |
| 2.11.2. Arquitectura de cross-conectores ópticos..... | 45 |
| 2.12. Planeación y diseño de Redes Ópticas..... | 51 |
| 2.12.1. Clasificación de las redes..... | 51 |
| 2.12.2. Consideraciones sobre diseño..... | 52 |
| 2.12.3. Restauración..... | 54 |
| 2.13. Administración de Redes Ópticas..... | 55 |
| 2.14. Consideraciones sobre las Redes Ópticas..... | 55 |
| 2.14.1. Consideraciones económicas..... | 55 |
| 2.14.2. Mercados para las redes ópticas..... | 56 |
| 2.14.3. El futuro de las Redes Ópticas..... | 57 |
| Capítulo 3. Metodología..... | 58 |
| 3.1. Introducción..... | 58 |
| 3.2. Análisis..... | 59 |
| 3.2.1. Calculo del OSNR..... | 59 |
| 3.2.2. Diagrama de flujo de la señal de un enlace..... | 62 |
| 3.2.3. Arquitecturas de OXC..... | 64 |
| 3.2.4. Parámetros de evaluación de la red..... | 66 |
| 3.3. Evaluación de las topologías..... | 67 |
| 3.4. Resultados de las tres topologías y las dos arquitecturas de OXC..... | 69 |
| 3.5. Comentarios sobre las tres topologías y las dos arquitecturas de OXC..... | 72 |
| 3.6. Una nueva arquitectura de OXC basada en PLC..... | 72 |
| 3.6.1. Introducción a la nueva arquitectura y su análisis..... | 72 |
| 3.6.2. Descripción de la nueva arquitectura de OXC..... | 73 |
| 3.6.3. Número de puertos y requerimientos de escalabilidad..... | 74 |
| 3.7. Desempeño del OSNR en las arquitecturas de OXC..... | 77 |
| 3.8. Resultados finales..... | 80 |
| Capítulo 4. Resultados y análisis de la investigación..... | 81 |
| 4.1. Consideraciones para el cálculo del costo de los cross- conectores..... | 81 |
| 4.2. Costo del OXC con arquitectura B&S..... | 82 |
| 4.2.1. Cálculo del costo del OXC con arquitectura B&S..... | 82 |
| 4.2.2. Costo del OXC con arquitectura B&S sin regeneración..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.3. Costo del OXC con arquitectura B&S con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 0dB..... | 85 |
| 4.2.4. Costo del OXC con arquitectura B&S con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB..... | 86 |
| 4.2.5. Comparación de costos de un OXC con arquitectura B&S con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas..... | 87 |
| 4.3. Costos del OXC con arquitectura DSM..... | 88 |
| 4.3.1. Cálculo del costo del OXC con arquitectura DSM..... | 88 |
| 4.3.2. Costo del OXC con arquitectura DSM sin regeneración..... | 89 |
| 4.3.3. Costo del OXC con arquitectura DSM con regeneración, con un OSNR de 25.5dB y una ganancia Raman de 0dB..... | 90 |
| 4.3.4. Costo del OXC con arquitectura DSM con regeneración, con un OSNR de 25.5dB y una ganancia Raman de 7dB..... | 92 |
| 4.3.5. Comparación de costos de un OXC con arquitectura DSM con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas..... | 93 |
| 4.4. Costos del OXC con arquitectura basada en PLC..... | 93 |
| 4.4.1. Cálculo del costo del OXC con arquitectura basada en PLC.... | 93 |
| 4.4.2. Costo del OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración..... | 94 |
| 4.4.3. Costo del OXC con arquitectura basada en PLC con regeneración, con OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 0dB..... | 96 |
| 4.4.4. Costo del OXC con arquitectura basada en PLC con regeneración, con OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB..... | 97 |
| 4.4.5. Comparación de costos de un OXC con una arquitectura basada en PLC con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas..... | 98 |
| 4.5. Costo de un cross-conector electrónico..... | 99 |
| 4.5.1. Cálculo de un cross-conector electrónico..... | 99 |
| 4.5.2. Costo de un cross-conector electrónico..... | 99 |
| 4.6. Costo de la topología de USA..... | 101 |
| 4.6.1 Costo de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 101 |
| 4.6.2 Costo de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 102 |
| 4.6.3 Costo de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 103 |
| 4.6.4 Costo de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 104 |
| 4.7 Costo de la topología de Japón..... | 105 |
| 4.7.1 Costo de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 105 |
| 4.7.2 Costo de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y | |

| | |
|---|------------|
| ganancia Raman de 7dB..... | 106 |
| 4.7.3 Costo de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 107 |
| 4.7.4 Costo de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 108 |
| 4.8 Costo de la topología de Europa..... | 109 |
| 4.8.1 Costo de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 109 |
| 4.8.2 Costo de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 110 |
| 4.8.3 Costo de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 111 |
| 4.8.4 Costo de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 112 |
| Capítulo 5. Conclusiones..... | 114 |
| 5.1. Conclusiones finales..... | 114 |
| 5.2. Trabajos futuros..... | 116 |
| Anexos..... | 117 |
| Bibliografía..... | 141 |
| Vita..... | 145 |

Lista de Gráficas y Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Diagrama básico de un sistema de telecomunicaciones..... | 6 |
| Figura 2.2. Tendido submarino de Fibra Óptica a nivel mundial..... | 8 |
| Figura 2.3. Servicios de longitud de onda <i>end-to-end</i> | 10 |
| Figura 2.4. Elementos de una infraestructura SONET..... | 11 |
| Figura 2.5. Fibra óptica..... | 15 |
| Figura 2.6. Transmisión básica de una Fibra Óptica..... | 15 |
| Figura 2.7. Comunicación bidireccional..... | 16 |
| Figura 2.8. Fibra óptica multimodal..... | 16 |
| Figura 2.9. Fibra óptica multimodal con índice graduado..... | 17 |
| Figura 2.10. Fibra óptica monomodal..... | 17 |
| Figura 2.11. Enlace con un módem óptico individual..... | 21 |
| Figura 2.12. Enlace multiplexado..... | 23 |
| Figura 2.13. Amplificadores ópticos..... | 25 |
| Figura 2.14. Diagrama de bloque de un EDFA..... | 26 |
| Figura 2.15. Amplificador óptico semiconductor..... | 26 |
| Figura 2.16. Diagrama de bloque de un receptor..... | 28 |
| Figura 2.17. Acoplador direccional..... | 28 |
| Figura 2.18. Tee Coupler..... | 29 |
| Figura 2.19. Topología estrella con acoplador estrella..... | 29 |
| Figura 2.20. Fused coupler..... | 30 |
| Figura 2.21. Circuladores de tres y cuatro puertos..... | 30 |
| Figura 2.22. Diagrama de bloque de un OXC..... | 32 |
| Figura 2.23. Cross-conexión óptica..... | 33 |
| Figura 2.24. Bloques funcionales claves para sistemas de transporte WDM..... | 33 |
| Figura 2.25. Topologías físicas y lógicas..... | 34 |
| Figura 2.26. Topología lógica punto a punto..... | 35 |
| Figura 2.27. Topología lógica estrella..... | 35 |
| Figura 2.28. Topología lógica bus..... | 36 |
| Figura 2.29. Topología lógica en anillo..... | 36 |
| Figura 2.30. Topología típica de un nuevo diseño óptico..... | 37 |
| Figura 2.31. Arquitectura óptica de anillo..... | 38 |
| Figura 2.32. Anillo óptico..... | 38 |
| Figura 2.33. Topología mesh..... | 39 |
| Figura 2.34. Diagrama funcional de un cross-conector..... | 41 |
| Gráfica 2.35. Pronóstico de mercado del crecimiento de los componentes Ópticos..... | 41 |
| Figura 2.36. Arquitectura de cross-conector 1..... | 45 |
| Figura 2.37. Arquitectura de cross-conector 2..... | 45 |
| Figura 2.38. Arquitectura de cross-conector 3..... | 46 |
| Figura 2.39. Arquitectura de cross-conector 4..... | 46 |
| Figura 2.40. Arquitectura de cross-conector 5..... | 47 |
| Figura 2.41. Arquitectura de cross-conector 6..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.42. Arquitectura de cross-conector 7..... | 48 |
| Figura 2.43. Arquitectura de cross-conector 8..... | 48 |
| Figura 2.44. Arquitectura de cross-conector 9..... | 49 |
| Figura 2.45. Arquitectura de cross-conector 10..... | 49 |
| Figura 2.46. Arquitectura de cross-conector 11..... | 49 |
| Figura 2.47. Arquitectura de cross-conector 12..... | 50 |
| Figura 2.48. Arquitectura de cross-conector 13..... | 50 |
| Figura 2.49. Arquitectura de cross-conector 14..... | 51 |
| Gráfica 2.50. Crecimiento de mercados..... | 56 |
| Figura 3.1. Red de transmisión óptica..... | 59 |
| Figura 3.2. Red de transmisión óptica con pérdida..... | 61 |
| Figura 3.3. Enlace de un nodo 1 y un nodo 2..... | 62 |
| Figura 3.4. Diagrama de flujo de una señal..... | 63 |
| Figura 3.5. Enlace con un nodo 1, un nodo 2 y un regenerador..... | 63 |
| Figura 3.6. OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda..... | 64 |
| Figura 3.7. Arquitecturas de OXC..... | 64 |
| Figura 3.8. Arquitectura de amplificadores..... | 65 |
| Figura 3.9. Eventos de las señales en un OXC..... | 66 |
| Figura 3.10. Topología en EUA..... | 68 |
| Figura 3.11. Topología en Europa..... | 68 |
| Figura 3.12. Topología en Japón..... | 68 |
| Figura 3.13. Compensación de dispersión..... | 69 |
| Gráfica 3.14. Razón de regeneración en las tres topologías con amplificadores EDFA..... | 70 |
| Gráfica 3.15. Razón de regeneración en las tres topologías con amplificadores Raman..... | 70 |
| Gráfica 3.16. Razón de regeneración de la topología Europea cuando se utiliza EDFA y cuando se utiliza Raman y EDFA..... | 71 |
| Figura 3.17. Nueva arquitectura de OXC con un banco de bloqueadores de longitud de onda..... | 74 |
| Gráfica 3.18. Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en EUA..... | 75 |
| Gráfica 3.19. Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en Japón..... | 75 |
| Gráfica 3.20. Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en Europa..... | 76 |
| Gráfica 3.21. Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en EUA..... | 77 |
| Gráfica 3.22. Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en Japón..... | 77 |
| Gráfica 3.23. Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en Europa..... | 77 |
| Gráfica 4.1. Costos contra entradas de la arquitectura B&S sin regeneración..... | 84 |
| Gráfica 4.2. Costos contra entradas de la arquitectura B&S con 5 | |

| | |
|---|-----|
| regeneradores..... | 86 |
| Gráfica 4.3. Costos contra entradas de la arquitectura B&S con 2 regeneradores..... | 87 |
| Gráfica 4.4. Costos contra entradas de la arquitectura B&S sin regeneración y con regeneración..... | 88 |
| Gráfica 4.5. Costos contra entradas de la arquitectura DSM sin regeneración..... | 90 |
| Gráfica 4.6. Costos contra entradas de la arquitectura DSM con 35 regeneradores..... | 91 |
| Gráfica 4.7. Costos contra entradas de la arquitectura DSM con 30 regeneradores..... | 93 |
| Gráfica 4.8. Costos contra entradas de la arquitectura DSM sin regeneración y con regeneración..... | 93 |
| Gráfica 4.9. Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC sin regeneración..... | 95 |
| Gráfica 4.10. Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC con 5 regeneradores..... | 97 |
| Gráfica 4.11. Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC con 2 regeneradores..... | 98 |
| Gráfica 4.12. Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC sin regeneración y con regeneración..... | 99 |
| Gráfica 4.13. Costos contra entradas del cross-conector electrónico..... | 101 |
| Gráfica 4.14 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 102 |
| Gráfica 4.15 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 103 |
| Gráfica 4.16 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 104 |
| Gráfica 4.17 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 105 |
| Gráfica 4.18 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 106 |
| Gráfica 4.19 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 107 |
| Gráfica 4.20 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 108 |
| Gráfica 4.21 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 109 |
| Gráfica 4.22 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 110 |
| Gráfica 4.23 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 111 |
| Gráfica 4.24 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 112 |
| Gráfica 4.25 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 113 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Tres generaciones de redes ópticas..... | 12 |
| Tabla 2.2. Bandas espectrales..... | 17 |
| Tabla 2.3. Comparación entre instalaciones ópticas y otros medios de transmisión..... | 20 |
| Tabla 2.4. Aplicaciones de enlaces y número de fibras ópticas necesarias.. | 22 |
| Tabla 2.5. Razón de datos de SONET y SDH..... | 40 |
| Tabla 2.6. Costo aproximado de los cross-conectores electrónicos..... | 40 |
| Tabla 2.7. Costo de circuito planar de onda luminosa (PLC)..... | 42 |
| Tabla 2.8. Costo de bloqueadores de longitud de onda (WB)..... | 42 |
| Tabla 2.9. Costo de regeneradores..... | 42 |
| Tabla 2.10. Costo de convertidores de longitud de onda (WC)..... | 42 |
| Tabla 2.11. Costo de demultiplexor y multiplexor (MUX/DEMUX)..... | 42 |
| Tabla 2.12. Costo de transponders..... | 43 |
| Tabla 2.13. Costo de switch..... | 43 |
| Tabla 2.14. Costo de atenuador óptico variable (VOA)..... | 43 |
| Tabla 2.15. Costo de divisores..... | 44 |
| Tabla 2.16. Costo de acopladores..... | 44 |
| Tabla 2.17. Costo de amplificadores..... | 44 |
| Tabla 2.18. Costo de circuladores..... | 45 |
| Tabla 3.1. Parámetros de evaluación de la red..... | 66 |
| Tabla 3.2. Distancia promedio de trayectoria (D), desviación estándar de la distancia de la trayectoria (σ) y número promedio de saltos (H).... | 71 |
| Tabla 3.3. Parámetros de evaluación de la red para la nueva arquitectura.. | 78 |
| Tabla 3.4. Resultados del OSNR en decibeles para los tres tipos de OXC y para las tres rutas que puede tomar la señal..... | 79 |
| Tabla 4.1. Precio del cross-conector electrónico..... | 81 |
| Tabla 4.2. Precios de los componentes de un cross-conector óptico..... | 82 |
| Tabla 4.3. Costo de un OXC con arquitectura B&S sin regeneración..... | 83 |
| Tabla 4.4. Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura B&S..... | 84 |
| Tabla 4.5. Costo de un OXC con arquitectura B&S con 5 regeneradores..... | 85 |
| Tabla 4.6. Costos para diferente número de entradas/salidas con 5 regeneradores para un OXC con arquitectura B&S..... | 85 |
| Tabla 4.7. Costo de un OXC con arquitectura B&S con 2 regeneradores..... | 86 |
| Tabla 4.8. Costos para diferente número de entradas/salidas con 2 regeneradores para un OXC con arquitectura B&S..... | 87 |
| Tabla 4.9. Costo de un OXC con arquitectura DSM sin regeneración..... | 89 |
| Tabla 4.10. Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura DSM..... | 89 |
| Tabla 4.11. Costo de un OXC con arquitectura DSM con 35 regeneradores..... | 91 |
| Tabla 4.12. Costos para diferente número de entradas/salidas con 35 regeneradores para un OXC con arquitectura DSM..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.13. Costo de un OXC con arquitectura DSM con 30 regeneradores..... | 92 |
| Tabla 4.14. Costos para diferente número de entradas/salidas con 30 regeneradores para un OXC con arquitectura DSM..... | 92 |
| Tabla 4.15. Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración..... | 95 |
| Tabla 4.16. Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura basada en PLC..... | 95 |
| Tabla 4.17. Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC con 5 regeneradores..... | 96 |
| Tabla 4.18. Costos para diferente número de entradas/salidas con 5 regeneradores para un OXC con arquitectura basada en PLC..... | 96 |
| Tabla 4.19. Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC con 2 regeneradores..... | 97 |
| Tabla 4.20. Costos para diferente número de entradas/salidas con 2 regeneradores para un OXC con arquitectura basada en PLC..... | 97 |
| Tabla 4.21. Costo de un cross-conector electrónico..... | 100 |
| Tabla 4.22. Costos para diferente número de entradas/salidas para un cross-conector electrónico..... | 100 |
| Tabla 4.23 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 101 |
| Tabla 4.24 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 102 |
| Tabla 4.25 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 103 |
| Tabla 4.26 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 104 |
| Tabla 4.27 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 106 |
| Tabla 4.28 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 106 |
| Tabla 4.29 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 107 |
| Tabla 4.30 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 108 |
| Tabla 4.31 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB..... | 110 |
| Tabla 4.32 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB..... | 110 |
| Tabla 4.33 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB..... | 111 |
| Tabla 4.34 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB..... | 112 |

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción General

Hoy en día, las personas y las organizaciones están solicitando sistemas de comunicación por los cuales se transmitan voz, video y datos, a altas velocidades, de una forma confiable y barata. Por esta razón, los medios de transmisión de larga distancia que se tenían hasta hace algún tiempo, como lo son el cable coaxial y el par trenzado, están siendo sustituidos debido a sus limitaciones por tecnologías nuevas, las cuales pueden satisfacer estas necesidades de comunicación.

Uno de estos medios de transmisión es la fibra óptica, la cual junto con los componentes ópticos se encuentran en una etapa de evolución, hasta llegar al diseño e implementación de redes totalmente ópticas o transparentes. Además han demostrado ser un sistema de comunicación altamente eficiente y confiable, que poco a poco ha ido disminuyendo en costos hasta llegar a ser más rentable que su contraparte electrónica. Este sistema de transmisión hizo su entrada en el mercado durante los años 70-y ha llegado a ser esencial para las telecomunicaciones, redes de datos y empresas de TV por Cable.

1.2 Antecedentes

En los últimos años la fibra óptica se ha convertido en uno de los medios de comunicación mas avanzados, así mismo vino a revolucionar las telecomunicaciones brindando una mayor velocidad de transmisión disminuyendo en gran medida el ruido y las interferencias.

Pero el concepto de comunicación por medio de luz no es un tema reciente, tiene más de un siglo de antigüedad. En el año de 1880, Alexander G. Bell construyó el fotófono que enviaba mensajes vocales a corta distancia por medio de la luz. Sin embargo, resultaba no viable por la falta de fuentes de luz adecuadas (Safford, 1988).

Con la aparición del rayo láser en la década de los 60, la idea de la transmisión óptica resurgió y se comenzaron a hacer estudios básicos sobre modulación y detección óptica. Posteriormente, con el empleo de fibras de vidrio como medio guía resultó de gran éxito, ya que es un material de fácil manejo, flexibilidad, bajo costo, muy ligero, y su tamaño es muy pequeño. Pero estas no eran las únicas características que hacían a este material atractivo, sino que también permitía guiar la luz a través de múltiples reflexiones internas.

El problema que surgió con estos primeros intentos de transmisión óptica fue que las fibras absorbían la luz y se dificultaba el proceso. Por esta razón se vio la necesidad de reemplazar el vidrio ordinario y se comenzaron a desarrollar vidrios más puros con transparencias mucho mayores.

Conforme han ido pasando los años la labor de investigación se ha incrementado y hoy en día ya se cuenta con mejores materiales, componentes y teorías más sólidas para la mejor aplicación de este sistema de comunicaciones.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la fibra óptica es aún un sistema nuevo de comunicación, y todavía hay mucho campo de estudio, tanto técnica como estratégicamente. Pero en este caso, resulta de particular interés lo que corresponde a la parte estratégica, ya que muchas organizaciones cuentan con redes de telecomunicaciones basados en tecnologías limitantes, y que desean migrar a redes que les permitan satisfacer sus necesidades de comunicación, pero desconocen el ahorro en componentes y por lo tanto en costos que las redes ópticas ofrecen.

1.3 Definición del problema

La finalidad de las redes transparentes es que la señal sea conmutada en forma óptica a lo largo de su trayectoria a su destino, también se pretende evitar lo más posible la conversión opto-electrónica (O/E) y de igual forma la conversión electro-óptica (E/O) de la señal (Castañón, 2002).

Para reducir el costo de las redes se ha propuesto evitar el uso de receptores, conversores electrónicos, regeneradores electrónicos, y transmisores ópticos. Un análisis que considera redes multi-canal ha demostrado que del 50% al 70% de la inversión en una red se debe a la conversión O/E/O y por ende al uso de los componentes mencionados anteriormente (Castañón, 2002).

Por esta razón se han buscado alternativas a los cross-conectores electrónicos, y se han diseñado diversas arquitecturas de OXC que permitan conmutar una señal de forma óptica a través del nodo. Pero aún no se ha podido evitar del todo la regeneración de la señal en un enlace, debido a esto se ha propuesto una arquitectura híbrida en la cual la señal que no necesite de regeneración pasará transparentemente, y las que requieran regeneración entrarán al banco de regeneradores. Actualmente este tipo de redes son factibles.

En esta tesis se realizará un análisis en el cual se muestren y comparen los costos de tres cross-conectores ópticos y un cross-conector electrónico, y también el costo de tres topologías aplicando estos cross-conectores, ya que

actualmente se cuenta con investigaciones sobre el ahorro en componentes, mas no se muestra el ahorro en costos que esto genera.

1.4 Justificación

Esta investigación se realizará con el fin de establecer escenarios para comparar en base a costos. Estos escenarios son las topologías de USA, Europa y Japón utilizando cross-conectores con diferente OSNR y diferente ganancia Raman en la red, y van a ser útiles para determinar los casos en los que es más conveniente utilizar cross-conectores ópticos sobre los electrónicos, así como también que factores son los que intervienen en la determinación de los costos.

1.5 Objetivo

La base de comparación serán diferentes arquitecturas de cross-conectores. Para hacer la comparación se tomará en cuenta un cross-conector electrónico y tres cross-conectores ópticos, los cuales proponen y demuestran un ahorro en sus componentes internos. Esto con el fin de determinar cual es el ahorro en costos que representa cambiar a una red totalmente óptica.

1.6 Producto Final

Al finalizar el desarrollo de esta tesis, se tendrá una comparación que arrojará resultados cuantitativos en cuanto al costo que representa implementar diferentes topologías con diferentes arquitecturas de cross-conectores, uno electrónico y tres ópticos. Esta información puede ser útil a compañías de telecomunicaciones que estén interesadas en cambiar a redes totalmente ópticas.

1.7 Organización del Documento

Esta investigación se encuentra dividida en 5 capítulos, en donde podemos encontrar el Capítulo 1, el cual presenta una introducción sobre el tema que se va a analizar, además se expone el objetivo que esta investigación persigue y el producto final esperado.

En el Capítulo 2 se describen detalladamente los temas que se relacionan con esta investigación, estos son: una breve introducción a las telecomunicaciones, una panorámica sobre las redes de comunicación óptica, el funcionamiento básico de la fibra óptica, así como sus ventajas, desventajas y comparación con otros medios; también se describen los componentes que forman parte de una red transparente, se hace una breve descripción de las topologías de red en general y ópticas; por otro lado, se incluyen los costos de cross-conectores electrónicos, los costos de los componentes que forman parte de un cross-conector óptico, y posteriormente se ilustran algunas arquitecturas de cross-conector óptico; por último, se realiza una breve descripción sobre la planeación, el diseño, y la administración de redes ópticas, así como algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta respecto a este tipo de redes.

La metodología que se siguió para la realización de esta investigación se describe en el Capítulo 3, en la cual se tomó como base el artículo referente a los requerimientos de desempeño para redes DWDM semitransparentes y que presenta dos arquitecturas de OXC (*Optical Cross-connector*), la arquitectura B&S (*Broadcast and Select*) y DSM (*Demultiplexing Switching and Multiplexing*) (Castañón, 2004); y el artículo que trata sobre una nueva arquitectura de cross-conector óptico basado en tecnología PLC (*Planar Lightwave Circuit*) (Castañón, 2005).

Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 4, aquí se muestran los costos que representan los diferentes tipos de cross-conectores que se analizaron en el Capítulo 3, adicionalmente se toma en cuenta el costo de un cross-conector electrónico. Posteriormente, con esta información se puede calcular el costo que implica la implementación de una red *backbone* con topología de EUA (Estados Unidos de América), Japón y Europa.

Por último se presenta el Capítulo 5, en el cual se pueden encontrar las conclusiones en cuanto al costo total y comparación de las diferentes tipos de redes. También se hablará sobre algunos trabajos futuros que se pueden llevar a cabo sobre este mismo tema.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Introducción a las telecomunicaciones

La palabra telecomunicaciones esta compuesta de dos partes: *tele* de origen griego y que significa “a través de la distancia” y *comunicaciones* que significa “intercambio de información”, por lo tanto se puede definir telecomunicaciones como el “intercambio de información a través de la distancia” mediante el uso de un dispositivo (Mynbaev, 2001). Algunos de los dispositivos que se utilizan en este concepto son el teléfono, la radio y la televisión.

El problema central de las telecomunicaciones se desenvuelve en el hecho de que la información se genera desde una fuente y debe entregarse a un destinatario que generalmente se encuentra en algún punto geográficamente distante del origen, por lo tanto, se debe determinar cual es la mejor forma de enviar la información de manera rápida, segura y confiable (Kuhlman, 1997).

Existen tres tipos básicos de información: datos, voz y video. Anteriormente cada tipo de información se distribuía a través de dispositivos diferentes y dedicados. Para el intercambio de voz se utilizaba el teléfono y la radio, para el intercambio de video se contaba con la televisión, y para el procesamiento de datos se utilizaba la computadora (Mynbaev, 2001).

En la actualidad, los tres tipos de información se han unido y por medio de la telefonía se puede distribuir voz en señales digitales y se utiliza la computadora a cualquier nivel de la red telefónica. Por otro lado, las compañías de televisión por cable han desarrollado esfuerzos para también proveer de servicios computacionales y telefónicos. Pero la industria de la computación también se encuentra en crecimiento e incluye voz y video dentro de sus servicios (Mynbaev, 2001).

En la figura 2.1 se muestra el diagrama básico de un sistema de telecomunicaciones, la información en su forma original entra a un transmisor y éste la convierte en un formato conveniente para su transmisión. Por ejemplo, una señal eléctrica entra, después el transmisor prepara la señal convertida para su transmisión y envía la señal. La señal viaja a través del medio de transmisión, el cual puede ser cable coaxial, el aire, o la fibra óptica, hasta llegar a un receptor que reconoce la señal y la prepara para su conversión. Por último el receptor convierte la señal a su forma original (Mynbaev, 2001).

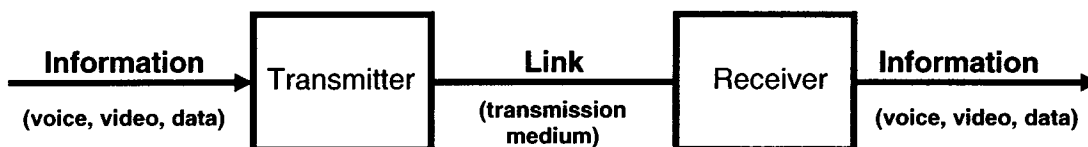


Figura 2.1 Diagrama básico de un sistema de telecomunicaciones.

De acuerdo a lo anterior, podemos determinar que un sistema de comunicaciones se integra en su forma más sencilla por cinco componentes básicos (Kuhlman, 1997):

- Fuente de información.
- Transmisor.
- Canal de comunicaciones.
- Receptor.
- Destinatario de la información.

Una red es una combinación de enlaces interconectados, y la Internet es la red de redes que conecta computadoras alrededor del mundo. Los usuarios utilizan el Internet para intercambiar voz, video o datos con cualquier persona en cualquier parte del mundo. Pero para que esto sea posible, la red debe incluir conexiones físicas con cierta inteligencia, y es funcional debido a la combinación apropiada de circuitos físicos y capas lógicas (Mynbaev, 2001).

Actualmente se ha presentado un aumento en la demanda de mayor capacidad de transmisión, mejor calidad en el servicio, e integración de los diferentes tipos de información (datos, video y voz) en sus aplicaciones. Esto ocasiona que la navegación por Internet y el uso de las redes de telecomunicaciones basadas en medios de comunicación como par trenzado, cable coaxial y línea telefónica sea muy lento (Avatar y Legba, 2002).

Este incremento en la demanda por mayor capacidad se debe principalmente a dos razones: se esta produciendo una gran cantidad de información, y en su mayoría se transmite en forma digital (Mynbaev, 2001).

-Debido a que la cantidad de información producida es cada vez más grande, también es más grande la necesidad de mejorar su forma de entrega, esto se debe a que la información funciona solamente cuando es entregada al tiempo, lugar y forma correcta, es decir, la información se debe entregar instantáneamente y libre de distorsión (Mynbaev, 2001).

El advenimiento de la digitalización ha sido el gran avance para todos los medios de transmisión antes mencionados, permitiendo así que la señal se dividiera en bits y por lo tanto, el tratamiento de la misma mediante procedimientos informáticos que se han desarrollado en paralelo. Dicha digitalización conlleva, por otra parte, que las señales dejen de estar asociadas a

un medio específico como la televisión o la voz para quedar encuadradas simplemente como un flujo de bits (Ozcariz, 2002).

De acuerdo con Cahn (1998), actualmente nos encontramos en la era de las redes, en la cual cada edificio esta interconectado con los demás. Mynbaev (2001) menciona que en esta era de las redes e información, las naciones producen más información que productos tangibles, relegando a la industria manufacturera a un segundo plano dentro de sus economías.

Las redes son una parte fundamental para la operación eficiente de las empresas, esto es: generan ganancias, hacen más ágil la comunicación organizacional y con el exterior, y otros aspectos de la vida cotidiana. Pero el éxito de una red no se puede alcanzar si esta se ve de una forma fragmentada, se tiene que ver como entidades holísticas. El buen diseño de la red es primordial para su funcionamiento y eficiencia (Cahn, 1998).

2.2 La Fibra Óptica: Una nueva tecnología de telecomunicaciones

Conforme la evolución de las telecomunicaciones se ha ido dando, también los medios de transmisión se tuvieron que ir adecuando a las necesidades cada vez más demandantes.

Entre algunos de los sistemas de transmisión podemos encontrar:

- Microondas.
- Satélite.
- Cable coaxial.
- Par trenzado.
- Fibra óptica.

A pesar de que la Fibra óptica es un medio de transmisión cuyos estudios e investigación comenzaron hace más de un siglo, es hasta la década de los 70 cuando comienza su aplicación y utilización en el área de las telecomunicaciones.

Según Malaguera (2002), la Fibra óptica representa el medio ideal para satisfacer el marcado crecimiento de la demanda de servicios. Todos desean servicios de voz confiables, una alta tasa de transmisión de datos, y video de calidad. Estos servicios son entregados por DSL's (*Digital Subscriber Line*), módems de cable, arquitecturas inalámbricas, o fibra óptica. Pero la forma en que se provee de estos servicios representa un gran número de retos, incluyendo el ¿cómo conseguir las líneas de salida para cada cliente?. Una solución a esta problemática sería el uso de FTTH (*Fiber To The Home*) (IEC, 2002).

El crecimiento de la fibra óptica y las telecomunicaciones en telefonía y televisión ha sido desenfrenado. En la actualidad se está llevando a cabo una convergencia mediante fusiones entre los fabricantes, las compañías telefónicas, las compañías de televisión por cable, y los ISP's (*Internet Service Providers*). La industria de las comunicaciones esta cambiando, el futuro esta en la habilidad para comunicarse. Se ha pasado de lo análogo a lo digital y de lo electrónico a lo fotónico. Las supercarreteras de fibra de vidrio portando los pulsos de luz atraviesan las ciudades y océanos llevando una enorme cantidad de información. La base de esta revolución es la fibra óptica, la cual esta cambiando la forma en la que nos comunicamos (Thorsen, 1998). DeCusatis (1998) menciona que la fibra óptica esta comenzando a emerger como una seria alternativa al cable coaxial en las interconexiones computacionales, hay suficiente fibra instalada en el mundo que iría de la tierra a la luna 28 veces.

El primer enlace de Fibra óptica internacional ocurrió en 1986 y se hizo entre Inglaterra y Bélgica, y el primer cable de Fibra óptica trasatlántico fue en 1986 y se trataba del sistema TAT-8, el cual fue una cooperación entre Estados Unidos y Gran Bretaña. A través de este cable se pueden transmitir alrededor de 40,000 conversaciones telefónicas, lo cual representa una capacidad de transmisión mucho mas grande que los enlaces satelitales trasatlánticos sumados a otros cables que se utilizan para el mismo fin (Kuhlman, 1997).

En la figura 2.2 se muestra un mapa que indica el tendido submarino de fibra óptica a nivel mundial (Pedrero, 2001). Como se puede ver en esta imagen, actualmente se cuenta con una gran cantidad de kilómetros de fibra óptica que comunica a los cinco continentes del mundo.

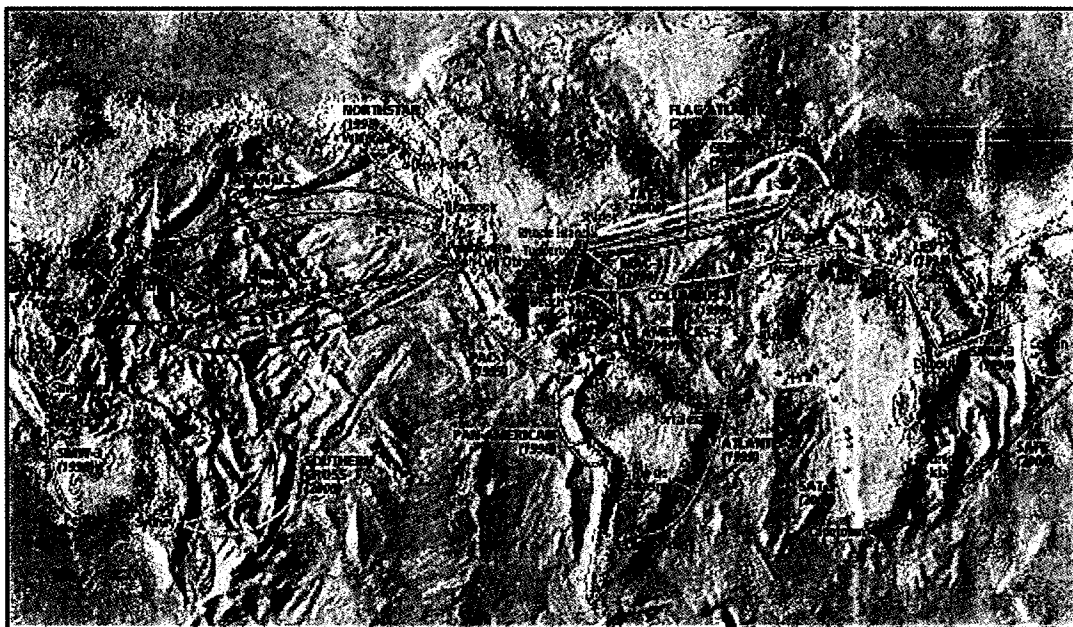


Figura 2.2 Tendido submarino de Fibra Óptica a nivel mundial.

2.3 Redes de telecomunicaciones

De acuerdo a Ramaswami y Sivarajan (1998) existen diferentes tipos de de redes de telecomunicaciones. Primero se tienen las redes que se extienden a través de empresas privadas, es decir, que la empresa es dueña del equipo y los enlaces de la red. Generalmente los enlaces que cruzan terreno público son rentados a un *carrier* de telecomunicaciones, a este tipo de redes se les conoce como Redes Empresariales o Redes de Área Local (LANs Local Area Networks). A las redes que comunican edificios se les llama Redes Metropolitanas (Metro Networks), y las redes que se extienden entre ciudades son conocidas como Redes de Área Amplia (WANs Wide Area Networks).

Por otro lado, se pueden observar redes que son proveídas por *carriers* de telecomunicaciones. Los *carriers* dan servicio a los usuarios y operan las redes, dentro de los servicios que ofrecen se tiene la renta de enlaces a empresas. Este tipo de redes es conocida como Redes Públicas, las cuales se pueden dividir en cuatro categorías y se mencionan a continuación (Ramaswami y Sivarajan, 1998):

- **Redes de acceso.** Es la parte de la red que abarca la salida de la oficina central hacia los hogares y negocios. Un *carrier* tiene una oficina central en cada población en la que opera.
- **Redes de intercambio local.** Es la parte de la red que interconecta edificios de una compañía y las redes de acceso.
- **Redes Metropolitanas.** Son las redes que interconectan colonias y municipios en una ciudad.
- **Redes de inter-intercambio.** Estas redes son de transporte a través grandes distancias que interconectan ciudades o concentrados de gran tráfico.
- **Redes submarinas.** Conectan continentes mediante tendidos de fibra óptica submarina, cuya longitud puede ser de varios miles de kilómetros.

2.3.1 Redes Ópticas

Según un artículo publicado por IEC llamado *Optical Networks* (2004), se define a las redes ópticas como redes de telecomunicaciones de alta capacidad que se basan en tecnologías y componentes ópticos, los cuales proveen ruteo, preparación, y restauración a nivel de longitud de onda, así como también servicios basados en longitud de onda.

Las redes ópticas tienen su base en la capa óptica de las redes de transporte, proporcionando así alta capacidad y reducción de costos para las nuevas aplicaciones como el Internet, video, multimedia y servicios digitales avanzados. Las redes ópticas proporcionan el ancho de banda necesario y la

flexibilidad para habilitar servicios de longitud de onda *end-to-end*, en la figura 2.3 se ilustra un ejemplo (IEC, 2004).

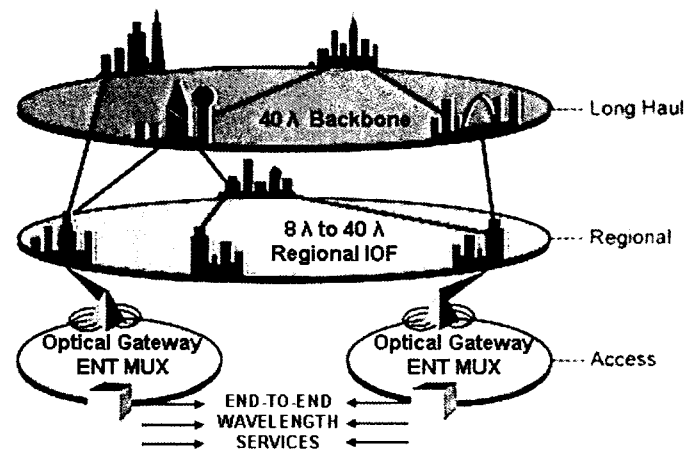


Figura 2.3 Servicios de longitud de onda end-to-end.

Las redes ópticas nacieron con la tecnología WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), la cual surgió para proporcionar capacidad adicional a las fibras existentes. Las bases de una red óptica están proporcionadas por la arquitectura y los elementos de la red ya definidos, los componentes de una red óptica se determinan de acuerdo a la forma en la que la longitud de onda se transmite, prepara, o implementa en la red (IEC, 2004).

Desde el punto de vista de capas, la red óptica requiere de una capa óptica adicional. Las redes se dividen en diferentes capas físicas o virtuales, la primera capa es la de servicios, aquí es en donde los servicios entran a la red de telecomunicaciones. La segunda capa provee restauración, monitoreo de desempeño, y suministra comunicación a la primera capa. Emergiendo con las redes ópticas está la tercera capa, la capa óptica, para la cual aún se están estableciendo estándares, pero eventualmente tendrá la misma funcionalidad que la capa SONET (IEC, 2004).

2.3.2 Primera generación de Redes Ópticas

De acuerdo a Ramaswami y Sivarajan (1998), en un inicio solamente se utilizaba la fibra óptica como un medio de transmisión que reemplazaba a otros medios como el cable coaxial o el par trenzado, y todo el procesamiento de bits era manejado por medios electrónicos. A este tipo de redes se les conoce como primera generación de redes ópticas, las cuales han sido ampliamente implementadas.

Podemos encontrar algunos ejemplos de la primera generación de redes ópticas, estos son: SONET y SDH; estas redes forman el centro de la infraestructura de telecomunicaciones de Norte América, Europa y Asia (Ramaswami y Sivarajan, 1998).

Ramaswami y Sivarajan (1998) mencionan que SONET (*Synchronous Optical Networks*) es el estándar actual para la transmisión y multiplexado de señales de alta velocidad dentro de la infraestructura de *carriers* en Norte América. SONET se desarrolla en tres diferentes tipos de configuraciones de red: anillos, configuraciones lineales y enlaces punto a punto. En la figura 2.4 se pueden ver los elementos que componen la infraestructura de SONET. Cuando la configuración es punto a punto, los nodos al final del enlace se conocen como *terminal multiplexers* (TMs) o *line terminating equipment* (LTE). En algunas ocasiones es necesario seleccionar algunos *streams* de baja velocidad de algún *stream* de alta velocidad y viceversa, a esta función se le conoce como *add/drop multiplexer* (ADM). Los ADMs pueden ser colocados entre el enlace punto a punto y los TMs. La configuración de anillo proporciona seguridad a la red por si llegara a ocurrir alguna falla, además los anillos hechos de ADMs realizan las operaciones de multiplexado y demultiplexado. Existen dos tipos de arquitectura de anillos: *unidirectional path-switched rings* (UPSR) y *bidirectional line-switched rings* (BLSR). La topología de anillo así como otras topologías se explicarán posteriormente. Por último se tiene un componente conocido como *digital cross-connect* (DCS), el cual se utiliza para administrar todas las facilidades de transmisión de la oficina central.

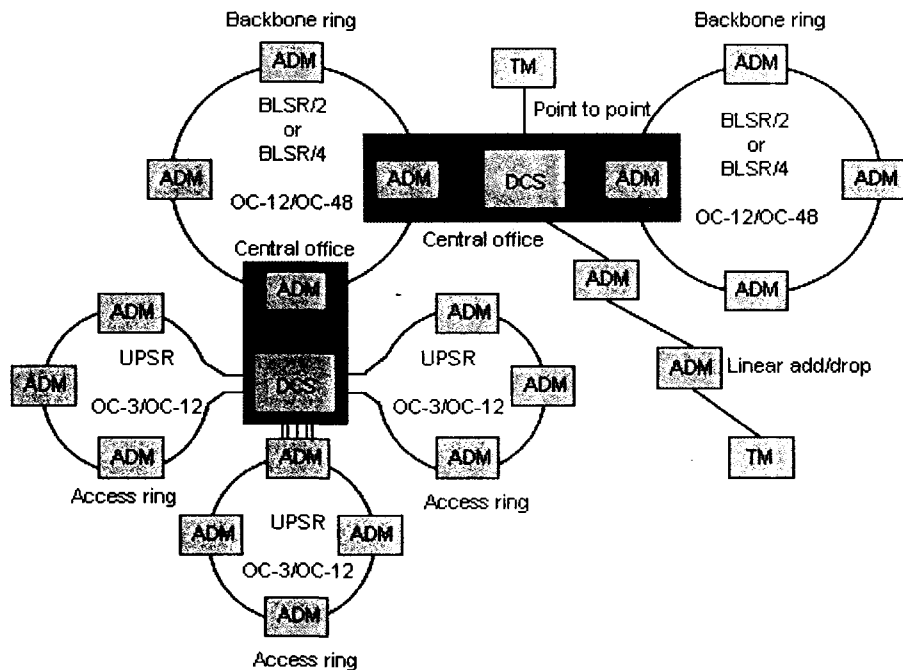


Figura 2.4 Elementos de una infraestructura SONET.

2.3.3 Segunda generación de Redes Ópticas

Investigaciones recientes han demostrado que las redes ópticas pueden proveer funciones adicionales a la de solamente establecer una transmisión punto a punto. Se pueden obtener más ventajas al incluir funciones de conmutación y ruteo de forma óptica, en lugar de electrónica como se ha hecho anteriormente. En las redes de primera generación, la electrónica se encargaba de manejar los datos que llegaban al nodo y los datos necesarios para ir a otros nodos de la red. Si estos últimos datos se pudieran rutear a través de mecanismos ópticos, la carga de electrónica en ese nodo se reduciría significativamente (Ramaswami y Sivarajan, 1998).

2.3.4 Tercera generación de Redes Ópticas

En la tabla 2.1 se muestran las principales características de las tres generaciones de redes (Black, 2002).

| | Primera Generación | Segunda Generación | Tercera Generación |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| Nombre | T1/E1 | SONET/SDH | OTN |
| Familia | Primera | Segunda | Tercera |
| Diseñada para | Voz, Non-BOD, Estática | Voz, Non-BOD, Estática | Voz, Video, Datos, Tailored QoS, BOD, Dinámica |
| Esquemas MUX/SW | TDM/E/E/E | TDM/O/E/O | WDM/O/O/O |
| Principales medios iniciales | Cobre | Cobre y Fibra | Fibra |
| Capacidad | Mbit/s | Gbit/s | Tbit/s |
| Carga útil típica | Longitud fija | Longitud fija | Longitud fija o variable |
| <i>Protocol Inter-Working?</i> | No | PPP, IP, ATM | Sí: PPP, IP, ATM, MPLS |

Tabla 2.1 Tres generaciones de redes ópticas.

La primera columna representa el nombre asociado con la tecnología, la primera generación es conocida como T1 o E1, la segunda generación es llamada SONET (*Synchronous Optical Network*) o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), y la tercera generación se conoce con el término OTN (*Optical Transport Network*). En la segunda columna se identifica la familia de la generación. En la tercera columna se muestra el tipo de carga útil para la cual fue diseñada la red, la primera y segunda generación están diseñadas para el tráfico de voz, también pueden transportar datos y video, aunque no están

optimizadas para este tipo de tráfico; en cambio la tercera generación esta diseñada para transportar voz, datos y video (Black, 2002)

En la tercer columna también se puede encontrar la notación Non-BOD o BON, la primera y segunda generación no están diseñadas para proveer ancho de banda sobre demanda (BOD, *Bandwidth on demand*), en contraste, la tercera generación es mas dinámica y permite que el ancho de banda sea solicitado de acuerdo a la demanda. La cuarta columna se refiere al esquema de multiplexado TDM o WDM, también se especifica la forma en la cual la red hace la conmutación del tráfico; en la primera generación se reciben señales eléctricas (primera E), se procesan (segunda E), y se envían a otro nodo (tercera E); en la segunda generación se reciben señales ópticas (primera O), se convierten en señales eléctricas para procesarlas (E), y posteriormente se convierten las señales eléctricas en señales ópticas para su transmisión (segunda O); en la tercera generación todo el procedimiento de transmisión es realizado en forma óptica sin tener que convertir las señales a un formato eléctrico (Black, 2002).

En la quinta columna se enlistan los principales medios de transmisión para cada generación. La sexta columna muestra la capacidad de transmisión de cada generación. En la séptima columna se muestra la carga útil típica, la primera y segunda generación fueron diseñadas para tráfico de voz con longitudes fijas, y la tercera generación soporta longitudes variables. Por último, se muestra la octava columna, la cual explica si las generaciones están diseñadas para interactuar y soportar directamente otros protocolos (Black, 2002).

2.3.5 WDM y DWDM

WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) es una tecnología óptica que une diferentes longitudes de onda en la misma fibra, esto permite que se incremente efectivamente el ancho de banda por fibra óptica a la suma de la razón de bit por cada longitud de onda, por ejemplo, 40 longitudes de onda a 10 Gbps por longitud de onda en la misma fibra se aumenta el ancho de banda a 400 Gbps (Kartalopoulos, 2000).

DWDM (*Dense WDM*) es un tecnología que cuenta con un número mayor de longitudes de onda unidas a la fibra (>40) que WDM. Cuando el número de longitudes de onda aumenta, se necesita poner especial atención a algunos factores como el ancho y espacio del canal, la potencia total óptica lanzada a la fibra, los efectos no lineales, interferencia, amplificación, entre otros (Kartalopoulos, 2000).

La tecnología DWDM es posible gracias a los diferentes componentes ópticos que existen, estos componentes han evolucionado desde ser

experimentos hasta llegar a ser compactos, de alta calidad, disponibles comercialmente, y cada vez más baratos. También se espera que se integren a esta tecnología algunas otras características ópticas que ofrezcan una funcionalidad más compleja a un costo por función comparable a la implementación electrónica (Kartalopoulos, 2000).

A continuación se mencionan algunas funciones que la tecnología DWDM a hecho realidad (Kartalopoulos, 2000):

- Las fibras ópticas se fabrican para presentar una menor pérdida y un mejor desempeño en la transmisión sobre un espectro de longitud de onda de 1.3 μm y 1.55 μm .
- Los amplificadores ópticos con una ganancia por encima del rango de los 20dB, elimina la necesidad de regeneradores.
- Los filtros ópticos de estado sólido son compactos y pueden ser integrados a otros componentes ópticos en el mismo sustrato.
- Las fuentes láser de estado sólido y los fotodetectores tienen un diseño compacto.
- Los multiplexores y demultiplexores ópticos se basan en difracción pasiva óptica.
- Se pueden utilizar filtros seleccionadores de longitud de onda como multiplexores *add/drop*.
- Los componentes ópticos conocidos como multiplexores *add/drop* (*Optical Add/Drop Multiplexer OADM*) han permitido que DWDM se pueda integrar en redes MAN tipo anillo y redes de transporte extendido.
- Los componentes de los cross-conectores ópticos (*Optical Cross-Connect OXC*) están implementados con una variedad de tecnologías, y han hecho posible la conmutación óptica.

2.4 Funcionamiento básico de la Fibra Óptica

La fibra óptica esta compuesta básicamente por tres elementos: núcleo, revestimiento y una cubierta protectora. El núcleo es un material cristalino, generalmente de vidrio o plástico, por el cual se transmiten los rayos luminosos; el recubrimiento es de un material conductor pero cuenta con un índice de refracción diferente al del núcleo; y por último esta la cubierta protectora cuya función es la de absorber los rayos que reciba, además protege a la fibra. Generalmente también se agrega una segunda cubierta protectora llamada *buffer jacket*, la cual es de plástico y su función es proporcionar una protección adicional contra dobleces y evitar desgaste. En la figura 2.5 se ilustra una típica fibra óptica (Olvera, 2002).

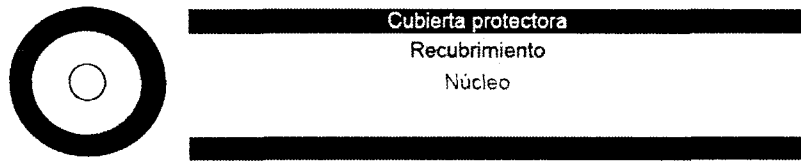


Figura 2.5 Fibra óptica.

Las señales se desplazan a través del núcleo de la fibra, el cual les sirve como guía, los rayos que se van al recubrimiento se transmiten a la cubierta protectora, la cual los absorbe. Si un rayo pasa de un material que tiene cierto índice de refracción a otro material con otro índice de refracción, el rayo se refracta de acuerdo a su ángulo de incidencia y la relación entre los índices de refracción. Pero si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico, el rayo se refleja y no pasa al siguiente material. Este comportamiento es el que permite que los rayos de luz se transmitan en la fibra óptica (Olvera, 2002).

Como ya se mencionó anteriormente, el funcionamiento básico de la fibra óptica es la transmisión de información utilizando luz a través de fibras hechas de vidrio o plástico. En la fuente (un láser o un diodo emisor de luz (LED)) se modula la señal de entrada que contiene la información, la luz modulada viaja y se propaga a través de la fibra óptica. Del lado opuesto se encuentra un detector óptico que recibe la señal modulada y la convierte en una señal de salida igual a la señal de entrada (Chomycz, 1998).

De acuerdo Chomycz (1998) y como se muestra en la figura 2.6, es posible dividir en tres categorías las técnicas de transmisión de luz, estas son: modulación digital, modulación analógica, y modulación digital con conversión analógica-digital.

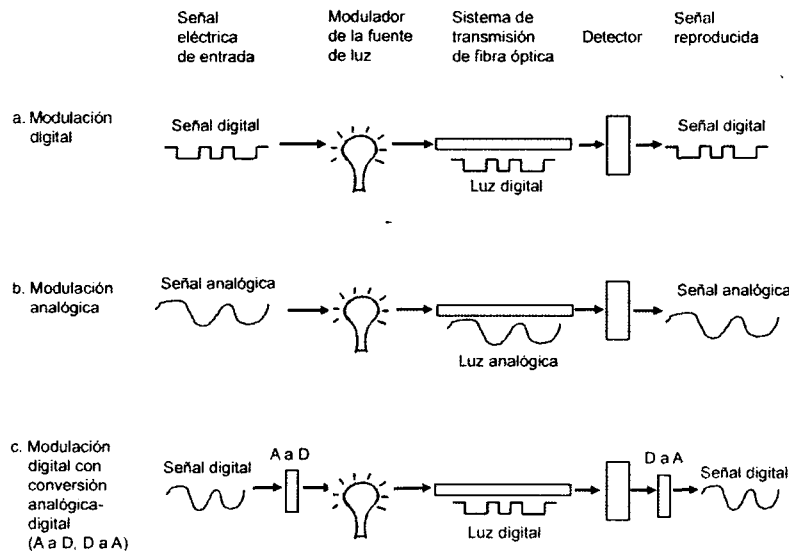


Figura 2.6 Transmisión básica de una Fibra Óptica.

Estas técnicas de transmisión ilustran solamente la transmisión en un sentido, pero los sistemas de comunicación necesitan que dicha transmisión sea simultánea y completa en ambos sentidos. Por esta razón, se añaden dispositivos de modulación y detección en sentido opuesto para formar un sistema bidireccional como se muestra en la figura 2.7 (Chomycz, 1998).

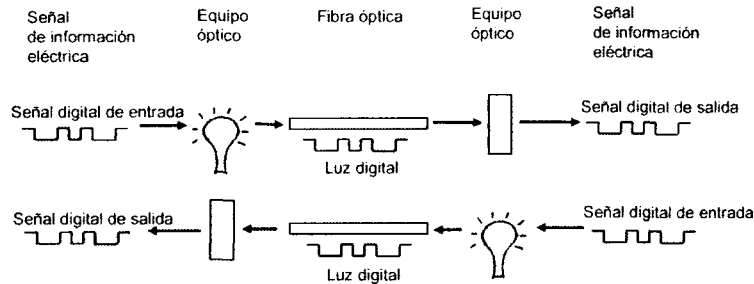


Figura 2.7 Comunicación bidireccional.

2.4.1 Tipos de fibras ópticas

Existen tres tipos de fibras ópticas las cuales se describen a continuación:

- **Fibra óptica multimodal.** A través de esta fibra se transmiten diferentes rayos, los cuales se van reflejando en la unión del núcleo y el recubrimiento. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de fibra óptica multimodal (Olvera, 2002).

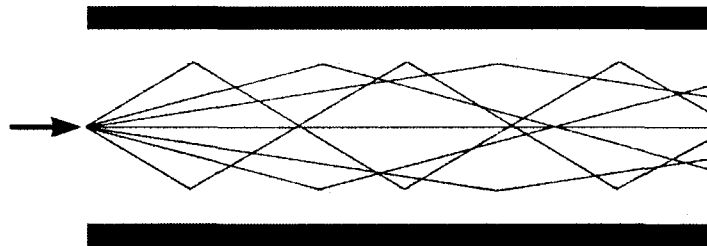


Figura 2.8 Fibra óptica multimodal.

- **Fibra óptica multimodal con índice graduado.** En esta fibra se transmiten diferentes rayos, los cuales se van refractando dentro del núcleo debido a que el índice de refracción del núcleo varía con la distancia entre el material y el centro del núcleo. En la figura 2.9 se ilustra un ejemplo de fibra óptica multimodal con índice graduado (Olvera, 2002).

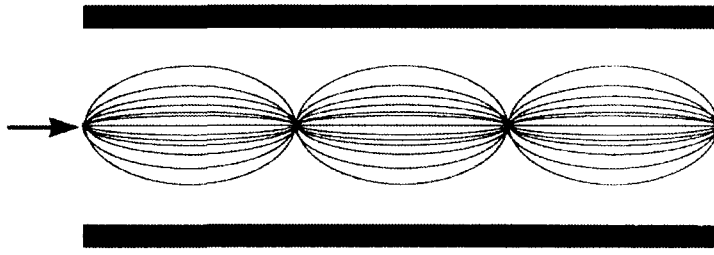


Figura 2.9 Fibra óptica multimodal con índice graduado.

- **Fibra óptica monomodal.** En estas fibras solamente se transmite el rayo central debido a que el núcleo es demasiado delgado. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo de fibra óptica monomodal (Olvera, 2002).

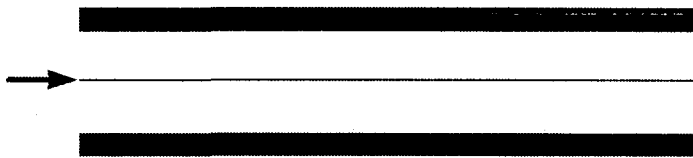


Figura 2.10 Fibra óptica monomodal.

2.4.2 Bandas espectrales

En la tabla 2.2 se muestra lo que la ITU definió como bandas espectrales, para de esta forma clarificar la terminología utilizada en sistemas de fibra óptica (Linktionary, 2001).

| Banda | Descripción | Rango (nm) |
|---------|------------------------------|-------------|
| Banda-O | Original | 1260 a 1360 |
| Banda-E | Extendida | 1360 a 1460 |
| Banda-S | Longitud de onda corta | 1460 a 1530 |
| Banda-C | Convencional | 1530 a 1565 |
| Banda-L | Longitud de onda extendida | 1565 a 1625 |
| Banda-U | Longitud de onda ultra larga | 1625 a 1675 |

Tabla 2.2 Bandas espectrales.

2.4.3 Enlace típico de fibra óptica

De acuerdo a Olvera (2002), un enlace típico de fibra óptica cuenta con los siguientes componentes: transmisor, receptor, fibra óptica, amplificadores ópticos y repetidores regenerativos.

La señal eléctrica llega al transmisor y éste la convierte en una señal óptica, para esto puede utilizarse un LED (diodo emisor de luz) o un LD (diodo láser), el transmisor debe contar con la máxima potencia posible y generar la señal con la menor dispersión. En el otro extremo se encuentra el receptor, el cual recibe la señal óptica y la transforma en señal eléctrica, puede utilizarse un APD (fotodiodo de avalancha) o un fotodiodo PIN (Olvera, 2002).

Sin embargo, existen algunos factores que pueden degradar la utilización y el servicio de una fibra óptica, algunos de estos factores son la atenuación y la dispersión. Pero para contrarrestar estos y otros factores existen dispositivos como los amplificadores y los repetidores regenerativos (Olvera, 2002).

2.5 Ventajas y desventajas de instalaciones ópticas

2.5.1 Ventajas de instalaciones ópticas

De acuerdo a Chomycz (1998), existen algunas ventajas que se obtienen con la utilización de fibra óptica para la transmisión de datos, estas se mencionan a continuación:

- **Gran capacidad.** La fibra óptica tiene la capacidad de transmitir grandes cantidades de información, permitiendo así que tenga una gran capacidad de transmisión. Por ejemplo, un cable de fibras ópticas de 2 cm. de diámetro puede tener hasta 200 fibras brindando al enlace una capacidad de 6,000,000 de conversaciones, mientras que un cable multipar puede transmitir solamente 500 conversaciones, un cable coaxial 10,000 conversaciones y un enlace microondas o satelital brinda solamente 2,000 conversaciones.

- **Tamaño y peso.** Un cable de fibra óptica tiene un diámetro muy pequeño y es más ligero que un cable de cobre de capacidad similar. Esto permite que sea más fácil su instalación ya que se puede introducir en espacios limitados.

- **Interferencia eléctrica.** La fibra óptica no es afectada por la interferencia electromagnética o por la interferencia de radiofrecuencia, y tampoco genera interferencia por sí misma. La fibra óptica también es libre de conversaciones cruzadas, y mas aún, si una fibra radiara, dicha radiación no podría ser captada por otra fibra óptica.

- **Aislamiento.** La fibra óptica es un dieléctrico. Eliminan la necesidad de corrientes eléctricas, esto es que no contienen conductores eléctricos y puede suministrar un aislamiento eléctrico normal, también puede eliminar la interferencia originada por las corrientes a tierra o por condiciones potencialmente peligrosas causadas por descargas eléctricas en las líneas de

comunicación. Es un medio seguro que se utiliza en donde el aislamiento eléctrico es muy importante.

- **Seguridad.** La fibra óptica ofrece un alto nivel de seguridad, esto se debe a que es muy difícil que los rayos luminosos que viajan por el centro de la fibra se escapen. Pero aún así, si se lograra la intervención en una fibra óptica, esta se podría detectar con el monitoreo de la señal que se recibe al final. En cambio, las señales de comunicación a través de satélites o radio se pueden intervenir fácilmente para su decodificación.

- **Fiabilidad y mantenimiento.** La fibra óptica es un medio constante y no envejece. Un enlace bien diseñado se vuelve resistente a condiciones adversas de humedad y temperatura, permitiendo así su uso en cables subacuáticos. Su vida de servicio puede alcanzar los 30 años y requiere de un mantenimiento mínimo en comparación a otros sistemas de transmisión.

- **Versatilidad.** Los sistemas de comunicación que utilizan fibra óptica son los adecuados para la mayoría de los formatos de comunicaciones de datos, voz y vídeo. Estos sistemas son adecuados para RS232, RS422, V.35, Ethernet, Arcnet, FDDI, T1, T2, T3, SONET, 2/4 cable de voz, señal E&M, video compuesto y más.

- **Expansión.** Un sistema de fibra óptica bien diseñado se puede expandir fácilmente.

- **Regeneración de la señal.** Se pueden brindar comunicaciones con fibra óptica más allá de los 70 km. antes de que se necesite regeneración, y puede extenderse a 150 km. usando amplificadores láser, pero existe la posibilidad de que con futuras tecnologías pueda extenderse de 200 km. hasta 1,000 km. En comparación con la fibra óptica, los sistemas de comunicaciones que utilizan cable eléctrico requieren de repetidores cada pocos kilómetros. El costo de estos equipos repetidores y su mantenimiento representa un ahorro sustancial con el uso de fibra óptica.

2.5.2 Desventajas de instalaciones ópticas

Las instalaciones de fibra óptica pueden presentar algunas desventajas en comparación a otros medios de transmisión. Algunas de estas desventajas son (Chomycz, 1998):

- **Conversión electro-óptica.** Para transmitir una señal eléctrica a través de fibra óptica, primero se debe convertir la señal por medios electrónicos en una señal óptica usando un LED o un láser. Después la señal óptica se propaga por la fibra hasta llegar al receptor, el cual tiene que convertir dicha

señal óptica en una señal eléctrica para que se pueda utilizar. Este costo de conversión debe ser considerado al momento de hacer la planeación de la red.

- **Caminos homogéneos.** Es necesario un camino físico recto para realizar el tendido de la fibra óptica. El cable se puede enterrar, situar en tubos o en cables aéreos a lo largo de caminos homogéneos, lo cual puede requerir de la compra o alquiler de propiedades, algunas de ellas imposibles de adquirir. Para algunas ubicaciones como terrenos montañosos o entornos urbanos, resultan mas factibles otros medios de transmisión como lo son los satelitales o microondas.

- **Instalación especial.** Debido a las características de la fibra óptica, es necesario el uso de técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces. Debido a que no aplican los métodos convencionales de instalación de cables, los técnicos deben estar capacitados para la instalación y puesta en funcionamiento de los cables de fibra óptica.

- **Reparaciones.** Un cable de fibra óptica que pueda resultar dañado no es fácil de reparar. Se requiere de un equipo técnico con destreza y habilidad para llevar acabo los procedimientos de reparación, incluso en algunas situaciones puede ser necesario reparar el cable entero. Esto se debe tomar en cuenta debido a los costos en los cuales se puede incurrir, y a la prestación del servicio que se vería interrumpido o dañado.

2.5.3 Comparación entre instalaciones con fibra óptica y otros medios de transmisión.

A continuación se presenta la tabla 2.3 en la cual se hace una comparación entre instalaciones con fibra óptica y otros medios de transmisión.

| | Fibra Óptica | Cobre | Par trenzado | Satélite |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Capacidad de transmisión | 6,000,000 conversaciones | 10,000 conversaciones | 500 conversaciones | 2,000 conversaciones |
| Mantenimiento | Bajo | Medio | Medio | Alto |
| Dimensiones físicas | Pequeño | Medio | Medio | Grande |
| Interferencia y ruido | Baja | Alta | Media | Alta |
| Seguridad | Alta | Media | Media | Baja |
| Costo | Medio | Bajo | Bajo | Alto |
| Expansión | Fácil | Difícil | Difícil | Fácil |
| Distancia | Grande | Mediana | Pequeña | Grande |

2.6 Componentes Ópticos

Los componentes utilizados en los sistemas de comunicación óptica moderna incluyen: módem óptico, multiplexores, amplificadores ópticos, generadores de luz, detección óptica, acopladores, aisladores y circuladores, entre otros. A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos:

2.6.1 Módem Óptico

La modulación óptica consiste en encender y apagar el rayo luminoso de acuerdo a la señal binaria a transmitir, de acuerdo a Olvera (2002) la modulación se puede realizar de forma directa o externa. La modulación en forma directa consiste en manipular directamente la corriente que alimenta la fuente de luz, pero esto puede ocasionar un cambio en la frecuencia de la señal. La modulación externa no presenta este cambio en la frecuencia, y por esta razón es preferida sobre la modulación directa.

De acuerdo a Chomycz (1998) existen módems ópticos para la mayoría de las señales de comunicaciones, cada señal se puede transmitir con un equipo módem y un par de fibras ópticas. En la figura 2.11 se ilustra un enlace con un módem óptico individual.

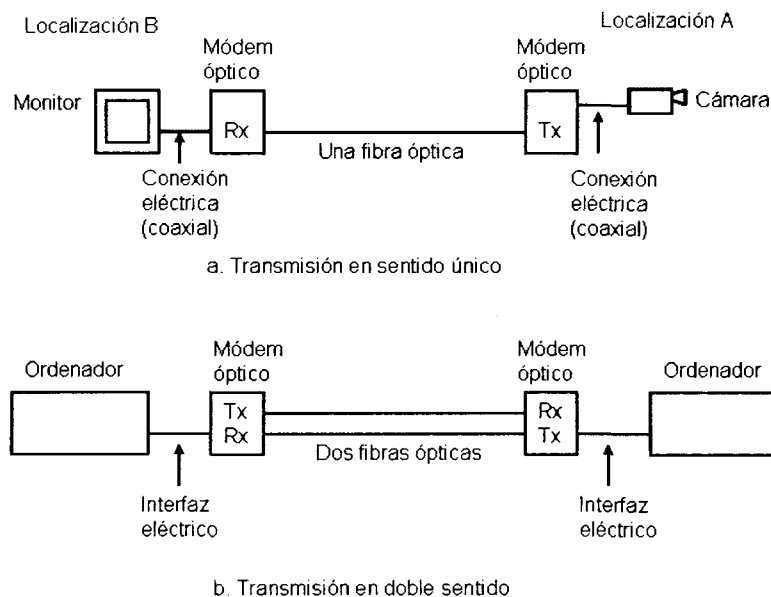


Figura 2.11 Enlace con un módem óptico individual.

Este tipo de configuración que involucra módems ópticos, tiene dentro de sus ventajas que es económica, fácil de usar porque no necesita de mucha configuración, y por la disponibilidad que representa para muchas aplicaciones. Pero por otro lado, se puede encontrar con una desventaja, la cual es la necesidad de contar con fibras dedicadas exclusivamente a cada señal. En la mayoría de los enlaces ópticos se utiliza un par de fibras para lograr una transmisión en dos direcciones, pero en la tabla 2.4 se muestran varias aplicaciones de enlaces y el número de fibras ópticas necesarias (Chomycz, 1998).

| Aplicación | Una fibra | Dos fibras | Cuatro fibras |
|---------------------------|-----------|------------|---------------|
| Voz (un canal, megafonía) | * | | |
| Voz (telefonía) | | * | |
| Vídeo (seguridad) | * | | |
| Vídeo (interactivo) | | * | |
| Sistemas de Control (PLC) | | * | |
| Telemetría | * | * | |
| Comunicación de Datos | | * | |
| Multiplexor | | * | |
| Ethernet | | * | |
| Token Ring | | * | |
| FDDI | | * | * |
| Sonet | | * | * |

Tabla 2.4 Aplicaciones de enlaces y número de fibras ópticas necesarias.

2.6.2 Multiplexor

Los multiplexores tienen la capacidad de combinar diferentes señales en una sola fibra óptica, esto nos permite reducir las fibras necesarias para una instalación, permitiendo así un ahorro en costo debido a las fibras. Los multiplexores cuentan con la capacidad de administración de la red, lo cual permite controlarlo desde una ubicación central, pero tienen la desventaja de tener un costo elevado y ser difíciles de instalar, por lo tanto el personal que lo va a operar debe estar altamente capacitado en su uso. En la figura 2.12 se muestra un ejemplo de enlace multiplexado (Chomycz, 1998).

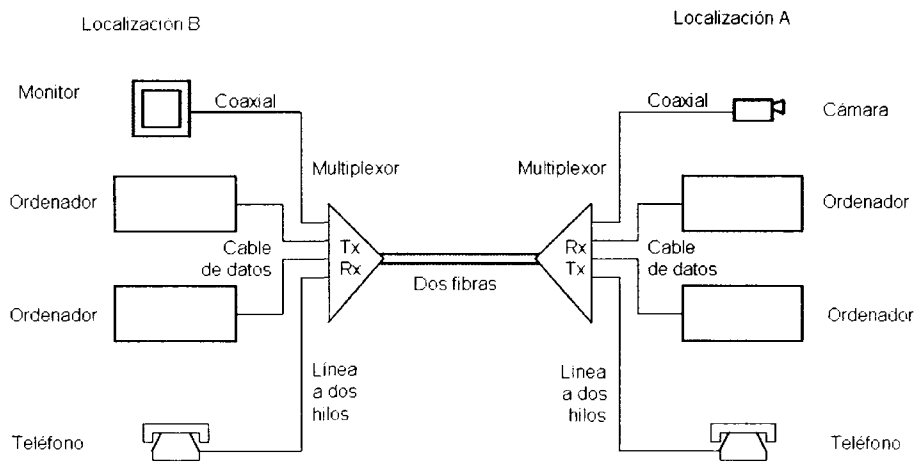


Figura 2.12 Enlace multiplexado.

Las características necesarias que deben tener los multiplexores son las siguientes (Olvera, 2002):

- Bajo cruzamiento de información (crosstalk).
- Transparencia a la velocidad de transmisión.
- Conmutación rápida.
- Bajas pérdidas por atenuación.
- Operación independiente de la longitud de onda.
- Operación simultánea sobre varias longitudes de onda.
- Escalabilidad.
- Integración monolítica.

2.6.3 Regeneradores

Un regenerador recibe una señal óptica modulada, la transforma en una señal electrónica con la misma razón de bit, la amplifica, y posteriormente la convierte de nuevo en señal óptica de la misma modulación y razón de bit (Kartalopoulos, 2000).

Los regeneradores tienen principalmente tres componentes: un receptor óptico, un amplificador electrónico, y un transmisor óptico. Pero un regenerador también realiza funciones adicionales como medición del tiempo, recuperación de errores y *pulse shaping* (Kartalopoulos, 2000).

Los regeneradores se pueden clasificar como 2R y 3R, son 2R porque realizan la función de *Reamplification*, y *Reshaping*, y son llamados 3R porque realizan *Reamplification*, *Reshaping* y *Retiming* (Kartalopoulos, 2000).

2.6.4 Amplificadores Ópticos

En un sistema de comunicación óptico la señal se puede atenuar mientras se propaga a través de la fibra óptica, después de cierta distancia recorrida, la señal va acumulando pérdida la cual ocasiona que se convierta en una señal muy débil y difícil de detectar. Antes de la llegada de los amplificadores ópticos, la única solución a este problema era regenerando la señal, esto es, se recibía la señal y se retransmitía. Los dispositivos que realizaban este proceso eran los repetidores, y su forma de operación era convertir la señal óptica en una señal eléctrica, la limpiaba y la convertía nuevamente en una señal óptica (Ramaswami y Sivarajan, 1998).

La regeneración de la señal es necesaria para los sistemas donde hay dispersión y pérdida, estos sistemas se pueden ver significativamente beneficiados si los repetidores electrónicos son reemplazados por amplificadores ópticos, los cuales son mas simples y potencialmente mas baratos (Mohan, sin fecha).

Los amplificadores ópticos presentan una serie de ventajas sobre los repetidores, las cuales se mencionan a continuación (Ramaswami y Sivarajan, 1998):

- Los repetidores son específicos a la razón de bits y a los formatos de modulación utilizados por el sistema de comunicación, en cambio, los amplificadores ópticos son insensibles a la razón de bits o a los formatos de señalización.
- Los amplificadores ópticos se pueden actualizar mas fácilmente sin tener que reemplazar el amplificador, en contraste, los repetidores se tienen que reemplazar si se desea hacer alguna actualización.
- Los amplificadores ópticos tienen una gran ganancia en ancho de banda, y como consecuencia a esto, un solo amplificador puede amplificar simultáneamente diferentes señales WDM, en cambio, con los repetidores se necesitaría uno para cada longitud de onda.

De acuerdo a Chomycz (1998), los amplificadores ópticos se utilizan con fibras monomodo, generadores de luz láser, y en longitudes de onda de 1.310 o 1.550 nm. Este equipo es un tipo especial de láser que refuerza la intensidad de la señal óptica.

Comúnmente los amplificadores ópticos se conectan en donde se encuentran los equipos ópticos, pero también se pueden localizar a mitad de camino de la instalación para reforzar la señal. Cuando los amplificadores son instalados a mitad de camino se necesita un control medioambiental que los aisle del exterior. En la figura 2.13 se ilustra un sistema con amplificadores ópticos (Chomycz, 1998).

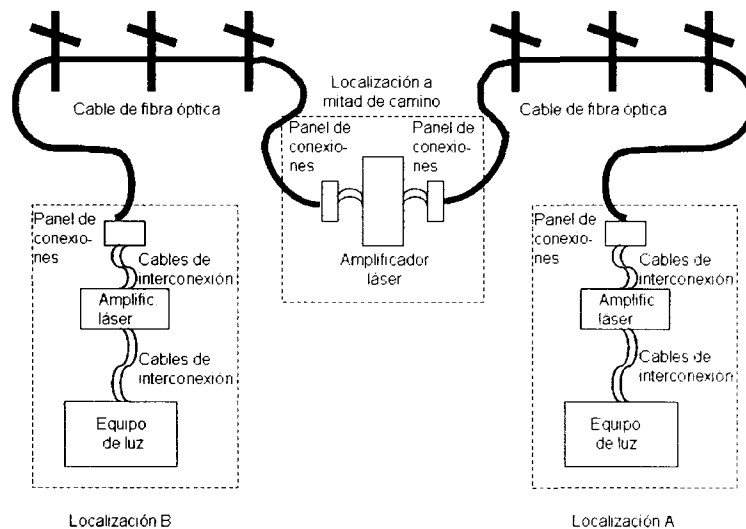


Figura 2.13 Amplificadores ópticos.

Ramaswami y Sivarajan (1998) consideran que hay tres diferentes tipos de amplificadores ópticos, estos son: *Erbium-doped fiber amplifiers* (EDFA), *Praseodymium-doped fiber amplifiers* (PDFA), y *semiconductor optical amplifiers* (SOA).

Amplificadores de fibra dopados con erbio

Debido al creciente uso de aplicaciones DWDM, también ha crecido el uso de los EDFAs, convirtiéndolos así en bloques esenciales dentro de un sistema óptico. Estos amplificadores permiten transmitir información a grandes distancias sin la necesidad de utilizar los repetidores convencionales, la fibra se dopa con erbio el cual es un elemento raro que tiene niveles apropiados de energía en su estructura atómica para amplificar la luz. Los EDFAs están diseñados para amplificar la luz a 1550 nm, este dispositivo utiliza un láser de 980 nm o 1480 nm para inyectar la energía a la fibra dopada. Cuando una señal débil entra a la fibra a 1310 nm o 1550 nm, la luz estimula a los átomos para liberar su energía almacenada, este proceso continúa conforme la señal pasa a través de la fibra volviéndose mas fuerte cada vez. En la figura 2.14 se muestra un ejemplo de un diagrama de bloque de un EDFA (Fiber Optics, 2005).

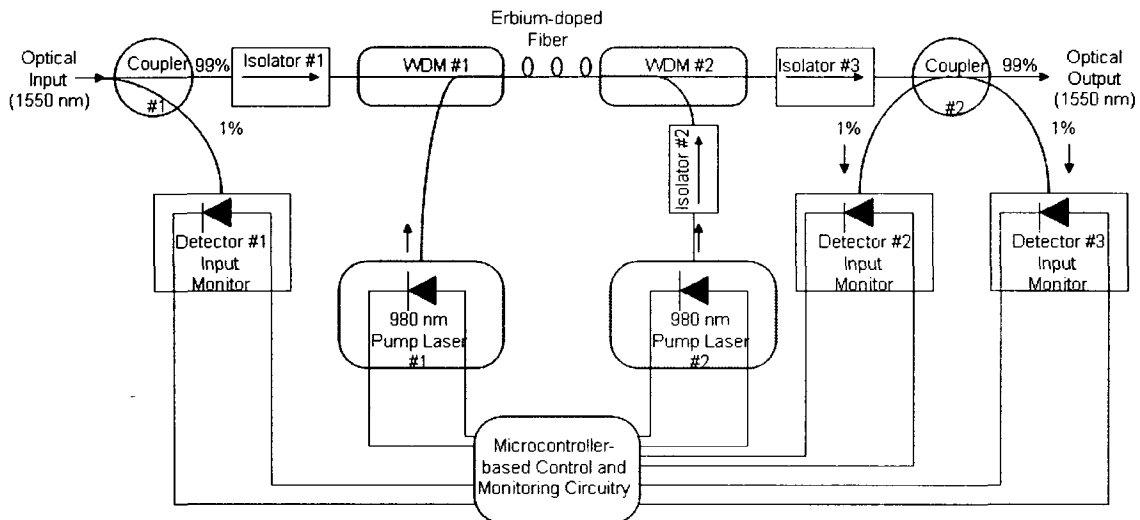


Figura 2.14 Diagrama de bloque de un EDFA.

Amplificadores de fibra dopados por praseodymium

El éxito que han tenido los EDFA, ha dejado la tarea de encontrar un dispositivo que pueda amplificar señales con longitud de onda de $1.3 \mu\text{m}$, la cual es una banda espectral importante dentro de los sistemas de comunicaciones ópticas. Aún no se ha encontrado algún equipo perfecto, pero los PDFAs ofrecen una cierta promesa. El principio de operación de estos amplificadores es muy similar al de los EDFAs (Ramaswami y Sivarajan, 1998).

Amplificadores ópticos semiconductores

Un amplificador óptico semiconductor es en esencia diodos láser pero sin los espejos finales, y que tienen la fibra anexada en sus dos extremos. Este tipo de dispositivo amplifica la señal que viaja a través de la fibra y transmite una versión amplificada de la señal a una segunda fibra. Los SOAs son típicamente construidos en pequeños paquetes, y trabajan con sistemas de longitud de onda de 1310 nm y 1550 nm . Otra característica de estos amplificadores es que pueden transmitir bidireccionalmente. En la figura 2.15 se ilustra un ejemplo de un SOA (Fiber Optics, 2005).

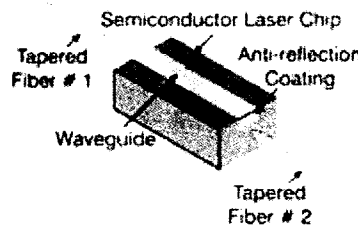


Figura 2.15 Amplificador óptico semiconductor.

2.6.5 Generadores de luz

De acuerdo a Chomycz (1998) existen dos tipos de generadores de luz: los diodos emisores de luz (LED) y los láser.

- **Diodos emisores de luz (LED).** Son equipos muy económicos y altamente utilizados en enlaces de corta distancia y en aplicaciones de baja transmisión de datos. Los LED tienen la característica de ser más confiables y estables en cualquier tipo de medio ambiente (Chomycz, 1998).

La luz generada por un diodo emisor de luz es creada por una emisión espontánea. Las principales ventajas que tiene un LED sobre un láser son: alta confiabilidad, circuito más simple, menor sensibilidad a temperatura, inmunidad a la luz reflejada y más bajo costo (Olvera, 2002).

- **Láser.** Algunas de las ventajas de utilizar el láser es el gran ancho de banda de modulación que proporciona, además presenta una elevada potencia óptica de salida y una reducida anchura espectral. Este equipo es muy utilizado cuando se quiere cubrir una gran distancia y transmitir una gran cantidad de datos (Chomycz, 1998).

La luz generada por un láser es creada por una emisión estimulada. Las principales ventajas que tiene un láser sobre un LED son las siguientes: mayor potencia de salida, alta eficiencia de acoplamiento, mayor ancho de banda y señal luminosa con menor ancho de banda (Olvera, 2002).

2.6.6 Detección Óptica

Aquí se recibe la señal de la fibra óptica y es convertida nuevamente en una señal eléctrica, el elemento que se encarga de esta función es el fotodetector. Los tipos de fotodetectores más comunes son los siguientes: fotodiodos tipo zona P-zona intrínseca-zona N (PIN) y los fotodiodos de avalancha (APD) (Chomycz, 1998).

El fotodiodo PIN requiere para su operación un pequeño voltaje de polarización inversa, cuando el haz de luz incide en el material p del diodo inversamente polarizado se crean pares de electrones-agujeros en el área de agotamiento entre el material n y el p. El campo eléctrico de la polarización provoca que los electrones viajen al material n y generen una corriente pequeña (Olvera, 2002).

Un fotodiodo de avalancha opera bajo el hecho de que cuando el diodo está polarizado de manera inversa (voltaje máximo de 100v.) e incide luz, se

generan pares de electrones-agujeros, y si el campo eléctrico es grande los electrones que están libres forman nuevos pares de electrones-agujeros, lográndose así un efecto de avalancha (Olvera, 2002).

En la figura 2.16 se ilustra un diagrama de bloque de un receptor en un sistema de comunicación digital. El fotodetector genera una corriente eléctrica proporcional a la potencia óptica, y el amplificador *front-end* incrementa la potencia de la señal eléctrica a un nivel utilizable (Ramaswami y Sivarajan, 1998).



Figura 2.16 Diagrama de bloque de un receptor.

2.6.7 Acopladores

De acuerdo a Ramaswami y Sivarajan (1998), los acopladores direccionales son usados para combinar y dividir las señales de una red óptica. Un acoplador 2x2 consiste en dos puertos de entrada y dos puertos de salida. En la figura 2.17 se muestra un ejemplo de un acoplador direccional.

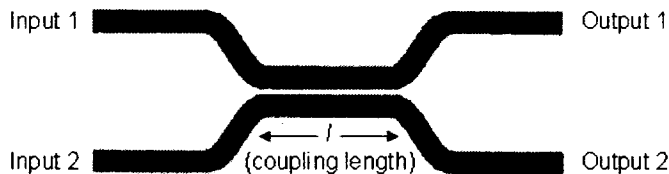


Figura 2.17 Acoplador direccional.

Conforme a un artículo publicado en Fiber-Optics (2005), los acopladores son dispositivos que pueden dividir una señal óptica en múltiples direcciones, o pueden combinar múltiples señales en una sola dirección. Las señales ópticas son más complejas que las señales eléctricas, lo cual provoca que los acopladores ópticos sean más difíciles de diseñar que los acopladores eléctricos. Los acopladores pueden ser pasivos o activos, la diferencia entre estos dos términos es que los pasivos redistribuyen la señal óptica sin convertirla en eléctrica. Los acopladores activos son dispositivos eléctricos que dividen o combinan la señal eléctricamente y utiliza los detectores y fuentes de la fibra óptica como entrada y salida.

Los acopladores más sencillos son los *splitters*, los cuales poseen como mínimo 3 puertos, pero pueden llegar a tener más de 32. En la figura 2.18 se

ilustra un ejemplo de un dispositivo de 3 puertos, y se le conoce como *tee coupler*. A una de las fibras se le llama fibra común, y a las otras dos fibras se les conoce como puertos de entrada o salida (Fiber-Optics, 2005).

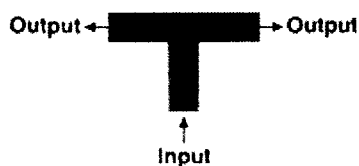


Figura 2.18 Tee Coupler.

Los acopladores ópticos tienen un uso muy amplio en aplicaciones que requieren otro tipo de enlace además del enlace punto a punto. Algunas de estas aplicaciones son enlaces bidireccionales y redes de área local (LAN). En las redes de área local se incorporan los acopladores en topologías como la de estrella o *bus*. En la figura 2.19 se muestra una topología tipo estrella en la cual se puede expandir el número de estaciones de trabajo de una forma mas sencilla. El acoplador estrella divide las salidas permitiendo así que cada estación escuche a todas las estaciones restantes (Fiber-Optics, 2005).

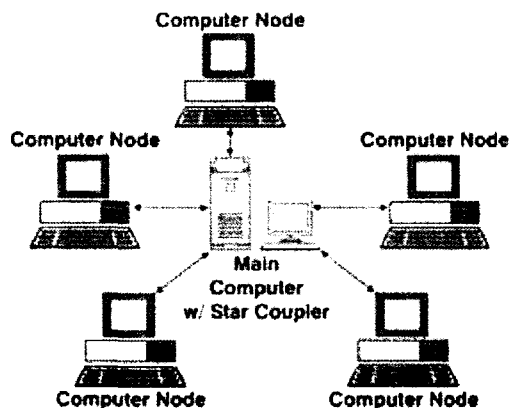


Figura 2.19 Topología estrella con acoplador estrella.

La topología de *bus* utiliza los *tee couplers* para conectar una serie de estaciones que escuchan un cable *backbone*. En una típica red de *bus*, el acoplador que se encuentra en cada nodo, divide parte del poder del enlace y lo conduce a un transmisor. En un sistema con N terminales, la señal debe pasar por N-1 acopladores antes de llegar al receptor (Fiber-Optics, 2005).

Al tipo de acoplador mas popular se le conoce como *fused coupler*, este acoplador reúne dos o mas fibras, las tuerce y las derrite al fuego. En la figura 2.20 se ilustra la construcción básica de este acoplador (Fiber-Optics, 2005).

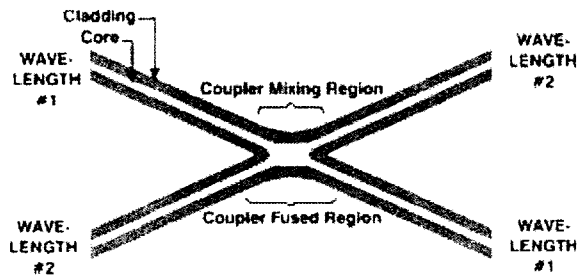


Figura 2.20 Fused coupler.

Estos acopladores han incrementado su popularidad debido al bajo costo de los materiales básicos utilizados para su construcción, el secreto se encuentra en conocer como torcer, derretir y tirar la fibra (Fiber-Optics, 2005).

2.6.8 Aisladores y circuladores

De acuerdo a Ramaswami y Sivarajan (1998), la mayoría de los dispositivos ópticos pasivos son recíprocos, es decir, que trabajan de la misma forma si las entradas y salidas son invertidas, sin embargo, existen algunas ocasiones en las que se requiere el uso de dispositivos pasivos no recíprocos en los sistemas de comunicación. Un aislador tiene como función permitir la transmisión en una dirección y bloquear todas las transmisiones en sentido contrario, este componente es utilizado en sistemas frente a los amplificadores ópticos y los láseres, esto con el objetivo de prevenir las reflexiones provocadas por incorporar estos dispositivos.

Los circuladores funcionan bajo un principio de operación similar a los aisladores, pero con la diferencia que un circulador tiene varios puertos, generalmente de tres a cuatro. En un circulador de tres puertos la señal de entrada en el puerto 1 se envía al puerto 2, la señal del puerto 2 es enviada al puerto 3, y la señal de entrada del puerto 3 es enviada al puerto 1. En la figura 2.21 se muestra un ejemplo de circuladores de tres y cuatro puertos (Ramaswami y Sivarajan, 1998).

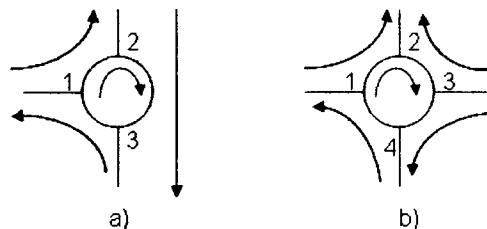


Figura 2.21 Circuladores de tres y cuatro puertos.

2.6.9 Filtros

Los filtros se utilizan en todos los sistemas de comunicación, incluyendo los sistemas a través de fibra óptica. Los filtros que se utilizan en fibra óptica permiten obtener una señal óptica de la longitud de onda deseada, eliminando así las señales de otras longitudes de onda (Olvera, 2002).

Se tienen filtros de frecuencia fija y filtros de frecuencia ajustable. Las características principales de los filtros de frecuencia ajustable son las siguientes: ancho de banda del canal, espaciamiento de los canales, rango de ajuste y velocidad de ajuste (Olvera, 2002).

2.6.10 Controladores de polarización

El tipo de fibra óptica monomodal permite que se propaguen dos rayos ópticos, los cuales tienen un desfase de 90° entre ellos, pero esto no es deseable y tiene que ser controlado. Los controladores de polarización son dispositivos de estado sólido que se localizan entre el generador de la señal óptica y la fibra óptica, esto es para aumentar la potencia de uno de los modos en relación al otro modo ortogonal y controlar de esta forma el problema de la fibra monomodal (Olvera, 2002).

2.6.11 Transponders

Los transponders adaptan la señal entrante de un cliente a un tipo de señal que se pueda manejar dentro de una red óptica, de igual forma se hace a la inversa, adaptando la señal de la red óptica para que pueda ser utilizada por el cliente. La interfase entre el cliente y el transponder puede variar dependiendo de la razón de bit, distancia, y pérdida entre el cliente y el transponder. La interfase que se utiliza comúnmente es SONET/SDH *short-reach* (SR) (Ramaswami y Sivarajan, 2002).

Esta adaptación consiste en convertir la señal a una longitud de onda que pueda ser útil en la red óptica, y también agrega funciones adicionales en la administración de la red. Por otro lado, agrega corrección de errores (FEC) particularmente a señales de 10 Gbs o mayores. Debido a estas razones, la adaptación se realiza típicamente de forma óptica-eléctrica-óptica (O/E/O) (Ramaswami y Sivarajan, 2002).

2.6.12 Cross-conectores ópticos (OXC)

Un uso eficiente de las facilidades que proporciona la fibra a nivel óptico es muy importante, esto se debe al movimiento de longitudes de onda a través del mundo entero. El ruteo y *grooming* son áreas claves que deben ser cubiertas, esta es la función de los OXC. En la figura 2.22 se presenta un diagrama de bloque de un OXC (IEC, 2004).

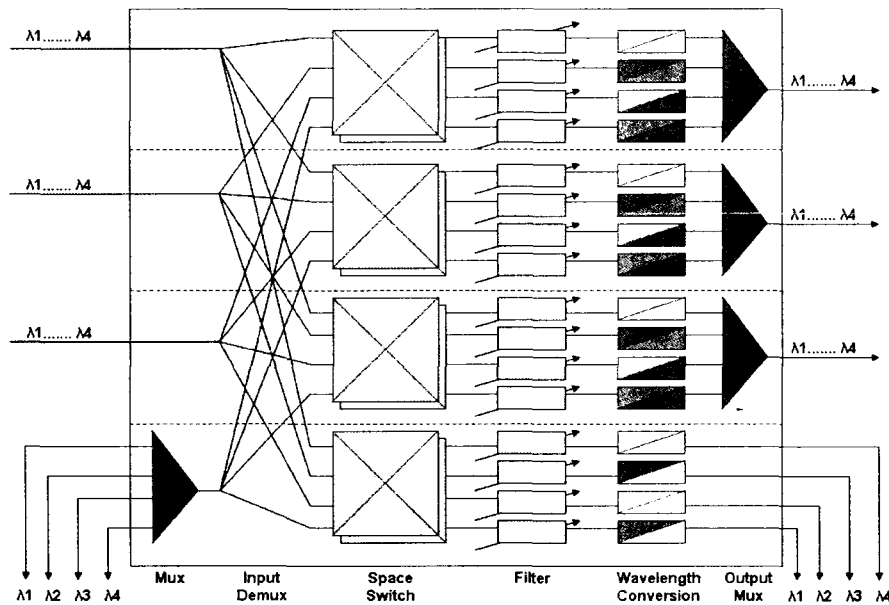


Figura 2.22 Diagrama de bloque de un OXC.

Un sistema de cross-conector digital proporciona la función crítica de preparar el tráfico (DS-0, DS-1, y DS-3) para llenar los puertos de salida de una manera eficiente, actualmente los puertos de salida pueden ser de nivel DS-3, OC-3, ó OC-12, por esta razón es esencial asegurarse que estas salidas contenga tráfico cuando dejen el cross-conector. En el dominio óptico se contemplan 40 canales transportados en una fibra, por esta razón se requiere de un elemento de red que permita aceptar diferentes longitudes de onda en los puertos de entrada y enrutarlos a un puerto de salida apropiado de la red, para conseguir esto, el OXC necesita tres bloques de construcción los cuales se describen a continuación y se ilustran en la figura 2.23 (IEC, 2004):

- **Switcheo de fibra.** Es la habilidad de enrutar todas las longitudes de onda de una fibra entrante a una fibra de salida.
- **Switcheo de longitud de onda.** Es la habilidad de realizar una conmutación entre las longitudes de onda específicas de una fibra entrante a una fibra de salida.

- **Conversión de longitud de onda.** Es la habilidad de tomar longitudes de onda entrantes y convertirlas a otra frecuencia óptica en el puerto de salida.

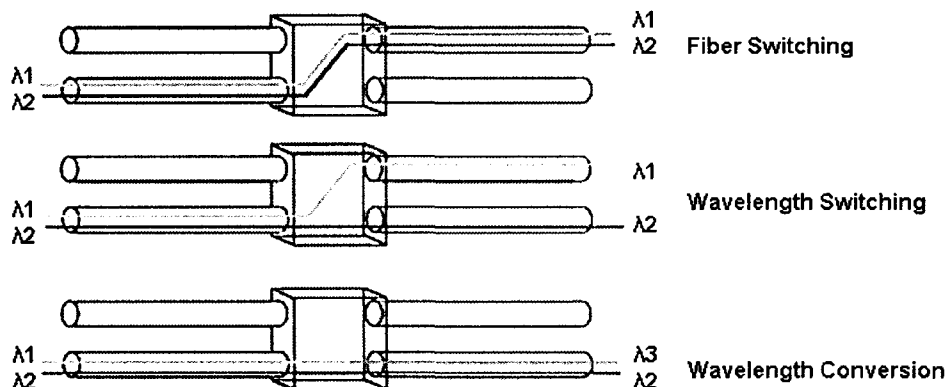


Figura 2.23 Cross-conexión óptica.

2.7 Tendencia en los componentes ópticos

Conforme la tecnología avanza cada una de las funciones requeridas, como por ejemplo el filtro para armonizar, los *space switches*, y convertidores de longitud de onda, se han vuelto más prácticos y rentables. En la figura 2.24 se ilustran algunas funciones claves que se han identificado como requerimiento para las redes ópticas emergentes (IEC, 2004).

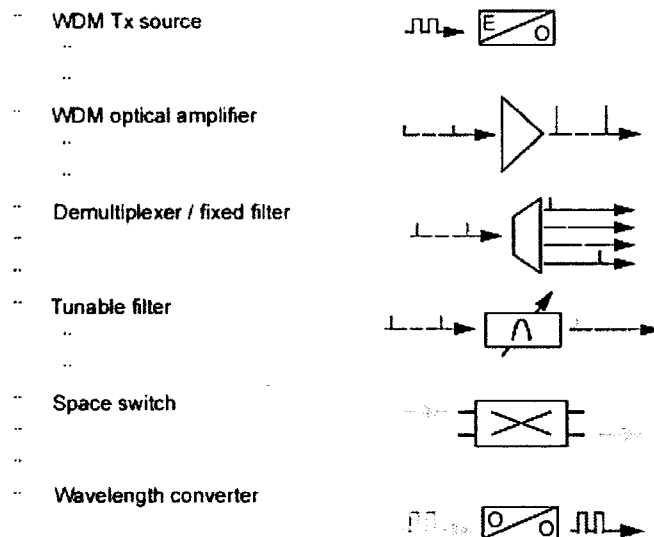


Figura 2.24 Bloques funcionales claves para sistemas de transporte WDM.

Una de las tecnologías más prometedoras para las redes ópticas son los Amplificadores Ópticos Semiconductores (SOA), los cuales integran la funcionalidad del amplificador a un semiconductor material. Los *space switches*, y los convertidores y selectores de longitud de onda, pueden hacerse desde un SOA, el cual conducirá a una reducción de costos y mejorará el desempeño de equipos de redes ópticas futuros (IEC, 2004).

Todas estas tecnologías van dirigidas a reducir los costos de la red y proveer nuevos servicios para los usuarios, los cuales como se mencionó anteriormente, constantemente están demandando mayor ancho de banda y características flexibles de su proveedor de servicios (IEC, 2004).

2.8 Topologías de red

Es posible clasificar las topologías de red como lógicas o físicas. Las topologías lógicas se refieren al método a través del cual se comunican los nodos de la red; y las topologías físicas se refieren al trazado físico del cableado y de los nodos de la red. En la figura 2.25 se muestra un ejemplo de topología lógica y física (Chomycz, 1998).

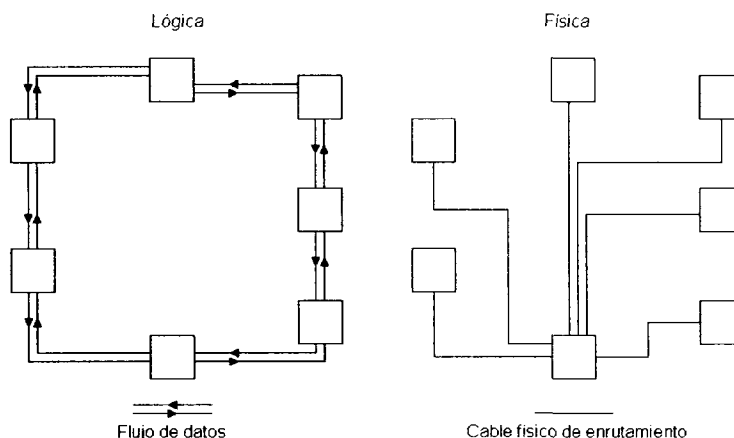


Figura 2.25 Topologías físicas y lógicas.

2.8.1 Topologías lógicas

Existen cuatro topologías lógicas consideradas como estándar: Punto a punto, estrella, enlace común o bus; y anillo.

- **Topología lógica punto a punto (Point to point).** Esta topología realiza un enlace directo entre dos dispositivos. En la figura 2.26 se ilustra un ejemplo de esta topología lógica. Las aplicaciones que utilizan esta

configuración son las conexiones de computadoras con modem, enlaces de multiplexado, enlaces de radio bidireccional y enlaces satelitales (Chomycz, 1998).

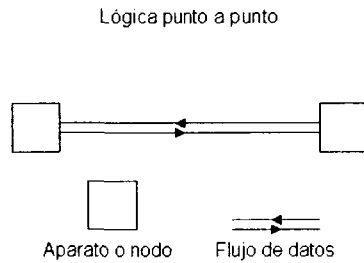


Figura 2.26 Topología lógica punto a punto.

- **Topología lógica en estrella (Star).** En esta topología se tiene un nodo en común o central que tiene un enlace punto a punto para comunicarse con los demás nodos de la red. En la figura 2.27 se muestra un ejemplo de esta configuración. Las aplicaciones que utilizan esta configuración son los sistemas telefónicos PBX y los sistemas multiestación de monitoreo de vídeo (Chomycz, 1998).

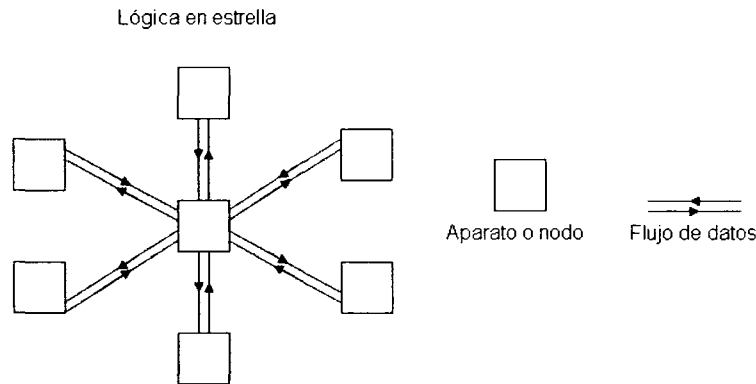


Figura 2.27 Topología lógica estrella.

- **Topología lógica en enlace común (Bus).** La característica de esta topología es que todos los nodos se conectan a un bus de transmisión, el cual es bidireccional. Cuando tiene lugar alguna transmisión, todos los demás dispositivos reciben la información. En la figura 2.28 se ilustra un ejemplo de la topología lógica bus. Las aplicaciones que utilizan esta configuración son Ethernet y token bus (Chomycz, 1998).

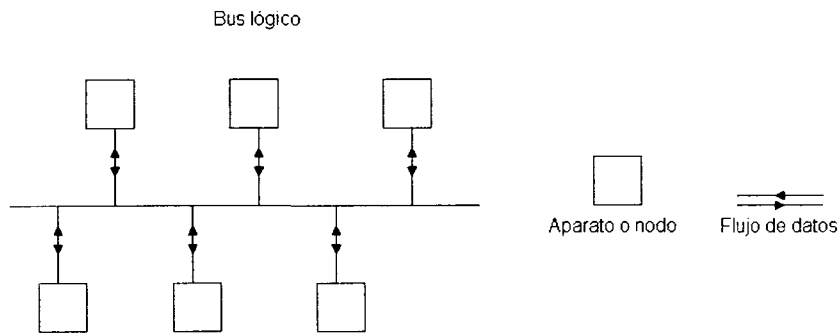


Figura 2.28 Topología lógica bus.

- **Lógica en anillo (Ring).** En este tipo de topología se tienen todos los nodos conectados en un anillo, la transmisión se lleva a cabo a través de un cable en una sola dirección, pero se puede agregar otro anillo en dirección opuesta. A la topología con dos anillos se le conoce como anillo lógico de rotación inversa, en la figura 2.29 se muestra un ejemplo utilizando esta configuración. Las aplicaciones que utilizan esta topología son token ring (IEEE 802.5) y FDDI (ANSI X3T9.5) (Chomycz, 1998).

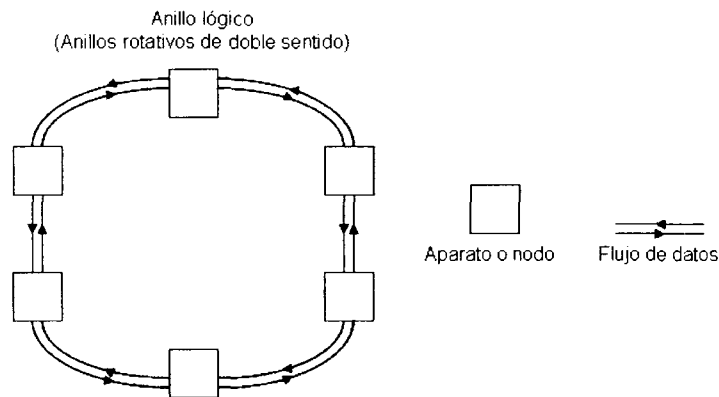


Figura 2.29 Topología lógica en anillo.

2.8.2 Topologías físicas

Según Chomycz (1998), es posible implementar las topologías físicas con la misma configuración que se utilizará en la topología lógica, esta es la forma más común para diseñar una red, sin embargo, una topología lógica también puede conectarse a una topología física diferente. La topología física de red que más se utiliza es la de estrella, esto se debe a que presenta una serie de ventajas sobre las otras topologías. Algunas de estas ventajas son las siguientes:

- Flexibilidad y capacidad de soporte de otras aplicaciones y topologías lógicas.

- Ubicación centralizada de interconexión de fibra óptica.
- Recomendado en el estándar EIA 568.
- La mayoría de las conducciones y vías de conducción tienen la configuración de estrella.
- Facilita la expansión del sistema de comunicación.

Pero también encontramos algunas desventajas, las cuales se mencionan a continuación (Chomycz, 1998):

- Si un cable falla ocasiona que también falle el nodo conectado.
- Requiere de más fibra óptica que una topología física de anillo.

Las topologías físicas que comúnmente se utilizan para redes con fibra óptica son las de punto a punto, estrella o anillo. Las configuraciones punto a punto se utilizan en aplicaciones modernas, y las topologías de estrella o anillo se utilizan comúnmente en redes LAN (Chomycz, 1998).

2.9 Topologías de red ópticas

La topología de los primeros sistemas ópticos ha evolucionado para adaptarse a la nueva tecnología y nuevos requerimientos, algunos de los nuevos diseños están formados por un *backbone* o esqueleto con una capacidad muy alta y con una estructura de malla parcial, esto para poder conectar los sistemas regionales que utilizan una estructura de anillo. El acceso al usuario final se realiza a través de una topología de estrella. En la figura 2.30 se ilustra un ejemplo de la topología típica de estos nuevos diseños (Olvera, 2004).

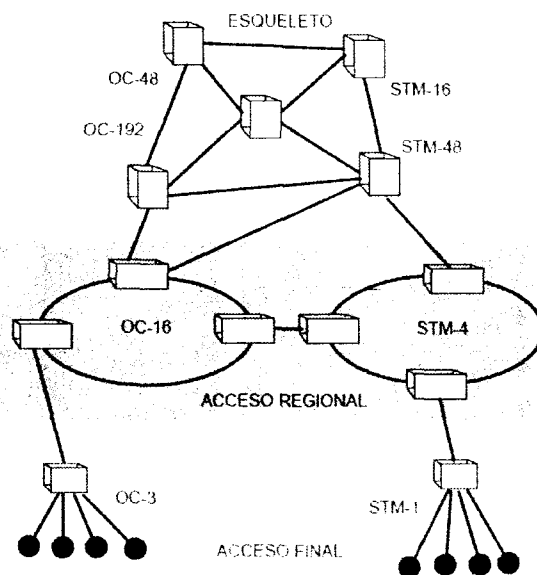


Figura 2.30 Topología típica de un nuevo diseño óptico.

2.9.1 Arquitectura óptica de anillo

La arquitectura óptica de anillo es un esquema familiar para la industria de las telecomunicaciones y aplicada en el dominio óptico, en la figura 2.31 se muestra un ejemplo de la arquitectura óptica de anillo. Los anillos ópticos se basan en los mismos principios que un anillo de fibra, es decir, proveen la protección necesaria contra las fallas de equipo y de red. En la figura 2.32 se ilustra un ejemplo de anillo óptico (IEC, 2004).

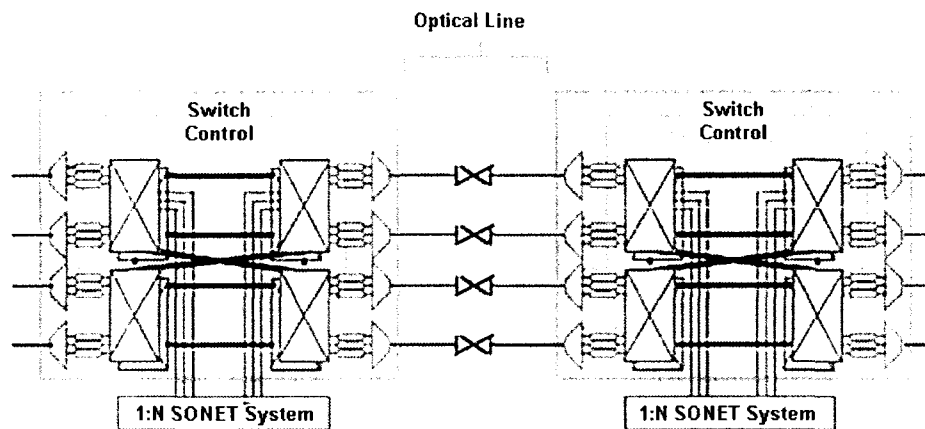


Figura 2.31 Arquitectura óptica de anillo.

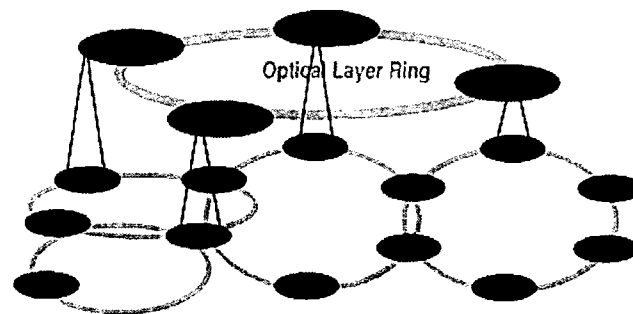


Figura 2.32 Anillo óptico.

Los dispositivos de red cuentan con *software* inteligente que les permite identificar alguna falla o interrupción de la comunicación, y así dirigir el tráfico en la dirección contraria del anillo. Sin embargo, los elementos de la red no soportan múltiples longitudes de onda en comparación con los circuitos DS-3 (IEC, 2004).

Debido a que los anillos ópticos son más rentables en redes extensas, el tiempo de conmutación se convierte en crítico, la tecnología Equipo de Protección de Red (NPE, *Network Protection Equipment*) está planeada para la

implementación y reduce significativamente el tiempo de conmutación requerido en una gran red óptica (IEC, 2004).

2.9.2 Topología mesh

La topología mesh es una topología de red en la cual cada dispositivo esta conectado a varias interconexiones redundantes entre los nodos de la red. En una topología mesh cada nodo tiene una conexión a cada otro nodo de la red. En la figura 2.33 se muestra un ejemplo de esta topología (Webopedia, 2004).

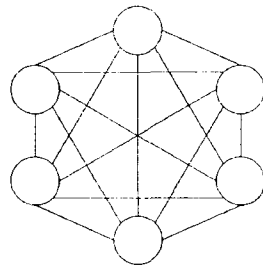


Figura 2.33 Topología mesh.

Existen dos tipos de topología mesh: mesh completa y mesh parcial. La topología mesh completa ocurre cuando cada nodo tiene un circuito y se conectan a cada nodo, este tipo de topología mesh es muy cara de implementar debido a la gran cantidad de redundancia, pero en el momento en el que algún nodo falle, el tráfico de la red podrá ser direccionado a cualquier otro nodo. La topología mesh completa generalmente se usa como *backbone* (Webopedia, 2004).

La topología mesh parcial es mas barata de implementar debido a que presenta menos redundancia que la topología mesh completa. Con esta topología algunos nodos son organizados en un esquema de mesh completo, y otros solamente son conectados a uno o dos nodos de la red. En algunas ocasiones se puede encontrar la topología mesh parcial en redes periféricas conectadas a un *backbone* de mesh completa (Webopedia, 2004).

2.10 Costos de cross-conectores electrónicos

Un cross-conector electrónico funciona como un *patch panel*, el cual se configura manualmente interconectando líneas de entrada y salida. Este es un dispositivo de comunicaciones fijo, si es necesario realizar alguna modificación en la configuración un técnico tiene que acudir a la ubicación física del cross-conector y realizar el ajuste en la conexión (Comunicación verbal).

En la tabla 2.5 se muestra la razón de datos que tiene SONET y SDH (Light Reading, 2002).

| Señal SONET | Señal SDH | Razón de Bit (Mbit/s) |
|-------------|-----------|-----------------------|
| STS1 | | 51.84 |
| OC3 | STM1 | 155.52 |
| OC12 | STM4 | 622.08 |
| STS24 | | 1,244.16 |
| OC48 | STM16 | 2,488.32 |
| OC192 | STM64 | 9,953.28 |
| OC768 | STM256 | 39,813.12 |

Tabla 2.5 Razón de datos de SONET y SDH.

En la actualidad se puede encontrar en el mercado los cross-conectores electrónicos, y su costo aproximado se ilustra en la tabla 2.6.

| Cross-conectores electrónicos | | | |
|-------------------------------|---------------|--------|-----|
| Descripción | Precio | Poten. | Ref |
| Term base Compañía 1 | \$ 267,000.00 | | [1] |
| Term per Channel Compañía 1 | \$ 4,200.00 | | [1] |
| Term base Compañía 2 | \$ 370,000.00 | | [1] |
| Term per Channel Compañía 2 | \$ 5,000.00 | | [1] |

Nota: Precios en dólares.

Tabla 2.6 Costo aproximado de los cross-conectores electrónicos.

Referencias: [1] Comunicación verbal, 2005

2.11 Costos y arquitectura de cross-conectores ópticos (OCX)

Como se mencionó anteriormente un cross-conector prepara el tráfico para llenar los puertos de salida de una forma eficiente. De acuerdo a Black (2002) los cross-conectores son utilizados para conectar enlaces ópticos, una de sus funciones es mapear diferentes tipos de entradas hasta la salida. Los cross-conectores son capaces de segregar tráfico de gran ancho de banda del tráfico de bajo ancho de banda, y enviar dicho tráfico a puertos diferentes. Estos dispositivos son capaces de convertir una señal de entrada de cierta longitud de onda a una señal de salida de una diferente longitud de onda.

En la figura 2.34 se ilustra un diagrama funcional de un cross-conector óptico, en el cual cuatro sistemas de líneas ópticas (*Optical line systems OLS*) son conectadas al cross-conector. La señal WDM de dos OLS son

demultiplexadas, y la longitud de onda resultante pasa a través de los convertidores de longitud de onda (*Wavelength converters*). Cada señal es cross-conectada, nuevamente convertida, multiplexada, y enviada a la fibra óptica (Black, 2002).

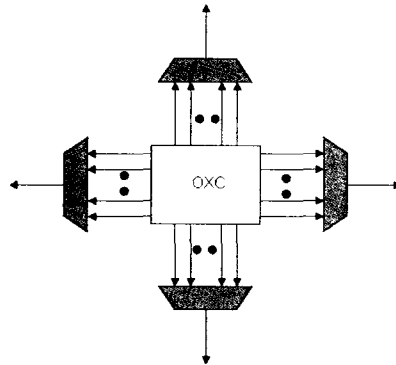
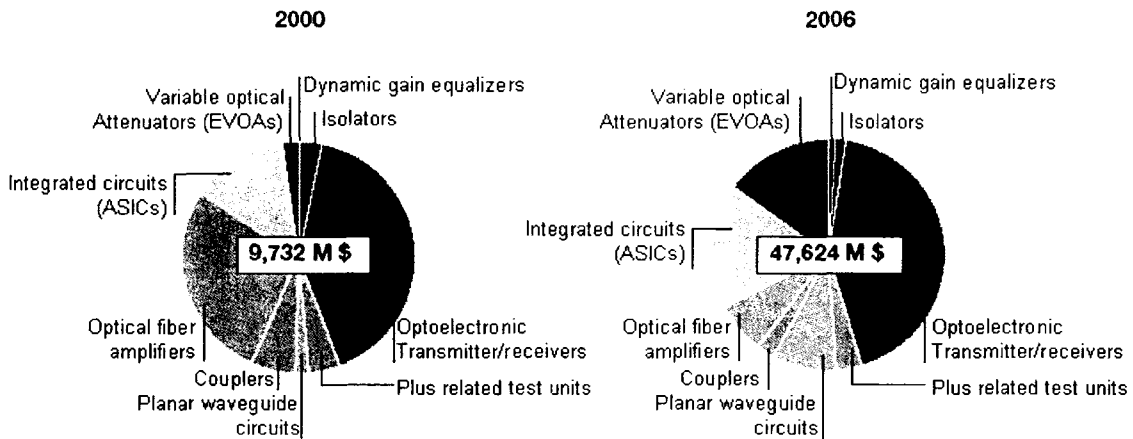


Figura 2.34 Diagrama funcional de un cross-conector.

2.11.1 Costos de componentes de cross-conectores ópticos

De acuerdo a Thompson (2002), en la gráfica 2.35 se ilustra un pronóstico de mercado del crecimiento de los componentes ópticos, el cual nos muestra que esta es una tecnología que poco a poco esta ganando mercado.



Gráfica 2.35 Pronóstico de mercado del crecimiento de los componentes ópticos.

De la tabla 2.7 a la 2.18 se presentan los componentes que forman parte de un cross-conector así como su descripción, precio y potencia.

Nota: Todos los precios son en dólares.

| Circuito planar de onda luminosa (Planar lightwave circuit (PLC)) | | | |
|--|------------------------------|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref |
| | Costo por entrada/salida | \$ 1,000.00 | [1] |
| | Planar lightwave circuit 8x8 | \$ 16,000.00 | [1] |

Tabla 2.7 Costo de circuito planar de onda luminosa (PLC).

| Bloqueadores de longitud de onda (Wavelength blockers) | | | |
|---|--------------------|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref |
| | WaveBlocker | \$ 100,000.00 | [1] |

Tabla 2.8 Costo de bloqueadores de longitud de onda (WB).

| Regeneradores (Regenerators) | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref |
| | Regenerator 3R Compañía 1 | \$ 53,300.00 | [1] |
| | Regenerator 3R Compañía 2 | \$ 46,000.00 | [1] |

Tabla 2.9 Costo de regeneradores.

| Convertidores de longitud de onda (Wavelength conversion) | | | |
|--|--|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref |
| | Convertidor de longitud de onda Compañía 1 | \$ 32,300.00 | [1] |
| | Convertidor de longitud de onda Compañía 2 | \$ 25,000.00 | [1] |

Tabla 2.10 Costo de convertidores de longitud de onda (WC).

| Demultiplexor y Multiplexor | | | | |
|------------------------------------|--|---------------|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Poten. | Precio | Ref |
| CMAX-CMC1 | 88-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 5.4W | \$ 41,384.00 | [1] |
| CMAX-CMC2 | 44-Channel Even-Numbered Mux/Demux Unit (C-Band) | 5.4W | \$ 41,384.00 | [1] |
| CMAX-CML1 | 88-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 5.4W | \$ 49,660.00 | [1] |
| CMAX-CML2 | 44-Channel Even-Numbered Mux/Demux Unit (L-Band) | 5.4W | \$ 49,660.00 | [1] |
| CHAX-MDC1 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 29,295.00 | [1] |
| CHAX-MDC3 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 29,295.00 | [1] |
| CHAX-MDC5 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 35,154.00 | [1] |
| CHAX-MDC7 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 36,619.00 | [1] |
| CHAX-MDC2 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 38,084.00 | [1] |
| CHAX-MDC4 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 39,549.00 | [1] |

| | | | | |
|-----------|------------------------------------|------|--------------|-----|
| CHAX-MDC6 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 41,013.00 | [1] |
| CHAX-MDC8 | 11-Channel Mux/Demux Unit (C-Band) | 8.7W | \$ 42,478.00 | [1] |
| CHAX-MDL1 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 45,408.00 | [1] |
| CHAX-MDL3 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 46,872.00 | [1] |
| CHAX-MDL5 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 48,337.00 | [1] |
| CHAX-MDL7 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 49,802.00 | [1] |
| CHAX-MDL2 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 51,267.00 | [1] |
| CHAX-MDL4 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 54,196.00 | [1] |
| CHAX-MDL6 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 57,126.00 | [1] |
| CHAX-MDL8 | 11-Channel Mux/Demux Unit (L-Band) | 8.7W | \$ 60,055.00 | [1] |
| | Mux/Demux per channel | | \$ 3,400.00 | [1] |

Tabla 2.11 Costo de demultiplexor y multiplexor (MUX/DEMUX).

| Transponders | | | | |
|----------------------------|------------------------|---------------|------------|--|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref | |
| | Transponder Compañía 1 | \$ 32,300.00 | [1] | |
| | Transponder Compañía 2 | \$ 25,000.00 | [1] | |

Tabla 2.12 Costo de Transponders.

| Switch | | | | |
|----------------------------|---|-----------------------|------------|--|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref | |
| FOSW-1/2 | 1x1/1x2 Fiber Optical Switch, 1 λ | \$ 145.00 | [2] | |
| FOSW-1x4 | 1x4 Fiber Optical Switch, 1 λ | \$ 1,280.00 | [2] | |
| FOSW-2x4 | 2x4 Fiber Optical Switch, 1 λ | \$ 750.00 | [2] | |
| | 2x2 Switch, 1 λ | \$ 2,000.00 | [1] | |
| | 6x6 Switch, 1 λ | \$ 6,000.00 | [1] | |
| | 8x8 Switch, 1 λ | \$ 8,000.00 | [1] | |
| | 12x12 Switch, 1 λ | \$ 12,000.00 | [1] | |
| | WaveSwitch 1:N | \$ 160,000.00 | [1] | |
| | 1x9 Switch, 60 GHz spacing, 80 λ | \$ 30,000.00 | [1] | |
| | 1x4 Switch, 100 GHz spacing, 64 λ | \$ 50,000.00 | [1] | |
| | 1x4 Switch, 50 GHz spacing, 88 λ | \$ 500.00 / λ | [1] | |

Tabla 2.13 Costo de switch.

| Atenuador óptico variable (Variable optical attenuator) | | | | |
|--|---|---------------|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Poten. | Precio | Ref |
| VAS1 | Variable Attenuator Unit | 0W | \$ 3,375.00 | [1] |
| VOA-B | Benchtop Variable Optical Attenuator | | \$ 1,365.00 | [2] |
| VOA-C | Variable Optical Attenuator – Collimator Type | | \$ 229.00 | [2] |

| | | | | |
|--------|-----------------------------|--|-----------|-----|
| VOA-M1 | Variable Optical Attenuator | | \$ 170.00 | [2] |
|--------|-----------------------------|--|-----------|-----|

Tabla 2.14 Costo de atenuador óptico variable (VOA).

| Divisores (Splitters) | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|--------|-------------|-----|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Poten. | Ref |
| BSP1 | Band Splitter/Combiner Unit | 1.6W | \$ 3,296.00 | [1] |
| 1x2 | Splitter, 3 dB loss, pasivo | | \$ 30.00 | [1] |
| 1x3 | Splitter, 3 dB loss, pasivo | | \$45.00 | [1] |

Tabla 2.15 Costo de divisores.

| Acopladores (Coupling) | | | | |
|-------------------------------|--|-----------|-----|--|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref | |
| MSMC-34 | 1x3/1x4 Single Mode Coupler (Monolithic) | \$ 59.00 | [2] | |
| MSMC-D | 1x4/4x4 Single Mode Dual Window Couplet (Monolithic) | \$ 92.00 | [2] | |
| MSMC-78 | 1x7/1x8 Single Mode Coupler (Monolithic) | \$162.00 | [2] | |
| DWC1315 | Dual Window Couplers 1310 & 1550 | \$ 22.00 | [2] | |
| MMC | Multimode Fiber Coupler | \$ 33.00 | [2] | |
| PIC | Polarization Insensitive Couplers | \$ 29.00 | [2] | |
| PMC | Polarization Maintaining Couplers | \$ 580.00 | [2] | |
| SMC-M | Single Mode Coupler – Mini Size | \$ 79.00 | [2] | |
| SMC | Single Mode Couplers | \$ 21.00 | [2] | |
| SSWC | Single Mode Single Window Wideband Couplers | \$ 35.00 | [2] | |
| SWC | Special Wavelength Couplers (630, 830, 1064 nm etc.) | \$ 95.00 | [2] | |
| SMWDM | Single Mode WDM Couplers | \$ 85.00 | [2] | |
| WDMH1315 | WDM Coupler with High Isolation 1310/1550nm | \$ 79.00 | [2] | |
| WDM1315 | WDM Fiber Coupler 1310/1550 nm | \$ 29.00 | [2] | |
| WDM1415 | WDM Pump Coupler 1480/1550 nm | \$ 58.00 | [2] | |
| WDMC915 | WDM Pump Coupler 980/1550 nm | \$ 58.00 | [2] | |

Tabla 2.16 Costo de acopladores.

| Amplificadores (Amplifiers) | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--------|--------------|-----|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Poten. | Precio | Ref |
| MAAX-AAC1 | Band Amplifier Unit (C-Band) | 89.2W | \$ 31,560.00 | [1] |
| MAAX-BAC1 | Band Amplifier Unit (C-Band) | 89.2W | \$ 31,560.00 | [1] |
| MAAX-CAC1 | Band Amplifier Unit (C-Band) | 89.2W | \$ 37,130.00 | [1] |
| MAAX-DAC1 | Band Amplifier Unit (C-Band) | 89.2W | \$ 51,981.00 | [1] |
| MAAX-AAL1 | Band Amplifier Unit (L-Band) | 89.2W | \$ 51,179.00 | [1] |
| MAAX-BAL1 | Band Amplifier Unit (L-Band) | 89.2W | \$ 51,179.00 | [1] |

| | | | | |
|-----------|--------------------------------------|--------|---------------|-----|
| MAAX-CAL1 | Band Amplifier Unit (L-Band) | 89.2W | \$ 60,210.00 | [1] |
| SRA1 | Raman Amplifier Shelf | 0W | \$ 4,149.00 | [1] |
| CRAX-SIR1 | Raman Amplifier Shelf Interface Unit | 20W | \$ 2,187.00 | [1] |
| RAAX-DRA1 | Raman Amplifier Unit | 123.5W | \$ 43,961.00 | [1] |
| RAAX-DRA2 | Raman Amplifier Unit | 123.5W | \$ 43,961.00 | [1] |
| RAAX-DRA3 | Raman Amplifier Unit | 123.5W | \$ 43,961.00 | [1] |
| RAAX-DRA4 | Raman Amplifier Unit | 123.5W | \$ 43,961.00 | [1] |
| | Amplifiers, commons | | \$ 257,000.00 | [1] |

Tabla 2.17 Costo de amplificadores.

| Circuladores (Circulator) | | | |
|----------------------------------|---|---------------|------------|
| Nombre de la Unidad | Descripción | Precio | Ref |
| CIR-01 | Polarization Insensitive Optical Circulator | \$ 480.00 | [2] |
| CIR-4 | Optical Circulators 4-Port | \$ 890.00 | [2] |
| CIR-CL | Wideband Circulators (C+L Bands) | \$ 590.00 | [2] |
| CIR-PM | Polarization Maintaining Circulators | \$ 1,480.00 | [2] |

Tabla 2.18 Costo de circuladores.

Referencias: [1] Comunicación verbal; [2] Oemarket, 2005.

2.11.2 Arquitectura de cross-conectores ópticos

En las siguientes figuras se muestran algunas arquitecturas de cross-conectores ópticos. En la figura 2.36 y 2.37 se ilustran dos arquitecturas básicas.

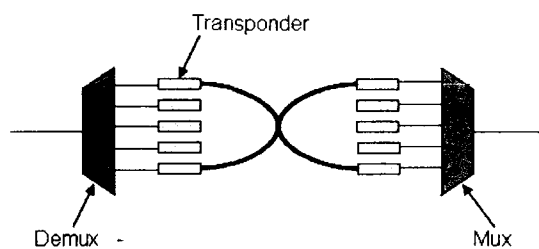


Figura 2.36 Arquitectura de cross-conector 1.

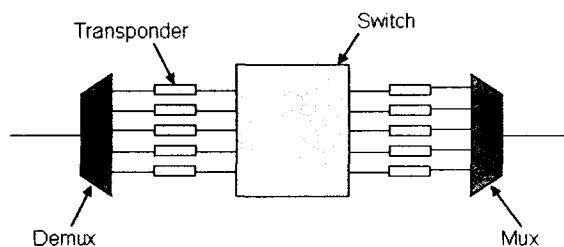


Figura 2.37 Arquitectura de cross-conector 2.

En la figura 2.38 se muestra una arquitectura de un OXC semi-transparente, en la cual se direccionan las longitudes de onda que requieren regeneración hacia una cola de regeneradores y de convertidores de longitud de onda (WC) (Castañón, 2004).

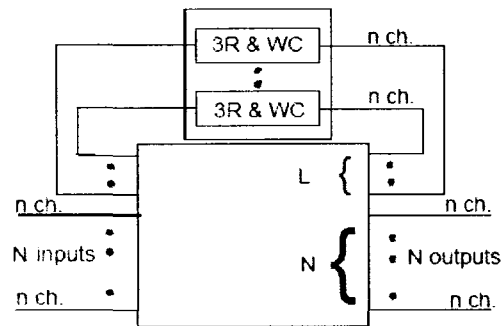


Figura 2.38 Arquitectura de cross-conector 3.

En la figura 2.39 se ilustra una arquitectura que realiza funciones de conmutación demultiplexada y multiplexado (DSM *Demultiplexing Switching and Multiplexing*). Los demultiplexores separan las señales WDM en longitudes de onda, y el espacio del conmutador proporciona una puerta óptica que controla el flujo de las rutas luminosas hacia la salida señalada. Las longitudes de onda son multiplexadas en la salida, y un atenuador óptico variable (VOA) se utiliza para ecualizar la potencia por canal antes de multiplexarla (Castañón, 2004).

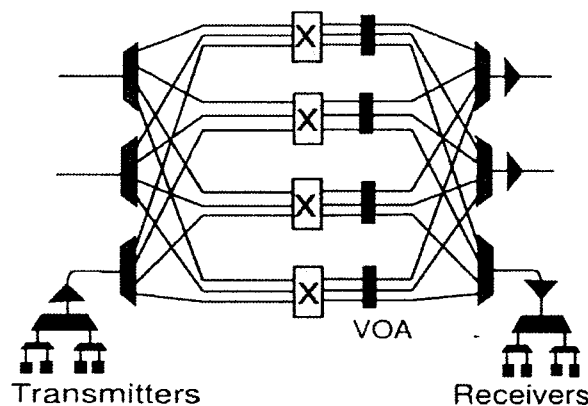


Figura 2.39 Arquitectura de cross-conector 4.

La figura 2.40 ilustra una arquitectura B&S, es decir, de *broadcast-and-select*. Los divisores realizan la difusión de las señales WDM, y posteriormente los bloqueadores de longitud de onda solamente permiten el paso a las señales deseadas y bloquean las no deseadas (Castañón, 2004).

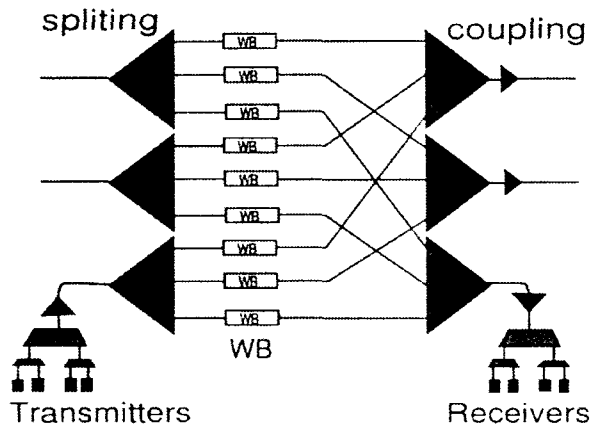


Figura 2.40 Arquitectura de cross-conector 5.

Debido a que en esta arquitectura se utilizan acopladores para dividir la señal, se produce una pérdida en las señales de salida, para compensar esta pérdida se propone la utilización de amplificadores EDFA (Castañón, 2004).

En la figura 2.41 se muestra una arquitectura de un OXC con un conjunto de bloqueadores de longitud de onda (WB). Utilizando las nuevas generaciones de conmutadores ópticos y circuitos planar de onda luminosa (PLC), los cuales permiten que $L+N$ fibras de entrada con señales WDM sean interconectadas a cualquiera de las W salidas conectadas a los bloqueadores de longitud de onda (Castañón, 2004).

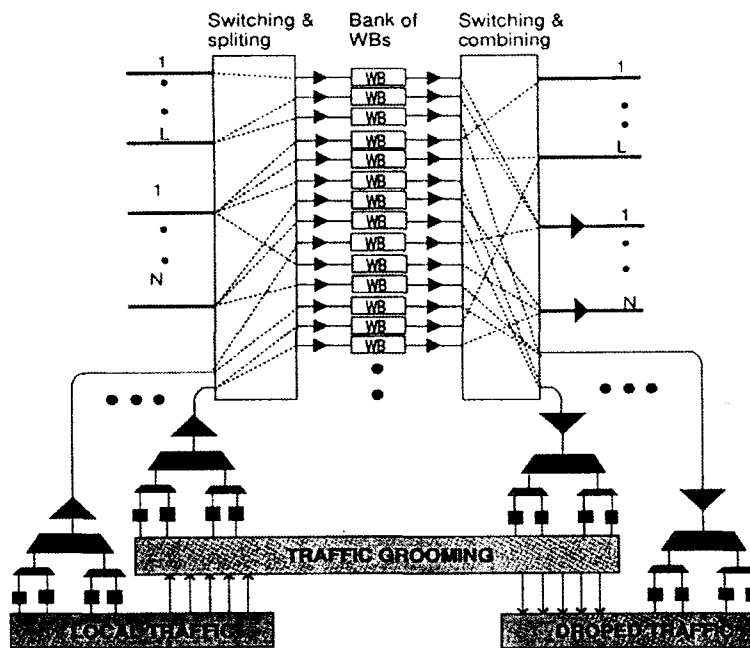


Figura 2.41 Arquitectura de cross-conector 6.

De acuerdo a Zang (2003), en la figura 2.42 y 2.43 se presentan las siguientes arquitecturas de cross-conector óptico:

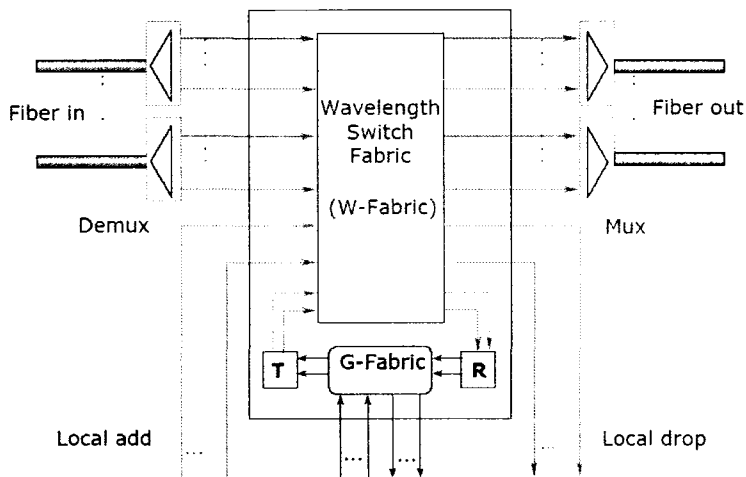


Figura 2.42 Arquitectura de cross-conector 7.

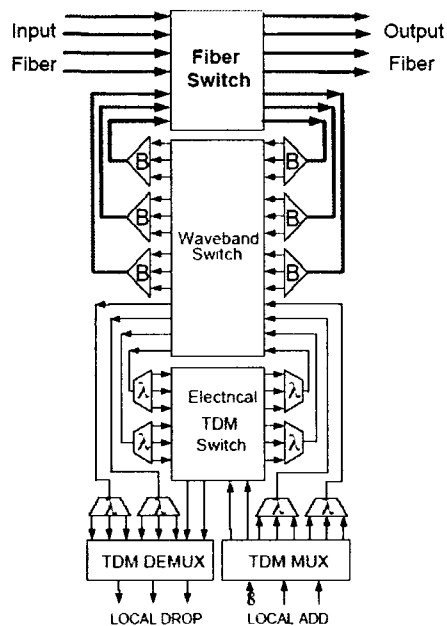


Figura 2.43 Arquitectura de cross-conector 8.

En la figura 2.44 y 2.45 se ilustran algunas arquitecturas propuestas por Ash y Ferguson (2001).

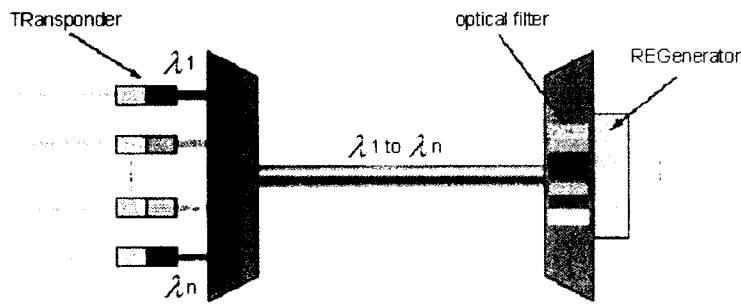


Figura 2.44 Arquitectura de cross-conector 9.

En la figura 2.45 se muestra un cross-conector óptico que utiliza tecnología láser.

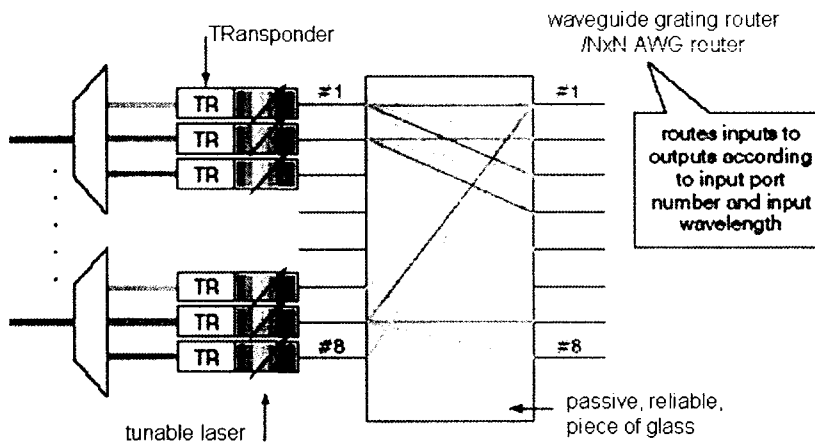


Figura 2.45 Arquitectura de cross-conector 10.

Otra arquitectura de cross-conector es la propuesta por Texas Instruments (2003), la cual se ilustra en la figura 2.46.

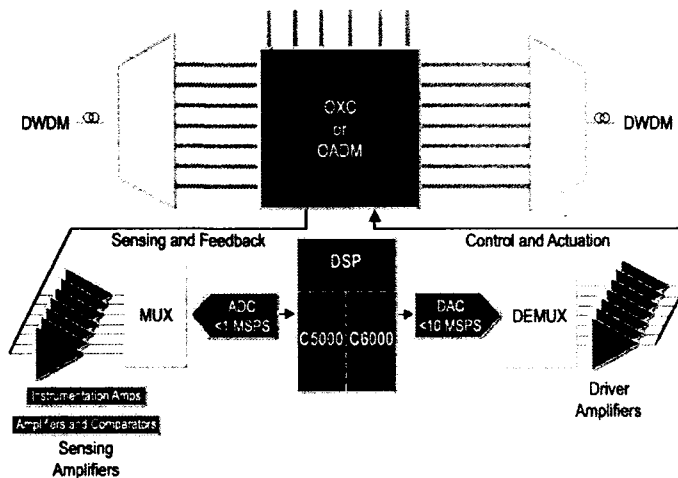


Figura 2.46 Arquitectura de cross-conector 11.

En la figura 2.47 se muestra un cross-conector que utiliza circuladores ópticos (Frazão, 2002).

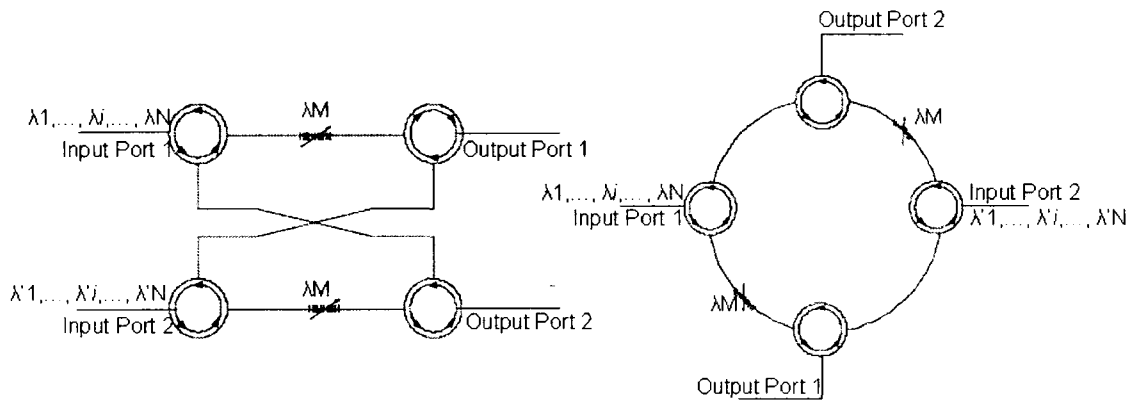


Figura 2.47 Arquitectura de cross-conector 12.

En la figura 2.48 se ilustra un cross-conector óptico que utiliza convertidores de longitud de onda (Antoniades, 1999).

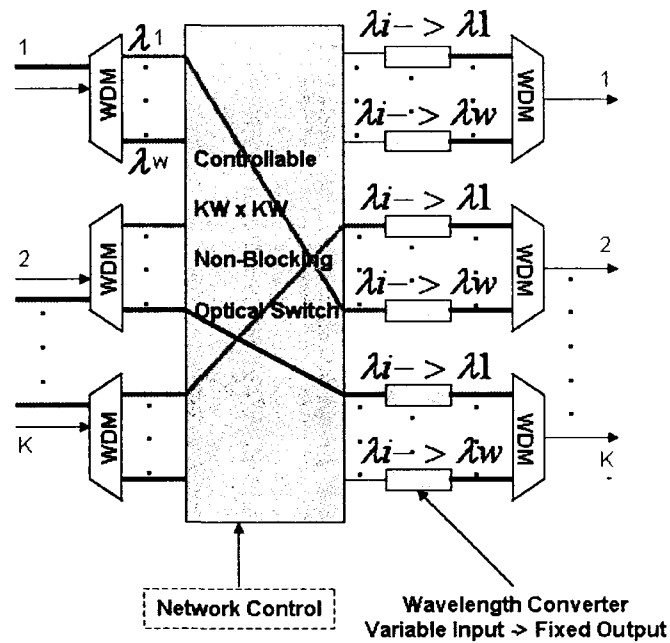


Figura 2.48 Arquitectura de cross-conector 13.

De acuerdo a Wincore (2002), en la figura 2.49 se muestra una arquitectura de OXC que utiliza filtros y un switch.

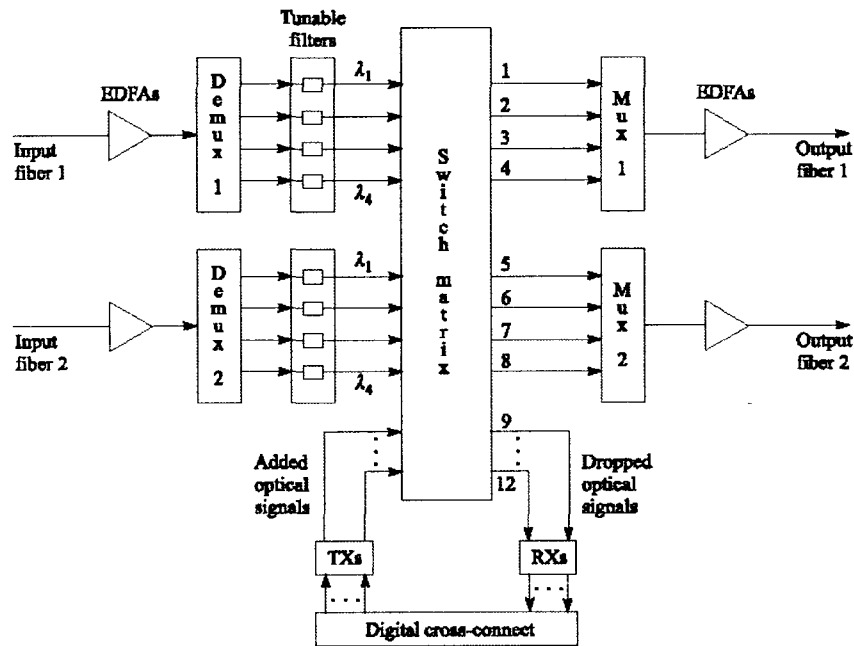


Figura 2.49 Arquitectura de cross-conector 14.

2.12 Planeación y diseño de Redes Ópticas

Como ya se mencionó, la comunicación a través de fibra óptica poco a poco ha reemplazado otros medios de transmisión en la comunicación a medianas y largas distancias, sin embargo, aún hace falta reemplazar el lazo local (conexión a casas y oficinas) con fibra óptica, pero esto no ha sido posible debido al costo que todavía es alto para que sea económicamente factible (Olvera, 2004).

Los sistemas de transmisión se pueden clasificar en 3 partes: lazo local, interconexión de centrales telefónicas y enlaces para largas distancias. Pero estos sistemas tienen factores que determinan su diseño, estos factores son: distancia del enlace, velocidad de transmisión, topología y aspectos económicos de la instalación y operación (Olvera, 2002).

2.12.1 Clasificación de las redes

Cuando se está haciendo una planeación y diseño de redes ópticas se debe tener en mente el tipo de red con el que se está trabajando, los tipos de redes son: redes de área local (LAN, *Local Area Networks*), redes de área amplia (WAN, *Wide Area Networks*), y redes de área metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Networks*) (Olvera, 2002).

Redes de área local

Este tipo de redes utilizan la fibra óptica como un sistema de comunicación de alta velocidad, y las topologías que se utilizan en las redes de área local son: anillo y estrella (Olvera, 2004).

Las redes de área local están hechas para interconectar impresoras, computadoras personales, estaciones de trabajo y servidores de archivos, en donde el área geográfica es pequeña. Los protocolos mas comunes que se usan en este tipo de redes son: CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) utilizado para Ethernet, token ring, token bus, y FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*) (Olvera, 2004).

Las redes de área local por lo general son enlaces multipunto, las topologías de estrella y anillo utilizan físicamente una comunicación punto a punto, pero lógicamente funcionan como enlaces multipunto (Olvera, 2004).

Redes de área metropolitana

Las redes de área metropolitana se pueden ver como una extensión a las redes de área local y también utiliza una comunicación multipunto, la red DQDB (*Distributed Queue Dual Bus*) es un ejemplo de estas redes (Olvera, 2004).

Redes de área amplia

Las redes de área amplia fueron las que se utilizaron primero, y están formadas por nodos de comunicación intermedios en una topología de malla incompleta y con enlaces punto a punto (Olvera, 2004).

2.12.2 Consideraciones sobre diseño

Un área muy importante es la optimización de topologías de red especializadas en el manejo de voz y datos. La topología de un sistema de redes provee una gran idea de su comportamiento interno. En estos días es necesario que se puedan diseñar redes con topologías mixtas que permitan la integración de voz, datos y video en aplicaciones de forma rentable, pero también las recientes tecnologías provocan la necesidad de la creación de topologías innovadoras (Sharma, 1990).

Según Menyuk, Holzloehner y Lima (2002), en los últimos años, han aumentado considerablemente la complejidad y los costos de los sistemas de transmisión ópticos. Debido a estos aumentos, se ha visto la necesidad de crear y utilizar métodos de modelación para diseñar y optimizar estos sistemas. Actualmente un gran número de empresas comerciales ofrecen herramientas de

modelación para cubrir esta necesidad. Estos métodos pueden ser usados para optimizar los mapas de dispersión, formatos de modulación, espacio entre canales, y ancho de banda del receptor. Una de estas herramientas es la que provee Morgan Kaufmann Publishers (2002), que nos permite analizar el comportamiento de una red, y con base en los datos que se obtienen, poder planear un diseño de red que nos lleve a aprovechar los recursos al máximo y sacar la mejor utilización y eficiencia. Otras herramientas son las que facilita la empresa Virtual Photonics Inc., la cual para la planeación de redes tiene el *VPI Transport Maker*, y para el diseño de redes ofrece el *VPI Transmission Maker*. También se tienen otras herramientas educativas como son *Delite*, y *Econet*.

Diseños *span*

Idealmente las redes ópticas deben proveer servicios *end-to-end* completamente en el dominio óptico, es decir, sin convertir señales en un formato electrónico, pero desafortunadamente aún faltan algunos años para que esta tecnología pueda transmitir señales a través de grandes distancias sin la necesidad de regeneración eléctrica (IEC, 2004).

Es necesario diseñar redes ópticas en las cuales las señales puedan viajar a través de la fibra entre un elemento de la red y otro (a esto se le llama *span*), manteniendo así su calidad. El reto en el diseño de redes ópticas aumenta con la introducción del cross-conector óptico y de los multiplexores *add/drop*, los cuales pueden cambiar dinámicamente la trayectoria de la señal para que viaje a través de diferentes rutas físicas (IEC, 2004).

Planes de ruteo de la longitud de onda

El elemento básico dentro de una red óptica es la longitud de onda, desde que diferentes longitudes de onda son transportadas a través de la red, se vuelve una situación muy importante administrar y realizar la conmutación de cada una de ellas. Uno de los beneficios que proveen las redes ópticas en relación a esto, es que permite que cada longitud de onda pueda contar con una arquitectura de red diferente, por ejemplo, se puede establecer en la red que una longitud de onda sea parte de una configuración de anillo, mientras que otra longitud de onda, que utiliza la misma red física, es parte de un sistema punto a punto. Esta flexibilidad ha conducido a dos definiciones de servicios punto a punto: *wavelength paths* (WPs), y los *virtual wavelength paths* (VWPs), los cuales se describen a continuación (IEC, 2004):.

- **WPs.** Es la implementación más sencilla de un servicio de longitud de onda en una red óptica. Usando WPs la señal entra y sale de la capa óptica con la misma longitud de onda, esencialmente la longitud de onda es dedicada a conectar dos puntos finales.

- **VWPs.** Debido a algunas limitaciones presentadas por WPs en cuanto al ancho de banda disponible en la red y el costo de su implementación, surgió el método VWP, en el cual una trayectoria de señales puede viajar en diferentes longitudes de onda a través de la red. Para evitar una longitud de onda dedicada para una conexión *end-to-end*, la red puede reutilizar y optimizar longitudes de onda para brindar la mayor capacidad.

2.12.3 Restauración

Conforme las redes ópticas se desarrollan, realizar una restauración a nivel de capa óptica permite un gran ahorro en costos. En este esquema de restauración, los nodos ópticos pueden proteger todas las longitudes de onda de la trayectoria mediante tiempos de conmutación muy similares a los anillos eléctricos de SONET. Debido a que la protección se realiza en la capa óptica, el sistema eléctrico se ve libre de la extensa arquitectura de protección, lo cual conduce a un enorme ahorro en costos; además esta restauración a nivel de capa óptica permite una mejor utilización de la longitud de onda (IEC, 2004).

Se pueden implementar diferentes métodos de protección en una red óptica, los cuales son similares a sus contrapartes eléctricos. A continuación se describe algunos de estos métodos (IEC, 2004):

- **Enlace.** La restauración del enlace es la más sencilla de implementar en una red óptica, esta restauración dirige la trayectoria óptica a través de un enlace alternativo entre los nodos, brindando así protección en el caso de que ocurra una falla en la fibra o el equipo.

- **Trayectoria.** En un esquema de restauración de trayectoria 1:N se asigna una trayectoria desunida a una conexión *end-to-end*, pero la trayectoria alterna no está dedicada a cada conexión, por lo tanto, aunque este método provee una restauración completa cuando ocurre alguna falla en el enlace, no puede brindar una restauración completa si fallan varios enlaces.

- **Híbrido.** Una restauración similar a la protección del enlace es la restauración híbrida, la cual suministra protección para cada enlace, pero también intenta mejorar la utilización de la fibra con la eliminación del transporte extenso. Para lograr esto la conmutación de nodos se realiza lejos de la falla.

- **Anillo.** La protección más robusta en la arquitectura de las redes ópticas, es el anillo óptico. Los anillos ópticos funcionan de la misma forma que su contraparte electrónico, con la misma arquitectura y las alternativas disponibles, sin embargo, se requiere de más fibra que los otros esquemas de restauración. Los anillos ópticos proveen el más alto nivel de confiabilidad.

2.13 Administración de Redes Ópticas

Uno de los aspectos más importantes y difíciles involucra a la administración de las redes ópticas, esto se debe a diferentes razones: restauración, desempeño, los servicios de longitud de onda (IEC, 2004). La administración de redes es un tema muy extenso, por lo tanto, en esta investigación solo se analizará de una forma general.

Las redes ópticas se encuentran en una etapa de evolución y se están implementando sobre una arquitectura SONET, la cual cuenta con su propia restauración y esquemas de protección. Si no se tiene un sistema de administración de redes (NMS *network-management system*) altamente inteligente, se vuelve muy difícil asegurar que no existan conflictos en un esquema de restauración entre la capa óptica y la eléctrica, además el sistema de administración de redes debe contar con la forma de identificar conflictos o prevenirlos (IEC, 2004).

El NMS también debe contar con la habilidad de monitorear el desempeño de la señal para cada longitud de onda. La utilización de componentes como los multiplexores *add/drop* y los cross-conectores ópticos, inducen a que el desempeño *end-to-end* de las longitudes de onda se vuelva más difícil. Así mismo, este sistema de administración de redes debe proporcionar asistencia en la solución de los problemas de red, asilando las longitudes de onda y la posible ubicación de la degradación, es muy importante contar con un método inteligente para monitoreo. Pero el servicio mas importante que puede proporcionar un NMS es la habilidad para administrar y entregar nuevos servicios a los clientes de una forma rápida, estableciendo y monitoreando nuevos servicios de longitud de onda *end-to-end* para maximizar sus ganancias en ancho de banda (IEC, 2004).

2.14 Consideraciones sobre las Redes Ópticas

2.14.1 Consideraciones económicas

Como se menciona en el artículo *Fiber Optics Basics*, publicado por Lascomm (2005), uno de los factores económicos iniciales que se tienen que considerar cuando se migra a fibra óptica, es el costo de remplazar el cableado electrónico por el óptico. La creciente demanda por la fibra óptica ha provocado que los precios bajen hasta llegar a un rango que resulta competitivo con el cobre. Sin embargo, desde que se requiere una variedad de *hardware* como son los transmisores, convertidores, repetidores ópticos, etc., el costo inicial de

cambiar a fibra óptica puede ser elevado, pero otros factores como los avances de la tecnología, la competencia, y la demanda han disminuido su precio.

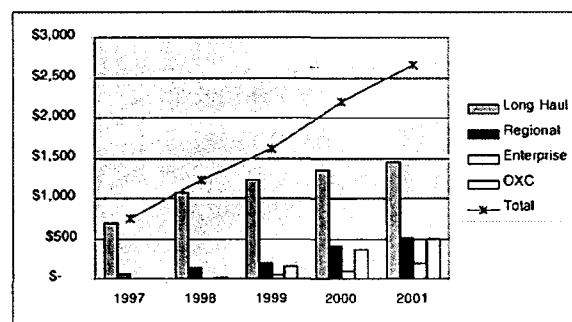
Se deben considerar las ganancias a corto y largo plazo cuando se planea realizar un reajuste al sistema de comunicaciones que se tiene implementado. A corto plazo resulta mas barato seguir utilizando el cableado de cobre para satisfacer las necesidades de expansión de los enlaces, de esta forma, se evitan los gastos de incluir transmisores y receptores necesarios para la integración de la fibra óptica. A largo plazo puede significar mas rentable invertir en la actualización del sistema de comunicaciones a fibra óptica. Esta rentabilidad se debe a la facilidad relativa de la fibra óptica para incrementar su velocidad y su desempeño. Por lo tanto, remplazar cableado de cobre por fibra óptica significa evitar la inversión continua en un sistema de cobre que pronto será obsoleto (Lascomm, 2005).

Cambios recientes en las leyes de regulación en la industria de las telecomunicaciones, han ayudado a promover y estimular el uso de la fibra óptica, la fibra óptica esta jugando un rol muy importante desde que las necesidades de ancho de banda son cada vez mayores, esto con el fin de brindar un servicio integral el cual incluya televisión, teléfono, multimedia interactiva, y acceso a Internet (Lascomm, 2005).

Con esto podemos decir que la transmisión por fibra óptica ha ganado terreno en la última década, y en ocasiones su costo es menor al de establecer enlaces de microondas. Se vislumbra un panorama prometedor para la tecnología de fibra óptica en los próximos años (Winch, 1998).

2.14.2 Mercados para las redes ópticas

La evolución de las redes ópticas es un proceso que se está dando en etapas en los diferentes mercados, esto se debe a la diferencia que existe en cuanto a la demanda de capacidad y tipos de tráfico. En la gráfica 2.50 se ilustra el crecimiento que se han venido dando en los diferentes mercados (IEC, 2004).



Gráfica 2.50 Crecimiento de mercados.

Redes de transporte extenso

En las redes de transporte extenso el ancho de banda se consume muy rápidamente, este tipo de redes se extienden a través de miles de kilómetros. El mercado de las redes de transporte extenso es diferente de los demás mercados en distintos aspectos, como por ejemplo: grandes distancias entre nodos y requerimientos de ancho de banda muy altos (IEC, 2004).

Redes IOF

Las redes IOF (*Interoffice*) tienen diferentes necesidades de tecnologías ópticas, este tipo de redes están localizadas geográficamente y con más interconexiones. Debido a los patrones de tráfico y distancias entre oficinas, los anillos ópticos y los cross-conectores ópticos serán requeridos más rápidamente que en otros mercados. Las redes IOF deben conectar redes de acceso extenso, además de distribuir tráfico en una región (IEC, 2004).

Redes de acceso de negocios

La última milla de las redes dirigidas a clientes de negocios, es conocida de diversas formas: WAN's, MAN's, y redes de acceso de negocios, pero el objetivo de estas redes es proveer conexiones a una infraestructura de telecomunicaciones. En las redes de acceso de negocios la aplicación de las redes ópticas no está muy bien definida. Los sitios de las redes de acceso de negocios están muy cerca unos de otros, así que los amplificadores ópticos no son tan necesarios (IEC, 2004).

2.14.3 El futuro de las Redes Ópticas

Los continuos avances en las tecnologías ópticas prometen seguir evolucionando hacia unas redes ópticas que lleguen a su última meta de proveer servicios de longitud de onda *end-to-end*. El impacto que tiene la nueva capa óptica en las redes de telecomunicaciones ha sido muy alto, el cual se puede medir de dos formas: en el impacto económico, y en la habilidad de los *carriers* de ofrecer nuevos servicios. Otro benéfico de la tecnología de la capa óptica es el aumento en la capacidad de la red, permitiendo así que se pueda transportar mas de 40 veces el tráfico con la misma infraestructura de fibra (IEC, 2004).

Estos avances conducirán hacia precios mas bajos y competencia en el intercambio local, los consumidores tendrán acceso a servicios con alto ancho de banda, y servicios que actualmente son considerados muy caros, por ejemplo: videoconferencias en los hogares, comercio electrónico, video de alta velocidad, etc., los cuales se convertirán en servicios comunes ya que serán tecnológicamente y económicamente posibles (IEC, 2004).

Capítulo 3. Metodología

Para la realización de esta investigación se tomaron como base el artículo “Performance Requirements for Semi-Transparent DWDM Networks”, y el artículo “An Optical Cross Connected Architecture Based on Planar Lightwave Circuit Switches” del Dr. Gerardo Castañón.

3.1 Introducción

Debido al enorme desarrollo que se ha presentado en el área de la óptica, en este caso particular, en las redes ópticas o transparentes, se ha visto la necesidad y la capacidad para proponer dispositivos que ayuden a disminuir los componentes y los costos de una red (Castañón, 2004).

En las redes transparentes, las señales son conmutadas de forma totalmente óptica a través de grandes distancias, esta transparencia en las redes representa una reducción en costos y una solución a los requerimientos cada vez más altos de un ancho de banda flexible para datos de banda ancha y aplicaciones de Internet (Castañón, 2004).

Se ha demostrado que en las redes WDM se invierte de un 50% hasta un 75% en transponders del tipo O/E/O. Se han realizado muchos acercamientos por reducir el número de convertidores O/E/O, como la introducción de dominios transparentes de transmisión, o como la aplicación de regeneración selectiva (Castañón, 2004).

Existe un problema general en las redes ópticas, esto es, combinar la reducción potencial de costos en la transmisión transparente, y los requerimientos físicos de conmutación y flexibilidad de la red. Pero el problema no solamente está dado por el hecho de que la transmisión transparente a través de largas distancias (mayor a 600 km.) requiere un sofisticado diseño de enlaces (Castañón, 2004).

Más allá de las dificultades que se tienen que considerar en el diseño de las redes ópticas, los impedimentos son la clave dentro de las transmisiones ópticas. Para mejorar la transmisión óptica se pueden utilizar codificadores de corrección de errores (FEC – *Forward Error Correction*), amplificadores Raman, formatos de modulación robustos tolerantes a los efectos no lineales y al ruido, mapas de dispersión optimizados, arquitecturas semitransparentes de OXC con regeneración selectiva 3R y 2R, y reducción de pérdida en arquitecturas OXC (Castañón, 2004).

En una red óptica típica con topología *mesh*, se espera que una señal luminosa sea conducida a través de numerosos nodos conectados a una fuente y a un destino. El efecto cascada de los nodos OXC, y la distancia de transmisión entre los mismos, representan los parámetros cruciales en el diseño de la red transparente (Castañón, 2004).

Los aspectos que se toman en cuenta en el análisis son: la distancia límite de transmisión, el efecto cascada en los nodos OXC, y el número de regeneradores por nodo en una red *backbone* DWDM; esto es con la finalidad de poder cuantificar el costo de los cross-conectores ópticos que pueden funcionar (comunicar) en una red óptica.

3.2 Análisis

En una red de transmisión óptica generalmente se tiene un transmisor que envía la señal óptica a un nodo, y este la dirige a través de la fibra óptica y pasa por diferentes nodos hasta llegar al receptor. Pero la señal al ser transmitida sufre de atenuación a causa del ruido provocado por los diferentes componentes de la red. Para compensar esta atenuación es necesario incluir en el enlace amplificadores que refuercen la intensidad de la señal. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de enlace con amplificadores.

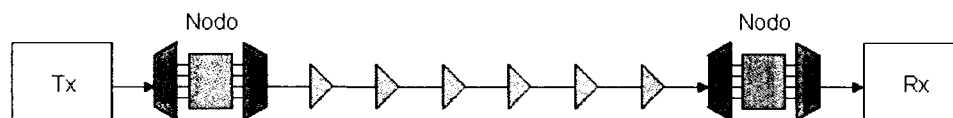


Figura 3.1 Red de transmisión óptica.

3.2.1 Calculo del OSNR

El OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) es el cálculo de la razón potencia de la señal a potencia del ruido en un canal óptico. Para un sistema típico de comunicación óptica la medición del OSNR es muy relevante. El ruido se presenta principalmente en la amplificación óptica. EL OSNR comúnmente es medido con un OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) y se define como la ecuación 3.1 (Circadiant systems, inc., 2002).

$$OSNR = 10dB \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (3.1)$$

En esta ecuación la S representa la potencia de la señal óptica y la N la potencia del ruido óptico. El cálculo del OSNR es muy importante, ya que sugiere el grado de impedimentos a los que se enfrenta una señal óptica cuando

es transmitida en un sistema que incluye amplificadores ópticos. La detección de la señal se ve afectada por la atenuación y la dispersión. Con el uso de los amplificadores se ayuda a mejorar la señal porque aumenta su amplitud, y así superar el ruido generado en el receptor (Circadiant systems, inc., 2002).

La decisión de regenerar una longitud de onda se basa en el nivel de OSNR, esto es, que el OSNR debe ser medido para las diferentes longitudes de onda o canales, y así determinar el diseño de la red.

El cálculo del OSNR se puede realizar con la ecuación 3.2, la cual se muestra a continuación (Comunicación verbal):

$$OSNR = \frac{Señal}{Ruido} = \frac{P_{Señal}}{P_{Ruido}} \quad (3.2)$$

Para calcular el OSNR total en un enlace, se tiene que tomar en cuenta el OSNR generado por cada componente en forma individual y aplicar la ecuación 3.3, la cual se describe a continuación (Comunicación verbal):

$$OSNR = \left[\frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} + \frac{1}{OSNR_4} + \dots + \frac{1}{OSNR_n} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

También se puede calcular el OSNR total del enlace con la ecuación recursiva 3.4, la cual se muestra a continuación (Comunicación verbal):

$$OSNR_{Total}^n = \left[\frac{1}{OSNR_{Total}^{n-1}} + \frac{1}{OSNR^n} \right]^{-1} \quad (3.4)$$

Cabe hacer notar que el $OSNR^n$ no es el acumulado $OSNR_{Total}^n$, sino el OSNR del último componente en la secuencia de componentes que introducen ruido. Por lo tanto, el cálculo del enlace utilizando la ecuación 3.4 sería de la siguiente manera (Comunicación verbal):

$$OSNR_{Total}^n = \left[\frac{1}{OSNR_{Tx}} + \frac{1}{OSNR_{Amp1}} \right]^{-1}, \quad OSNR_{Total}^n = \left[\frac{1}{OSNR_{Total}^{n-1}} + \frac{1}{OSNR_{Amp2}} \right]^{-1}, \quad \text{etc} \quad (3.5)$$

Para este análisis se tomó en cuenta que el OSNR del transmisor es 57.9 dB, y el OSNR de los amplificadores se determina con la ecuación 3.6, y se muestra a continuación (Comunicación verbal):

$$OSNR_{Amp} = \frac{P_{Señal}^{Salida}}{2F_N h \nu G \Delta V_{opt}} \quad (3.6)$$

La figura 3.2 se puede ilustrar en tres partes: a) primeramente se muestra un enlace óptico en el cual se especifica la pérdida que se tiene y la potencia de salida de cada amplificador; b) posteriormente se utiliza un mapa de dispersión, como el que se muestra en la gráfica de dispersión contra distancia, en cada punto donde se establecieron amplificadores; c) y por último se grafica la potencia contra distancia (Comunicación verbal).

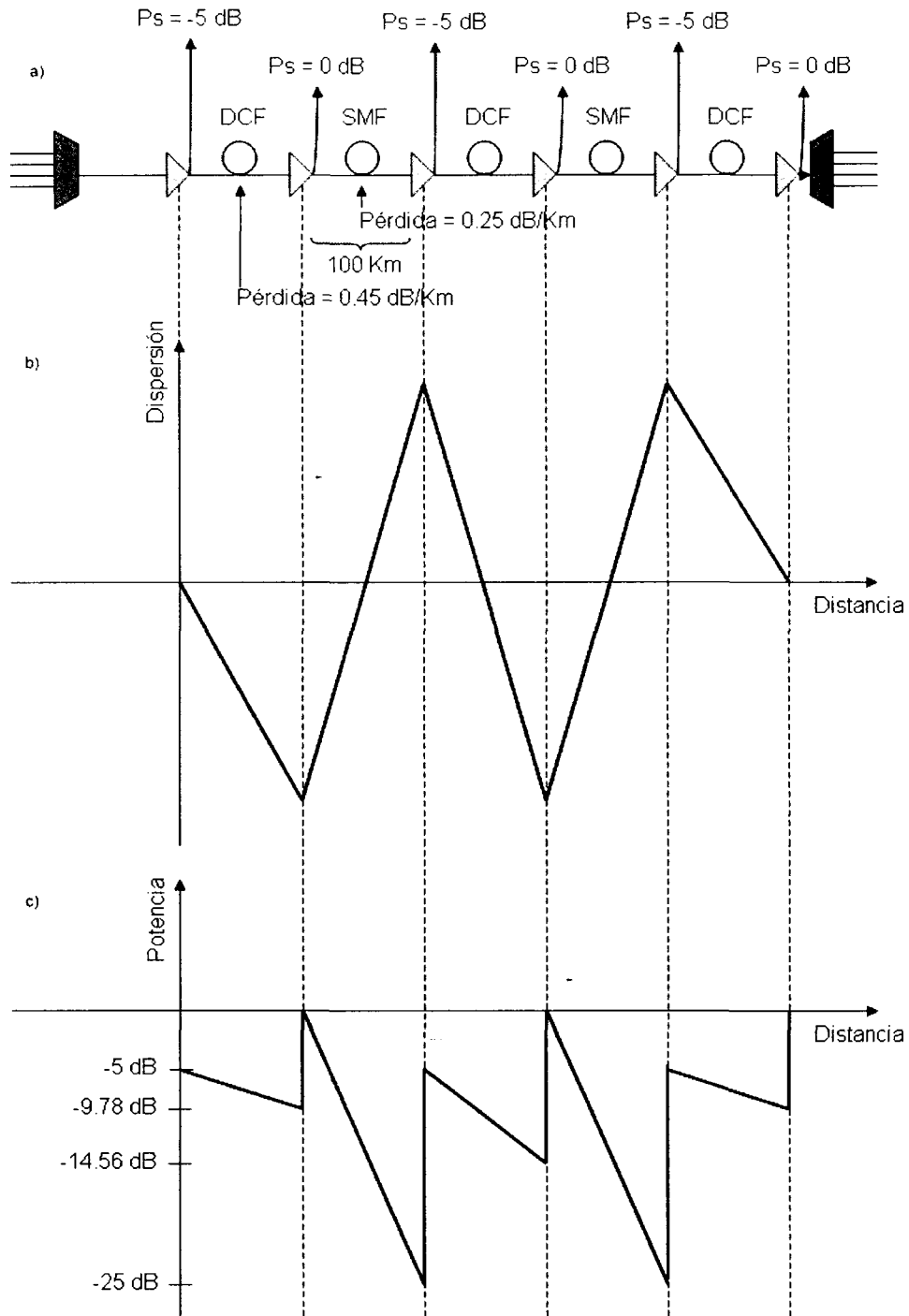


Figura 3.2 Red de transmisión óptica con pérdida.

Para determinar la pérdida de la potencia en la figura 3.2c, se hacen los cálculos que se muestran a continuación. La distancia l se define con la ecuación 3.7 (Comunicación verbal).

$$100km \cdot D_{SMF} = l \cdot D_{DCF} \quad (3.7)$$

Despejando la ecuación 3.7 y sustituyendo los valores de D_{SMF} y D_{DCF} , se tiene que (Comunicación verbal):

$$l = \frac{D_{SMF}}{D_{DCF}} \cdot 100km = \frac{17 ps / nm - km}{-80 ps / nm - km} \cdot 100km = -21.25km \quad (3.8)$$

Conociendo el valor de la l , se puede determinar la pérdida mediante el siguiente cálculo (Comunicación verbal):

$$Pérdida = -21.25km \cdot 0.45 \frac{dB}{km} = -9.56dB \quad (3.9)$$

Con esto podemos ver que la pérdida resulta ser de (-9.56dB)+(-5dB) dando un total de -14.56dB (Comunicación verbal).

Para determinar la pérdida en la otra parte del enlace, la $l = -10.62km$ (la mitad de -21.25km) y realizando el siguiente cálculo se tiene que (Comunicación verbal):

$$Pérdida = -10.62km \cdot 0.45 \frac{dB}{km} = -4.78dB \quad (3.10)$$

Con esto podemos ver que la pérdida para la otra parte del enlace resulta ser de (-4.78dB)+(-5dB) dando un total de -9.78dB (Comunicación verbal).

3.2.2 Diagrama de flujo de la señal en un enlace

Para que una señal pueda viajar a través de la red necesita contar con un nivel mínimo de OSNR de 11.8 dB, de lo contrario se tiene que regenerar la señal. A continuación se describe cual es el flujo que una señal debe seguir en un enlace. En la figura 3.3 se muestra un enlace sencillo en el cual se tiene un nodo 1 y un nodo 2 (Comunicación verbal).

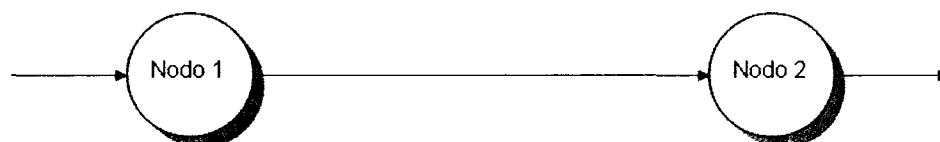


Figura 3.3 Enlace de un nodo 1 y un nodo 2.

La señal debe viajar del nodo 1 al nodo 2, pero esta señal puede sufrir atenuación y llegar tan débil a su destino que no se pueda interpretar, e inclusive puede hasta perderse. Para poder manejar esta situación, se consideró para esta investigación el diagrama de flujo de la señal que se ilustra en la figura 3.4 (Comunicación verbal).

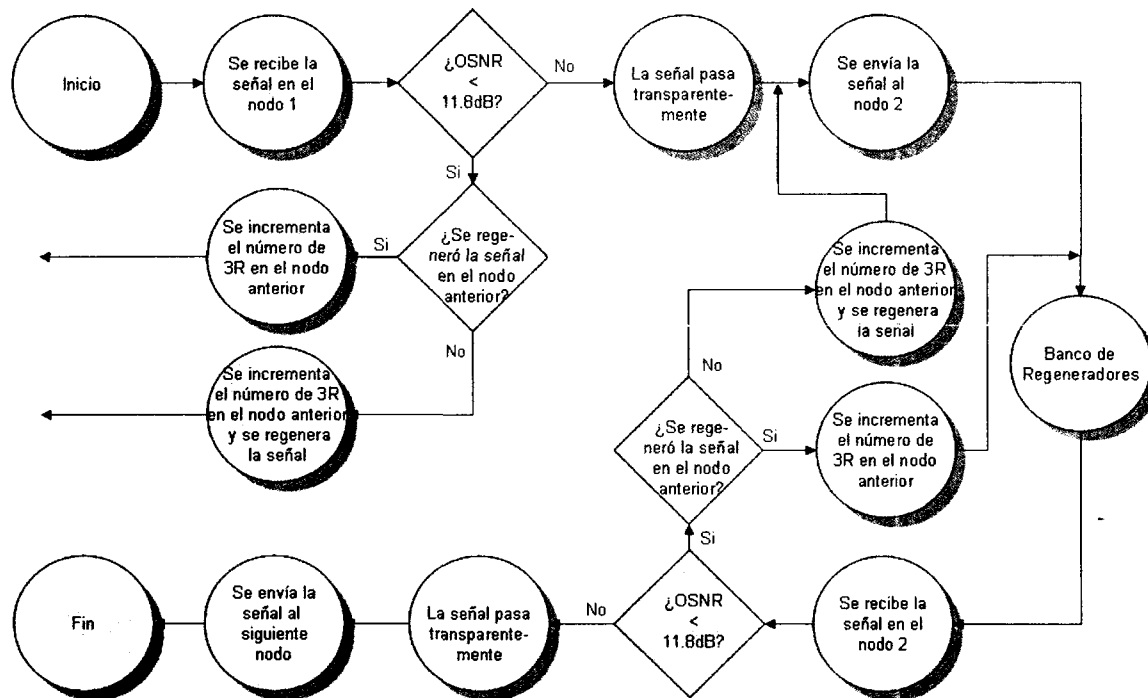


Figura 3.4 Diagrama de flujo de una señal.

Como se puede ver en este diagrama, si llega al nodo una señal con un OSNR menor al mínimo permitido, se tiene que regenerar dicha señal para poder procesarla y enviarla al siguiente nodo (Comunicación verbal).

Si la señal es enviada por el nodo 1, pero esta se atenúa de tal forma que el nodo 2 no la recibe, entonces el nodo 2 solicita al nodo 1 que se le envíe nuevamente la señal. Si el nodo 2 solicita continuamente al nodo 1 que le envíe la señal porque esta no llega, se tiene que considerar la opción de colocar un regenerador en el enlace, esta situación se muestra en la figura 3.5 (Comunicación verbal).



Figura 3.5 Enlace con un nodo 1, un nodo 2 y un regenerador.

3.2.3 Arquitecturas de OXC

La arquitectura de OXC propuesta para el análisis de estos artículos se ilustra en la figura 3.6 (Castañón, 2004).

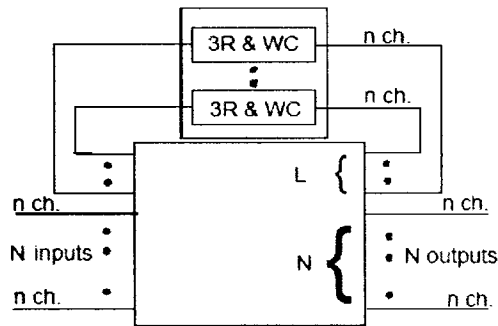


Figura 3.6 OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda.

En esta arquitectura, las longitudes de onda que requieren regeneración son enviadas a los regeneradores, en los cuales se realiza una regeneración tipo 3R y la conversión de la longitud de onda (WC – *Wavelength Conversion*). También es posible utilizar 2R y WC, o solamente utilizar WC ópticos, los cuales han demostrado que mejoran la calidad de la señal. Si se requiere, los regeneradores y WC pueden efectuar el demultiplexado de los n canales después de la regeneración y conversión de longitud de onda, y después de esto se acopla la longitud de onda (Castañón, 2004).

Las longitudes de onda que no requieran regeneración pasaran transparentemente siendo conmutadas por el OXC. Las arquitecturas de OXC utilizadas se ilustran en la figura 3.7. La figura 3.7a representa a una arquitectura conocida como *broadcast-and-select* (B&S) y presenta un OSNR de 36.68 dB, y la figura 3.7b muestra una arquitectura con conmutación demultiplexada y multiplexado (DSM) con un OSNR de 25.5 dB (Castañón, 2004).

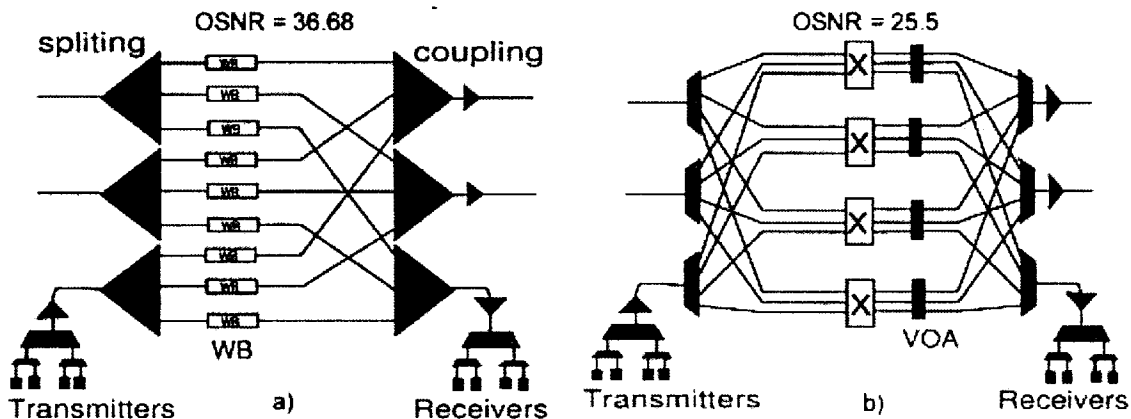


Figura 3.7 Arquitecturas de OXC.

Como se puede apreciar en estas arquitecturas, no se muestran los regeneradores ni los bloqueadores de longitud de onda, sin embargo se asume que se tienen las suficientes entradas y salidas al OXC para realizar la regeneración y la conversión (Castañón, 2004).

En la arquitectura de la figura 3.7a los divisores efectúan la difusión de la señal WDM, y posteriormente los bloqueadores de onda (WB) solamente permiten el paso de las longitudes deseadas. La combinación de la longitud de onda se realiza en la salida de la arquitectura (Castañón, 2004).

En la entrada del OXC la difusión de la señal WDM es realizada por la arquitectura de amplificadores distribuidos ilustrada en la figura 3.8a, y el proceso de combinación se hace a través de la arquitectura mostrada en la figura 3.8b (Castañón, 2004).

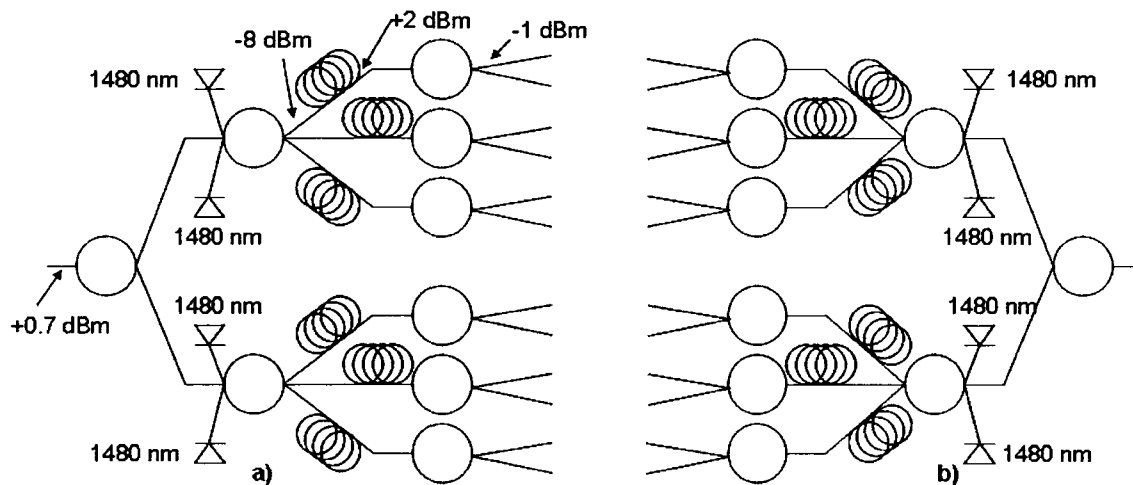


Figura 3.8 Arquitectura de amplificadores.

Se asume que los bloqueadores de longitud de onda pueden dejar pasar o pueden bloquear arbitrariamente cualquier combinación de longitudes de onda. Esta arquitectura no requiere de una matriz de conmutación extendida, y es capaz de realizar *multicast* a los canales hacia diferentes salidas. La señal es dividida por acopladores de bajo costo, así como se muestra en la figura 3.8a, estos acopladores producen una pérdida de 3 dB y 5 dB, y tienen 2 y 3 salidas respectivamente. Los EDFAs son los encargados de compensar esta pérdida (Castañón, 2004).

Por otra parte, se transmite o recibe tráfico local utilizando fibras de entrada y salida dedicadas respectivamente. También se asume que los bloqueadores de longitud de onda cuentan con la función adicional de controlar la potencia de la señal de cada longitud de onda (Castañón, 2004).

En la figura 3.7b se muestra la segunda arquitectura de OXC que se utiliza en el análisis, esta arquitectura realiza una conmutación demultiplexada y multiplexada (DSM). La función de los demultiplexores (DEMUX) en cada una de las N entradas es separar la señal WDM en longitudes de onda. La conmutación espaciada consiste en puertas ópticas que controlan el flujo de las rutas hacia las salidas señaladas. Las longitudes de onda son multiplexadas en la salida y un atenuador óptico variable (VOA) es utilizado para ecualizar la potencia de la señal por canal antes del multiplexor (Castañón, 2004).

Para evaluar el funcionamiento del OSNR de una red es necesario conocer los posibles eventos de la señal, estos tres posibles eventos se ilustran en la figura 3.9. En un OXC una señal puede pasar a través de un nodo, se puede recibir una señal, y por último se puede transmitir una señal. Desde el momento en que una señal pasa por diferentes componentes con diferentes pérdidas, es de esperarse que el OSNR también sea diferente (Castañón, 2004).

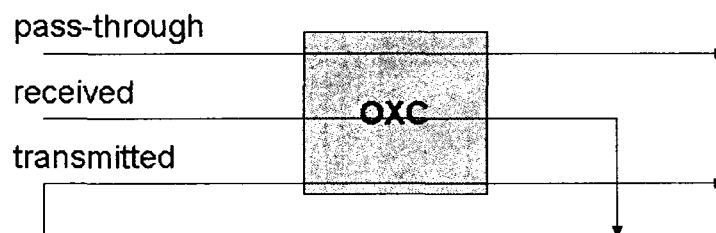


Figura 3.9 Eventos de las señales en un OXC.

3.2.4 Parámetros de evaluación de la red

El OSNR que se produce al pasar a través de las arquitecturas de OXC analizadas se muestra en la figura 3.7, para la arquitectura B&S es de 36.68 dB y para la arquitectura DSM es de 25.5 dB. Esta medición es desde un punto anterior al DEMUX hasta un punto posterior al amplificador en una de sus salidas. Para calcular el OSNR se utilizan los parámetros que se muestran en la tabla 3.1.

| Parámetro | Valor |
|---|---------|
| Razón de Bit (Gbps) | 10.7 |
| Longitud de onda de la señal (nm) | Banda C |
| Espacio entre canales (GHz) | 50 |
| Potencia de transmisión lanzada/ch (dBm) | 0.7 |
| Cociente de extinción del transmisor (dB) | 12 |
| Chirp | -1 |
| Span launched power/ch (dBm) | 0.7 |
| Potencia lanzada en el DCF (dBm) | -5.2 |

| | |
|--|----------------------|
| Potencia lanzada en el OXC (dBm) | 0.7 |
| Pérdida en la fibra (dB/km) | 2.5 |
| Figura de ruido NF de los EDFA (dB) | 4 |
| Ancho de banda electrónica del receptor | 7.5 |
| DMUX/MUX (3 dB) Ancho de banda (GHz) | 40 |
| Forma del filtro del receptor | 2do. Orden Gaussiano |
| DMUX pérdida de entrada (dB) | 8.8 |
| MUX pérdida de entrada (dB) | 9 |
| Pérdida de entrada de la matriz de switch (dB) | 6 |
| Pérdida del conector (dB) | 0.3 |
| Pérdida de empalmes (dB) | 0.1 |
| Pérdida de Bloqueadores de onda (dB) | 6 |
| Ganancia FEC (dB) | 6 |
| OSNR tx $10 \log(h\nu\Delta f)$ | 57.94 |
| Ganancia Raman (dB) | 7 |

Tabla 3.1 Parámetros de evaluación de la red.

Se asume que la potencia de entrada a un OXC es de 0.7 dBm. El OSNR inicial que resulta de transmitir la señal se determina con la ecuación 3.11, en donde NF es la figura de ruido total de los EDFAs (Castañón, 2004).

$$10 * \log(h\nu\Delta f) = 57.9dB \quad (3.11)$$

Como se pudo observar en la figura 3.7, el OSNR de la arquitectura B&S es mejor que el OSNR presentado por la arquitectura DSM. Esto se debe a que en el caso de B&S la contribución de ruido que genera el filtro ASE del EDFA es bajo, ya que el nivel de la potencia de una señal WDM se mantiene alta por los amplificadores distribuidos EDFA ilustrados en la figura 3.8. En el caso de la arquitectura DSM la pérdida se acumula y el OSNR se incrementa, el uso de amplificadores en esta arquitectura no es rentable ya que se tiene que utilizar un amplificador por longitud de onda, el cual no es el caso de la arquitectura B&S (Castañón, 2004).

3.3 Evaluación de las topologías

Las redes *backbone* evaluadas con las arquitecturas de OXC son: Estados Unidos con 40 nodos, Europa con 19 nodos, y Japón con 40 nodos. Estas redes se ilustran de la figura 3.10 a la 3.12.

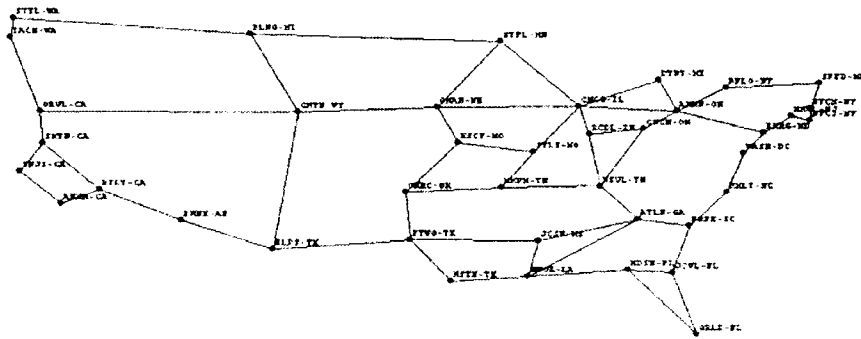


Figura 3.10 Topología en EUA.

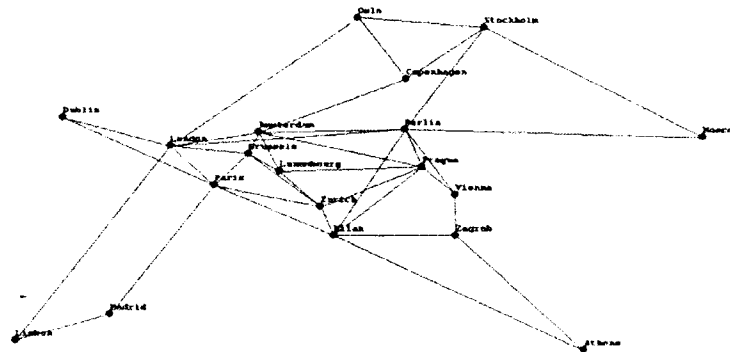


Figura 3.11 Topología en Europa.

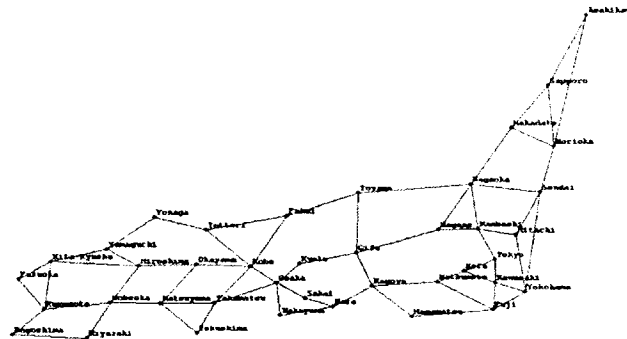


Figura 3.12 Topología en Japón.

Se asume que el formato de modulación es el NRZ y la transmisión se extiende con una distancia máxima de 100 km. También se considera que se tiene un tráfico bidireccional uniforme de 10 canales (OC192) por cada par de nodos fuente-destino, y que se cuenta con protección 1+1 en donde las rutas, de trabajo y protección, son vértices y bordes de desunión (Castañón, 2004).

La compensación de la dispersión cromática es muy importante dentro de las redes transparentes, ya que las rutas de luz atraviesan los OXC y cada una

de estas tiene diferente historia de compensación de dispersión, y la dispersión acumulada depende de la frecuencia. También es posible que una señal pase a través de una mezcla de diferentes tipos de fibras en una red, lo cual complica más la compensación de la dispersión. Para esto se asume que el canal central de la banda de transmisión se compensa totalmente en cada nodo, y la dispersión acumulada del canal es compensada por longitud de onda antes de ser recibida (Castañón, 2004).

Se puede recurrir a tecnología para la compensación de dispersión variable mediante el uso de *fiber bragg gratings* antes del receptor, como se muestra en la figura 3.13, o también se puede utilizar fibra de compensación de dispersión para circuitos de red estáticos. La compensación de la dispersión por longitud de onda es necesaria en el módulo de regeneración de la figura 3.6 (Castañón, 2004).

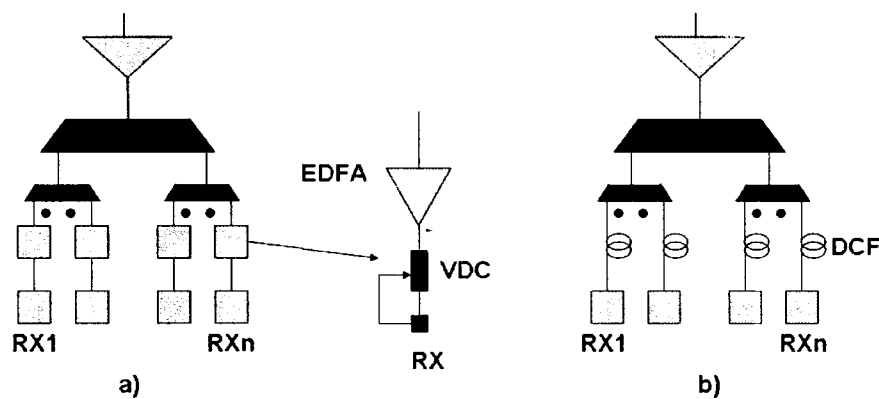


Figura 3.13 Compensación de dispersión.

En la figura 3.13a se ilustra la compensación de dispersión variable para redes dinámicas, y en la figura 3.13b se muestra la compensación de dispersión fija para redes estáticas (Castañón, 2004).

3.4 Resultados de las tres topologías y las dos arquitecturas de OXC

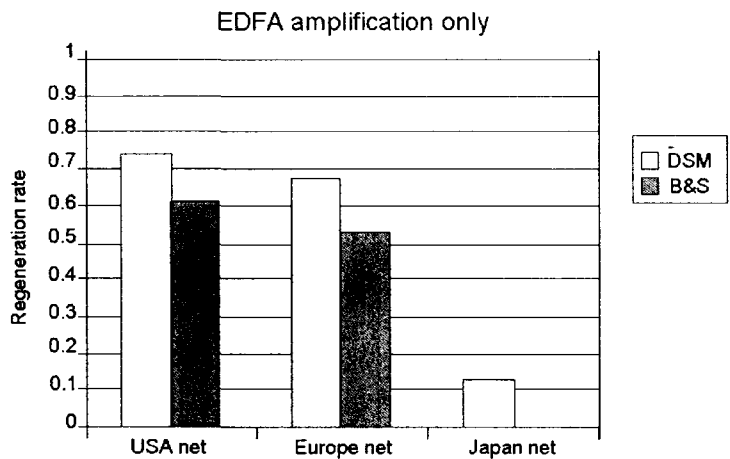
El grado de transparencia utilizada en este análisis es la razón de regeneración que se requiere por nodo. La razón de regeneración por nodo esta definida como el número de regeneradores divididos entre el número de arribos de longitudes de onda. Si la razón de regeneración es igual a 1 significa que todas las longitudes de onda entrantes al nodo necesitan regeneración, si esta razón es igual 0.01 significa que solamente el 10% de las longitudes de onda necesitan regeneración (Castañón, 2004).

Se requiere calcular el número de regeneradores necesarios por nodo, este cálculo se basa en el límite Q de 11.8 dB ($20 \log_{10}(7.8) - \text{FEC gain}$). Para la

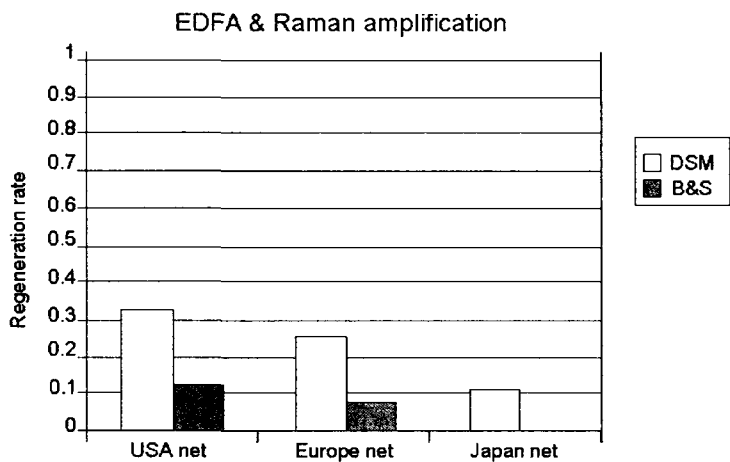
obtención del resultado de este análisis se asume que el margen de Q es de 3.8 dB, en donde se incluye el funcionamiento incorrecto del transmisor/receptor, adicionalmente se tiene una degradación de Q debido al ruido del ASE (Castañón, 2004).

También se asume el impacto de los efectos no lineales de 0.001 dB/km y la ganancia del amplificador Raman de 7 dB. El ruido producido por estos amplificadores no es considerado (Castañón, 2004).

En las gráficas 3.14 y 3.15 se ilustran los resultados de la razón de regeneración promedio necesaria de los nodos para las tres topologías. La gráfica 3.14 muestra el resultado tomando solamente la amplificación EDFA para las tres topologías y para las dos arquitecturas de OXC. En la gráfica 3.15 se muestra el resultado tomando en cuenta la amplificación Raman y EDFA (Castañón, 2004).



Gráfica 3.14 Razón de regeneración en las tres topologías con amplificadores EDFA.



Gráfica 3.15 Razón de regeneración en las tres topologías con amplificadores Raman.

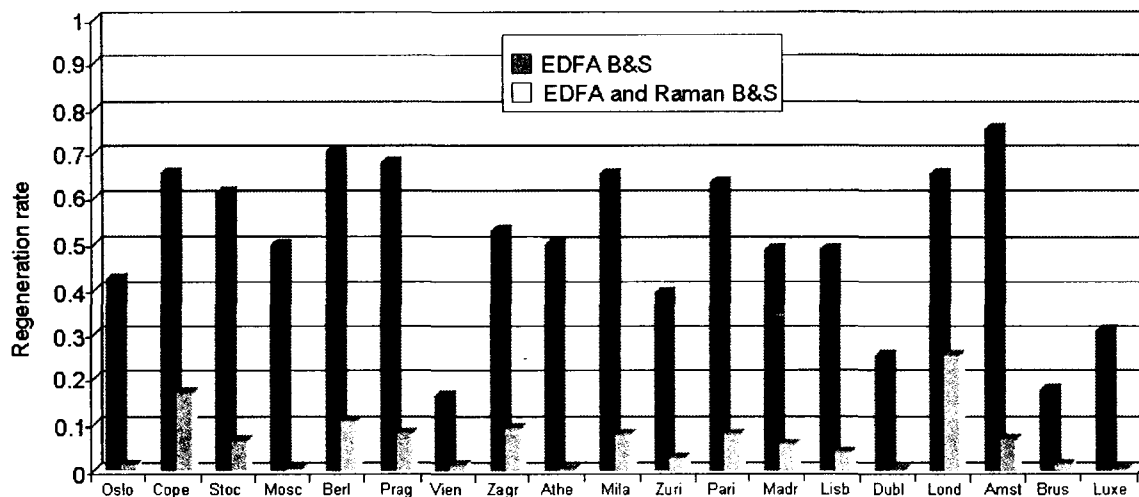
Considerando la amplificación Raman y un promedio de seis OXC con un OSNR de 36.6 dB, se tiene una distancia de transmisión de 3200 km. Se observa que la arquitectura B&S tiene un mejor desempeño que la arquitectura DSM, esto es porque B&S tiene mejor OSNR con respecto a DSM (Castañón, 2004).

En la tabla 3.2 se muestra la distancia promedio (D), la desviación estándar de la distancia de la trayectoria (σ), y el número promedio de saltos (H) para las tres topologías. Se puede ver que la razón de regeneración de la red Japonesa utilizando B&S es básicamente cero, esto es porque el OSNR de la arquitectura B&S es bajo, y porque la desviación estándar de la distancia de la trayectoria también es baja (Castañón, 2004).

| | D | σ | H |
|--------|------------|-----------|------|
| USA | 5679.52 km | 1471.9 km | 5.9 |
| Europa | 427.97 km | 191.63 km | 2.86 |
| Japón | 497.97 km | 167.21 km | 5.65 |

Tabla 3.2 Distancia promedio de trayectoria (D), desviación estándar de la distancia de la trayectoria (σ) y número promedio de saltos (H).

En la gráfica 3.16 se ilustran los resultados de la topología Europea cuando se utiliza Raman y cuando no se utiliza en la red. El beneficio de utilizar amplificación Raman es alrededor de un 46% con respecto a la razón de regeneración. Nótese que en la gráfica 3.16 se da información de la razón de regeneración por locación (Castañón, 2004).



Gráfica 3.16 Razón de regeneración de la topología Europea cuando se utiliza EDFA y cuando se utiliza Raman y EDFA.

3.5 Comentarios sobre las tres topologías y las dos arquitecturas de OXC

El límite de cascabilidad de la transparencia de los nodos OXC y la distancia de transmisión entre los mismos, son parámetros cruciales en el diseño de una red. En este análisis se presenta la distancia de transmisión límite requerida, la cascabilidad de los nodos OXC, y el número de regeneradores por nodo para una red *backbone* DWDM. Se requieren arquitecturas OXC con baja pérdida en sus componentes y con una rentable amplificación distribuida, esto para facilitar un OSNR alto y reducir la razón de regeneración de las redes semitransparentes (Castañón, 2004).

Una cascabilidad de seis OXC con un promedio total de 3200 km de distancia de transmisión, utilizando amplificación Raman, y con una arquitectura de OXC con un OSNR de 36.7 dB, es capaz de reducir la razón de regeneración de un 73% a 12% para la red de Estados Unidos, y de un 67% a 7% para la red Europea, y de un 13% a 0.0005% para la red Japonesa (Castañón, 2004).

Por último, con la utilización de la amplificación Raman se obtiene un beneficio del 46% con respecto a la razón de regeneración, y el beneficio que representa la arquitectura B&S es alrededor del 13% con respecto a la razón de regeneración comparada con la arquitectura DSM (Castañón, 2004).

3.6 Una nueva arquitectura de OXC basada en PLC

3.6.1 Introducción a la nueva arquitectura y su análisis

Esta nueva arquitectura de cross-conector óptico esta basada en la tecnología *planar lightwave circuit switches* (PLC), y en un banco de bloqueadores de longitud de onda (WB). Con esta arquitectura es posible reducir enormemente el número de bloqueadores de longitud de onda, desde un 33% a un 95%, y también mejora el OSNR de la señal en algunas de las rutas para una red con topología tipo *mesh*. Esta arquitectura es una excelente candidata para todo tipo de redes ópticas, contando también con capacidad de difusión y *multicast* (Castañón, 2005).

El OSNR está directamente relacionado con la razón de error de bit (*Bit Error Rate* BER) del sistema de transmisión, como ya se sabe, entre mayor sea el OSNR menor será el BER. Posteriormente se compararán las arquitecturas B&S y DSM de OXC tomando como base el OSNR, el cual es afectado por las pérdidas internas que el mismo OXC produce a la señal. Si una arquitectura genera pérdida a la señal, y si no existe una forma rentable de compensar dicha pérdida, entonces esta arquitectura tendrá un OSNR bajo en comparación a una

arquitectura que puede compensar la pérdida inmediatamente. Una buena capacidad de compensación de la pérdida de un OXC, es muy importante para las aplicaciones en redes transparentes (Castañón, 2005).

Otra característica importante es la escalabilidad del OXC, y se define en esta investigación como la capacidad para crecer el número de entradas y salidas de la arquitectura. La escalabilidad esta directamente relacionada al grado del nodo, por ejemplo el número de puertos de entrada/salida de la fibra en la arquitectura del OXC. El número de puertos de la fibra esta determinado por la topología de red y la demanda de tráfico. Con la topología de la red es posible calcular el número de enlaces conectados al OXC, y la demanda del tráfico se puede calcular el número real de fibras con tráfico conectadas al OXC. Para poder hacer un diseño de una red OXC, es necesario conocer el número puertos de la fibra asumiendo diferentes escenarios de tráfico (Castañón, 2005).

3.6.2 Descripción de la nueva arquitectura de OXC

En la figura 3.17 se ilustra la arquitectura de OXC propuesta, esta arquitectura utiliza la generación mas nueva de conmutadores (*switches*) y divisores (*splitters*) ópticos basados en circuitos planares ópticos (PLC), las L+N fibras entrantes con señales WDM pueden ser conmutadas a cualquiera de las W salidas conectadas a los bloqueadores de longitud de onda (WB). Esta nueva generación de conmutadores ópticos basados en PLC, es capaz de conmutar y hacer *multicast* a una señal de entrada y enviarla a cualquier combinación de puertos de salida, en cualquier cociente requerido entre la potencia de salida (Castañón, 2005).

Tomando en cuenta esta capacidad y el banco de bloqueadores de longitud de onda que se puede utilizar para no tener un WB dedicado por entrada y por salida (NxN), así como se presenta en la arquitectura de B&S de la figura 3.7a. Con la utilización de un banco de WB se logra una reducción desde un 33% hasta un 95% en el número de WB necesarios en la arquitectura de OXC, esto a expensas del costo generado por el uso de la tecnología PLC. El banco de bloqueadores de longitud de onda hace uso de la ganancia de la multiplexación de los requerimientos internos ópticos de conmutación del OXC (Castañón, 2005).

Por otro lado, se observa que el tráfico interno de un nodo en una topología *mesh*, como las de EUA, Japón y Europa, y que se muestran en la figura 3.10 a la 3.12, es un tráfico asimétrico. Este tráfico asimétrico provoca que el número de bloqueadores de longitud de onda necesarios por entrada sea variable, esto quiere decir que el tener WB NxN no es realmente necesario como lo es en el caso de la arquitectura B&S (Castañón, 2005).

Existe una gran variedad de bloqueadores de longitud de onda, para esta investigación se asume que estos WB son capaces de bloquear un canal sencillo, y así poder conmutar cualquier combinación de longitudes de onda. El bloque de combinación también es un conmutador basado en tecnología PLC, el cual es capaz de conmutar y combinar cualquier combinación de entradas a cualquier salida (Castañón, 2005).

Con esta nueva arquitectura de OXC es posible conmutar y hacer *multicasting* a cualquier combinación de longitudes de onda a cualquier salida, y esta arquitectura también permite *traffic grooming*, el cual se sabe que reduce el número de puertos en un OXC (Castañón, 2005).

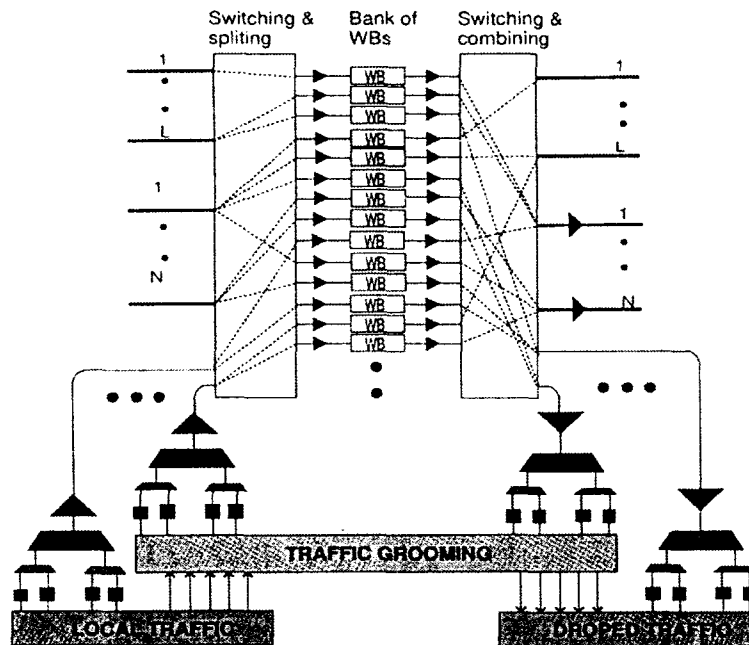


Figura 3.17 Nueva arquitectura de OXC con un banco de bloqueadores de longitud de onda.

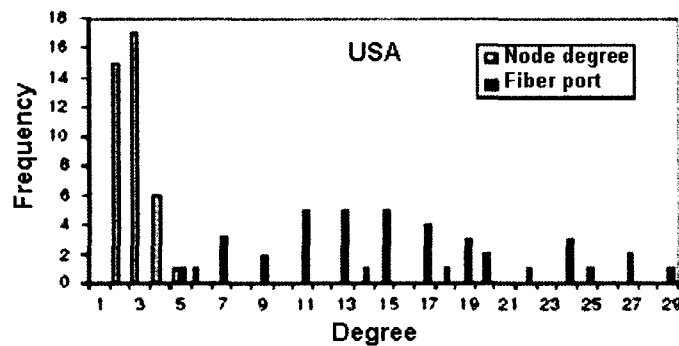
3.6.3 Número de puertos y requerimientos de escalabilidad

Se espera que los futuros OXC tengan la capacidad de escalar el número de puertos de entrada/salida de acuerdo a la demanda de tráfico. Para las tres topologías ilustradas anteriormente, se cuantificarán los siguientes aspectos importantes: 1) número de enlaces de salida/entrada de la topología asumiendo que no hay tráfico; 2) número de puertos de la fibra asumiendo tráfico; y 3) razón promedio de bloqueadores de longitud de onda activos, la cual está definida como el número de WB activos dividido por el número de tiempos de entrada número de salidas ($N \times N$) del OXC (Castañón, 2005).

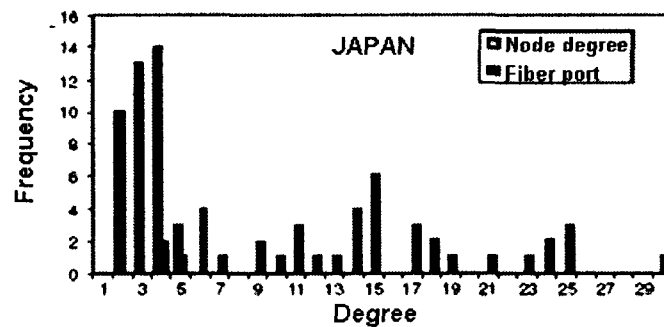
Como se mencionó anteriormente la topología de Estados Unidos tiene 40 nodos, la topología japonesa cuenta con 40 nodos, y la topología europea tiene 19 nodos.

De la gráfica 3.18 a la 3.20 se muestra el grado del enlace del nodo y el grado del puerto de la fibra para las tres topologías que se están analizando. Para la obtención del resultado del grado del puerto de la fibra, se utilizó tráfico bidireccional uniforme de 2 canales (OC-192) para cada uno de los pares de nodos fuente-destino. También se debe considerar la protección 1+1 en donde las rutas (trabajo y protección) están enlazadas y los nodos están desunidos (Castañón, 2005).

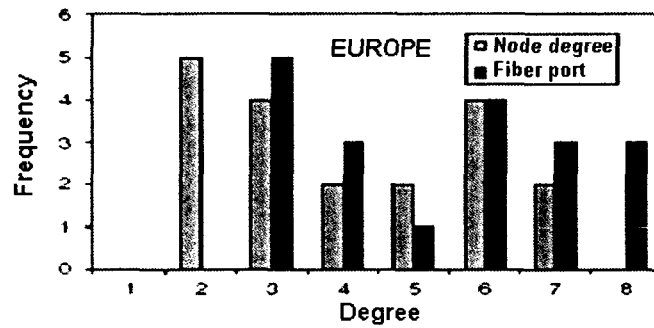
Como se puede apreciar en la gráfica 3.18 el grado del nodo máximo para la topología de Estados Unidos es 6; en la gráfica 3.19 se observa que el grado del nodo máximo para la topología japonesa es 5; y en la gráfica 3.20 se tiene que el grado del nodo máximo para la topología europea es 7. También se puede apreciar en estas gráficas que el grado del puerto de la fibra se incrementa considerablemente después de añadir tráfico a la red, esto se debe principalmente a que se está considerando protección 1+1 con rutas desunidas en la red. Para la red de Japón se tiene que el máximo grado del puerto en la red es de 30, para USA es 29, y para la red europea es de 8 (Castañón, 2005).



Gráfica 3.18 Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en EUA.



Gráfica 3.19 Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en Japón.



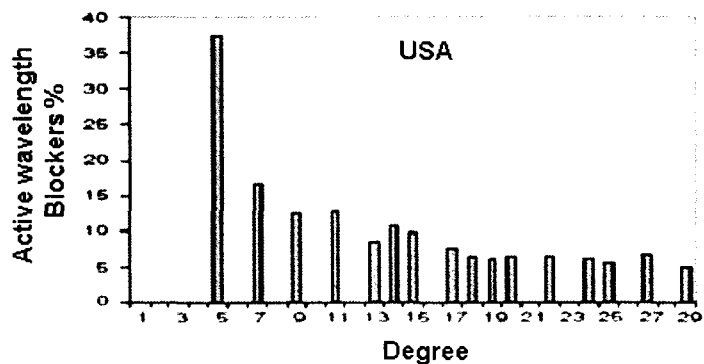
Gráfica 3.20 Grado del nodo y grado de la fibra del nodo para la topología en Europa.

Para este análisis se utiliza tráfico uniforme debido a que este tipo de tráfico provee un límite superior a la razón de WB activos, el cual es un parámetro de mérito que demuestra que el tráfico de una red tipo *mesh* es asimétrico, y justifica el uso del banco de bloqueadores de longitud de onda de la nueva arquitectura de OXC propuesta en la figura 3.17 (Castañón, 2005).

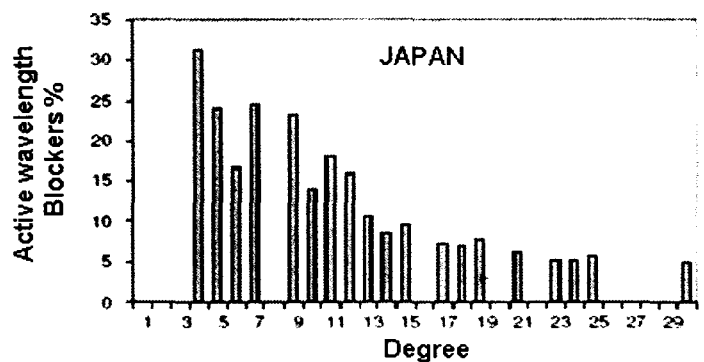
En las gráficas 3.21, 3.22, y 3.23 se ilustra la razón promedio de WB activos para el diferente número de puertos de la fibra mostrados en las gráficas de la 3.18 a la 3.20. En gráfica 3.21 se puede observar que para el caso de la red de Estados Unidos y tomando en cuenta un grado de puerto de 5 solamente se tiene que el 37% de los 25 ($N \times N$) WB están activos, esto significa que el 63% de los WB no son requeridos en el cross-conector óptico. Si se considera un alto grado de puerto de la fibra, como por ejemplo 17, se tiene un porcentaje promedio de WB activos de alrededor de un 6%. Un patrón similar aparece en la red japonesa en donde el porcentaje máximo de WB activos es 32% y el mínimo es de 5%, este resultado indica un gran ahorro en el número de WB (Castañón, 2005).

El ahorro en el número de WB en redes relativamente grandes, como lo son la de Estados Unidos y Japón, van desde un 63% a un 95% en comparación con la arquitectura B&S (Castañón, 2005).

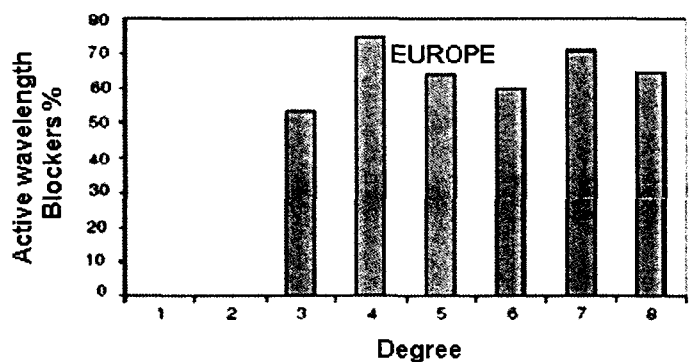
Los resultados que se obtuvieron en la red europea son mas conservadores, ya que el porcentaje mínimo de WB activos es de 52% y el máximo es de 73%, de cualquier forma, el grado máximo del puerto de la fibra es solamente 8. La razón por la cual el porcentaje del puerto de la fibra no es tan bajo como en las otras dos topologías, es porque la topología europea tiene 19 nodos, y representa un número mas bajo en comparación a los 40 nodos de Estados Unidos y Japón (Castañón, 2005).



Gráfica 3.21 Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en EUA.



Gráfica 3.22 Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en Japón.



Gráfica 3.23 Porcentaje promedio de WB activos para diferentes grados de puertos para la topología en Europa.

3.7 Desempeño del OSNR en las arquitecturas de OXC

Para poder evaluar el desempeño del OSNR de un OXC, es necesario conocer las posibles rutas que una señal puede tomar en un cross-conector óptico. Como ya se mencionó anteriormente y se ilustró en la figura 3.9, existen

tres posibles eventos: una señal puede pasar a través de un nodo, se puede recibir una señal, y por último se puede transmitir una señal (Castañón, 2005).

Para calcular el OSNR de la opción en la que una señal pasa a través del nodo, se utiliza la ecuación 3.12 y se muestra a continuación (Castañón, 2005):

$$OSNR_{dB} = P_{dB}^S - L_{dB}^{loss} - NF_{dB} + 57.938_{dB} \quad (3.12)$$

En donde la P^S es la potencia inicial de la señal, y L^{loss} es la pérdida neta antes de un amplificador EDFA, y se asume que la ganancia del amplificador es suficientemente grande para compensar la pérdida. Por otro lado, NF representa la figura de ruido del EDFA, y el valor $57.938 \text{ dB} = -10 * \log\left(\frac{h\nu\Delta f}{1e^{-3}}\right)$ se debe al OSNR inicial de la señal transmitida (Castañón, 2005).

Para calcular el OSNR después de los amplificadores A se utiliza la ecuación 3.13, la cual se muestra a continuación (Castañón, 2005):

$$OSNR_A = \left(\frac{1}{OSNR_{A-1}} + \frac{1}{10 \frac{OSNR_{dB}}{10}} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

Para poder calcular el OSNR se utilizan los parámetros que se presentan en la tabla 3.3, y se asume que en la entrada del OXC se tiene una potencia de 0.7 dBm (Castañón, 2005).

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Razón de Bit (Gbps) | 10.7 |
| Espacio entre canales (GHz) | 50 |
| Potencia lanzada en el OXC (dBm) | 0.7 |
| Figura de ruido NF de los EDFA (dB) | 6 |
| DMUX pérdida de entrada (dB) | 8.8 |
| MUX pérdida de entrada (dB) | 9 |
| Matriz de switch (MEMS) pérdida de entrada (dB) | 6 |
| Pérdida del conector (dB) | 0.3 |
| Pérdida de empalmes (dB) | 0.1 |
| Pérdida de Bloqueadores de onda (dB) | 6 |
| Pérdida de entrada de los PLC switch (dB) | 4 |
| División de la señal del PLC (dB) | 3 |
| División de la señal del acoplador (dB) | 3 |
| Atenuador óptico variable (dB) | 1.5 |

Tabla 3.3 Parámetros de evaluación de la red para la nueva arquitectura.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del OSNR para las tres diferentes rutas que puede tomar una señal dentro de un cross-conector óptico, para la opción *passing through* se considera el OSNR desde la entrada del OXC hasta la salida del EDFA; la opción de *injecting* considera el OSNR desde el transmisor hasta la salida del EDFA; y la opción de *dropping* considera el OSNR desde la entrada hasta un punto antes del receptor (Castañón, 2005).

| Evento | DSM | B&S | PLC & bank of WBs |
|-----------------|-------|-------|-------------------|
| Passing through | 25.63 | 38.6 | 43.33 a 34.5 |
| Injecting | 25.08 | 32.96 | 33.8 a 31.1 |
| Dropping | 25.03 | 32.66 | 33.45 a 31.19 |

Tabla 3.4 Resultados del OSNR en decibeles para los tres tipos de OXC y para las tres rutas que puede tomar la señal.

En tabla 3.4 también se puede ver que el OSNR de la arquitectura B&S es mejor que el OSNR de la arquitectura DSM, como ya se mencionó anteriormente, esto se debe a que en el caso de B&S la contribución del ruido ASE del EDFA es bajo, ya que el nivel de potencia de la señal WDM se mantiene alta por los amplificadores distribuidos EDFA. En la arquitectura DSM la pérdida acumulada y el OSNR aumenta, como ya se mencionó, en este caso el uso de amplificadores no es rentable, porque se tiene que usar un amplificador por cada longitud de onda, lo cual no es el caso de B&S (Castañón, 2005).

El OSNR de la nueva arquitectura es variable, esto se debe a que depende del número de veces en las que la señal es dividida en el primer conmutador, y en el número de veces en las que la señal es combinada en el segundo conmutador. Para el cálculo del OSNR se toman en cuenta los siguientes dos casos: 1) cuando la señal WDM solamente se conmuta sin hacerle *multicast* ni combinarla; y 2) el peor de los casos cuando a una señal se le tiene que hacer *multicast* a 12 salidas en el primer conmutador PLC, y 12 entradas son combinadas a una salida en el segundo conmutador PLC (Castañón, 2005).

El OSNR resultante para esta nueva arquitectura es de 43.33 dB para el primer caso, y de 34.5 dB para el segundo caso. Se asume que la pérdida de inserción del PLC es de 4 dB cuando la señal es conmutada de una entrada a una salida, pero adicionalmente se tiene una pérdida de 3 dB cuando la señal esta igualmente dividida o combinada (Castañón, 2005).

Para los resultados ilustrados en la tabla 3.4 se esta asumiendo un OXC 12 por 12, el cual es razonablemente grande, aún y cuando resultados anteriores muestran que se pueden tener un OXC con 29 ó 30 entradas y salidas para las redes de Estados Unidos y Japón, sin embargo, el porcentaje de

WB activos es solamente del 5% de 30x30, esto significa que solamente 45 WB se requieren realmente para el OXC (Castañón, 2005).

3.8 Resultados finales

La nueva arquitectura de cross-conector óptico basada en *planar lightwave circuit switches* (PLC) y con un banco de bloqueadores de longitud de onda ha demostrado que puede ahorrar una gran cantidad de WB, desde un 33% a un 95%, y también puede mejorar el OSNR de la señal para diferentes rutas en redes tipo *mesh*. Esto es porque el tráfico interno del nodo es asimétrico en redes con topología *mesh* (Castañón, 2005).

Esta característica asimétrica y la ganancia inherente de la multiplexación de la arquitectura propuesta, pueden ahorrar una gran cantidad de componentes necesarios, y también mejorar el OSNR en comparación con aquellas arquitecturas que tienen conexiones dedicadas a los WB. En el caso de redes grandes, como la de Estados Unidos o Japón las cuales cuentan con 40 nodos, el resultado del uso de esta nueva arquitectura es un ahorro en una gran cantidad de WB (Castañón, 2005).

Por último, esta nueva arquitectura cuenta con la capacidad de *multicast* y difusión, y también presenta un OSNR que va de 43.33 dB a 31.1 dB para cross-conectores ópticos 12 por 12, esto en comparación con otras arquitecturas permite que sea una excelente candidata para todo tipo de redes transparentes (Castañón, 2005).

Capítulo 4. Resultados y Análisis de la Investigación

Con la información recabada en el capítulo 2, sobre precios de componentes y cross-conectores electrónicos, y con lo presentado en el capítulo anterior, en donde se dieron a conocer las arquitecturas de OXC y las topologías que se van a tomar en cuenta para esta investigación, se puede determinar el costo total de una red utilizando las diferentes arquitecturas para las diferentes topologías.

Para calcular el costo total de una red, primeramente se debe calcular el costo de los cross-conectores ópticos para las arquitecturas B&S, DSM y de la nueva arquitectura basa en tecnología PLC, así mismo se debe calcular el costo que representa el cross-conector electrónico; para todos cross-conectores el cálculo del costo es sin regeneración y con regeneración.

Posteriormente, de acuerdo a las topologías que se están analizando, EUA, Japón y Europa, y al costo total de cada cross-conector óptico y el cross-conector electrónico, se puede calcular el costo total de la red para cada una de las tres topologías.

Para la primera parte de este análisis, la cual se refiere al cálculo del costo de los cross-conectores, se asume que: cada entrada contiene 80 canales, el número de entradas para regeneración en los OXC es variable, se pueden llegar a tener hasta 80 regeneradores por entrada de regeneración, el número de regeneradores es variable, el número de bloqueadores de longitud de onda para la arquitectura basada en PLC es de 3WB por entrada y solamente se tiene un amplificador después del WB.

4.1 Consideraciones para el cálculo del costo de los cross-conectores

Para calcular el costo de los tres cross-conectores ópticos y del cross-conector electrónico se tomó en cuenta la lista de precios que se muestran en la tabla 4.1 y 4.2, y que se derivan del capítulo 2.

| Costo de un cross-conector electrónico | |
|---|------------------------|
| Descripción | Costo por canal |
| Term per Channel | \$4,200.00 |

Nota: Precios en dólares.

Tabla 4.1 Precio del cross-conector electrónico.

En la tabla 4.1 se presenta el costo por canal del cross-conector electrónico a analizar, y en la tabla 4.2 se ilustra la lista de componentes con sus respectivos precios que se tomaron en cuenta y que forman parte de un cross-conector óptico.

| Lista de componentes y sus precios | |
|--|---------------|
| Componente | Precio |
| Divisor, 1x2 Splitter, 3 dB loss, pasivo | \$30.00 |
| Divisor, 1x3 Splitter, 3 dB loss, pasivo | \$45.00 |
| Circuito planar de onda luminosa (PLC), Costo por entrada/salida | \$1,000.00 |
| Switch, 1 λ , Costo por entrada | \$1,000.00 |
| Atenuador óptico variable, VOA Unit | \$3,375.00 |
| Convertidor de longitud de onda (WC) | \$25,000.00 |
| Transponder | \$25,000.00 |
| Amplificador, Band Amplifier Unit (C-Band) | \$31,560.00 |
| MUX/DEMUX 88-Channel Unit (C-Band) | \$41,384.00 |
| Regenerador 3R | \$46,000.00 |
| Bloqueador de longitud de onda (WB), WaveBlocker | \$100,000.00 |

Nota: Precios en dólares.

Tabla 4.2 Precios de los componentes de un cross-conector óptico.

Para calcular los costos de los cross-conectores se consideró un número de entrada/salidas de 12x12, que tienen diferente número de regeneradores y 1 entrada para regeneración.

4.2 Costo del OXC con arquitectura B&S

4.2.1 Cálculo del costo del OXC con arquitectura B&S

Para calcular el costo total de un OXC con arquitectura B&S se deben tomar en cuenta los componentes que integran al cross-conector y si realiza regeneración.

El cálculo del costo sin regeneración se presenta en la ecuación 4.1.

$$B \& S - \text{Sin Regeneración} = \text{Divisores}1x2 + \text{Divisores}1x3 + \text{Amplificadores} + WB \quad (4.1)$$

En donde:

$$Divisores1x2 = (Cantidad_{Divisores1x2} \cdot Precio_{Divisores1x2}) \quad (4.2)$$

$$Divisores1x3 = (Cantidad_{Divisores1x3} \cdot Precio_{Divisores1x3}) \quad (4.3)$$

$$Amplificadores = (Cantidad_{Amplificadores} \cdot Precio_{Amplificadores}) \quad (4.4)$$

$$WB = (Cantidad_{WB} \cdot Precio_{WB}) \quad (4.5)$$

El cálculo del costo con regeneración se presenta en la ecuación 4.6, y se debe considerar el número de entradas mas el número de entradas para regeneración para poder considerar la arquitectura de amplificadores correcta, además que se pueden tener hasta 80 regeneradores por entrada para regeneración.

$$B \& S - Con \text{ Regeneración} = Divisores1x2 + Divisores1x3 + Amplificadores + WB + MUX / DEMUX + Re \text{ generadores} + WC \quad (4.6)$$

En donde:

$$Divisores1x2 = (Cantidad_{Divisores1x2} \cdot Precio_{Divisores1x2}) \quad (4.7)$$

$$Divisores1x3 = (Cantidad_{Divisores1x3} \cdot Precio_{Divisores1x3}) \quad (4.8)$$

$$Amplificadores = (Cantidad_{Amplificadores} \cdot Precio_{Amplificadores}) \quad (4.9)$$

$$WB = (Cantidad_{WB} \cdot Precio_{WB}) \quad (4.10)$$

$$MUX / DEMUX = (Cantidad_{MUX / DEMUX} \cdot Precio_{MUX / DEMUX}) \quad (4.11)$$

$$Re \text{ generadores} = (Cantidad_{Re \text{ generadores}} \cdot Precio_{Re \text{ generadores}}) \quad (4.12)$$

$$WC = (Cantidad_{WC} \cdot Precio_{WC}) \quad (4.13)$$

4.2.2 Costo del OXC con arquitectura B&S sin regeneración

En el anexo 1 se muestra los componentes que integran al OXC, así como la cantidad requerida y su costo por unidad. Con esta información se puede determinar el costo que genera un OXC con arquitectura B&S sin regeneración, y se presenta en la tabla 4.3.

| Costo de un OXC con arquitectura B&S | |
|--------------------------------------|-----------------|
| OXC con arquitectura B&S | Costo total |
| Costo sin Regeneración | \$18,951,840.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.3 Costo de un OXC con arquitectura B&S sin regeneración.

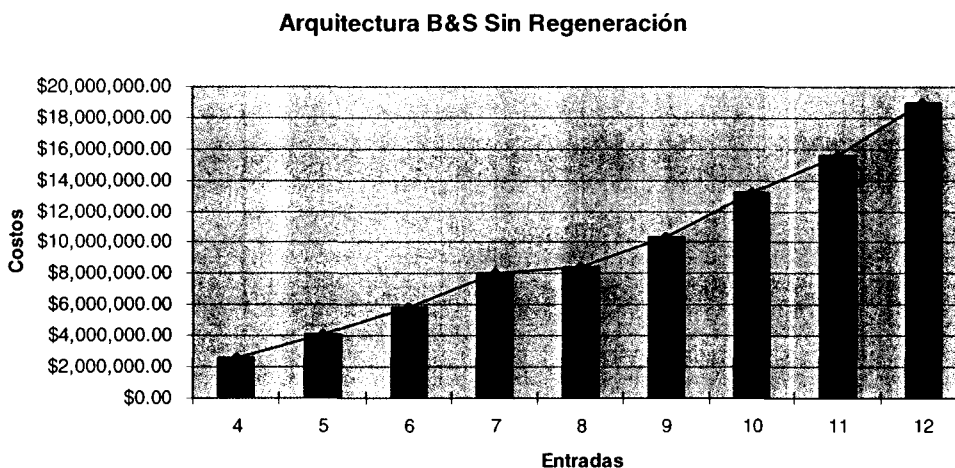
Para esta investigación se calculó el costo del OXC con arquitectura B&S para diferente número de entradas/salidas que van desde 4x4 a 12x12. En la tabla 4.4 se muestran los costos sin regeneración.

| Entradas/Salidas | Costo |
|------------------|-----------------|
| 4 | \$2,610,640.00 |
| 5 | \$4,079,050.00 |
| 6 | \$5,873,760.00 |
| 7 | \$7,994,980.00 |
| 8 | \$8,423,200.00 |
| 9 | \$10,376,370.00 |
| 10 | \$13,161,100.00 |
| 11 | \$15,577,540.00 |
| 12 | \$18,951,840.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.4 Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura B&S.

Con la información presentada en la tabla anterior se obtiene la gráfica de costos contra número de entradas que se presenta a continuación. En la gráfica 4.1 podemos ver que no se sigue un crecimiento de costos lineal, ya que existe una variación cuando se tienen cross-conectores 7x7 debido a que la arquitectura de amplificadores utilizada requiere un mayor número de amplificadores que las demás arquitecturas.



Gráfica 4.1 Costos contra entradas de la arquitectura B&S sin regeneración.

4.2.3 Costo del OXC con arquitectura B&S con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 0dB

Para poder calcular el costo del OXC con arquitectura B&S con regeneración se debe tomar en cuenta el costo en el que se incurre con la regeneración, el costo que genera el número de entradas al cross-conector para regeneración, y el costo sin regeneración pero tomando en cuenta el número de entradas para regeneración, por ejemplo, si se tiene un cross-conector 4x4 con 1 entrada para regeneración se debe tomar como si se tratara de una arquitectura de amplificadores 5x5.

Para un cross-conector con un OSNR=32dB y una ganancia Raman de 0dB, se tiene que la razón de regeneradores es de 5. Este cálculo se obtuvo considerando la topología de Japón y utilizando la ecuación 4.14.

$$Razón3R = EntradasOX \cdot \left(\frac{\overline{3R}}{Entradas} \right) \quad (4.14)$$

En el anexo 2 se ilustra la cantidad y precio de los componentes necesarios para la regeneración, así como los componentes, cantidad y precio por entrada al cross-conector, y a partir de esto se puede deducir que el costo del OXC con arquitectura B&S con 5 regeneradores es el que se presenta en la tabla 4.5.

| Costo de un OXC con arquitectura B&S | |
|---|------------------------|
| OXC con arquitectura B&S | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$22,269,318.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.5 Costo de un OXC con arquitectura B&S con 5 regeneradores.

En la tabla 4.6 se muestran los costos de un OXC con arquitectura B&S con 1 entrada para regeneración y 5 regeneradores, esto se calcula para diferente número de entradas/salidas.

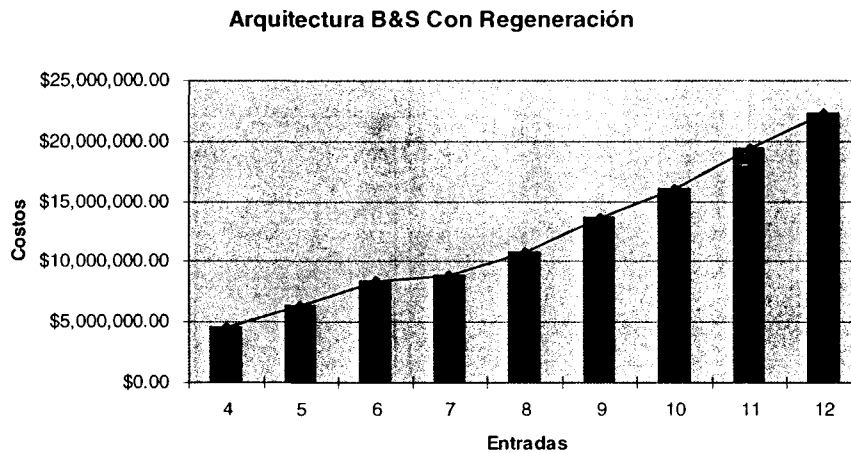
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|-----------------|
| 4 | \$4,516,818.00 |
| 5 | \$6,311,528.00 |
| 6 | \$8,432,748.00 |
| 7 | \$8,860,968.00 |
| 8 | \$10,814,138.00 |
| 9 | \$13,598,868.00 |

| | |
|----|-----------------|
| 10 | \$16,015,308.00 |
| 11 | \$19,389,608.00 |
| 12 | \$22,269,318.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.6 Costos para diferente número de entradas/salidas con 5 regeneradores para un OXC con arquitectura B&S.

Los costos de la tabla 4.6 se pueden ilustrar en la gráfica 4.2, en esta gráfica también se presenta la variación cuando el cross-conector es de 6x6.



Gráfica 4.2 Costos contra entradas de la arquitectura B&S con 5 regeneradores.

4.2.4 Costo del OXC con arquitectura B&S con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB

Se tiene una razón de regeneradores de 2 cuando se tiene un cross-conector con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB. Para este cálculo se tomó en cuenta la topología de Japón y la ecuación 4.14. En el anexo 3 se presenta la cantidad y precio de los componentes necesarios para la regeneración, así como los componentes, cantidad y precio por entrada al cross-conector. Con esta información se puede calcular el costo del OXC con arquitectura B&S con 2 regeneradores, y este se presenta en la tabla 4.7.

| Costo de un OXC con arquitectura B&S | |
|---|------------------------|
| OXC con arquitectura B&S | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$22,056,318.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.7 Costo de un OXC con arquitectura B&S con 2 regeneradores.

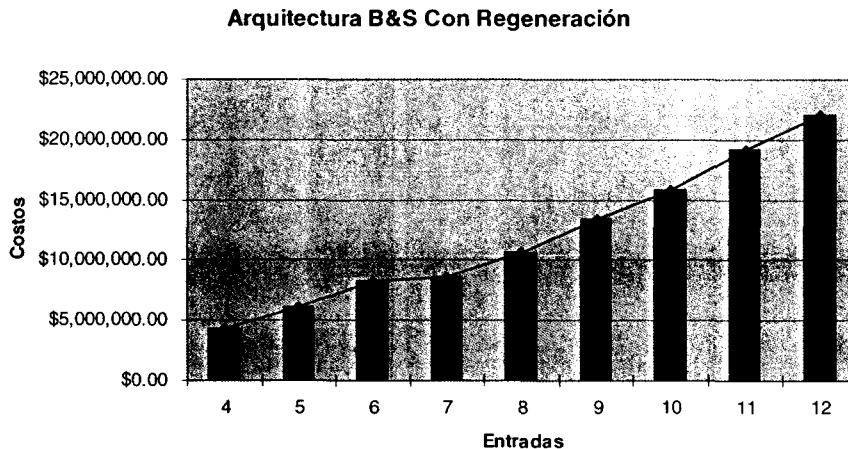
Enseguida se muestra la tabla 4.8 en la cual se ilustran los costos de un OXC con arquitectura B&S con 1 entrada para regeneración y 2 regeneradores.

| Entradas/Salidas | Costo |
|------------------|-----------------|
| 4 | \$4,303,818.00 |
| 5 | \$6,098,528.00 |
| 6 | \$8,219,748.00 |
| 7 | \$8,647,968.00 |
| 8 | \$10,601,138.00 |
| 9 | \$13,385,868.00 |
| 10 | \$15,802,308.00 |
| 11 | \$19,176,608.00 |
| 12 | \$22,056,318.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.8 Costos para diferente número de entradas/salidas con 2 regeneradores para un OXC con arquitectura B&S.

De la tabla 4.8 se puede derivar la gráfica 4.3, en la cual se ilustran los costos del OXC con arquitectura B&S para diferente número de entradas/salidas. En esta gráfica también se puede observar la variación cuando el cross-conector es de 6x6.

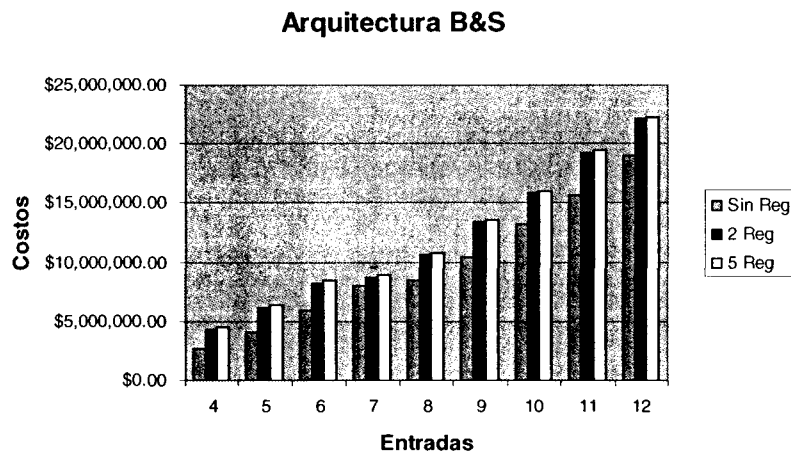


Gráfica 4.3 Costos contra entradas de la arquitectura B&S con 2 regeneradores.

4.2.5 Comparación de costos de un OXC con arquitectura B&S con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas

Tomando en cuenta los costos de las tablas 4.4, 4.6, y 4.8, se puede construir la gráfica 4.4 en donde se puede apreciar la diferencia en costos que

existe en un OXC con arquitectura B&S sin regeneración y con 5 y 2 regeneradores.



Gráfica 4.4 Costos contra entradas de la arquitectura B&S sin regeneración y con regeneración.

4.3 Costo del OXC con arquitectura DSM

4.3.1 Cálculo del costo del OXC con arquitectura DSM

Para calcular el costo total de un OXC con arquitectura DSM se deben tomar en cuenta los componentes que integran al cross-conector y si realiza regeneración.

El cálculo del costo sin regeneración se presenta en la ecuación 4.15.

$$DSM - Sin Regeneración = MUX / DEMUX + Switch + VOA \quad (4.15)$$

En donde:

$$MUX / DEMUX = (Cantidad_{MUX / DEMUX} \cdot Precio_{MUX / DEMUX}) \quad (4.16)$$

$$Switch = (Cantidad_{Switch} \cdot Precio_{Switch}) \quad (4.17)$$

$$VOA = (Cantidad_{VOA} \cdot Precio_{VOA}) \quad (4.18)$$

El cálculo del costo con regeneración se presenta en la ecuación 4.19, y se debe considerar el número de entradas mas el número de entradas para regeneración para poder considerar el Switch con el número de entradas/salidas correcto, además que se pueden tener hasta 80 regeneradores por entrada para regeneración.

$$DSM - \text{Con Regeneración} = MUX / DEMUX + Switch + VOA + MUX / DEMUX_{Reg} + \text{Regeneradores} + WC \quad (4.19)$$

En donde:

$$MUX / DEMUX = (Cantidad_{MUX / DEMUX} \cdot Precio_{MUX / DEMUX}) \quad (4.20)$$

$$Switch = (Cantidad_{Switch} \cdot Precio_{Switch}) \quad (4.21)$$

$$VOA = (Cantidad_{VOA} \cdot Precio_{VOA}) \quad (4.22)$$

$$MUX / DEMUX_{Reg} = (Cantidad_{MUX / DEMUX_{Reg}} \cdot Precio_{MUX / DEMUX_{Reg}}) \quad (4.23)$$

$$\text{Regeneradores} = (Cantidad_{Regeneradores} \cdot Precio_{Regeneradores}) \quad (4.24)$$

$$WC = (Cantidad_{WC} \cdot Precio_{WC}) \quad (4.25)$$

4.3.2 Costo del OXC con arquitectura DSM sin regeneración

Para calcular el costo del OXC con arquitectura DSM sin regeneración se deben considerar los componentes que integran al OXC, así como la cantidad de estos necesarios y su costo por unidad. En el anexo 4 se presenta esta información. Al igual que en la arquitectura B&S también se tiene el supuesto de un cross-conector 12x12 para su cálculo.

Con esta información se determina el costo que genera un OXC con arquitectura DSM sin regeneración, y se muestra en la tabla 4.9.

| Costo de un OXC con arquitectura DSM | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura DSM | Costo total |
| Costo sin Regeneración | \$1,193,091.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.9 Costo de un OXC con arquitectura DSM sin regeneración.

En la tabla 4.10 se presentan los costos para diferente número de entradas/salidas, que van desde 4x4 hasta 12x12, para el OXC con arquitectura DSM sin regeneración.

| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|--------------|
| 4 | \$367,947.00 |
| 5 | \$464,090.00 |
| 6 | \$562,233.00 |
| 7 | \$662,376.00 |

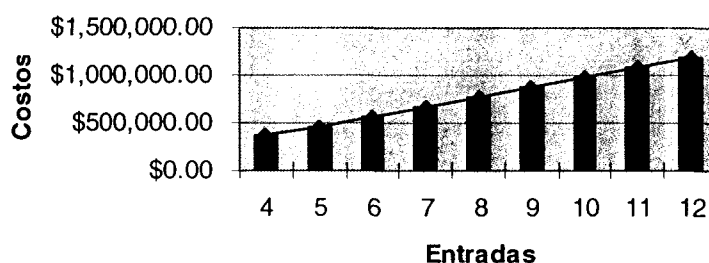
| | |
|----|----------------|
| 8 | \$764,519.00 |
| 9 | \$868,662.00 |
| 10 | \$974,805.00 |
| 11 | \$1,082,948.00 |
| 12 | \$1,193,091.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.10 Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura DSM.

Con la información presentada en la tabla 4.10 se obtiene la gráfica de costos contra número de entradas que se presenta a continuación. En la gráfica 4.5 se muestran los costos de la arquitectura DSM sin regeneración, en la cual podemos ver un crecimiento lineal.

Arquitectura DSM Sin Regeneración



Gráfica 4.5 Costos contra entradas de la arquitectura DSM sin regeneración.

4.3.3 Costo del OXC con arquitectura DSM con regeneración, con un OSNR de 25.5dB y una ganancia Raman de 0dB

Para calcular el costo del OXC con arquitectura DSM con regeneración se debe tomar en cuenta el costo en el que se incurre con la regeneración, el costo del número de entradas al cross-conector para regeneración, y el costo sin regeneración pero tomando en cuenta que el precio total del Switch aumenta debido a que el precio por entrada es de \$1,000 dólares (número de entradas mas el número de entradas para regeneración, esto se multiplica por \$1,000).

Como se mencionó anteriormente, para un cross-conector con un OSNR=25.5dB y una ganancia Raman de 0dB, se tiene que la razón de regeneradores es de 35. En el anexo 5 se presenta la cantidad y precio de los componentes utilizados.

Considerando lo anterior se puede determinar el costo de un OXC con arquitectura DSM con 35 regeneradores. Este costo se presenta en la tabla 4.11.

| Costo de un OXC con arquitectura DSM | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura DSM | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$3,790,234.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.11 Costo de un OXC con arquitectura DSM con 35 regeneradores.

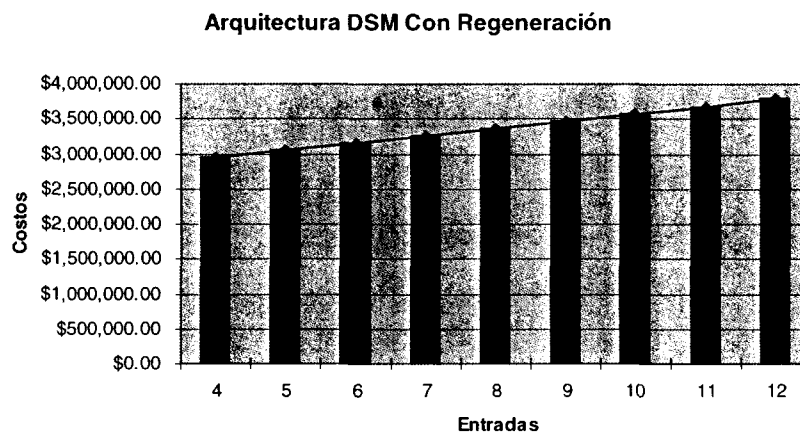
En la tabla 4.12 se ilustran los costos del OXC con arquitectura DSM para diferente número de entradas/salidas con regeneración, una entrada para regeneración y 35 regeneradores.

| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$2,949,090.00 |
| 5 | \$3,047,233.00 |
| 6 | \$3,147,376.00 |
| 7 | \$3,249,519.00 |
| 8 | \$3,353,662.00 |
| 9 | \$3,459,805.00 |
| 10 | \$3,567,948.00 |
| 11 | \$3,678,091.00 |
| 12 | \$3,790,234.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.12 Costos para diferente número de entradas/salidas con 35 regeneradores para un OXC con arquitectura DSM.

De la tabla 4.12 se puede deducir la gráfica 4.6, la cual presenta los costos de la arquitectura DSM con 35 regeneradores. Como se puede observar la gráfica sigue un crecimiento lineal.



Gráfica 4.6 Costos contra entradas de la arquitectura DSM con 35 regeneradores.

4.3.4 Costo del OXC con arquitectura DSM con regeneración, con un OSNR de 25.5dB y una ganancia Raman de 7dB

Como ya se mencionó, para un cross-conector con un OSNR=25.5dB, una ganancia Raman de 7dB y considerando la topología de Japón y la ecuación 4.14, se tiene que la razón de regeneradores es de 30.

En el anexo 6 se muestra la cantidad y precio de los componentes utilizados en un OXC con arquitectura DSM con 30 regeneradores y 12x12. Con la información anterior se determina el costo del cross-conector con arquitectura B&S con 30 regeneradores, y dicho costo se muestra en la tabla 4.13.

| Costo de un OXC con arquitectura DSM | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura DSM | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$3,435,234.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.13 Costo de un OXC con arquitectura DSM con 30 regeneradores.

En la tabla 4.14 se presentan los costos para diferentes entradas/salidas, 1 entrada para regeneración y 30 regeneradores.

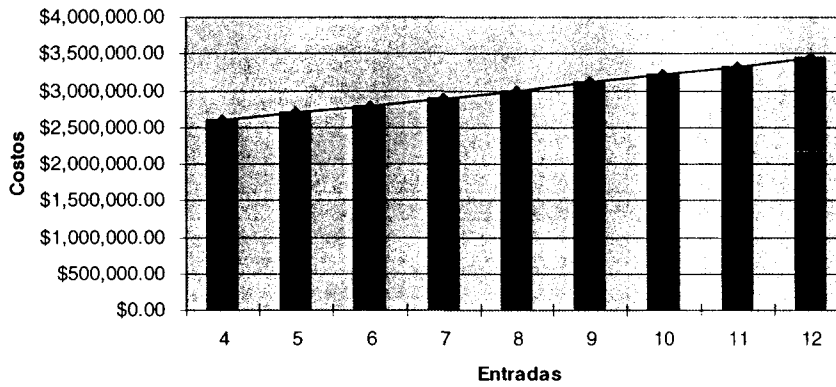
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$2,594,090.00 |
| 5 | \$2,692,233.00 |
| 6 | \$2,792,376.00 |
| 7 | \$2,894,519.00 |
| 8 | \$2,998,662.00 |
| 9 | \$3,104,805.00 |
| 10 | \$3,212,948.00 |
| 11 | \$3,323,091.00 |
| 12 | \$3,435,234.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.14 Costos para diferente número de entradas/salidas con 30 regeneradores para un OXC con arquitectura DSM.

De la tabla 4.14 se obtiene la gráfica 4.7, la cual presenta los costos de la arquitectura DSM con 30 regeneradores. Como se puede observar la gráfica sigue un crecimiento lineal.

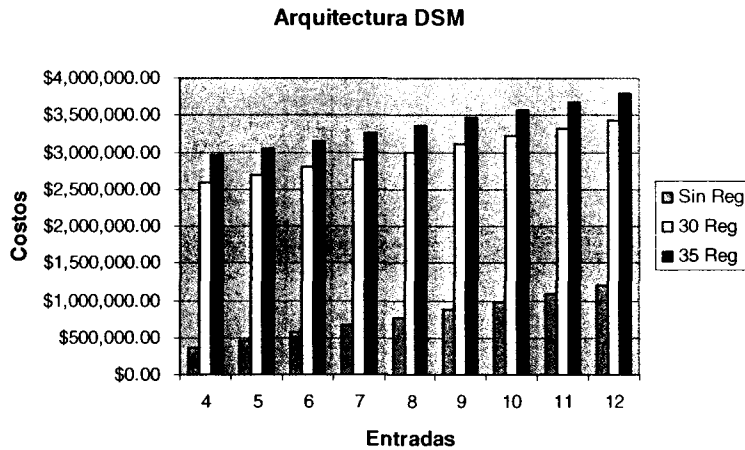
Arquitectura DSM Con Regeneración



Gráfica 4.7 Costos contra entradas de la arquitectura DSM con 30 regeneradores.

4.3.5 Comparación de costos de un OXC con arquitectura DSM con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas

Tomando en cuenta los costos de las tablas 4.10, 4.12, y 4.14, se puede construir la gráfica 4.8 en la cual se puede apreciar la diferencia en costos para OXC con arquitectura DSM sin regeneración y con 35 y 30 regeneradores.



Gráfica 4.8 Costos contra entradas de la arquitectura DSM sin regeneración y con regeneración.

4.4 Costo del OXC con arquitectura basada en PLC

4.4.1 Cálculo del costo del OXC con arquitectura basada en PLC

Para calcular el costo total de un OXC con arquitectura basada en PLC se deben tomar en cuenta los componentes que integran al cross-conector y si realiza regeneración. El cálculo del costo sin regeneración se presenta en la ecuación 4.26.

$$PLC - Sin Re generación = Switch \& Spliting PLC + WB + Amplificadores \quad (4.26)$$

En donde:

$$Switch \& Spliting PLC = (Cantidad_{Switch \& Spliting PLC} \cdot Precio_{Switch \& Spliting PLC}) \quad (4.27)$$

$$WB = (Cantidad_{WB} \cdot Precio_{WB}) \quad (4.28)$$

$$Amplificadores = (Cantidad_{Amplificadores} \cdot Precio_{Amplificadores}) \quad (4.29)$$

El cálculo del costo con regeneración se presenta en la ecuación 4.30, y se debe considerar el número de entradas mas el número de entradas para regeneración para poder considerar el *Switch* con el número de entradas/salidas correcto, además que se pueden tener hasta 80 regeneradores por entrada para regeneración.

$$PLC - Con Re generación = Switch \& Spliting PLC + WB + Amplificadores + \quad (4.30) \\ MUX / DEMUX + Re generadores + WC$$

En donde:

$$Switch \& Spliting PLC = (Cantidad_{Switch \& Spliting PLC} \cdot Precio_{Switch \& Spliting PLC}) \quad (4.31)$$

$$WB = (Cantidad_{WB} \cdot Precio_{WB}) \quad (4.32)$$

$$Amplificadores = (Cantidad_{Amplificadores} \cdot Precio_{Amplificadores}) \quad (4.33)$$

$$MUX / DEMUX = (Cantidad_{MUX / DEMUX} \cdot Precio_{MUX / DEMUX}) \quad (4.34)$$

$$Re generadores = (Cantidad_{Re generadores} \cdot Precio_{Re generadores}) \quad (4.35)$$

$$WC = (Cantidad_{WC} \cdot Precio_{WC}) \quad (4.36)$$

4.4.2 Costo del OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración

Para calcular el costo del OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración se deben considerar los componentes que integran al cross-conector, así como la cantidad de estos necesarios y su costo por unidad. En el anexo 7 se presenta esta información bajo el supuesto de un cross-conector 12x12, y que por cada entrada se tienen 3 bloqueadores de longitud de onda. De acuerdo a lo anterior se determina el costo que genera un OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración, y se presenta en la tabla 4.15.

| Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura basada en PLC | Costo total |
| Costo sin Regeneración | \$4,760,160.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.15 Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración.

Enseguida se presentan los costos del OXC con arquitectura basada en PLC sin regeneración para diferente número de entradas/salidas, que van desde 4x4 a 12x12. En la tabla 4.16 se muestran dichos costos.

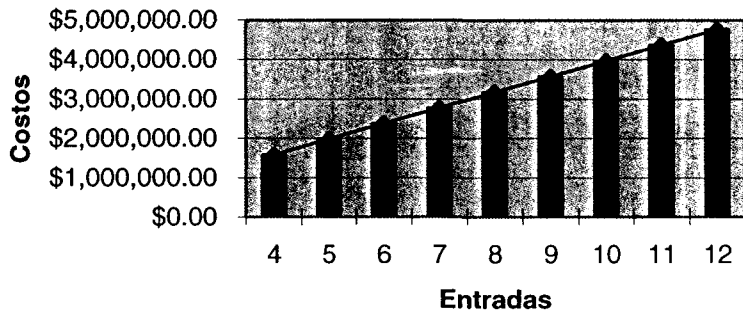
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$1,586,720.00 |
| 5 | \$1,983,400.00 |
| 6 | \$2,380,080.00 |
| 7 | \$2,776,760.00 |
| 8 | \$3,173,440.00 |
| 9 | \$3,570,120.00 |
| 10 | \$3,966,800.00 |
| 11 | \$4,363,480.00 |
| 12 | \$4,760,160.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.16 Costos para diferente número de entradas/salidas sin regeneración para un OXC con arquitectura basada en PLC.

Los costos presentados en la tabla 4.16 también se pueden ilustrar en la gráfica 4.9 que se presenta a continuación. En esta gráfica se puede observar que el crecimiento de costos se da en forma lineal.

Arquitectura basada en PLC Sin Regeneración



Gráfica 4.9 Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC sin regeneración.

4.4.3 Costo del OXC con arquitectura basada en PLC con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 0dB

Como ya se mencionó anteriormente, un cross-conector con estas características presenta una razón de regeneradores de 5. En el anexo 8 se muestra la cantidad y precio de los componentes necesarios para el cross-conector y a partir de esto se obtiene el costo del OXC con arquitectura basada en PLC con 5 regeneradores, y el resultado se presenta en la tabla 4.17.

| Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura basada en PLC | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$5,594,608.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.17 Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC con 5 regeneradores.

En la tabla 4.18 se muestran los costos del cross-conector con 1 entrada para regeneración y 5 regeneradores, este cálculo se realiza para diferente número de entradas/salidas.

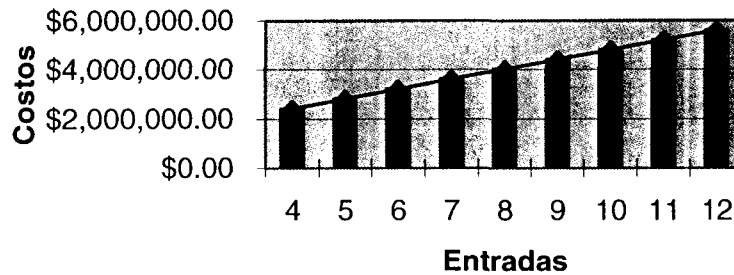
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$2,421,168.00 |
| 5 | \$2,817,848.00 |
| 6 | \$3,214,528.00 |
| 7 | \$3,611,208.00 |
| 8 | \$4,007,888.00 |
| 9 | \$4,404,568.00 |
| 10 | \$4,801,248.00 |
| 11 | \$5,197,928.00 |
| 12 | \$5,594,608.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.18 Costos para diferente número de entradas/salidas con 5 regeneradores para un OXC con arquitectura basada en PLC.

Los costos de la tabla 4.18 se pueden ilustrar en la gráfica 4.10, en la que se presenta un crecimiento lineal de costos.

Arquitectura basada en PLC Con Regeneración



Gráfica 4.10 Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC con 5 regeneradores.

4.4.4 Costo del OXC con arquitectura basada en PLC con regeneración, con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB

Quando se tiene un cross-conector con un OSNR de 32dB y una ganancia Raman de 7dB, se tiene una razón de regeneradores de 2. En el anexo 9 se presenta la cantidad y precio de los componentes requeridos para un OXC con arquitectura basada en PLC, de esto se deduce el costo del cross-conector para esta arquitectura, y este se muestra en la tabla 4.19.

| Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC | |
|---|-----------------------|
| OXC con arquitectura basada en PLC | Costo total |
| Costo con Regeneración | \$5,381,608.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.19 Costo de un OXC con arquitectura basada en PLC con 2 regeneradores.

En la tabla 4.20 se presentan los costos para un OXC con arquitectura basada en PLC para un número diferente de entradas/salidas.

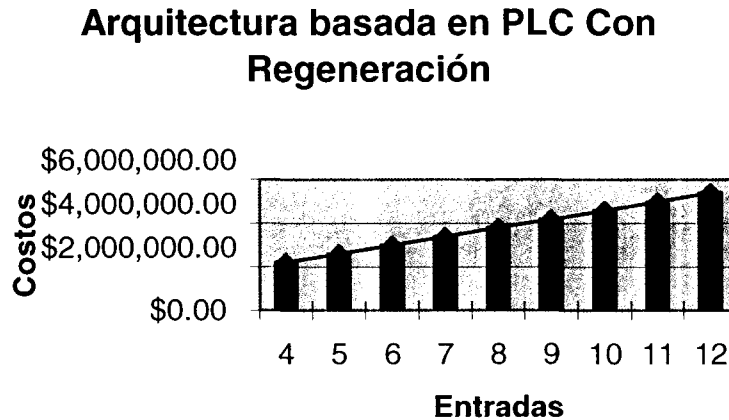
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$2,208,168.00 |
| 5 | \$2,604,848.00 |
| 6 | \$3,001,528.00 |
| 7 | \$3,398,208.00 |
| 8 | \$3,794,888.00 |
| 9 | \$4,191,568.00 |

| | |
|----|----------------|
| 10 | \$4,588,248.00 |
| 11 | \$4,984,928.00 |
| 12 | \$5,381,608.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.20 Costos para diferente número de entradas/salidas con 2 regeneradores para un OXC con arquitectura basada en PLC.

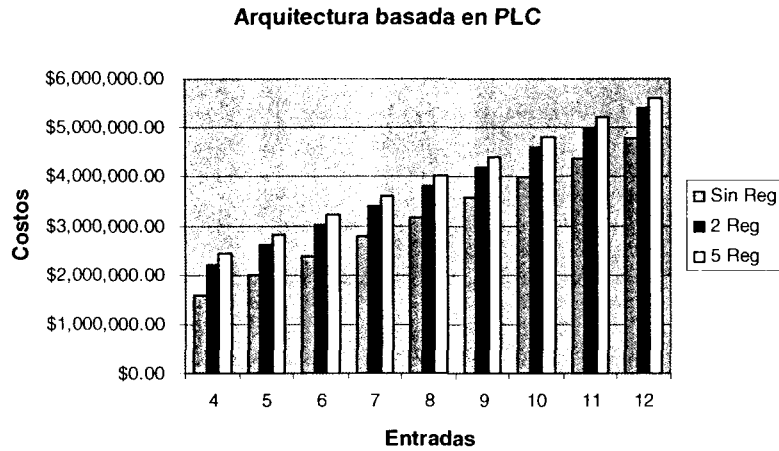
De la tabla anterior se puede derivar la gráfica 4.11 en donde se observa un crecimiento en costos lineal.



Gráfica 4.11 Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC con 2 regeneradores.

4.4.5 Comparación de costos de un OXC con una arquitectura basada en PLC con regeneración y sin regeneración para diferente número de entradas/salidas

De acuerdo a los costos que se calcularon en las tablas 4.16, 4.18, y 4.20, se puede construir la gráfica 4.12 y se ilustra a continuación.



Gráfica 4.12 Costos contra entradas de la arquitectura basada en PLC sin regeneración y con regeneración.

4.5 Costo de un cross-conector electrónico

4.5.1 Cálculo de un cross-conector electrónico

Para calcular el costo total de un cross-conector electrónico se deben tomar en cuenta los componentes que integran al mismo. El cálculo del costo se presenta en la ecuación 4.37.

$$Cross - conectorElectrónico = Canales \cdot Precio_{porCanal} \quad (4.37)$$

En donde:

$$Canales = (Cantidad_{Entradas} + Cantidad_{Salidas}) \cdot Cantidad_{Canales} \quad (4.38)$$

4.5.2 Costo de un cross-conector electrónico

Para calcular el costo de un cross-conector electrónico se debe tomar en cuenta el precio por canal que se ilustró en la tabla 4.1, además, como ya se mencionó anteriormente, se deben considerar 80 canales por entrada y un cross-conector 12x12. En el anexo 10 se muestra el componente, la cantidad y el precio por unidad requerido. De acuerdo a lo anterior se puede determinar el costo total de un cross-conector electrónico, el cual se presenta en la tabla 4.21.

| Costo de un cross-conector electrónico | |
|---|-----------------------|
| Cross-conector electrónico | Costo total |
| Costo sin Regeneración | \$8,064,000.00 |

Nota: Costo en dólares.

Tabla 4.21 Costo de un cross-conector electrónico.

Para esta investigación también se tomó en cuenta el costo de un cross-conector electrónico para diferente número de entradas/salidas, que van desde 4x4 a 12x12. En la tabla 4.22 se muestran los costos para este cross-conector sin regeneración.

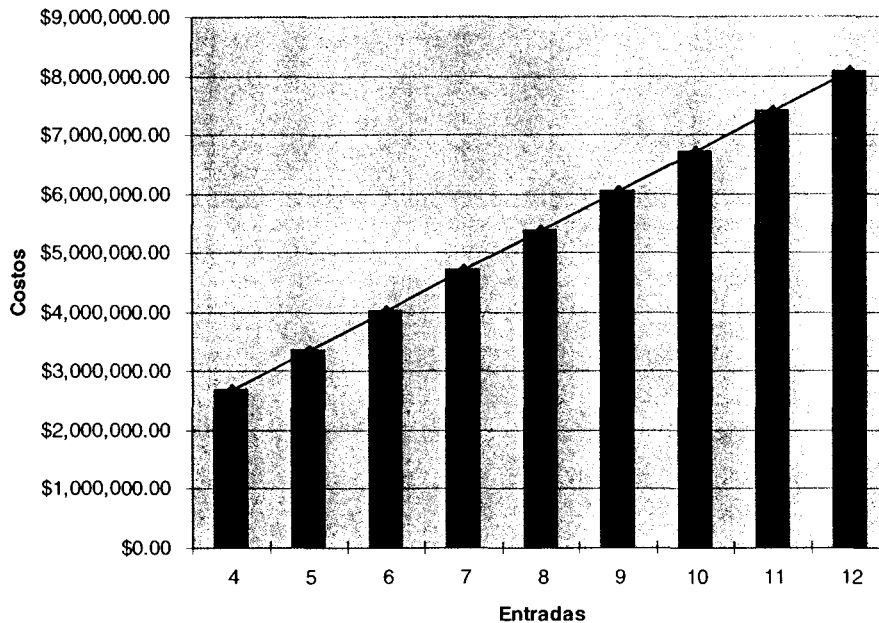
| Entradas/Salidas | Costo |
|-------------------------|----------------|
| 4 | \$2,688,000.00 |
| 5 | \$3,360,000.00 |
| 6 | \$4,032,000.00 |
| 7 | \$4,704,000.00 |
| 8 | \$5,376,000.00 |
| 9 | \$6,048,000.00 |
| 10 | \$6,720,000.00 |
| 11 | \$7,392,000.00 |
| 12 | \$8,064,000.00 |

Nota: Costos en dólares.

Tabla 4.22 Costos para diferente número de entradas/salidas para un cross-conector electrónico.

Con la información de la tabla 4.22 se obtiene la gráfica de costos contra número de entradas y se presenta en la gráfica 4.13. Como se puede observar en esta gráfica el crecimiento en costo que sigue este cross-conector es lineal.

Cross-conector Electrónico



Gráfica 4.13 Costos contra entradas del cross-conector electrónico.

4.6 Costo de la topología de USA

Para el cálculo del costo de la topología de USA, se tomaron en cuenta las arquitecturas de cross-convertidores que se mencionaron anteriormente, así como los anexos 11, 12, 13 y 14, en los cuales se muestra la información detallada sobre los nodos que integran la red para diferente OSNR y ganancia Raman.

4.6.1 Costo de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

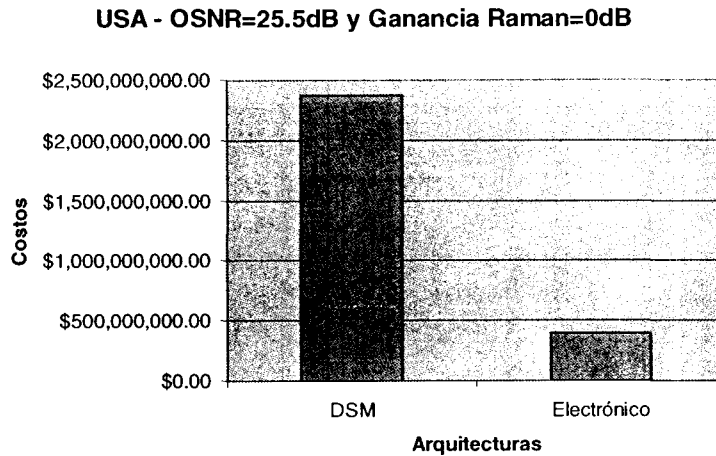
Para la red de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB se obtuvieron los costos por nodo para la arquitectura DSM y el cross-convertidor electrónico, los cuales se muestran en el anexo 23. De dicho anexo se puede deducir el costo total de esta topología por arquitectura de cross-convertidor, dichos costos se presentan en la tabla 4.23.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|--------------------|
| DSM | \$2,370,592,288.00 |

| | |
|--------------------|-------------------------|
| Electrónico | \$401,856,000.00 |
|--------------------|-------------------------|

Tabla 4.23 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

En la gráfica 4.14 se ilustra la gráfica que se deriva de la tabla 4.23.



Gráfica 4.14 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

El costo total elevado que presenta la arquitectura DSM se debe a la gran cantidad de regeneradores necesarios, ya que este OXC tiene muchas pérdidas internas.

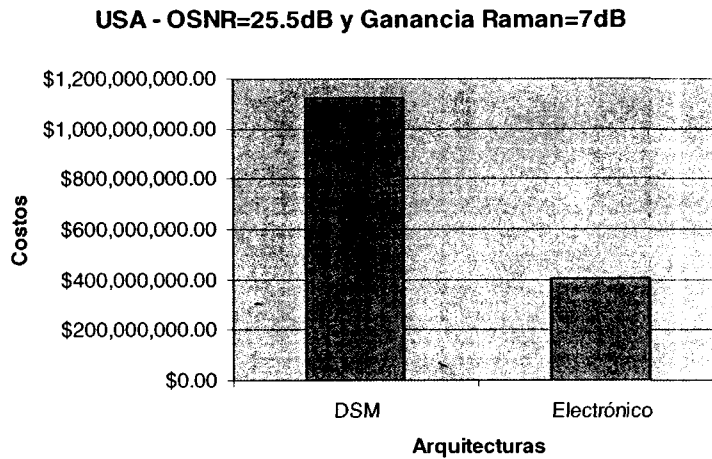
4.6.2 Costo de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

Los costos por nodo para el OXC con arquitectura DSM y el cross-conector electrónico para una red de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB, se presentan en el anexo 24. De dicho anexo se puede determinar el costo total por arquitectura de cross-conector, y se muestran en la tabla 4.24.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------------|---------------------------|
| DSM | \$1,120,619,543.00 |
| Electrónico | \$401,856,000.00 |

Tabla 4.24 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

En la gráfica 4.15 se ilustra la gráfica que se deduce de la tabla 4.24.



Gráfica 4.15 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

En esta gráfica se puede ver que el costo total de la red con OXC del tipo DSM sigue siendo elevado debido a los regeneradores, pero la introducción de ganancia Raman de 7dB ayudó a que esta cantidad de regeneradores disminuyera.

4.6.3 Costo de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

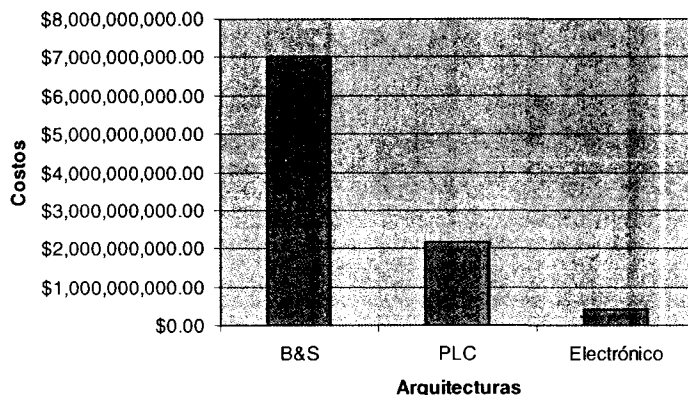
Para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB, se calculó el costo por nodo para las arquitecturas B&S, la que esta basada en PLC y el cross-conector electrónico, y se muestran en el anexo 25. De este anexo se puede calcular el costo total por arquitectura de cross-conector y se presenta en la tabla 4.25.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|--------------------|
| B&S | \$7,003,956,108.00 |
| PLC | \$2,176,411,328.00 |
| Electrónico | \$401,856,000.00 |

Tabla 4.25 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

En la gráfica 4.16 se ilustra la gráfica que se deriva de la tabla 4.25.

USA - OSNR=32dB y Ganancia Raman=0dB



Gráfica 4.16 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

En esta gráfica se puede observar que la necesidad de regeneradores sigue siendo elevada, ya que la topología de USA presenta una distancia grande entre algunos de sus enlaces, y esto se ve reflejado en el costo total de los OXC sobre el cross-conector electrónico.

4.6.4 Costo de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

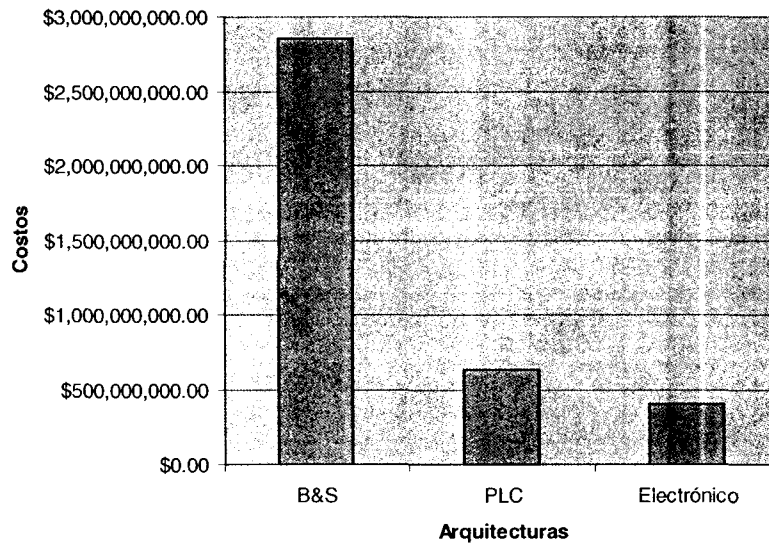
En el anexo 26 se muestran los costos por nodo para cada una de las arquitecturas de cross-conector B&S, basado en PLC y electrónico, de la red de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB. De lo anterior, se calcula el costo total por arquitectura de cross-conector y se presenta en la tabla 4.26.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|--------------------|
| B&S | \$2,853,643,198.00 |
| PLC | \$637,387,808.00 |
| Electrónico | \$401,856,000.00 |

Tabla 4.26 Costo por arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

En la gráfica 4.17 se ilustra la gráfica que se deriva de la tabla 4.26.

USA - OSNR=32dB y Ganancia Raman=7dB



Gráfica 4.17 Arquitecturas contra costos de la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

En la gráfica 4.17 se puede ver que la introducción de ganancia Raman ayuda en la disminución de regeneradores, y el costo de la red compuesta de OXC con arquitectura basada en PLC es muy cercano al costo cuando se utilizan cross-conectores electrónicos.

4.7 Costo de la topología de Japón

Para la topología de Japón se consideraron las arquitecturas de cross-conectores que se mencionaron anteriormente, así como los anexos 15, 16, 17 y 18, en los cuales se presenta la información detallada sobre los nodos que integran la red para diferente OSNR y ganancia Raman.

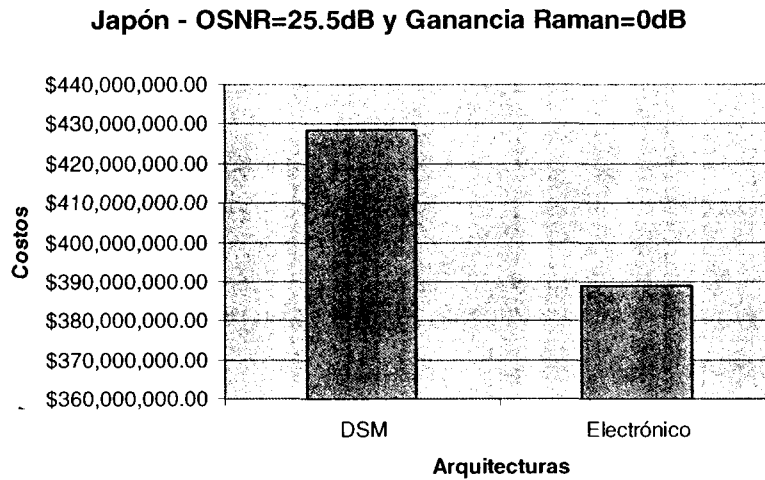
4.7.1 Costo de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

En el anexo 27 se muestran los costos por nodo para las arquitecturas de cross-conectores DSM y electrónico que se obtuvieron para la red de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB. De dicho anexo se puede determinar el costo total de la red de Japón por arquitectura de cross-conector, y se presentan en la tabla 4.27.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|------------------|
| DSM | \$428,355,380.00 |
| Electrónico | \$389,088,000.00 |

Tabla 4.27 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

En la gráfica 4.18 se ilustra la gráfica que se deriva de la tabla 4.27.



Gráfica 4.18 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

De esta gráfica se puede deducir que la necesidad de regeneradores no es tan alta, ya que en la red de Japón no se tiene tanta distancia entre sus enlaces, y se puede llegar a tener nodos sin regeneradores. Por esta razón el costo de la red con DSM es cercano al de la red con cross-conectores electrónicos.

4.7.2 Costo de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

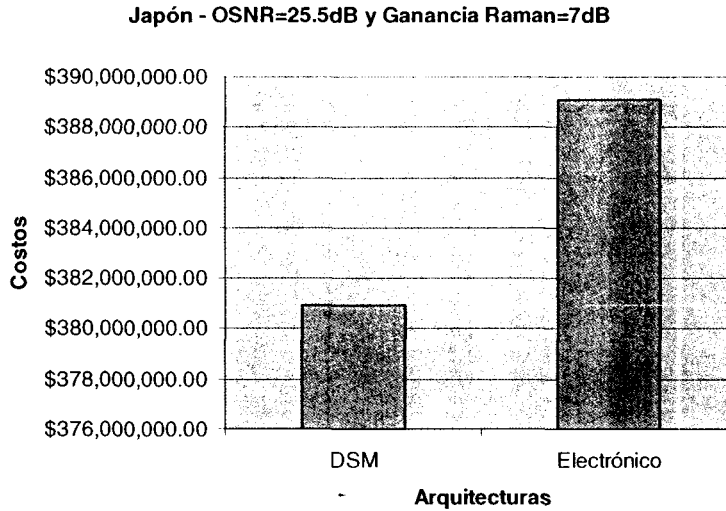
En el anexo 28 se presentan los costos por nodo para las arquitecturas de cross-conector DSM y electrónico de la red de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB. De lo anterior se puede calcular el costo total de la red de Japón por arquitectura de cross-conector, y se muestran en la tabla 4.28.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|------------------|
| DSM | \$380,916,379.00 |

| | |
|--------------------|-------------------------|
| Electrónico | \$389,088,000.00 |
|--------------------|-------------------------|

Tabla 4.28 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

De la tabla anterior se deduce la gráfica 4.19 y se presenta enseguida.



Gráfica 4.19 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

En esta gráfica se puede observar que la introducción de ganancia Raman a la red y su topología compacta, permiten que se tengan mas nodos completamente ópticos, y por lo tanto la red de OXC con arquitectura DSM resulta más barata.

4.7.3 Costo de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

Para la red de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB, se calcula el costo por nodo para las arquitecturas de cross-conectores B&S, basada en PLC y el cross-conector electrónico. Dichos costos se muestran en el anexo 29 y a partir de esto se calcula el costo total de la topología de Japón por arquitectura de cross-conector, y se presentan en la tabla 4.29.

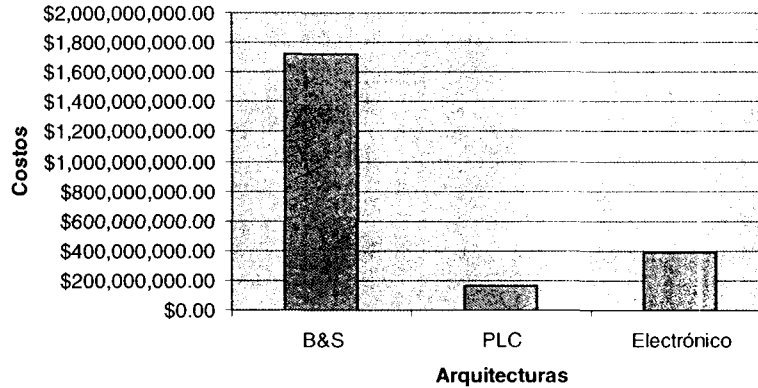
| Arquitectura | Costo total |
|--------------|--------------------|
| B&S | \$1,722,342,458.00 |
| PLC | \$160,675,888.00 |

| | |
|--------------------|-------------------------|
| Electrónico | \$389,088,000.00 |
|--------------------|-------------------------|

Tabla 4.29 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

De la tabla anterior se deriva la gráfica 4.20 y se presenta a continuación.

Japón - OSNR=32dB y Ganancia Raman=0dB



Gráfica 4.20 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

En este caso la red de OXC con arquitectura basada en PLC resulta ser la más barata, esto debido a que tiene un mejor OSNR que los OXC con arquitectura DSM y se requiere de una cantidad muy baja de regeneradores.

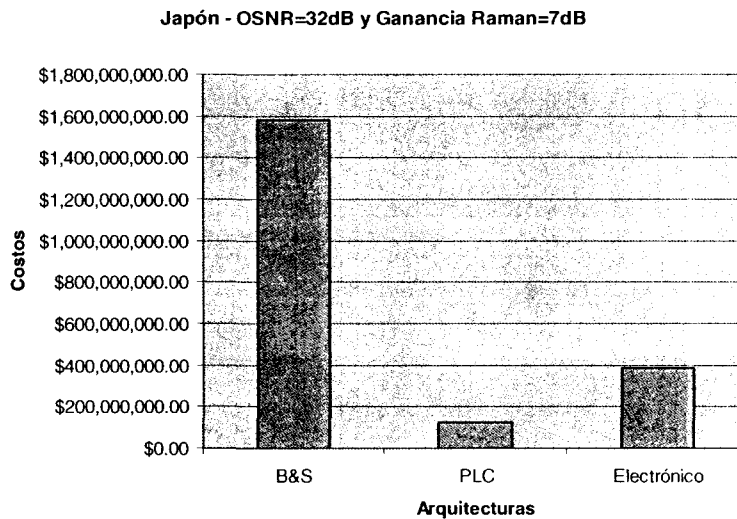
4.7.4 Costo de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

En el anexo 30 se presenta el costo por nodo para las arquitecturas de cross-conector B&S, basada en PLC y el cross-conector electrónico para la red de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB. De lo anterior se obtiene el costo total de la topología de Japón por arquitectura de cross-conector, y estos se muestran en la tabla 4.30.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------------|---------------------------|
| B&S | \$1,579,842,562.00 |
| PLC | \$126,714,672.00 |
| Electrónico | \$389,088,000.00 |

Tabla 4.30 Costo por arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

De la tabla 4.30 se obtiene la gráfica 4.21 y se presenta a continuación.



Gráfica 4.21 Arquitectura contra costos de la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

En esta gráfica se puede ver que el costo total de la red de OXC con arquitectura basada en PLC es aún mas bajo que en la sección anterior, esto se debe a que el número de regeneradores necesarios es aún más pequeño.

4.8 Costo de la topología de Europa

Para la topología de Europa se tomaron en cuenta las arquitecturas de cross-conectores que ya se presentaron, y los anexos 19, 20, 21 y 22, en los cuales se presenta la información detallada sobre los nodos que integran la red para diferente OSNR y ganancia Raman.

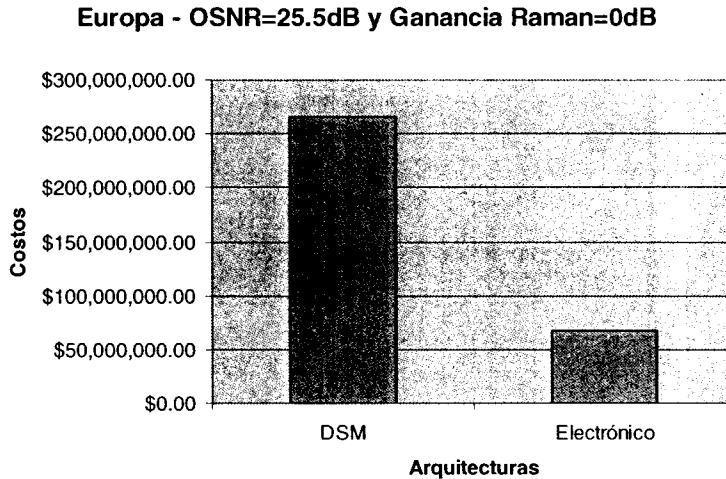
4.8.1 Costo de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

En el anexo 31 se presentan los costos por nodo para la arquitectura DSM y el cross-conector electrónico que se calcularon para la red de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB. Del anexo anterior se puede determinar el costo total de la red de Europa por arquitectura de cross-conector, y se presentan en la tabla 4.31.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|------------------|
| DSM | \$265,992,004.00 |
| Electrónico | \$67,872,000.00 |

Tabla 4.31 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

De la tabla 4.31 se deriva la gráfica 4.22, la cual se presenta a continuación.



Gráfica 4.22 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB.

La red de Europa es un caso similar a la de USA, solamente que en menor escala, por esta razón resulta mas barato implementar una red con cross-conectores electrónicos.

4.8.2 Costo de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

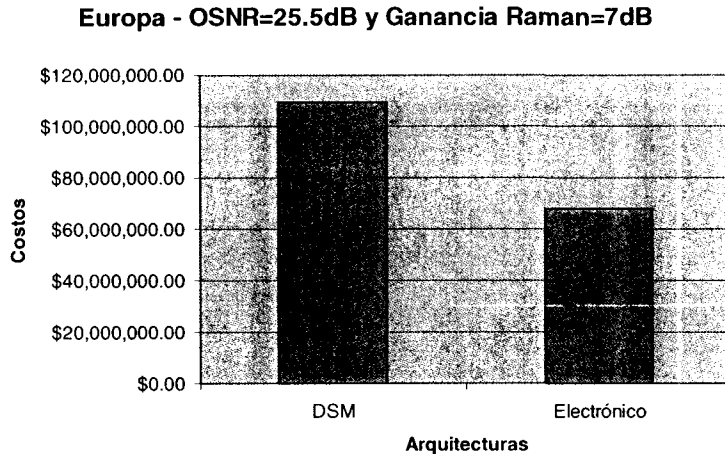
En el anexo 32 se muestran los costos por nodo para la arquitectura DSM y el cross-conector electrónico que se obtuvieron para la topología de Europa con OSNR 25.5dB y ganancia Raman de 7dB. A partir del anexo 32 se puede calcular el costo total por arquitectura de cross-conector para la red de Europa, y se presenta en la tabla 4.32.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|------------------|
| DSM | \$109,215,857.00 |

| | |
|--------------------|------------------------|
| Electrónico | \$67,872,000.00 |
|--------------------|------------------------|

Tabla 4.32 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

De la tabla anterior se deriva la gráfica 4.23 y se presenta a continuación.



Gráfica 4.23 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB.

En esta gráfica se puede observar que la ganancia Raman ayuda en la disminución de regeneradores y el costo total de la arquitectura DSM se acerca al costo total de los cross-conectores electrónicos.

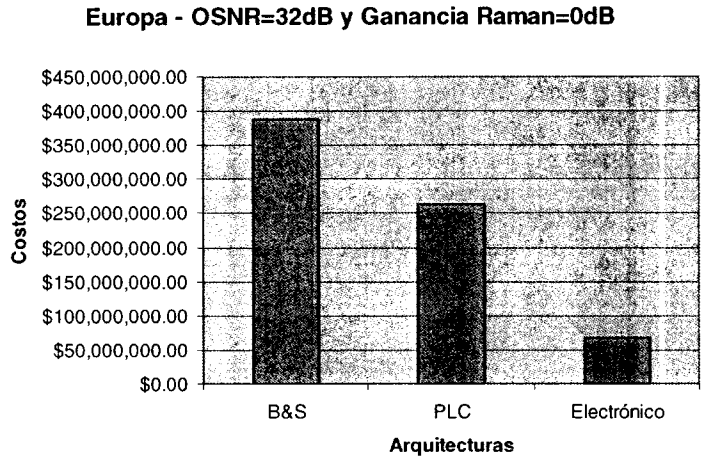
4.8.3 Costo de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

En el anexo 33 se presentan los costos por nodo para las arquitecturas B&S y la que esta basada en PLC, así como del cross-conector electrónico que se calcularon para la red de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB. De dicho anexo se deriva el costo total por arquitectura de cross-conector para la red de Europa, y se presentan en la tabla 4.33.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------------|------------------------|
| B&S | \$386,909,450.00 |
| PLC | \$262,644,960.00 |
| Electrónico | \$67,872,000.00 |

Tabla 4.33 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

De la tabla anterior se obtiene la gráfica 4.24 y se presenta a continuación.



Gráfica 4.24 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB.

En la gráfica anterior se puede ver que el costo total de la red con cross-conectores electrónicos resulta ser el mas bajo, esto se debe a la distancia entre nodos y la cantidad de regeneradores necesarios.

4.8.4 Costo de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

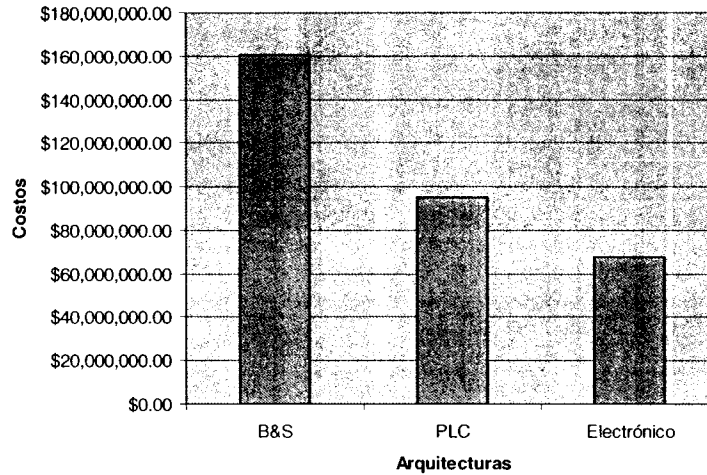
En el anexo 34 se muestran los costos por nodo para las arquitecturas de cross-conector B&S, la que esta basada en PLC y el electrónico que se obtuvieron para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB. De dicho anexo se determina el costo total por arquitectura de cross-conector para la topología de Europa, y se presentan en la tabla 4.34.

| Arquitectura | Costo total |
|--------------|------------------|
| B&S | \$160,635,416.00 |
| PLC | \$94,983,456.00 |
| Electrónico | \$67,872,000.00 |

Tabla 4.34 Costo por arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

De la tabla 4.34 se obtiene la gráfica 4.25 y se ilustra a continuación.

Europa - OSNR=32dB y Ganancia Raman=7dB



Gráfica 4.25 Arquitectura contra costos de la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB.

De la gráfica anterior se puede deducir que la ganancia Raman ayuda en la disminución de regeneradores, pero esto no es suficiente para conseguir un alto número de nodos totalmente ópticos, por esta razón el costo total de la red con cross-conectores electrónicos es el más bajo.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Conclusiones finales

De acuerdo a esta investigación, se puede decir que muchas de las tendencias actuales van orientadas a la implantación de redes totalmente ópticas, y por lo tanto resulta muy factible y de gran utilidad un estudio en cuanto a los costos en los que se incurren en la implantación de una red óptica.

Se debe analizar el tipo de red que se desea implementar, para así poder seleccionar el mejor diseño, en el cual parte de esta selección recae en que tipo de cross-conector se va a utilizar.

En esta investigación se analizaron tres tipos de arquitecturas cross-conectores ópticos así como un electrónico, y se determinaron sus costos para diferentes tipos de entradas/salidas que van desde 4x4 a 12x12, suponiendo cuatro casos en donde el OSNR es de 25.5dB (arquitectura DSM) y 32dB (arquitectura B&S y basada en PLC), y la ganancia Raman es de 0dB y 7dB.

De acuerdo a los resultados de este análisis a los cross-conectores, se puede observar que los OXC con arquitectura DSM y PLC, y el cross-conector electrónico siguen cierto crecimiento lineal cuando el número de entradas se incrementa, en cambio el OXC con arquitectura B&S tiene variación en su costo ya que la arquitectura de amplificadores varía dependiendo del número de entradas/salidas, y como se pudo apreciar en el capítulo anterior, uno de 7x7 requiere un mayor número de componentes para su construcción que un 8x8, por esa razón sus costos son muy similares.

Por otro lado, se puede decir que para un cross-conector con OSNR de 25.5dB la arquitectura más barata es DSM sobre el cross-conector electrónico. Cuando se tiene un cross-conector con OSNR de 32dB, la arquitectura más barata es la que está basada en PLC, seguida por el cross-conector electrónico y por último la arquitectura B&S.

El costo tan elevado que presenta el OXC con arquitectura B&S se debe a que uno de sus componentes aún mantiene un precio muy elevado, este componente es el bloqueador de longitud de onda (WB), y esta arquitectura presenta un número alto de estos componentes. Por esta misma razón también se eleva el costo del OXC con arquitectura PLC, la cual también utiliza WB pero en una menor cantidad que el B&S, y esto se explicó en el capítulo 3.

También se pudo observar que cuando se aplica el análisis de los cross-conectores en una red en la cual varía la ganancia Raman, se presentan

resultados diferentes en cuanto a costos que cuando se analizan los cross-conectores individualmente.

La distancia de transmisión, la utilización de amplificación Raman y el OSNR del OXC, son factores capaces de reducir la razón de regeneración en una red. Para la topología de USA se puede observar que la distancia de transmisión entre algunos de sus enlaces es grande, si ha esto se le agrega que no se tiene ganancia Raman, el número de regeneradores necesarios para la red es muy alto, esta es la razón por la cual, en este caso, el cross-conector electrónico resulta mas barato que los cross-conectores ópticos. Cuando se tiene una ganancia Raman de 7dB la razón de regeneradores disminuye, pero aún así el cross-conector electrónico continua siendo más barato que los ópticos, solo la arquitectura basada en PLC se encuentra cerca de alcanzarlo. Para que una red construida con OXC pueda ser barata, se tiene que trabajar en la disminución de la regeneración.

El caso de la topología de Europa resulta similar a la de USA, solamente que la diferencia entre los costos no es tan grande. Para esta red también se tiene que trabajar en la disminución de regeneradores.

En cuanto a la topología de Japón, la distancia entre sus nodos no es muy grande y utilizando una ganancia Raman de 7dB, da como resultado que la red integrada por OXC con arquitectura basada en PLC es la más barata, seguida por la arquitectura DSM, posteriormente el cross-conector electrónico y por último la arquitectura B&S. Si en la red no se tiene ganancia Raman los regeneradores necesarios aumentan, pero aún así la red integrada con OXC con arquitectura basada en PLC continua siendo la más barata, seguida por el cross-conector electrónico, después la arquitectura DSM y por último la B&S.

Por lo tanto, se puede decir que se tiene que seguir trabajando para la disminución del precio de los componentes ópticos, por ejemplo el bloqueador de longitud de onda.

También se puede deducir de este análisis que actualmente resulta factible y más barata la construcción de redes con cross-conectores ópticos para topologías en donde la distancia de transmisión entre nodos sea pequeña, como la red de Japón, ya que con esto se disminuye la necesidad de regeneradores hasta llegar a tener nodos completamente ópticos. En cambio, cuando se tienen topologías con grandes distancias entre sus nodos, el uso de cross-conectores electrónicos resulta más barato sobre los ópticos, ya que se requiere un mayor número de regeneradores ocasionando así que se tengan nodos híbridos y como consecuencia más caros.

Otros factores que también influyen en la determinación del costo de una red partiendo de un tipo de cross-conector son: cobertura y tráfico. Para redes con una cobertura pequeña y gran cantidad de tráfico resulta más barato el uso

de OXC, en cambio para redes de cobertura amplia y tráfico uniforme es más barato utilizar cross-conectores electrónicos.

Por último, si se decide cambiar a una red construida con cross-conectores ópticos se debe tomar en cuenta el término *legacy networks*, esto significa que se debe poner atención en las acciones necesarias a realizar para que los nuevos componentes se adapten a la red existente (SONET/SDH o WDM).

5.2 Trabajos futuros

Durante el desarrollo de esta tesis se pensaron en algunos temas que podrían presentarse en trabajos futuros, y que están basados en investigación bibliográfica. Los temas son los siguientes:

- Análisis en base a costos de diferentes topologías utilizando cross-conectores ópticos y electrónicos para tráfico no uniforme, para redes optimizadas.
- Desarrollo de nuevas arquitecturas de cross-conectores ópticos que sean eficientes y confiables, enfocándose en el ahorro en componentes y por lo tanto en los costos de una red.
- Investigación basándose en costos de enlaces ópticos con otros medios de transmisión.
- Investigación para la reducción de componentes que realizan conversiones del tipo O/E/O, para que se utilicen componentes totalmente ópticos.
- Análisis de diferentes topologías de redes para determinar donde, como y cuando es conveniente migrar a una red totalmente transparente.

Nota: Precios en Dólares

Anexo 1. Componentes, cantidad y precio por unidad sin regeneración de un OXC con arquitectura B&S

| Costo de una arquitectura B&S | | |
|--|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Divisores 1x2 | 168 | \$30.00 |
| Divisores 1x3 | 48 | \$45.00 |
| Amplificadores | 144 | \$31,560.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 144 | \$100,000.00 |

Anexo 2. Componentes, cantidad y precio por unidad para 5 regeneradores de un OXC con arquitectura B&S

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 5 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 5 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX | 2 | \$41,384.00 |
| Divisores 1x2 | 156 | \$30.00 |
| Divisores 1x3 | 78 | \$45.00 |
| Amplificadores | 156 | \$31,560.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 169 | \$100,000.00 |

Anexo 3. Componentes, cantidad y precio por unidad para 2 regeneradores de un OXC con arquitectura B&S

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 2 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 2 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX | 2 | \$41,384.00 |
| Divisores 1x2 | 156 | \$30.00 |
| Divisores 1x3 | 78 | \$45.00 |
| Amplificadores | 156 | \$31,560.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 169 | \$100,000.00 |

Anexo 4. Componentes, cantidad y precio por unidad sin regeneración de un OXC con arquitectura DSM

| Costo de una arquitectura DSM | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| MUX/DEMUX | 24 | \$41,384.00 |
| Switch | 13 | \$12,000.00 |
| Atenuador óptico variable | 13 | \$3,375.00 |

Anexo 5. Componentes, cantidad y precio por unidad para 35 regeneradores de un OXC con arquitectura DSM

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 35 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 35 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX de regeneración | 2 | \$41,384.00 |
| MUX/DEMUX | 24 | \$41,384.00 |
| Switch | 14 | \$13,000.00 |
| Atenuador óptico variable | 14 | \$3,375.00 |

Anexo 6. Componentes, cantidad y precio por unidad para 30 regeneradores de un OXC con arquitectura DSM

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 30 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 30 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX de regeneración | 2 | \$41,384.00 |
| MUX/DEMUX | 24 | \$41,384.00 |
| Switch | 14 | \$13,000.00 |
| Atenuador óptico variable | 14 | \$3,375.00 |

Anexo 7. Componentes, cantidad y precio por unidad sin regeneración de un OXC con arquitectura basada en PLC

| Costo de una arquitectura basada en PLC | | |
|--|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Switching & splitting PLC | 24 | \$1,000.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 36 | \$100,000.00 |
| Amplificadores | 36 | \$31,560.00 |

Anexo 8. Componentes, cantidad y precio por unidad para 5 regeneradores de un OXC con arquitectura basada en PLC

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 5 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 5 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX | 2 | \$41,384.00 |
| Switching & spliting PLC | 26 | \$1,000.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 39 | \$100,000.00 |
| Amplificadores | 39 | \$31,560.00 |

Anexo 9. Componentes, cantidad y precio por unidad para 2 regeneradores de un OXC con arquitectura basada en PLC

| Costo de un OXC semitransparente con regeneración selectiva y conversión de longitud de onda | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Componente | Cantidad | Precio por unidad |
| Regeneradores del tipo 3R | 2 | \$46,000.00 |
| Convertidores de longitud de onda | 2 | \$25,000.00 |
| MUX/DEMUX | 2 | \$41,384.00 |
| Switching & spliting PLC | 26 | \$1,000.00 |
| Bloqueadores de longitud de onda | 39 | \$100,000.00 |
| Amplificadores | 39 | \$31,560.00 |

Anexo 10. Componente, cantidad y precio por unidad de un cross-conector electrónico

| Costo de un cross-conector electrónico | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Descripción | Cantidad | Precio por unidad |
| Term per channel | 1920 | \$4,200.00 |

Anexo 11. Topología USA, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|-------------|-------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|
| 0 | AKRN | 1648 | 1414 | 23 | 529 | 40 |
| 1 | ANHM | 468 | 230 | 6 | 36 | 6 |
| 2 | ATLN | 2068 | 1814 | 28 | 784 | 38 |
| 3 | BFLO | 900 | 658 | 12 | 144 | 12 |
| 4 | BLNG | 648 | 492 | 10 | 100 | 14 |
| 5 | CHCG | 1940 | 1700 | 26 | 676 | 54 |
| 6 | CHYN | 1504 | 1348 | 21 | 441 | 28 |
| 7 | CNCN | 892 | 652 | 14 | 196 | 18 |
| 8 | DTRT | 348 | 114 | 6 | 36 | 6 |
| 9 | EKRG | 1444 | 616 | 19 | 361 | 24 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|----|-----|----|
| 10 | ELPS | 1376 | 1220 | 19 | 361 | 22 |
| 11 | FRFX | 1704 | 1392 | 23 | 529 | 26 |
| 12 | FTWO | 1696 | 1462 | 24 | 576 | 32 |
| 13 | HMLT | 1360 | 1126 | 18 | 324 | 18 |
| 14 | HSTN | 676 | 442 | 10 | 100 | 10 |
| 15 | JCSN | 860 | 670 | 13 | 169 | 18 |
| 16 | JCVL | 760 | 444 | 10 | 100 | 14 |
| 17 | KSCY | 1176 | 910 | 17 | 289 | 18 |
| 18 | MDSN | 760 | 526 | 10 | 100 | 14 |
| 19 | MHVL | 900 | 0 | 12 | 144 | 12 |
| 20 | MMPH | 1008 | 800 | 14 | 196 | 18 |
| 21 | NSVL | 1956 | 1716 | 26 | 676 | 36 |
| 22 | NWOR | 964 | 798 | 14 | 196 | 24 |
| 23 | NYCM | 900 | 86 | 12 | 144 | 12 |
| 24 | NYC2 | 900 | 416 | 12 | 144 | 12 |
| 25 | OKRC | 1092 | 898 | 16 | 256 | 20 |
| 26 | OMAH | 1600 | 1376 | 23 | 529 | 32 |
| 27 | ORLD | 316 | 82 | 4 | 16 | 6 |
| 28 | ORVL | 1268 | 1040 | 18 | 324 | 22 |
| 29 | PHNX | 1160 | 1004 | 16 | 256 | 16 |
| 30 | RCDL | 1016 | 776 | 14 | 196 | 18 |
| 31 | RILT | 1184 | 1022 | 16 | 256 | 20 |
| 32 | SKTN | 1184 | 662 | 16 | 256 | 20 |
| 33 | SNJS | 468 | 230 | 6 | 36 | 6 |
| 34 | SPFD | 900 | 658 | 12 | 144 | 12 |
| 35 | STLS | 1036 | 778 | 14 | 196 | 18 |
| 36 | STPL | 660 | 504 | 10 | 100 | 12 |
| 37 | STTL | 484 | 248 | 8 | 64 | 8 |
| 38 | TACM | 484 | 248 | 8 | 64 | 8 |
| 39 | WASH | 1360 | 1126 | 18 | 324 | 18 |

Anexo 12. Topología USA, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | AKRN | 1648 | 430 | 23 | 529 | 40 |
| 1 | ANHM | 468 | 4 | 6 | 36 | 6 |
| 2 | ATLN | 2068 | 812 | 28 | 784 | 38 |
| 3 | BFLO | 900 | 246 | 12 | 144 | 12 |
| 4 | BLNG | 648 | 336 | 10 | 100 | 14 |
| 5 | CHCG | 1940 | 924 | 26 | 676 | 54 |
| 6 | CHYN | 1504 | 1208 | 21 | 441 | 28 |
| 7 | CNCN | 892 | 178 | 14 | 196 | 18 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|----|-----|----|
| 8 | DTRT | 348 | 14 | 6 | 36 | 6 |
| 9 | EKRG | 1444 | 382 | 19 | 361 | 24 |
| 10 | ELPS | 1376 | 1064 | 19 | 361 | 22 |
| 11 | FRFX | 1704 | 476 | 23 | 529 | 26 |
| 12 | FTWO | 1696 | 788 | 24 | 576 | 32 |
| 13 | HMLT | 1360 | 412 | 18 | 324 | 18 |
| 14 | HSTN | 676 | 156 | 10 | 100 | 10 |
| 15 | JCSN | 860 | 178 | 13 | 169 | 18 |
| 16 | JCVL | 760 | 88 | 10 | 100 | 14 |
| 17 | KSCY | 1176 | 326 | 17 | 289 | 18 |
| 18 | MDSN | 760 | 132 | 10 | 100 | 14 |
| 19 | MHVL | 900 | 190 | 12 | 144 | 12 |
| 20 | MMPH | 1008 | 342 | 14 | 196 | 18 |
| 21 | NSVL | 1956 | 654 | 26 | 676 | 36 |
| 22 | NWOR | 964 | 270 | 14 | 196 | 24 |
| 23 | NYCM | 900 | 60 | 12 | 144 | 12 |
| 24 | NYC2 | 900 | 122 | 12 | 144 | 12 |
| 25 | OKRC | 1092 | 388 | 16 | 256 | 20 |
| 26 | OMAH | 1600 | 936 | 23 | 529 | 32 |
| 27 | ORLD | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 28 | ORVL | 1268 | 1034 | 18 | 324 | 22 |
| 29 | PHNX | 1160 | 140 | 16 | 256 | 16 |
| 30 | RCDL | 1016 | 288 | 14 | 196 | 18 |
| 31 | RILT | 1184 | 642 | 16 | 256 | 20 |
| 32 | SKTN | 1184 | 72 | 16 | 256 | 20 |
| 33 | SNJS | 468 | 2 | 6 | 36 | 6 |
| 34 | SPFD | 900 | 154 | 12 | 144 | 12 |
| 35 | STLS | 1036 | 258 | 14 | 196 | 18 |
| 36 | STPL | 660 | 348 | 10 | 100 | 12 |
| 37 | STTL | 484 | 172 | 8 | 64 | 8 |
| 38 | TACM | 484 | 0 | 8 | 64 | 8 |
| 39 | WASH | 1360 | 296 | 18 | 324 | 18 |

Anexo 13. Topología USA, OSNR=32dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | AKRN | 1648 | 1190 | 23 | 529 | 40 |
| 1 | ANHM | 468 | 230 | 6 | 36 | 6 |
| 2 | ATLN | 2068 | 1814 | 28 | 784 | 38 |
| 3 | BFLO | 900 | 658 | 12 | 144 | 12 |
| 4 | BLNG | 648 | 492 | 10 | 100 | 14 |
| 5 | CHCG | 1940 | 1612 | 26 | 676 | 54 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|----|-----|----|
| 6 | CHYN | 1504 | 1348 | 21 | 441 | 28 |
| 7 | CNCN | 892 | 518 | 14 | 196 | 18 |
| 8 | DTRT | 348 | 36 | 6 | 36 | 6 |
| 9 | EKRG | 1444 | 472 | 19 | 361 | 24 |
| 10 | ELPS | 1376 | 1220 | 19 | 361 | 22 |
| 11 | FRFX | 1704 | 1244 | 23 | 529 | 26 |
| 12 | FTWO | 1696 | 1462 | 24 | 576 | 32 |
| 13 | HMLT | 1360 | 1048 | 18 | 324 | 18 |
| 14 | HSTN | 676 | 364 | 10 | 100 | 10 |
| 15 | JCSN | 860 | 670 | 13 | 169 | 18 |
| 16 | JCVL | 760 | 100 | 10 | 100 | 14 |
| 17 | KSCY | 1176 | 864 | 17 | 289 | 18 |
| 18 | MDSN | 760 | 452 | 10 | 100 | 14 |
| 19 | MHVL | 900 | 0 | 12 | 144 | 12 |
| 20 | MMPH | 1008 | 738 | 14 | 196 | 18 |
| 21 | NSVL | 1956 | 1644 | 26 | 676 | 36 |
| 22 | NWOR | 964 | 724 | 14 | 196 | 24 |
| 23 | NYCM | 900 | 0 | 12 | 144 | 12 |
| 24 | NYC2 | 900 | 0 | 12 | 144 | 12 |
| 25 | OKRC | 1092 | 838 | 16 | 256 | 20 |
| 26 | OMAH | 1600 | 1376 | 23 | 529 | 32 |
| 27 | ORLD | 316 | 82 | 4 | 16 | 6 |
| 28 | ORVL | 1268 | 1040 | 18 | 324 | 22 |
| 29 | PHNX | 1160 | 926 | 16 | 256 | 16 |
| 30 | RCDL | 1016 | 624 | 14 | 196 | 18 |
| 31 | RILT | 1184 | 662 | 16 | 256 | 20 |
| 32 | SKTN | 1184 | 662 | 16 | 256 | 20 |
| 33 | SNJS | 468 | 230 | 6 | 36 | 6 |
| 34 | SPFD | 900 | 658 | 12 | 144 | 12 |
| 35 | STLS | 1036 | 724 | 14 | 196 | 18 |
| 36 | STPL | 660 | 504 | 10 | 100 | 12 |
| 37 | STTL | 484 | 248 | 8 | 64 | 8 |
| 38 | TACM | 484 | 248 | 8 | 64 | 8 |
| 39 | WASH | 1360 | 1048 | 18 | 324 | 18 |

Anexo 14. Topología USA, OSNR=32dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | AKRN | 1648 | 232 | 23 | 529 | 40 |
| 1 | ANHM | 468 | 24 | 6 | 36 | 6 |
| 2 | ATLN | 2068 | 320 | 28 | 784 | 38 |
| 3 | BFLO | 900 | 80 | 12 | 144 | 12 |

| | | | | | | |
|----|------|------|-----|----|-----|----|
| 4 | BLNG | 648 | 336 | 10 | 100 | 14 |
| 5 | CHCG | 1940 | 490 | 26 | 676 | 54 |
| 6 | CHYN | 1504 | 950 | 21 | 441 | 28 |
| 7 | CNCN | 892 | 86 | 14 | 196 | 18 |
| 8 | DTRT | 348 | 4 | 6 | 36 | 6 |
| 9 | EKRG | 1444 | 106 | 19 | 361 | 24 |
| 10 | ELPS | 1376 | 470 | 19 | 361 | 22 |
| 11 | FRFX | 1704 | 188 | 23 | 529 | 26 |
| 12 | FTWO | 1696 | 420 | 24 | 576 | 32 |
| 13 | HMLT | 1360 | 190 | 18 | 324 | 18 |
| 14 | HSTN | 676 | 112 | 10 | 100 | 10 |
| 15 | JCSN | 860 | 216 | 13 | 169 | 18 |
| 16 | JCVL | 760 | 42 | 10 | 100 | 14 |
| 17 | KSCY | 1176 | 164 | 17 | 289 | 18 |
| 18 | MDSN | 760 | 28 | 10 | 100 | 14 |
| 19 | MHVL | 900 | 12 | 12 | 144 | 12 |
| 20 | MMPH | 1008 | 174 | 14 | 196 | 18 |
| 21 | NSVL | 1956 | 180 | 26 | 676 | 36 |
| 22 | NWOR | 964 | 134 | 14 | 196 | 24 |
| 23 | NYCM | 900 | 8 | 12 | 144 | 12 |
| 24 | NYC2 | 900 | 40 | 12 | 144 | 12 |
| 25 | OKRC | 1092 | 132 | 16 | 256 | 20 |
| 26 | OMAH | 1600 | 252 | 23 | 529 | 32 |
| 27 | ORLD | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 28 | ORVL | 1268 | 418 | 18 | 324 | 22 |
| 29 | PHNX | 1160 | 404 | 16 | 256 | 16 |
| 30 | RCDL | 1016 | 186 | 14 | 196 | 18 |
| 31 | RILT | 1184 | 0 | 16 | 256 | 20 |
| 32 | SKTN | 1184 | 402 | 16 | 256 | 20 |
| 33 | SNJS | 468 | 6 | 6 | 36 | 6 |
| 34 | SPFD | 900 | 66 | 12 | 144 | 12 |
| 35 | STLS | 1036 | 72 | 14 | 196 | 18 |
| 36 | STPL | 660 | 322 | 10 | 100 | 12 |
| 37 | STTL | 484 | 10 | 8 | 64 | 8 |
| 38 | TACM | 484 | 10 | 8 | 64 | 8 |
| 39 | WASH | 1360 | 124 | 18 | 324 | 18 |

Anexo 15. Topología Japón, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Asah | 312 | 0 | 4 | 16 | 4 |
| 1 | Sapp | 468 | 34 | 7 | 49 | 12 |

| | | | | | | |
|----|------|------|-----|----|-----|----|
| 2 | Mori | 756 | 68 | 11 | 121 | 20 |
| 3 | Haka | 748 | 48 | 10 | 100 | 14 |
| 4 | Send | 992 | 70 | 14 | 196 | 22 |
| 5 | Naga | 1736 | 324 | 25 | 625 | 40 |
| 6 | Hita | 948 | 122 | 14 | 196 | 18 |
| 7 | Yoko | 532 | 20 | 9 | 81 | 18 |
| 8 | Kawa | 836 | 58 | 11 | 121 | 24 |
| 9 | Maeb | 1812 | 280 | 24 | 576 | 33 |
| 10 | Naga | 1272 | 236 | 17 | 289 | 22 |
| 11 | Kofu | 964 | 62 | 13 | 169 | 18 |
| 12 | Fuji | 544 | 28 | 9 | 81 | 20 |
| 13 | Mats | 1040 | 64 | 15 | 225 | 18 |
| 14 | Hama | 340 | 2 | 6 | 36 | 6 |
| 15 | Kago | 1444 | 132 | 21 | 441 | 28 |
| 16 | Gifu | 1852 | 272 | 25 | 625 | 33 |
| 17 | Toya | 1808 | 566 | 24 | 576 | 28 |
| 18 | Fuku | 1760 | 496 | 23 | 529 | 28 |
| 19 | Tott | 1134 | 176 | 15 | 225 | 20 |
| 20 | Kobe | 1750 | 190 | 25 | 625 | 38 |
| 21 | Kyot | 1352 | 176 | 18 | 324 | 18 |
| 22 | Osak | 2130 | 304 | 30 | 900 | 46 |
| 23 | Saka | 1072 | 146 | 14 | 196 | 14 |
| 24 | Nara | 1216 | 120 | 17 | 289 | 20 |
| 25 | Waka | 324 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 26 | Toku | 318 | 0 | 5 | 25 | 6 |
| 27 | Taka | 1316 | 210 | 19 | 361 | 28 |
| 28 | Okay | 1170 | 28 | 17 | 289 | 21 |
| 29 | Yona | 1026 | 180 | 14 | 196 | 14 |
| 30 | Yama | 1062 | 56 | 15 | 225 | 20 |
| 31 | Hiro | 1074 | 116 | 15 | 225 | 25 |
| 32 | Kita | 876 | 106 | 12 | 144 | 23 |
| 33 | Fuku | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 34 | Kuma | 796 | 52 | 11 | 121 | 22 |
| 35 | Kago | 468 | 24 | 6 | 36 | 6 |
| 36 | Miya | 468 | 28 | 6 | 36 | 6 |
| 37 | Nobe | 1098 | 92 | 15 | 225 | 26 |
| 38 | Mats | 1268 | 76 | 18 | 324 | 27 |
| 39 | Toky | 1144 | 70 | 15 | 225 | 20 |

Anexo 16. Topología Japón, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|-------------|-------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|
|-------------|-------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|

| | | | | | | |
|----|------|------|-----|----|-----|----|
| 0 | Asah | 312 | 0 | 4 | 16 | 4 |
| 1 | Sapp | 468 | 14 | 7 | 49 | 12 |
| 2 | Mori | 756 | 68 | 11 | 121 | 20 |
| 3 | Haka | 748 | 38 | 10 | 100 | 14 |
| 4 | Send | 992 | 64 | 14 | 196 | 22 |
| 5 | Naga | 1736 | 266 | 25 | 625 | 40 |
| 6 | Hita | 948 | 70 | 14 | 196 | 18 |
| 7 | Yoko | 532 | 8 | 9 | 81 | 18 |
| 8 | Kawa | 836 | 30 | 11 | 121 | 24 |
| 9 | Maeb | 1812 | 218 | 24 | 576 | 33 |
| 10 | Naga | 1272 | 150 | 17 | 289 | 22 |
| 11 | Kofu | 964 | 36 | 13 | 169 | 18 |
| 12 | Fuji | 544 | 22 | 9 | 81 | 20 |
| 13 | Mats | 1040 | 62 | 15 | 225 | 18 |
| 14 | Hama | 340 | 2 | 6 | 36 | 6 |
| 15 | Kago | 1444 | 142 | 21 | 441 | 28 |
| 16 | Gifu | 1852 | 218 | 25 | 625 | 33 |
| 17 | Toya | 1808 | 522 | 24 | 576 | 28 |
| 18 | Fuku | 1760 | 366 | 23 | 529 | 28 |
| 19 | Tott | 1134 | 170 | 15 | 225 | 20 |
| 20 | Kobe | 1750 | 138 | 25 | 625 | 38 |
| 21 | Kyot | 1352 | 186 | 18 | 324 | 18 |
| 22 | Osak | 2130 | 250 | 30 | 900 | 46 |
| 23 | Saka | 1072 | 160 | 14 | 196 | 14 |
| 24 | Nara | 1216 | 118 | 17 | 289 | 20 |
| 25 | Waka | 324 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 26 | Toku | 318 | 0 | 5 | 25 | 6 |
| 27 | Taka | 1316 | 202 | 19 | 361 | 28 |
| 28 | Okay | 1170 | 52 | 17 | 289 | 21 |
| 29 | Yona | 1026 | 98 | 14 | 196 | 14 |
| 30 | Yama | 1062 | 168 | 15 | 225 | 20 |
| 31 | Hiro | 1074 | 96 | 15 | 225 | 25 |
| 32 | Kita | 876 | 60 | 12 | 144 | 23 |
| 33 | Fuku | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 34 | Kuma | 796 | 54 | 11 | 121 | 22 |
| 35 | Kago | 468 | 14 | 6 | 36 | 6 |
| 36 | Miya | 468 | 26 | 6 | 36 | 6 |
| 37 | Nobe | 1098 | 86 | 15 | 225 | 26 |
| 38 | Mats | 1268 | 82 | 18 | 324 | 27 |
| 39 | Toky | 1144 | 122 | 15 | 225 | 20 |

Anexo 17. Topología Japón, OSNR=32dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|-------------|-------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|
| 0 | Asah | 312 | 0 | 4 | 16 | 4 |
| 1 | Sapp | 468 | 18 | 7 | 49 | 12 |
| 2 | Mori | 756 | 36 | 11 | 121 | 20 |
| 3 | Haka | 748 | 12 | 10 | 100 | 14 |
| 4 | Send | 992 | 36 | 14 | 196 | 22 |
| 5 | Naga | 1736 | 90 | 25 | 625 | 40 |
| 6 | Hita | 948 | 22 | 14 | 196 | 18 |
| 7 | Yoko | 532 | 0 | 9 | 81 | 18 |
| 8 | Kawa | 836 | 14 | 11 | 121 | 24 |
| 9 | Maeb | 1812 | 14 | 24 | 576 | 33 |
| 10 | Naga | 1272 | 0 | 17 | 289 | 22 |
| 11 | Kofu | 964 | 6 | 13 | 169 | 18 |
| 12 | Fuji | 544 | 10 | 9 | 81 | 20 |
| 13 | Mats | 1040 | 0 | 15 | 225 | 18 |
| 14 | Hama | 340 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 15 | Kago | 1444 | 6 | 21 | 441 | 28 |
| 16 | Gifu | 1852 | 10 | 25 | 625 | 33 |
| 17 | Toya | 1808 | 44 | 24 | 576 | 28 |
| 18 | Fuku | 1760 | 36 | 23 | 529 | 28 |
| 19 | Tott | 1134 | 0 | 15 | 225 | 20 |
| 20 | Kobe | 1750 | 28 | 25 | 625 | 38 |
| 21 | Kyot | 1352 | 0 | 18 | 324 | 18 |
| 22 | Osak | 2130 | 30 | 30 | 900 | 46 |
| 23 | Saka | 1072 | 2 | 14 | 196 | 14 |
| 24 | Nara | 1216 | 8 | 17 | 289 | 20 |
| 25 | Waka | 324 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 26 | Toku | 318 | 0 | 5 | 25 | 6 |
| 27 | Taka | 1316 | 2 | 19 | 361 | 28 |
| 28 | Okay | 1170 | 4 | 17 | 289 | 21 |
| 29 | Yona | 1026 | 66 | 14 | 196 | 14 |
| 30 | Yama | 1062 | 52 | 15 | 225 | 20 |
| 31 | Hiro | 1074 | 24 | 15 | 225 | 25 |
| 32 | Kita | 876 | 46 | 12 | 144 | 23 |
| 33 | Fuku | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 34 | Kuma | 796 | 10 | 11 | 121 | 22 |
| 35 | Kago | 468 | 6 | 6 | 36 | 6 |
| 36 | Miya | 468 | 6 | 6 | 36 | 6 |
| 37 | Nobe | 1098 | 14 | 15 | 225 | 26 |
| 38 | Mats | 1268 | 22 | 18 | 324 | 27 |

| | | | | | | |
|----|------|------|----|----|-----|----|
| 39 | Toky | 1144 | 20 | 15 | 225 | 20 |
|----|------|------|----|----|-----|----|

Anexo 18. Topología Japón, OSNR=32dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Asah | 312 | 0 | 4 | 16 | 4 |
| 1 | Sapp | 468 | 6 | 7 | 49 | 12 |
| 2 | Mori | 756 | 24 | 11 | 121 | 20 |
| 3 | Haka | 748 | 6 | 10 | 100 | 14 |
| 4 | Send | 992 | 0 | 14 | 196 | 22 |
| 5 | Naga | 1736 | 46 | 25 | 625 | 40 |
| 6 | Hita | 948 | 10 | 14 | 196 | 18 |
| 7 | Yoko | 532 | 0 | 9 | 81 | 18 |
| 8 | Kawa | 836 | 6 | 11 | 121 | 24 |
| 9 | Maeb | 1812 | 0 | 24 | 576 | 33 |
| 10 | Naga | 1272 | 0 | 17 | 289 | 22 |
| 11 | Kofu | 964 | 2 | 13 | 169 | 18 |
| 12 | Fuji | 544 | 4 | 9 | 81 | 20 |
| 13 | Mats | 1040 | 0 | 15 | 225 | 18 |
| 14 | Hama | 340 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 15 | Kago | 1444 | 0 | 21 | 441 | 28 |
| 16 | Gifu | 1852 | 10 | 25 | 625 | 33 |
| 17 | Toya | 1808 | 0 | 24 | 576 | 28 |
| 18 | Fuku | 1760 | 0 | 23 | 529 | 28 |
| 19 | Tott | 1134 | 0 | 15 | 225 | 20 |
| 20 | Kobe | 1750 | 0 | 25 | 625 | 38 |
| 21 | Kyot | 1352 | 0 | 18 | 324 | 18 |
| 22 | Osak | 2130 | 0 | 30 | 900 | 46 |
| 23 | Saka | 1072 | 0 | 14 | 196 | 14 |
| 24 | Nara | 1216 | 2 | 17 | 289 | 20 |
| 25 | Waka | 324 | 0 | 6 | 36 | 6 |
| 26 | Toku | 318 | 0 | 5 | 25 | 6 |
| 27 | Taka | 1316 | 0 | 19 | 361 | 28 |
| 28 | Okay | 1170 | 0 | 17 | 289 | 21 |
| 29 | Yona | 1026 | 4 | 14 | 196 | 14 |
| 30 | Yama | 1062 | 12 | 15 | 225 | 20 |
| 31 | Hiro | 1074 | 12 | 15 | 225 | 25 |
| 32 | Kita | 876 | 16 | 12 | 144 | 23 |
| 33 | Fuku | 316 | 0 | 4 | 16 | 6 |
| 34 | Kuma | 796 | 20 | 11 | 121 | 22 |
| 35 | Kago | 468 | 22 | 6 | 36 | 6 |
| 36 | Miya | 468 | 4 | 6 | 36 | 6 |

| | | | | | | |
|----|------|------|----|----|-----|----|
| 37 | Nobe | 1098 | 18 | 15 | 225 | 26 |
| 38 | Mats | 1268 | 6 | 18 | 324 | 27 |
| 39 | Toky | 1144 | 0 | 15 | 225 | 20 |

Anexo 19. Topología Europa, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Oslo | 188 | 116 | 4 | 16 | 12 |
| 1 | Cope | 328 | 256 | 6 | 36 | 12 |
| 2 | Stoc | 276 | 204 | 6 | 36 | 20 |
| 3 | Mosc | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 4 | Berl | 332 | 244 | 8 | 64 | 42 |
| 5 | Prag | 356 | 260 | 7 | 49 | 32 |
| 6 | Vien | 272 | 150 | 4 | 16 | 12 |
| 7 | Zagr | 232 | 124 | 4 | 16 | 12 |
| 8 | Athe | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 9 | Mila | 300 | 198 | 7 | 49 | 34 |
| 10 | Zuri | 312 | 214 | 6 | 36 | 24 |
| 11 | Pari | 372 | 262 | 7 | 49 | 38 |
| 12 | Madr | 212 | 140 | 3 | 9 | 6 |
| 13 | Lisb | 212 | 140 | 3 | 9 | 6 |
| 14 | Dubl | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 15 | Lond | 372 | 282 | 8 | 64 | 46 |
| 16 | Amst | 484 | 382 | 8 | 64 | 36 |
| 17 | Brus | 336 | 210 | 6 | 36 | 30 |
| 18 | Luxe | 268 | 140 | 5 | 25 | 16 |

Anexo 20. Topología Europa, OSNR=25.5dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Oslo | 188 | 40 | 4 | 16 | 12 |
| 1 | Cope | 328 | 30 | 6 | 36 | 12 |
| 2 | Stoc | 276 | 76 | 6 | 36 | 20 |
| 3 | Mosc | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 4 | Berl | 332 | 142 | 8 | 64 | 42 |
| 5 | Prag | 356 | 76 | 7 | 49 | 32 |
| 6 | Vien | 272 | 34 | 4 | 16 | 12 |
| 7 | Zagr | 232 | 70 | 4 | 16 | 12 |
| 8 | Athe | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 9 | Mila | 300 | 122 | 7 | 49 | 34 |
| 10 | Zuri | 312 | 30 | 6 | 36 | 24 |
| 11 | Pari | 372 | 110 | 7 | 49 | 38 |
| 12 | Madr | 212 | 68 | 3 | 9 | 6 |
| 13 | Lisb | 212 | 68 | 3 | 9 | 6 |

| | | | | | | |
|----|------|-----|-----|---|----|----|
| 14 | Dubl | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 15 | Lond | 372 | 184 | 8 | 64 | 46 |
| 16 | Amst | 484 | 230 | 8 | 64 | 36 |
| 17 | Brus | 336 | 74 | 6 | 36 | 30 |
| 18 | Luxe | 268 | 18 | 5 | 25 | 16 |

Anexo 21. Topología Europa, OSNR=32dB y Ganancia Raman=0dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Oslo | 188 | 80 | 4 | 16 | 12 |
| 1 | Cope | 328 | 216 | 6 | 36 | 12 |
| 2 | Stoc | 276 | 170 | 6 | 36 | 20 |
| 3 | Mosc | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 4 | Berl | 332 | 236 | 8 | 64 | 42 |
| 5 | Prag | 356 | 256 | 7 | 49 | 32 |
| 6 | Vien | 272 | 44 | 4 | 16 | 12 |
| 7 | Zagr | 232 | 124 | 4 | 16 | 12 |
| 8 | Athe | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 9 | Mila | 300 | 198 | 7 | 49 | 34 |
| 10 | Zuri | 312 | 152 | 6 | 36 | 24 |
| 11 | Pari | 372 | 262 | 7 | 49 | 38 |
| 12 | Madr | 212 | 104 | 3 | 9 | 6 |
| 13 | Lisb | 212 | 104 | 3 | 9 | 6 |
| 14 | Dubl | 144 | 72 | 3 | 9 | 4 |
| 15 | Lond | 372 | 246 | 8 | 64 | 46 |
| 16 | Amst | 484 | 366 | 8 | 64 | 36 |
| 17 | Brus | 336 | 64 | 6 | 36 | 30 |
| 18 | Luxe | 268 | 82 | 5 | 25 | 16 |

Anexo 22. Topología Europa, OSNR=32dB y Ganancia Raman=7dB

| Node | Name | nbr_waves | nbr_3Rs | nbr_fibers | NWB1 | NWB2 |
|------|------|-----------|---------|------------|------|------|
| 0 | Oslo | 188 | 8 | 4 | 16 | 12 |
| 1 | Cope | 328 | 50 | 6 | 36 | 12 |
| 2 | Stoc | 276 | 32 | 6 | 36 | 20 |
| 3 | Mosc | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 4 | Berl | 332 | 66 | 8 | 64 | 42 |
| 5 | Prag | 356 | 34 | 7 | 49 | 32 |
| 6 | Vien | 272 | 16 | 4 | 16 | 12 |
| 7 | Zagr | 232 | 16 | 4 | 16 | 12 |
| 8 | Athe | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 9 | Mila | 300 | 54 | 7 | 49 | 34 |
| 10 | Zuri | 312 | 16 | 6 | 36 | 24 |
| 11 | Pari | 372 | 66 | 7 | 49 | 38 |

| | | | | | | |
|----|------|-----|-----|---|----|----|
| 12 | Madr | 212 | 10 | 3 | 9 | 6 |
| 13 | Lisb | 212 | 10 | 3 | 9 | 6 |
| 14 | Dubl | 144 | 0 | 3 | 9 | 4 |
| 15 | Lond | 372 | 106 | 8 | 64 | 46 |
| 16 | Amst | 484 | 74 | 8 | 64 | 36 |
| 17 | Brus | 336 | 16 | 6 | 36 | 30 |
| 18 | Luxe | 268 | 18 | 5 | 25 | 16 |

Anexo 23. Costo por nodo y arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|------|--------|------------------|-----------------|
| 0 | AKRN | \$105,651,238.00 | \$15,456,000.00 |
| 1 | ANHM | \$17,198,662.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | ATLN | \$135,842,668.00 | \$18,816,000.00 |
| 3 | BFLO | \$48,992,378.00 | \$8,064,000.00 |
| 4 | BLNG | \$36,705,806.00 | \$6,720,000.00 |
| 5 | CHCG | \$127,190,239.00 | \$17,472,000.00 |
| 6 | CHYN | \$100,466,809.00 | \$14,112,000.00 |
| 7 | CNCN | \$48,828,664.00 | \$9,408,000.00 |
| 8 | DTRT | \$8,858,519.00 | \$4,032,000.00 |
| 9 | EKRG | \$46,821,236.00 | \$12,768,000.00 |
| 10 | ELPS | \$90,898,380.00 | \$12,768,000.00 |
| 11 | FRFX | \$104,089,238.00 | \$15,456,000.00 |
| 12 | FTWO | \$109,401,524.00 | \$16,128,000.00 |
| 13 | HMLT | \$83,914,094.00 | \$12,096,000.00 |
| 14 | HSTN | \$33,035,663.00 | \$6,720,000.00 |
| 15 | JCSN | \$49,974,521.00 | \$8,736,000.00 |
| 16 | JCVL | \$33,177,663.00 | \$6,720,000.00 |
| 17 | KSCY | \$67,981,522.00 | \$11,424,000.00 |
| 18 | MDSN | \$39,119,806.00 | \$6,720,000.00 |
| 19 | MHVL | \$1,193,091.00 | \$8,064,000.00 |
| 20 | MMPH | \$59,470,807.00 | \$9,408,000.00 |
| 21 | NSVL | \$128,326,239.00 | \$17,472,000.00 |
| 22 | NWOR | \$59,328,807.00 | \$9,408,000.00 |
| 23 | NYCM | \$7,525,377.00 | \$8,064,000.00 |
| 24 | NYC2 | \$31,431,949.00 | \$8,064,000.00 |
| 25 | OKRC | \$66,985,379.00 | \$10,752,000.00 |
| 26 | OMAH | \$102,953,238.00 | \$15,456,000.00 |
| 27 | ORLD | \$6,384,233.00 | \$2,688,000.00 |
| 28 | ORVL | \$77,505,808.00 | \$12,096,000.00 |
| 29 | PHNX | \$74,655,522.00 | \$10,752,000.00 |
| 30 | RCDL | \$57,766,807.00 | \$9,408,000.00 |

| | | | |
|----|------|-----------------|-----------------|
| 31 | RILT | \$75,933,522.00 | \$10,752,000.00 |
| 32 | SKTN | \$49,808,950.00 | \$10,752,000.00 |
| 33 | SNJS | \$17,198,662.00 | \$4,032,000.00 |
| 34 | SPFD | \$48,992,378.00 | \$8,064,000.00 |
| 35 | STLS | \$57,908,807.00 | \$9,408,000.00 |
| 36 | STPL | \$37,557,806.00 | \$6,720,000.00 |
| 37 | STTL | \$18,801,091.00 | \$5,376,000.00 |
| 38 | TACM | \$18,801,091.00 | \$5,376,000.00 |
| 39 | WASH | \$83,914,094.00 | \$12,096,000.00 |

Anexo 24. Costo por nodo y arquitectura para la topología de USA con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|------|--------|-----------------|-----------------|
| 0 | AKRN | \$33,901,522.00 | \$15,456,000.00 |
| 1 | ANHM | \$946,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | ATLN | \$62,574,952.00 | \$18,816,000.00 |
| 3 | BFLO | \$19,119,663.00 | \$8,064,000.00 |
| 4 | BLNG | \$25,391,520.00 | \$6,720,000.00 |
| 5 | CHCG | \$70,362,809.00 | \$17,472,000.00 |
| 6 | CHYN | \$90,364,666.00 | \$14,112,000.00 |
| 7 | CNCN | \$14,411,806.00 | \$9,408,000.00 |
| 8 | DTRT | \$1,656,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 9 | EKRG | \$29,792,807.00 | \$12,768,000.00 |
| 10 | ELPS | \$79,512,094.00 | \$12,768,000.00 |
| 11 | FRFX | \$37,167,522.00 | \$15,456,000.00 |
| 12 | FTWO | \$60,070,237.00 | \$16,128,000.00 |
| 13 | HMLT | \$31,922,807.00 | \$12,096,000.00 |
| 14 | HSTN | \$12,269,091.00 | \$6,720,000.00 |
| 15 | JCSN | \$14,291,663.00 | \$8,736,000.00 |
| 16 | JCVL | \$7,441,091.00 | \$6,720,000.00 |
| 17 | KSCY | \$25,550,521.00 | \$11,424,000.00 |
| 18 | MDSN | \$10,565,091.00 | \$6,720,000.00 |
| 19 | MHVL | \$15,025,520.00 | \$8,064,000.00 |
| 20 | MMPH | \$26,302,092.00 | \$9,408,000.00 |
| 21 | NSVL | \$50,712,380.00 | \$17,472,000.00 |
| 22 | NWOR | \$21,065,949.00 | \$9,408,000.00 |
| 23 | NYCM | \$5,565,234.00 | \$8,064,000.00 |
| 24 | NYC2 | \$10,081,377.00 | \$8,064,000.00 |
| 25 | OKRC | \$29,822,378.00 | \$10,752,000.00 |
| 26 | OMAH | \$70,734,380.00 | \$15,456,000.00 |
| 27 | ORLD | \$367,947.00 | \$2,688,000.00 |
| 28 | ORVL | \$77,079,808.00 | \$12,096,000.00 |

| | | | |
|----|------|-----------------|-----------------|
| 29 | PHNX | \$11,835,949.00 | \$10,752,000.00 |
| 30 | RCDL | \$22,343,949.00 | \$9,408,000.00 |
| 31 | RILT | \$48,388,950.00 | \$10,752,000.00 |
| 32 | SKTN | \$6,885,806.00 | \$10,752,000.00 |
| 33 | SNJS | \$804,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 34 | SPFD | \$12,353,377.00 | \$8,064,000.00 |
| 35 | STLS | \$20,213,949.00 | \$9,408,000.00 |
| 36 | STPL | \$26,243,520.00 | \$6,720,000.00 |
| 37 | STTL | \$13,294,948.00 | \$5,376,000.00 |
| 38 | TACM | \$764,519.00 | \$5,376,000.00 |
| 39 | WASH | \$23,420,521.00 | \$12,096,000.00 |

Anexo 25. Costo por nodo y arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|------------------|------------------|-----------------|
| 0 | AKRN | \$335,741,120.00 | \$91,069,920.00 | \$15,456,000.00 |
| 1 | ANHM | \$26,954,674.00 | \$17,385,664.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | ATLN | \$574,405,314.00 | \$135,798,944.00 | \$18,816,000.00 |
| 3 | BFLO | \$103,513,382.00 | \$49,083,632.00 | \$8,064,000.00 |
| 4 | BLNG | \$70,862,366.00 | \$37,387,216.00 | \$6,720,000.00 |
| 5 | CHCG | \$494,424,978.00 | \$123,388,368.00 | \$17,472,000.00 |
| 6 | CHYN | \$347,124,656.00 | \$100,874,736.00 | \$14,112,000.00 |
| 7 | CNCN | \$93,407,846.00 | \$39,767,456.00 | \$9,408,000.00 |
| 8 | DTRT | \$10,633,748.00 | \$3,442,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 9 | EKRG | \$145,460,358.00 | \$37,216,048.00 | \$12,768,000.00 |
| 10 | ELPS | \$301,079,238.00 | \$90,908,608.00 | \$12,768,000.00 |
| 11 | FRFX | \$352,599,938.00 | \$93,146,848.00 | \$15,456,000.00 |
| 12 | FTWO | \$423,357,442.00 | \$109,670,512.00 | \$16,128,000.00 |
| 13 | HMLT | \$254,770,592.00 | \$77,998,832.00 | \$12,096,000.00 |
| 14 | HSTN | \$54,448,990.00 | \$27,603,440.00 | \$6,720,000.00 |
| 15 | JCSN | \$109,235,112.00 | \$50,726,992.00 | \$8,736,000.00 |
| 16 | JCVL | \$26,217,376.00 | \$9,131,376.00 | \$6,720,000.00 |
| 17 | KSCY | \$200,785,008.00 | \$64,678,528.00 | \$11,424,000.00 |
| 18 | MDSN | \$64,259,648.00 | \$34,462,448.00 | \$6,720,000.00 |
| 19 | MHVL | \$18,951,840.00 | \$1,602,720.00 | \$8,064,000.00 |
| 20 | MMPH | \$156,303,760.00 | \$55,641,760.00 | \$9,408,000.00 |
| 21 | NSVL | \$496,696,978.00 | \$123,292,288.00 | \$17,472,000.00 |
| 22 | NWOR | \$155,309,760.00 | \$55,437,120.00 | \$9,408,000.00 |
| 23 | NYCM | \$18,951,840.00 | \$1,602,720.00 | \$8,064,000.00 |
| 24 | NYC2 | \$18,951,840.00 | \$1,602,720.00 | \$8,064,000.00 |
| 25 | OKRC | \$189,586,438.00 | \$63,093,648.00 | \$10,752,000.00 |
| 26 | OMAH | \$389,000,474.00 | \$103,477,744.00 | \$15,456,000.00 |

| | | | | |
|----|------|------------------|-----------------|-----------------|
| 27 | ORLD | \$11,861,296.00 | \$6,788,896.00 | \$2,688,000.00 |
| 28 | ORVL | \$243,462,054.00 | \$77,872,304.00 | \$12,096,000.00 |
| 29 | PHNX | \$205,269,776.00 | \$68,900,176.00 | \$10,752,000.00 |
| 30 | RCDL | \$105,886,344.00 | \$47,378,224.00 | \$9,408,000.00 |
| 31 | RILT | \$159,198,662.00 | \$50,428,112.00 | \$10,752,000.00 |
| 32 | SKTN | \$159,198,662.00 | \$50,428,112.00 | \$10,752,000.00 |
| 33 | SNJS | \$26,954,674.00 | \$17,385,664.00 | \$4,032,000.00 |
| 34 | SPFD | \$103,513,382.00 | \$49,083,632.00 | \$8,064,000.00 |
| 35 | STLS | \$155,309,760.00 | \$54,647,760.00 | \$9,408,000.00 |
| 36 | STPL | \$71,714,366.00 | \$37,976,096.00 | \$6,720,000.00 |
| 37 | STTL | \$36,890,912.00 | \$19,015,552.00 | \$5,376,000.00 |
| 38 | TACM | \$36,890,912.00 | \$19,015,552.00 | \$5,376,000.00 |
| 39 | WASH | \$254,770,592.00 | \$77,998,832.00 | \$12,096,000.00 |

Anexo 26. Costo por nodo y arquitectura para la topología de USA con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|------------------|-----------------|-----------------|
| 0 | AKRN | \$136,872,024.00 | \$22,034,704.00 | \$15,456,000.00 |
| 1 | ANHM | \$9,781,748.00 | \$2,590,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | ATLN | \$202,254,912.00 | \$28,114,352.00 | \$18,816,000.00 |
| 3 | BFLO | \$27,594,318.00 | \$7,367,488.00 | \$8,064,000.00 |
| 4 | BLNG | \$52,460,990.00 | \$26,141,680.00 | \$6,720,000.00 |
| 5 | CHCG | \$225,557,286.00 | \$42,539,616.00 | \$17,472,000.00 |
| 6 | CHYN | \$258,631,126.00 | \$72,192,896.00 | \$14,112,000.00 |
| 7 | CNCN | \$37,942,576.00 | \$8,671,616.00 | \$9,408,000.00 |
| 8 | DTRT | \$8,361,748.00 | \$1,170,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 9 | EKRG | \$63,742,006.00 | \$10,890,976.00 | \$12,768,000.00 |
| 10 | ELPS | \$145,318,358.00 | \$36,810,928.00 | \$12,768,000.00 |
| 11 | FRFX | \$133,748,024.00 | \$17,068,864.00 | \$15,456,000.00 |
| 12 | FTWO | \$188,531,208.00 | \$34,586,528.00 | \$16,128,000.00 |
| 13 | HMLT | \$69,788,774.00 | \$16,148,384.00 | \$12,096,000.00 |
| 14 | HSTN | \$27,069,376.00 | \$9,457,136.00 | \$6,720,000.00 |
| 15 | JCSN | \$47,255,344.00 | \$17,984,384.00 | \$8,736,000.00 |
| 16 | JCVL | \$18,642,308.00 | \$4,928,608.00 | \$6,720,000.00 |
| 17 | KSCY | \$63,273,104.00 | \$14,300,384.00 | \$11,424,000.00 |
| 18 | MDSN | \$17,648,308.00 | \$3,934,608.00 | \$6,720,000.00 |
| 19 | MHVL | \$22,766,318.00 | \$2,539,488.00 | \$8,064,000.00 |
| 20 | MMPH | \$47,953,294.00 | \$15,004,384.00 | \$9,408,000.00 |
| 21 | NSVL | \$161,237,734.00 | \$17,822,464.00 | \$17,472,000.00 |
| 22 | NWOR | \$41,350,576.00 | \$12,868,976.00 | \$9,408,000.00 |
| 23 | NYCM | \$22,482,318.00 | \$2,255,488.00 | \$8,064,000.00 |
| 24 | NYC2 | \$24,754,318.00 | \$4,527,488.00 | \$8,064,000.00 |

| | | | | |
|----|------|------------------|-----------------|-----------------|
| 25 | OKRC | \$52,179,176.00 | \$12,204,736.00 | \$10,752,000.00 |
| 26 | OMAH | \$147,401,062.00 | \$22,486,992.00 | \$15,456,000.00 |
| 27 | ORLD | \$2,610,640.00 | \$797,360.00 | \$2,688,000.00 |
| 28 | ORVL | \$133,252,688.00 | \$33,116,928.00 | \$12,096,000.00 |
| 29 | PHNX | \$90,100,808.00 | \$31,329,568.00 | \$10,752,000.00 |
| 30 | RCDL | \$48,805,294.00 | \$15,856,384.00 | \$9,408,000.00 |
| 31 | RILT | \$31,671,040.00 | \$2,663,200.00 | \$10,752,000.00 |
| 32 | SKTN | \$89,958,808.00 | \$31,713,808.00 | \$10,752,000.00 |
| 33 | SNJS | \$8,503,748.00 | \$1,312,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 34 | SPFD | \$26,600,318.00 | \$6,373,488.00 | \$8,064,000.00 |
| 35 | STLS | \$33,385,918.00 | \$7,592,848.00 | \$9,408,000.00 |
| 36 | STPL | \$51,466,990.00 | \$24,884,560.00 | \$6,720,000.00 |
| 37 | STTL | \$11,169,138.00 | \$1,863,248.00 | \$5,376,000.00 |
| 38 | TACM | \$11,169,138.00 | \$1,863,248.00 | \$5,376,000.00 |
| 39 | WASH | \$60,350,336.00 | \$11,377,616.00 | \$12,096,000.00 |

Anexo 27. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|------|--------|-----------------|-----------------|
| 0 | Asah | \$367,947.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Sapp | \$3,178,519.00 | \$4,704,000.00 |
| 2 | Mori | \$6,021,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 3 | Haka | \$4,490,948.00 | \$6,720,000.00 |
| 4 | Send | \$6,505,520.00 | \$9,408,000.00 |
| 5 | Naga | \$26,521,665.00 | \$16,800,000.00 |
| 6 | Hita | \$10,315,663.00 | \$9,408,000.00 |
| 7 | Yoko | \$2,394,805.00 | \$6,048,000.00 |
| 8 | Kawa | \$5,311,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 9 | Maeb | \$23,107,379.00 | \$16,128,000.00 |
| 10 | Naga | \$18,902,235.00 | \$11,424,000.00 |
| 11 | Kofu | \$5,821,377.00 | \$8,736,000.00 |
| 12 | Fuji | \$2,962,805.00 | \$6,048,000.00 |
| 13 | Mats | \$6,197,663.00 | \$10,080,000.00 |
| 14 | Hama | \$804,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 15 | Kago | \$11,908,664.00 | \$14,112,000.00 |
| 16 | Gifu | \$22,683,522.00 | \$16,800,000.00 |
| 17 | Toya | \$44,001,951.00 | \$16,128,000.00 |
| 18 | Fuku | \$38,733,665.00 | \$15,456,000.00 |
| 19 | Tott | \$14,391,949.00 | \$10,080,000.00 |
| 20 | Kobe | \$16,717,379.00 | \$16,800,000.00 |
| 21 | Kyot | \$14,770,378.00 | \$12,096,000.00 |
| 22 | Osak | \$25,706,237.00 | \$20,160,000.00 |

| | | | |
|----|------|-----------------|-----------------|
| 23 | Saka | \$12,019,663.00 | \$9,408,000.00 |
| 24 | Nara | \$10,540,092.00 | \$11,424,000.00 |
| 25 | Waka | \$562,233.00 | \$4,032,000.00 |
| 26 | Toku | \$464,090.00 | \$3,360,000.00 |
| 27 | Taka | \$17,314,521.00 | \$12,768,000.00 |
| 28 | Okay | \$3,883,949.00 | \$11,424,000.00 |
| 29 | Yona | \$14,553,806.00 | \$9,408,000.00 |
| 30 | Yama | \$5,629,663.00 | \$10,080,000.00 |
| 31 | Hiro | \$10,009,806.00 | \$10,080,000.00 |
| 32 | Kita | \$8,945,377.00 | \$8,064,000.00 |
| 33 | Fuku | \$367,947.00 | \$2,688,000.00 |
| 34 | Kuma | \$4,885,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 35 | Kago | \$2,366,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 36 | Miya | \$2,650,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 37 | Nobe | \$8,305,806.00 | \$10,080,000.00 |
| 38 | Mats | \$7,416,092.00 | \$12,096,000.00 |
| 39 | Toky | \$6,623,663.00 | \$10,080,000.00 |

Anexo 28. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|-------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 0 | Asah | \$367,947.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Sapp | \$1,758,519.00 | \$4,704,000.00 |
| 2 | Mori | \$6,021,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 3 | Haka | \$3,780,948.00 | \$6,720,000.00 |
| 4 | Send | \$6,079,520.00 | \$9,408,000.00 |
| 5 | Naga | \$22,257,522.00 | \$16,800,000.00 |
| 6 | Hita | \$6,505,520.00 | \$9,408,000.00 |
| 7 | Yoko | \$1,542,805.00 | \$6,048,000.00 |
| 8 | Kawa | \$3,323,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 9 | Maeb | \$18,563,236.00 | \$16,128,000.00 |
| 10 | Naga | \$12,670,092.00 | \$11,424,000.00 |
| 11 | Kofu | \$3,975,377.00 | \$8,736,000.00 |
| 12 | Fuji | \$2,536,805.00 | \$6,048,000.00 |
| 13 | Mats | \$6,055,663.00 | \$10,080,000.00 |
| 14 | Hama | \$804,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 15 | Kago | \$12,618,664.00 | \$14,112,000.00 |
| 16 | Gifu | \$18,705,379.00 | \$16,800,000.00 |
| 17 | Toya | \$40,727,808.00 | \$16,128,000.00 |
| 18 | Fuku | \$29,213,379.00 | \$15,456,000.00 |
| 19 | Tott | \$13,965,949.00 | \$10,080,000.00 |
| 20 | Kobe | \$12,883,236.00 | \$16,800,000.00 |

| | | | |
|----|------|-----------------|-----------------|
| 21 | Kyot | \$15,480,378.00 | \$12,096,000.00 |
| 22 | Osak | \$21,872,237.00 | \$20,160,000.00 |
| 23 | Saka | \$13,013,663.00 | \$9,408,000.00 |
| 24 | Nara | \$10,398,092.00 | \$11,424,000.00 |
| 25 | Waka | \$562,233.00 | \$4,032,000.00 |
| 26 | Toku | \$464,090.00 | \$3,360,000.00 |
| 27 | Taka | \$16,746,521.00 | \$12,768,000.00 |
| 28 | Okay | \$5,587,949.00 | \$11,424,000.00 |
| 29 | Yona | \$8,611,663.00 | \$9,408,000.00 |
| 30 | Yama | \$13,823,949.00 | \$10,080,000.00 |
| 31 | Hiro | \$8,589,806.00 | \$10,080,000.00 |
| 32 | Kita | \$5,565,234.00 | \$8,064,000.00 |
| 33 | Fuku | \$367,947.00 | \$2,688,000.00 |
| 34 | Kuma | \$5,027,091.00 | \$7,392,000.00 |
| 35 | Kago | \$1,656,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 36 | Miya | \$2,508,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 37 | Nobe | \$7,879,806.00 | \$10,080,000.00 |
| 38 | Mats | \$7,968,235.00 | \$12,096,000.00 |
| 39 | Toky | \$10,435,806.00 | \$10,080,000.00 |

Anexo 29. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|------------------|-----------------|-----------------|
| 0 | Asah | \$2,610,640.00 | \$534,240.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Sapp | \$9,783,968.00 | \$2,955,488.00 | \$4,704,000.00 |
| 2 | Mori | \$21,590,608.00 | \$5,293,968.00 | \$7,392,000.00 |
| 3 | Haka | \$16,512,308.00 | \$2,798,608.00 | \$6,720,000.00 |
| 4 | Send | \$30,829,918.00 | \$5,563,088.00 | \$9,408,000.00 |
| 5 | Naga | \$135,733,526.00 | \$11,871,936.00 | \$16,800,000.00 |
| 6 | Hita | \$29,835,918.00 | \$4,042,848.00 | \$9,408,000.00 |
| 7 | Yoko | \$10,376,370.00 | \$2,386,080.00 | \$6,048,000.00 |
| 8 | Kawa | \$20,028,608.00 | \$4,258,208.00 | \$7,392,000.00 |
| 9 | Maeb | \$112,528,518.00 | \$5,468,248.00 | \$16,128,000.00 |
| 10 | Naga | \$35,350,990.00 | \$2,928,320.00 | \$11,424,000.00 |
| 11 | Kofu | \$25,420,088.00 | \$2,904,848.00 | \$8,736,000.00 |
| 12 | Fuji | \$13,953,868.00 | \$3,443,968.00 | \$6,048,000.00 |
| 13 | Mats | \$28,191,150.00 | \$2,398,080.00 | \$10,080,000.00 |
| 14 | Hama | \$5,873,760.00 | \$801,360.00 | \$4,032,000.00 |
| 15 | Kago | \$61,428,968.00 | \$4,236,448.00 | \$14,112,000.00 |
| 16 | Gifu | \$120,944,488.00 | \$5,186,248.00 | \$16,800,000.00 |
| 17 | Toya | \$114,658,518.00 | \$6,940,448.00 | \$16,128,000.00 |
| 18 | Fuku | \$105,716,848.00 | \$6,370,448.00 | \$15,456,000.00 |

| | | | | |
|----|------|------------------|----------------|-----------------|
| 19 | Tott | \$28,191,150.00 | \$2,661,200.00 | \$10,080,000.00 |
| 20 | Kobe | \$122,222,488.00 | \$7,122,048.00 | \$16,800,000.00 |
| 21 | Kyot | \$42,641,640.00 | \$2,404,080.00 | \$12,096,000.00 |
| 22 | Osak | \$170,758,838.00 | \$8,326,528.00 | \$20,160,000.00 |
| 23 | Saka | \$28,415,918.00 | \$2,096,608.00 | \$9,408,000.00 |
| 24 | Nara | \$43,292,408.00 | \$3,317,968.00 | \$11,424,000.00 |
| 25 | Waka | \$5,873,760.00 | \$801,360.00 | \$4,032,000.00 |
| 26 | Toku | \$4,079,050.00 | \$799,360.00 | \$3,360,000.00 |
| 27 | Taka | \$51,605,568.00 | \$3,948,448.00 | \$12,768,000.00 |
| 28 | Okay | \$43,008,408.00 | \$3,165,528.00 | \$11,424,000.00 |
| 29 | Yona | \$32,959,918.00 | \$6,640,608.00 | \$9,408,000.00 |
| 30 | Yama | \$35,445,808.00 | \$6,437,968.00 | \$10,080,000.00 |
| 31 | Hiro | \$33,457,808.00 | \$5,107,768.00 | \$10,080,000.00 |
| 32 | Kita | \$25,180,318.00 | \$6,400,648.00 | \$8,064,000.00 |
| 33 | Fuku | \$2,610,640.00 | \$797,360.00 | \$2,688,000.00 |
| 34 | Kuma | \$19,744,608.00 | \$3,711,088.00 | \$7,392,000.00 |
| 35 | Kago | \$8,503,748.00 | \$1,312,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 36 | Miya | \$8,503,748.00 | \$1,312,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 37 | Nobe | \$32,747,808.00 | \$4,529,328.00 | \$10,080,000.00 |
| 38 | Mats | \$48,555,958.00 | \$5,234,888.00 | \$12,096,000.00 |
| 39 | Toky | \$33,173,808.00 | \$4,165,968.00 | \$10,080,000.00 |

Anexo 30. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Japón con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|------------------|----------------|-----------------|
| 0 | Asah | \$2,610,640.00 | \$534,240.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Sapp | \$8,931,968.00 | \$2,103,488.00 | \$4,704,000.00 |
| 2 | Mori | \$20,738,608.00 | \$4,441,968.00 | \$7,392,000.00 |
| 3 | Haka | \$16,086,308.00 | \$2,372,608.00 | \$6,720,000.00 |
| 4 | Send | \$24,911,320.00 | \$2,922,320.00 | \$9,408,000.00 |
| 5 | Naga | \$123,500,488.00 | \$8,663,168.00 | \$16,800,000.00 |
| 6 | Hita | \$28,983,918.00 | \$3,190,848.00 | \$9,408,000.00 |
| 7 | Yoko | \$10,376,370.00 | \$2,386,080.00 | \$6,048,000.00 |
| 8 | Kawa | \$19,460,608.00 | \$3,690,208.00 | \$7,392,000.00 |
| 9 | Maeb | \$103,078,080.00 | \$4,389,480.00 | \$16,128,000.00 |
| 10 | Naga | \$35,350,990.00 | \$2,928,320.00 | \$11,424,000.00 |
| 11 | Kofu | \$25,136,088.00 | \$2,620,848.00 | \$8,736,000.00 |
| 12 | Fuji | \$13,527,868.00 | \$3,017,968.00 | \$6,048,000.00 |
| 13 | Mats | \$28,191,150.00 | \$2,398,080.00 | \$10,080,000.00 |
| 14 | Hama | \$5,873,760.00 | \$801,360.00 | \$4,032,000.00 |
| 15 | Kago | \$56,050,470.00 | \$3,725,680.00 | \$14,112,000.00 |
| 16 | Gifu | \$120,944,488.00 | \$5,186,248.00 | \$16,800,000.00 |

| | | | | |
|----|------|------------------|----------------|-----------------|
| 17 | Toya | \$103,078,080.00 | \$3,731,680.00 | \$16,128,000.00 |
| 18 | Fuku | \$65,989,990.00 | \$3,729,680.00 | \$15,456,000.00 |
| 19 | Tott | \$28,191,150.00 | \$2,661,200.00 | \$10,080,000.00 |
| 20 | Kobe | \$111,451,750.00 | \$5,049,280.00 | \$16,800,000.00 |
| 21 | Kyot | \$42,641,640.00 | \$2,404,080.00 | \$12,096,000.00 |
| 22 | Osak | \$158,214,600.00 | \$6,111,760.00 | \$20,160,000.00 |
| 23 | Saka | \$24,911,320.00 | \$1,869,840.00 | \$9,408,000.00 |
| 24 | Nara | \$42,866,408.00 | \$2,891,968.00 | \$11,424,000.00 |
| 25 | Waka | \$5,873,760.00 | \$801,360.00 | \$4,032,000.00 |
| 26 | Toku | \$4,079,050.00 | \$799,360.00 | \$3,360,000.00 |
| 27 | Taka | \$46,911,190.00 | \$3,721,680.00 | \$12,768,000.00 |
| 28 | Okay | \$35,350,990.00 | \$2,796,760.00 | \$11,424,000.00 |
| 29 | Yona | \$28,557,918.00 | \$2,238,608.00 | \$9,408,000.00 |
| 30 | Yama | \$32,605,808.00 | \$3,597,968.00 | \$10,080,000.00 |
| 31 | Hiro | \$32,605,808.00 | \$4,255,768.00 | \$10,080,000.00 |
| 32 | Kita | \$23,050,318.00 | \$4,270,648.00 | \$8,064,000.00 |
| 33 | Fuku | \$2,610,640.00 | \$797,360.00 | \$2,688,000.00 |
| 34 | Kuma | \$20,454,608.00 | \$4,421,088.00 | \$7,392,000.00 |
| 35 | Kago | \$9,639,748.00 | \$2,448,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 36 | Miya | \$8,361,748.00 | \$1,170,128.00 | \$4,032,000.00 |
| 37 | Nobe | \$33,031,808.00 | \$4,813,328.00 | \$10,080,000.00 |
| 38 | Mats | \$47,419,958.00 | \$4,098,888.00 | \$12,096,000.00 |
| 39 | Toky | \$28,191,150.00 | \$2,661,200.00 | \$10,080,000.00 |

Anexo 31. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|------|--------|-----------------|----------------|
| 0 | Oslo | \$8,798,233.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Cope | \$19,150,805.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | Stoc | \$15,352,662.00 | \$4,032,000.00 |
| 3 | Mosc | \$5,479,947.00 | \$2,016,000.00 |
| 4 | Berl | \$18,517,091.00 | \$5,376,000.00 |
| 5 | Prag | \$19,542,948.00 | \$4,704,000.00 |
| 6 | Vien | \$11,212,233.00 | \$2,688,000.00 |
| 7 | Zagr | \$9,366,233.00 | \$2,688,000.00 |
| 8 | Athe | \$5,479,947.00 | \$2,016,000.00 |
| 9 | Mila | \$15,032,805.00 | \$4,704,000.00 |
| 10 | Zuri | \$16,062,662.00 | \$4,032,000.00 |
| 11 | Pari | \$19,684,948.00 | \$4,704,000.00 |
| 12 | Madr | \$10,404,090.00 | \$2,016,000.00 |
| 13 | Lisb | \$10,404,090.00 | \$2,016,000.00 |
| 14 | Dubl | \$5,479,947.00 | \$2,016,000.00 |

| | | | |
|----|------|-----------------|----------------|
| 15 | Lond | \$21,215,091.00 | \$5,376,000.00 |
| 16 | Amst | \$28,427,234.00 | \$5,376,000.00 |
| 17 | Brus | \$15,778,662.00 | \$4,032,000.00 |
| 18 | Luxe | \$10,602,376.00 | \$3,360,000.00 |

Anexo 32. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 25.5dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | DSM | Electrónico |
|------|--------|-----------------|----------------|
| 0 | Oslo | \$3,304,090.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Cope | \$2,792,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | Stoc | \$6,058,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 3 | Mosc | \$273,804.00 | \$2,016,000.00 |
| 4 | Berl | \$11,056,805.00 | \$5,376,000.00 |
| 5 | Prag | \$6,160,519.00 | \$4,704,000.00 |
| 6 | Vien | \$2,878,090.00 | \$2,688,000.00 |
| 7 | Zagr | \$5,434,090.00 | \$2,688,000.00 |
| 8 | Athe | \$273,804.00 | \$2,016,000.00 |
| 9 | Mila | \$9,530,662.00 | \$4,704,000.00 |
| 10 | Zuri | \$2,792,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 11 | Pari | \$8,678,662.00 | \$4,704,000.00 |
| 12 | Madr | \$5,195,947.00 | \$2,016,000.00 |
| 13 | Lisb | \$5,195,947.00 | \$2,016,000.00 |
| 14 | Dubl | \$273,804.00 | \$2,016,000.00 |
| 15 | Lond | \$14,146,948.00 | \$5,376,000.00 |
| 16 | Amst | \$17,412,948.00 | \$5,376,000.00 |
| 17 | Brus | \$5,916,376.00 | \$4,032,000.00 |
| 18 | Luxe | \$1,840,233.00 | \$3,360,000.00 |

Anexo 33. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 0dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|-----------------|-----------------|----------------|
| 0 | Oslo | \$9,841,818.00 | \$7,351,488.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Cope | \$25,960,674.00 | \$17,181,024.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | Stoc | \$22,694,674.00 | \$14,967,504.00 | \$4,032,000.00 |
| 3 | Mosc | \$7,805,408.00 | \$5,729,008.00 | \$2,016,000.00 |
| 4 | Berl | \$32,581,844.00 | \$22,551,824.00 | \$5,376,000.00 |
| 5 | Prag | \$34,084,612.00 | \$22,738,992.00 | \$4,704,000.00 |
| 6 | Vien | \$7,285,818.00 | \$4,795,488.00 | \$2,688,000.00 |
| 7 | Zagr | \$14,843,296.00 | \$10,560,256.00 | \$2,688,000.00 |
| 8 | Athe | \$7,805,408.00 | \$5,729,008.00 | \$2,016,000.00 |
| 9 | Mila | \$27,467,404.00 | \$18,799,344.00 | \$4,704,000.00 |
| 10 | Zuri | \$19,380,736.00 | \$14,130,976.00 | \$4,032,000.00 |

| | | | | |
|----|------|-----------------|-----------------|----------------|
| 11 | Pari | \$34,510,612.00 | \$23,954,352.00 | \$4,704,000.00 |
| 12 | Madr | \$11,628,586.00 | \$8,348,896.00 | \$2,016,000.00 |
| 13 | Lisb | \$11,628,586.00 | \$8,348,896.00 | \$2,016,000.00 |
| 14 | Dubl | \$7,805,408.00 | \$5,729,008.00 | \$2,016,000.00 |
| 15 | Lond | \$36,748,912.00 | \$23,872,832.00 | \$5,376,000.00 |
| 16 | Amst | \$48,231,390.00 | \$31,162,000.00 | \$5,376,000.00 |
| 17 | Brus | \$12,621,748.00 | \$8,587,568.00 | \$4,032,000.00 |
| 18 | Luxe | \$13,982,516.00 | \$8,106,496.00 | \$3,360,000.00 |

Anexo 34. Costo por nodo y arquitectura para la topología de Europa con OSNR de 32dB y ganancia Raman de 7dB

| Nodo | Nombre | B&S | PLC | Electrónico |
|------|--------|-----------------|-----------------|----------------|
| 0 | Oslo | \$4,729,818.00 | \$2,239,488.00 | \$2,688,000.00 |
| 1 | Cope | \$11,627,748.00 | \$5,225,488.00 | \$4,032,000.00 |
| 2 | Stoc | \$10,349,748.00 | \$4,999,968.00 | \$4,032,000.00 |
| 3 | Mosc | \$900,270.00 | \$532,240.00 | \$2,016,000.00 |
| 4 | Berl | \$15,145,138.00 | \$10,312,288.00 | \$5,376,000.00 |
| 5 | Prag | \$10,919,968.00 | \$6,722,688.00 | \$4,704,000.00 |
| 6 | Vien | \$5,297,818.00 | \$2,807,488.00 | \$2,688,000.00 |
| 7 | Zagr | \$5,297,818.00 | \$2,807,488.00 | \$2,688,000.00 |
| 8 | Athe | \$900,270.00 | \$532,240.00 | \$2,016,000.00 |
| 9 | Mila | \$12,339,968.00 | \$8,405,808.00 | \$4,704,000.00 |
| 10 | Zuri | \$9,213,748.00 | \$4,390,208.00 | \$4,032,000.00 |
| 11 | Pari | \$13,191,968.00 | \$9,784,048.00 | \$4,704,000.00 |
| 12 | Madr | \$3,403,408.00 | \$1,590,128.00 | \$2,016,000.00 |
| 13 | Lisb | \$3,403,408.00 | \$1,590,128.00 | \$2,016,000.00 |
| 14 | Dubl | \$900,270.00 | \$532,240.00 | \$2,016,000.00 |
| 15 | Lond | \$20,852,636.00 | \$13,763,296.00 | \$5,376,000.00 |
| 16 | Amst | \$15,713,138.00 | \$10,090,928.00 | \$5,376,000.00 |
| 17 | Brus | \$9,213,748.00 | \$5,179,568.00 | \$4,032,000.00 |
| 18 | Luxe | \$7,234,528.00 | \$3,477,728.00 | \$3,360,000.00 |

Bibliografía

- (Antoniades, 1999). ANTONIADES, N.; YOO, S. J. B.; BALA, Krishna; ELLINAS, Gregorios; STERN, Thomas E. "An architecture for a wavelength-interchanging cross-connect utilizing parametric wavelength converters". Journal of lightwave technology, Vol. 17, No. 7, Julio de 1999.
- (Ash y Ferguson, 2001). ASH, J. D.; FERGUSON, S. P. "The evolution of the telecommunications transport architecture: from megabit/s to terabit/s". Electronics & communication engineering journal. February 2001.
- (Avatar y Legba, 2002). AVATAR y LEGBA. "Fibra Óptica". 2002.
http://usuarios.lycos.es/Fibra_Optica.
- (Black, 2002). BLACK, Uyles. "Optical Networks: Third Generation Transport Systems". Prentice Hall PTR, 2002.
- (Cahn, 1998). CAHN, Robert S. "Wide Area Network Design". Morgan Kaufmann, 1998.
- (Castañón, 2005). CASTAÑÓN, Gerardo. "An optical cross connected architecture based on planar lightwave circuit switches". 0-7803-8924-7/05/\$20.00 (C) 2005 IEEE.
- (Castañón, 2004). CASTAÑÓN, Gerardo. "Performance Requirements for Semi-Transparent DWDM Networks". Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking III, edited by B. B. Dingel, W. Weiershausen, A. K. Dutta, K.-I. Sato, Proceedings of SPIE Vol. 5596 (SPIE, Bellingham, WA, 2004) · 0277-786X/04/\$15 · doi: 10.1117/12.571692.
- (Castañón, 2002). CASTAÑÓN, Gerardo. "Redes transparentes: Habilitando arquitecturas y tecnología de punta". Propuesta de Investigación de redes ópticas transparentes, redes de larga distancia y de alta velocidad que forman parte de las áreas prioritarias de las tecnologías de información y comunicaciones. Centro de Electrónica y Telecomunicaciones, ITESM. 2002.
- (Chomycz, 1998). CHOMYCZ, Bob. "Instalaciones de Fibra Óptica, Fundamentos, Técnicas y Aplicaciones". McGraw Hill/Interamericana de España, S. A. U., 1998.
- (Decusatis, 1998). DECUSATIS, Casimer. "Handbook of Fiber Optic Data Communication". Academic Press, 1998.

- (Fiber-Optics, 2005). FIBER-OPTICS. "Couplers & Splitters". Force, Incorporated, 2005. <http://www.fiber-optics.info/articles/couple-split.htm>.
- (Fiber-Optics, 2005). FIBER-OPTICS. "Optical Amplifiers". Force, Incorporated, 2005. <http://www.fiber-optics.info/articles/op-amp.htm>.
- (Frazão, 2002). FRAZÃO, O.; CARVALHO, J. P.; TERROSO, I.; BARBOSA, V.; SALGADO, H. M. "A novel architecture of an optical cross-connect based on tuneable fibre bragg gratings and optical circulators". INESC Porto, FEUP. 2002.
- (IEC, 2002). IEC (International Engineering Consortium). "Fiber To The Home". 2002. <http://www.iec.org>.
- (IEC, 2004). IEC (International Engineering Consortium). "Optical Networks". 2004. http://www.iec.org/online/tutorials/opt_net/index.html.
- (Kartalopoulos, 2000). KARTALOPOULOS, Stamatios V. "Introduction to DWDM Technology". IEEE Press. 2000.
- (Kuhlman, 1997). KUHLMAN, Federico; ALONSO C., Antonio. "Información y telecomunicaciones". Publicado por el FCE, México 1997. http://www.cft.gob.mx/html/la_era/info_tel/it0.html.
- (Lascomm, 2005). LASCOMM. "Fiber Optic Basics". 2002-2005. http://www.lascomm.com/tutorials/tut_fobasics.htm.
- (Light Reading, 2002). LIGHT READING. "Tutorial on Grooming Switches". Febrero 04, 2002. http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=11329&print=true.
- (Linktionary, 2001). LINKTIONARY. "Fiber-Optic Cable". 2001. <http://www.linktionary.com/f/fiber-optic.html>.
- (Malagueña, 2002). MALAGUERA, José. Ciencia Física. Fibra Óptica. 2002. <http://cienciafisica.com/fibra.htm>.
- (Menyuk, Holzloehner y Lima, 2002). MENYUK, C.R.; HOLZLOEHNER, R.; LIMA, I.T. "Advances in modeling optical fiber transmission systems". 2002. <http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/leos/oct01/menyuk.htm>.
- (Mohan, sin fecha). MOHAN, N. "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Modeling and Simulation using VHDL-AMS". Course Project Report. University of Waterloo.

- (Morgan Kaufmann Publishers, 2002). MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS. 2002. <http://www.mkp.com>.
- (Mynbaev, 2001). MYNBAEV, Djafar K.; SCHEINER, Lowell L. "Fiber-Optic Communications Technology". Prentice Hall, 2001.
- (Oemarket, 2005). OEMARKET. "The opto-electronics market for the industry". Abril 2005. <http://www.oemarket.com/index.php>.
- (Olvera, 2002). OLVERA, Jorge A. "Apoyos de la sesión 9: Fibras Ópticas". Sistemas de Transmisión, Universidad Virtual. Enero-Marzo 2002.
- (Olvera, 2002). OLVERA, Jorge A. "Apoyos de la sesión 10: Sistemas de Transmisión por Fibra Óptica". Sistemas de Transmisión, Universidad Virtual. Enero-Marzo 2002.
- (Circadiant Systems, Inc., 2002). CIRCADIANT SYSTEMS, INC. "OSNR". Diciembre 2002. <http://www.circadiant.com/technology/tech/pdf/tb001.pdf>.
- (Ozcariz, 2002). OZCARIZ, Ignacio. "Prospectiva de las tecnologías de las telecomunicaciones y la informática en el campo de la seguridad". 2002. <http://www.ucm.es/info/Psyap/taller/iozcariz/>.
- (Pedrero, 2001). PEDRERO, Fernando. "Se enlaza México a un Nuevo Mundo". Periódico Reforma. pp. 4. México D.F. a 06 de febrero de 2001.
- (Ramaswami y Sivarajan, 1998). RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, Kumar N. "Optical Networks: A Practical Perspective". Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1998.
- (Ramaswami y Sivarajan, 2002). RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, Kumar N. "Optical Networks: A Practical Perspective". Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 2002.
- (Safford, 1988). SAFFORD, Edward L. "Introducción a la Fibra Óptica y el Láser". Ed. Paraninfo, 1988.
- (Sharma, 1990). SHARMA, Roshan L. "Network Topology Optimization, the art and science of network design". Van Nostrand Reinhold, New York. 1990.
- (Texas Instruments, 2005). TEXAS INSTRUMENTS. "System Block Diagrams". 2005. <http://focus.ti.com/docs/apps/catalog/resources/blockdiagram.jhtml?bdId=851>
- (Thompson, 2002). THOMPSON, Valerie. "Seeing the light: Optoelectronics Market Focus". Technical Journalist, Zurich. Julio 2002.

http://semiconductors.unaxis.com/en/p08_11_seeingthelight.pdf

(Thorsen, 1998). THORSEN, Norman. "Fiber Optics and the Telecommunications Explosion". Scarborough, ON, Canada, Prentice-Hall Canada. 1998.

(Webopedia, 2004). WEBOPEDIA. "What is a mesh?". Enero 2004.
<http://www.webopedia.com/TERM/m/mesh.html>.

(Wincore, 2002)WINCORE. "Fiber-Optic network architectures". Electrical and computer engineering, Ryerson University. Otoño 2002.

(Winch, 1998).WINCH, Robert G. "Telecommunication Transmission Systems". Mc. Graw Hill. 1998.

(Zang, 2003). ZANG, Hui. "Optical Networking: What is its future?". Sprint Advanced Technology Laboratories. INFOCOM, San Francisco, CA, Marzo 2003.

