

**ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE UN CARRER DE LARGA DISTANCIA A
TECNOLOGÍA WDM**



MARIA JOSE LATORRE VIDAL

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACION
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA**

POPAYÁN

2003

**ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE UN CARRIER DE LARGA DISTANCIA A
TECNOLOGÍA WDM**

MARIA JOSE LATORRE VIDAL

**Trabajo de grado presentado como requisito
para optar el título de Ingeniera Física.**

**Director
MSc. JAURY LEON TELLEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACION
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA**

POPAYÁN

2003

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1.SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICAS	
BASADO EN LA TÉCNICA WDM.....	3
1.1 SISTEMA BÁSICO BASADO EN WDM.....	6
1.2 MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	7
1.2.1 Fibra Multimodo.....	9
1.2.2 Fibra Monomodo.....	10
1.3 BLOQUE TRANSMISOR.....	12
1.3.1 Modulación Óptica.....	13
1.3.2 Transmisores Ópticos.....	15
1.3.3 Dispositivos para la Transmisión por Fibra Óptica.....	16
1.3.4 Características de los Dispositivos Láser.....	20
1.3.5 Enrutamiento.....	21
1.3.6 Amplificadores Ópticos.....	22
1.3.7 Parámetros básicos para el Amplificador Óptico.....	26
1.3.8 Ventajas del EDFA en Sistemas WDM.....	29
1.3.9 Multiplexación Óptica.....	30
1.3.10 Multiplexores de División de Longitud de Onda.....	31
1.3.11 Entrelazado.....	33
1.3.12 Conmutación y Transconexión.....	34

1.3.13 Dispositivos de inserción/extracción.....	36
1.4 BLOQUE RECEPTOR.....	38
1.4.1 Receptor Óptico Digital.....	38
1.4.2 Detección Óptica de Señales.....	39
1.4.3 Fotodetectores.....	40
1.4.4 Filtros.....	42
2. TECNOLOGÍAS Y EQUIPO DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS POR TELECOM Y FUNCIONAMIENTO CON WDM.....	47
2.1 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO.....	48
2.1.1 Sistema de Multiplexación TDM.....	49
2.1.2 Multiplexación por Codificación de Pulsos.....	52
2.2 JERARQUÍA DIGITAL SÍNCRONA.....	53
2.2.1 Estructura de Multiplexación SDH.....	54
2.2.2 Módulo de transporte Síncrono nivel N.....	58
2.2.3 NORTEL TN-1X.....	58
2.3 RANGO DE TRANSMISION SDH DE NORTEL UTILIZADO POR TELECOM.....	59
2.3.1 Estándar de Transporte Óptico.....	59
2.3.2. Equipo de Transporte SDH de Nortel.....	59
2.3.3 Elemento de Red TN-1X.....	60
2.4 GENERALIDADES Y CONFIGURACIONES DEL SISTEMA MULTIPLEXOR TN-1X.....	65
2.4.1 TN-1X NE.....	65

2.4.2 Configuración del Sistema.....	66
2.4.3 Agregados STM-4.....	69
2.5 DESCRIPCION DEL EQUIPO.....	70
2.5.1 Multiplexor TN-1X con Unica Fibra.....	71
2.5.2 Características de la fibra óptica de la RTNDFO.....	76
2.6 EXPLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRANSPORTE DE INFORMACIÓN UTILIZADA EN TELECOM.....	81
2.7 MULTIPLICACION POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA.....	84
2.7.1 Transparencia de la Red Óptica.....	91
3. ARQUITECTURA DE LA RED BASADA EN LA TECNOLOGIA WDM.....	92
3.1 TECNICAS DE CONMUTACION ÓPTICA DE PAQUETES ES REDES WDM.....	95
3.1.1 Conmutación.....	96
3.1.2 Matriz Conmutación Óptica.....	98
3.1.3 Conmutación Óptica de Ráfagas.....	100
3.2 CONVERSION DE LONGITUD DE ONDA.....	101
3.2.1. Establecimiento del Camino Optico.....	102
3.2.2. Conversión de Longitud de Onda.....	103
3.3. INTERCONECTORES OPTICOS.....	104
3.3.1. Tipos de Interconectores.....	108
3.4. CONDICIONES EN REDES WDM DE LARGA	

DISTANCIA.....	112
3.4.1.Transparencia Óptica.....	114
3.4.2.Redes de Enrutamiento de Longitud de Onda.....	115
3.4.3.Redes de Salto Simple.....	116
4.POTENCIALIDADES DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA WDM POR PARTE DE LA EMPRESA NACIONAL DE COMUNICACIONES EN POPAYÁN USANDO EN CRITERIO DE COSTO- BENEFICIO.....	122
4.1.RELACION DE COSTO Y BENEFICIO.....	123
4.2.EVALUACION DE LA RELACION DE COSTO-BENEFICIO QUE REPRESENTA LA IMPLEMENTACION DE LA TECNOLOGÍA WDM EN LA RTDNF DE TELECOM.....	123
4.2.1.Modelo Teórico.....	123
4.2.3.Modelo Conceptual.....	124
4.2.4.Diagrama Causal.....	131
4.2.5.Diagrama de Forrester.....	134
4.2.6.Modelo Matemático.....	135
4.2.7.Simulación.....	137

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Sistema básico punto a punto WDM.....	7
Figura 1.2. Evolución de sistemas de transmisión de fibra óptica.....	9
Figura 1.3. Transmisión punto a punto con WDM.....	12
Figura 1.4. Interferómetro de Mach-Zehnder	14
Figura 1.5. Cavidad de Fabry- Perot.....	18
Figura 1.6. Rejilla de difracción.....	19
Figura 1.7. Amplificador de Fibra Dopada con Erbio.....	22
Figura 1.8. Espectro de Ganancia del EDFA.....	25
Figura 1.9. Principio del EDFA explotando las Bandas C y L.....	28
Figura 1.10. Principio de operación de un intercambiador.....	34
Figura 1.11. Estructura genérica de un conmutador.....	35
Figura 1.12. Dispositivo de inserción/extracción.....	37
Figura 1.13. Dispositivo de inserción/extracción multicanal.....	37
Figura 1.14. Receptor óptico WDM.....	38
Figura 1.15. Filtro LC-FPI usado en sistemas WDM.....	42
Figura 1.16. Guías de onda en Arrays AWG.....	46
Figura 2.1. Multiplexación TDM.....	48
Figura 2.2. Sistema de Multiplexación TDM.....	49

Figura 2.3. Formato típico de la trama TDM.....	51
Figura 2.4. Sistema básico PCM.....	53
Figura 2.5. Estructura generalizada de los multiplexores SDH.....	56
Figura 2.6. Estructura de la trama STM-1.....	57
Figura 2.7. Estructura de multiplexación TN-1X.....	59
Figura 2.8. Red Síncrona Sencilla.....	60
Figura 2.9. Elemento de red TN-1X.....	61
Figura 2.10 Elemento de red TN-1P.....	61
Figura 2.11 Elemento de red TN-1C.....	61
Figura 2.12 Elemento de red TN-16X.....	62
Figura 2.13 a Interfaz TN-1X de altura aumentada.....	64
Figura 2.13 b Interfaz TN-1Xde altura disminuida.....	64
Figura 2.14 Diagrama en bloques del sistema típico TN-1X.....	67
Figura 2.15 Multiplexor terminal de altura aumentada.....	68
Figura 2.16 Multiplexor de inserción/extracción.....	68
Figura 2.17 Multiplexor de inserción/extracción en anillo.....	69
Figura 2.18 Multiplexor TN-1X/4.....	70
Figura 2.19 Diagrama en bloques TN-1X.....	71
Figura 2.20 TN-1X trabajando con una fibra.....	72
Figura 2.21 Láser Automático de Cierre.....	73
Figura 2.22 RTNDFO en el Cauca de TELECOM.....	77
Figura 2.23 Diagrama representativo de tecnología y negocio de TELECOM.....	81

Figura 2.24 Esquema representativo de la tecnología utilizada en TELECOM.....	82
Figura 2.25 Ejemplo ilustrativo del manejo de tramas.....	83
Figura 2.26 Representación de multiplexación.....	84
Figura 2.27 Recuperación de la señal óptica multiplexada.....	85
Figura 2.28 Camino a la transmisión de muy alta capacidad.....	85
Figura 2.29 Migración hacia una red completamente óptica.....	87
Figura 2.30 Esquema de migración.....	87
Figura 2.31 Relación entre TDM y WDM.....	90
Figura 2.32 Canales multiplexados con WDM.....	91
Figura 3.1 Sistemas punto a punto.....	94
Figura 3.2 Sistema lineal con OADM.....	94
Figura 3.3 Sistema lineal con OXC.....	95
Figura 3.4 Red de transporte.....	96
Figura 3.5 Evolución de la capacidad de los routers.....	97
Figura 3.6 Conmutación óptica de paquetes.....	99
Figura 3.7 Enrutamiento de datos en longitudes de onda.....	102
Figura 3.9 Funcionamiento del conversor.....	103
Figura 3.8 OXC con núcleo óptico.....	108
Figura 3.10 OXC con regeneración optoelectrónica.....	109
Figura 3.11. OXC totalmente óptico.....	109
Figura 3.12. FXC.....	110
Figura 3.13 WSXC.....	111
Figura 3.14 WIXC.....	111

Figura 3.15 Arquitectura de red.....	113
Figura 3.16 Nodo Metropolitano Multiservicio.....	115
Figura 3.17 Enrutamiento en una red WAN WDM.....	116
Figura 3.18 Red WDM de Simple Salto de Difusión.....	118
Figura 3.19 Red en anillo interconectada.....	119
Figura 4.1 Comportamiento del recaudo y facturación 2001.....	127
Figura 4.2 Diagrama Causal.....	133
Figura 4.3 Diagrama de Forrester.....	134
Figura 4.4 Diagrama de Ecuaciones.....	135
Figura 4.5 Interfaz de usuario para BW.....	137
Figura 4.6 Gráfica de Utilidades con Evolution 2.0a.....	140
Figura 4.7 Gráfica de diagnóstico en Excel.....	142

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1.1 Ventanas de Transmisión.....	6
Tabla 2.2 Velocidades de transporte de información.....	59
Tabla 2.2 Valores recomendados por la IUT-T para la fibra G.652.....	79
Tabla 2.3 Valores recomendados por la IUT-T para la fibra G.654.....	80
Tabla 4.1 Lista de facturación y recaudo 2001.....	126
Tabla 4.2 Datos de internet conmutado.....	128
Tabla 4.3 Clientes internet conmutado.....	129
Tabla 4.4 Lista de recaudo anual.....	129
Tabla 4.5 Ingreso, egresos y utilidades reales.....	131
Tabla 4.6 Clasificación de variables y parámetros.....	133
Tabla 4.7 Parámetros para egresos.....	134
Tabla 4.8 Diagnóstico con escenarios para WDM.....	141

GLOSARIO

ADM : Es un multiplexor de inserción y extracción.

ALS: (*Automatic Laser Shutdown*) Láser Automático de Cierre

AM : Modulación de Amplitud.

ASK: Técnica digital de Modulación por Desplazamiento de Amplitud.

ATM: Es el Modo de transferencia Asíncrono y es una tecnología a nivel de transporte, funciona en la multiplexación de etiquetas utilizando tecnología SDH.

Banda Ancha: Es un ancho de banda flexible donde deben estar todas las capacidades de las redes, donde algunos de los servicios que se crean son por ejemplo distribución de TV, Vídeo telefonía, Videotex en movimiento, puede haber intercambio entre redes de área local.

BER: Error en la Velocidad de Bit.

Chirp: Ligera modulación de la fase que aparece durante la modulación de amplitud.

CRZ: Con Retorno a Cero.

DFB: (*Distributed Feedback*), Láser SLM de Distribución y Regeneración.

DM: Dispersión de Manejo en la misma transmisión con CRZ.

DSF: (*Dispersion Shipted Fiber*), Fibra de Cambio de Dispersión.

Diafonía: Es un fenómeno causado por interferencia de las señales, si la interferencia es de diferentes longitudes de onda se denomina diafonía inter-banda y se determina por el espaciamiento entre canales WDM, se denomina diafonía intra-banda si la interferencia de la señal es la misma longitud de onda en diferentes fibras.

EDFA: Amplificador de Fibra Dopado con Erblio utilizado en equipos de comunicaciones ópticas.

FEC: Corrección de Errores hacia delante.

FSK: Técnica digital de Modulación de Frecuencia.

FXC: Es un Interconector de Conmutación de Fibra el cual conmuta todos los canales de longitud de onda desde una fibra de entrada a una de salida.

GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*): Es conmutación multiprotocolo con etiquetado de los flujos generalizados para diferenciación de servicios estableciendo prioridades evitando la congestión del tráfico de información.

IP: Protocolo Internet.

LED: (Light Emission Diode), Diodo Emisor de Luz.

MLM: Nomenclatura utilizada para Láseres de Modo Multilongitudinal.

NRZ: (*Non Return Zero*), No Retorno a Cero.

OA: Amplificador Optico.

OADM: Multiplexores de inserción/extracción ópticos.

OSNR: Relación Señal a Ruido Optico.

OXC (*Optical Crossconnect*): es un transconector o interconector óptico que consiste en un conmutador matricial de fibras ópticas de dimensión número de fibras de entrada por número de fibras de salida, su función clave es gestionar el enrutamiento de los canales ópticos disminuyendo el nivel de congestión.

PCM (*Pulse Code Modulation*): Es una técnica de modulación por codificación de pulsos utilizada para procesar la información en forma de secuencia mensajes discretos que se utilizarán en TDM.

PDH (*Plesiochronous Digital Hierachy*): La Jerarquía Digital Plesiócrona es una tecnología de transporte, donde hay separación y desacople de funciones, se pueden crear servicios eficientes y se pueden conectar diferentes redes donde se utiliza Banda Estrecha.

PSK: Técnica de Modulación con Desplazamiento de Fase.

SDH (*Synchronous Digital Hierachy*): La tecnología de Jerarquía Digital Síncrona es a nivel de trasporte y es una evolución de la tecnología PDH donde se utiliza Banda Ancha y simplifica las técnicas de multiplexación/demultiplexación, permitiendo una eficaz inserción de canales facilitando la introducción de una gama amplia de servicios.

SLM: Nomenclatura utilizada en Láseres de Modo Longitudinal Simple.

SOA: Amplificador Optico de Semiconductores InP, utilizados como puertos ópticos, tienen una ganancia de 10 dB.

SONET: Red Óptica Síncrona.

TDM (*Time División Multiplexing*): Multiplexación por División de Tiempo es en principio un conjunto de señales independientes que comparten un solo medio de transmisión.

TIA: Amplificador de Trans-Inpedancia.

WSXC: es un Interconector de Selección de Longitud de Onda, el cual conmuta un subconjunto de los canales de longitud de onda de una fibra de entrada a una de salida.

WIXC: Es un WSXC de Intercambio de longitud de onda, puede traducir o cambiar la frecuencia del canal en otra.

XGM: Modulación de Ganancia Cruzada.

RESUMEN

Este trabajo surgió a partir de una visita a TELECOM para realizar una videoconferencia, los ingenieros hicieron la sugerencia de ampliar y mejorar sus servicios sin cambiar su infraestructura instalada, hacer el estudio de migración hacia una tecnología de comunicaciones para el transporte de información en forma de longitudes de onda sobre la Red Troncal Digital Nacional de Fibra Óptica de TELECOM en el Cauca para portadoras de larga distancia, llamada Multiplexación por División de longitud de Onda, en cuanto a tecnología, costos y beneficios teniendo en cuenta los sistemas básicos y el principio físico de los dispositivos utilizados en dicha técnica era un primer paso, por lo que se divide en capítulos todo el estudio donde en el primer capítulo se hablará de los dispositivos y sistema básico utilizado en WDM, se utilizaran los manuales de NORTEL donde se especifican los componentes y funcionamiento de las tecnologías de transporte utilizadas por TELECOM, se hace un resumen explicativo en el segundo capítulo con el cual se diferenciará la forma de utilización de la actual tecnología de transporte en TELECOM y la nueva técnica posteriormente se hablará brevemente en el tercer capítulo de la arquitectura de la red con la técnica de multiplexación por división de longitud de onda para finalmente realizar el análisis de costos y beneficios con datos reales y proyecciones sugeridas por la Empresa Nacional de Telecomunicaciones el cual representa para TELECOM la viabilidad de la migración.

INTRODUCCION

Durante los últimos años, la óptica y la optoelectrónica se han constituido como una de las tecnologías básicas de las redes de telecomunicación, resultando diversas innovaciones importantes (fibra óptica, láser de semiconductores, amplificador de fibras) para satisfacer a las necesidades del mercado. La introducción de la Multiplexación por División de Onda (WDM, *Wavelength División Multiplexing*) ha hecho posible la transmisión de enormes cantidades de información a distancias casi ilimitadas dado que aprovecha toda la capacidad de transmisión de la fibra óptica. Las redes completamente ópticas no son aún una realidad puesto que la industria es joven, la investigación en comunicaciones ópticas puede contribuir al perfeccionamiento de la tecnología en diversas áreas industriales y fundamentales (materiales, circuitos, arquitecturas y protocolos).

El crecimiento de la capacidad de transporte de información es en gran medida el resultado del uso masivo de la Internet y la introducción de nuevos servidores con mayores contenidos de imagen y vídeo que ha hecho que la demanda aumente, esto ha sido posible gracias a la combinación del Multiplexado por División en el Tiempo (TDM, *Time División Multiplexing*) con WDM.

La técnica WDM, presenta mayor proyección actualmente para incrementar la capacidad de servicios hacia comunicaciones de larga distancia nacionales e internacionales y un punto de partida hacia la consolidación de la capa óptica.

En este trabajo se analizarán las condiciones técnicas y económicas que determinarán la conveniencia por parte de la Empresa Nacional de Comunicaciones TELECOM sobre la Red Troncal Digital Nacional de Fibra Óptica (RTDNFO) de migrar o no a la tecnología WDM. Las consideraciones a tener en cuenta en la implementación serán de tipo técnico, en cuanto al aumento del Ancho de Banda para una mejor calidad del servicio en eficiencia y capacidad de transmisión, para esto se hablará de los dispositivos utilizados en la técnica WDM, así como de las técnicas utilizadas en TELECOM para el manejo de la información a nivel de transporte Jerarquía Digital Síncrona (SDH, *Hierarchy Digital Synchronous*) y la técnica TDM, y así efectuar el estudio de la viabilidad de su implementación para comunicaciones a largas distancias nacionales haciendo un análisis de los costos y beneficios con datos reales y proyectados por la empresa.

En el primer capítulo se hablará de los componentes utilizados en un sistema basado en tecnología WDM debido a que los componentes ópticos están en el corazón de los sistemas de comunicación actuales. No solamente fijan los límites de rendimiento y restricciones funcionales, sino que también tienen incidencia en el costo inicial del equipamiento final del sistema. En el segundo capítulo se hablará de la tecnología utilizada en TELECOM y la forma de utilizar la tecnología WDM, en el tercer capítulo se incluirá la arquitectura de la red utilizando WDM. Por último se hará un análisis de costos y beneficios en cuanto a datos actuales de la empresa y datos proyectados empleando *Evolution 2.0a* del grupo Simón de la Universidad de Santander.

1. SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICAS BASADO EN LA TÉCNICA DE MULTIPLEXACION POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

Con la ventaja de los Amplificadores de Fibra Dopados con Erblio (EDFA) capaces de amplificar la señal de muchas longitudes de onda simultáneamente, proporcionó otra manera de mejorar la capacidad del sistema en lugar de aumentar la velocidad de transporte bit incrementando el número de longitudes de onda de trabajo, es decir, usando WDM.

El uso de WDM y Amplificadores de Fibra Dopados con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) han disminuido el costo de la transmisión y aumentado la capacidad de los sistemas, un solo amplificador óptico puede reemplazar una serie de regeneradores mas costosos por fibra, hoy se utilizan sistemas de amplificación WDM para las portadoras de transporte. Como dato de observación, experimentos reportados muestran que la capacidad de transmisión está sobre 1Tbps y va en aumento al mismo tiempo que la rata de bit por canal se ha incrementado a 10Tbps. Uno de los primeros sistemas WDM fue diseñado en 1995 por AT&T con 4 longitudes de onda; IBM desarrolló en 1994 un sistema WDM con 20 longitudes de onda para un área metropolitana [1].

Usando moduladores y demoduladores externos junto con los láseres de Realimentación Distribuida (DFB, *Distributed Feed Back*) que son un ejemplo de un Láser de Modo

Longitudinal (SLM, *Single Longitudinal Mode*) y EDFA permite a los sistemas que las distancias entre los regeneradores sea de aproximadamente 600 km a 2.5 Gbps sobre fibra monomodo normal, en la ventana de transmisión de 1.55 μm de longitud de onda, que es substancialmente menor en 10 Gbps. La próxima invención lógica era desarrollar técnicas de compensación de dispersión cromáticas introduciendo un límite favorable para el manejo de la dispersión residual global, estas técnicas permiten habilitar sistemas comerciales y lograr aumentar la distancia entre regeneradores a varios miles de kilómetros incrementando la velocidad de bit tan alto como 10 Gbps por canal. Al mismo tiempo varios efectos de segundo y tercer orden como efectos no lineales en la fibra, el espectro de ganancia en los EDFAs y varios efectos relacionados con polarización fueron superados y ahora son de primer orden [2]. Hoy estamos viendo el despliegue de la alta capacidad de amplificación de Tbps en los sistemas WDM con los cientos de canales a 10 Gbps, con espacios entre canales de menos de 50 GHz, con distancias entre regeneradores eléctricos extendidas a miles de kilómetros. Estos sistemas usan una estructura de transmisión especial con Retorno a Cero (CRZ.) también llamada Dispersión de Manejo (DM, *Dispersion Measurement*) con solitones, junto con la dispersión Raman y la corrección de Errores Hacia Delante (FEC).

Como dato [3] en industrias de equipo para telecomunicaciones se construyen solitones de DM con pulsos pequeños comparando con los pulsos de No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return Zero*) que pueden propagarse a distancias mas largas sobre las plantas de fibra extendidas con una compensación periódica de dispersión y amplificación. La amplificación Raman es un efecto no lineal propio de la fibra donde la energía es bombeada

de una señal y transferida sobre las otras señales, la ganancia Raman es obtenida sobre un razonable ancho de banda con un pico de ganancia centrada sobre los 100 nm de longitud de onda de la bomba Raman. Los sistemas de hoy todavía usan EDFAs. la amplificación de Raman distribuida se usa principalmente para hacer parecer el espacio mas corto entre EDFAs y en conjunto con los FEC que agregan a la cabeza bits adicionales a los bits de datos del transmisor y en el receptor, estos bits extras pueden detectar y corregir errores en la señal recibida, agregando aproximadamente del 10 al 20 por ciento de bits puede proporcionar varios decibelios adicionales que mejoran el enlace y la capacidad del sistema.

Con los EDFA los primeros sistemas WDM usaron la ventana Convencional C de transmisión principalmente, porque era donde los EDFAs trabajaban. Hoy los EDFA's trabajan en la ventana Larga L de transmisión, esto permite que los sistemas WDM usen ambas ventanas. El uso de la amplificación Raman, complemento de los EDFAs permite abrir otras ventanas de transmisión de la fibra como la corta S (*Short*) y la Ultralarga U, las cuales se especifican en la tabla 1.1 para aplicaciones WDM. Entretanto, el desarrollo de nuevos tipos de fibra también está abriendo una nueva ventana de transmisión llamada ventana Extendida E, pero aún no hay amplificadores efectivos en esta banda los cuales serían útiles para corta distancia.

BANDA	Descripción	Rango de longitudes de onda (nm)
O	Original	1260 a 1360
E	Extendida	1360 a 1460
S	Corta	1460 a 1530
C	Convencional	1530 a 1565
L	Larga	1565 a 1625
U	Ultralarga	1625 a 1675

Tabla 1.1. Ventanas de Transmisión en el rango de longitudes de onda.

1.1. SISTEMA BASICO BASADO EN WDM

Un sistema punto a punto sirve como referencia para la introducción de sistemas WDM en diferentes entornos y arquitecturas de red. Los sistemas de fibra WDM y principalmente los sistemas punto a punto están ampliamente desplegados en las redes de telecomunicaciones para contrarrestar el agotamiento de la fibra en las redes ópticas. Los operadores han expresado durante cierto tiempo el deseo de poder gestionar redes ópticas en el ámbito de la longitud de onda o de la fibra, con el objetivo de reforzar la eficacia de la planta de fibra instalada y el equipo base, esto implica la necesidad de poder conmutar y transconectar fibras o longitudes de onda en los elementos de red.

Jerarquía Digital Síncrona El sistema de comunicaciones está compuesto por tres partes esenciales, que son: Bloque transmisor, Bloque receptor y Medio de transmisión como se ve en la figura 1.1 es un sistema WDM punto a punto.

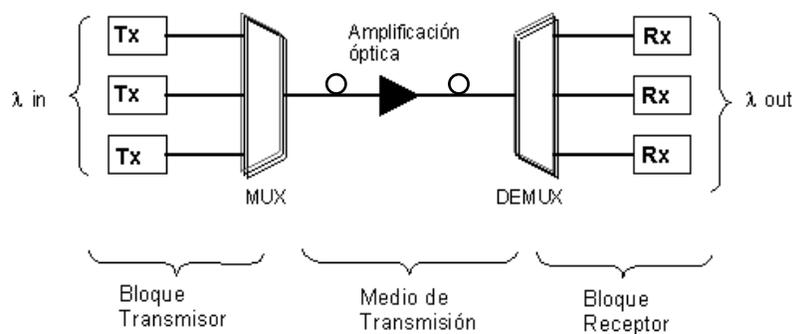


Figura 1.1. Sistema básico punto a punto WDM, de izquierda a derecha se encuentra el bloque transmisor indicando las longitudes de onda de entrada o canales de entrada que van al multiplexor luego pasan por el medio de transmisión de fibra óptica donde se amplifican por medio de un EDFA por ejemplo y llegan al bloque receptor donde se recuperan las señales de información.

1.2 MEDIO DE TRANSMISIÓN

La comunicación por fibra óptica es importante en la infraestructura de las telecomunicaciones, debido a que en las últimas dos décadas las innovaciones en este campo han tenido un extraordinario y consistente desarrollo tecnológico entregando un mayor ancho de banda a largas distancias y reduciendo el costo en la transmisión, pero la adquisición y más aún instalación de este tipo de fibra es costoso y las empresas de telecomunicaciones, especialmente en países tercermundistas, no están en la capacidad económica de adquirir esa tecnología, pero al mismo tiempo las redes existentes también han incrementado su demanda de ancho de banda con la consecuente disminución de disponibilidad de fibra, ante esta situación los proveedores están migrando hacia una escala crucial, la construcción de la capa óptica y así permitir la introducción de procesos de

conmutación óptica en redes flexibles y reconfigurables de acuerdo a las condiciones de tráfico cambiantes.

La fibra óptica se ha establecido como uno de los medios preferidos de comunicación para velocidades de megabits por segundo a distancias de cientos de metros. Comparado con la transmisión de cables eléctricos, la fibra óptica ofrece un casi perfecto medio de transmisión debido a que presenta bajas pérdidas, muy alto ancho de banda, niveles bajos de transmisión indeseable, baja probabilidad de deterioros, inmunidad a la interferencia del campo electromagnético, y tiempo de vida largo y en términos de conjugar tecnología se puede pensar en la fibra óptica y las comunicaciones inalámbricas como complementarias.

La fibra óptica no va por todas partes, pero proporciona una gran cantidad de ancho de banda disponible (por encima de las decenas de terabits por segundo sobre una sola fibra). En la figura 1.2 se observa la evolución de la capa óptica desde un medio de transmisión puro a una red de gestión óptica; la capa óptica es capaz de proporcionar extremo a extremo servicios de la red.

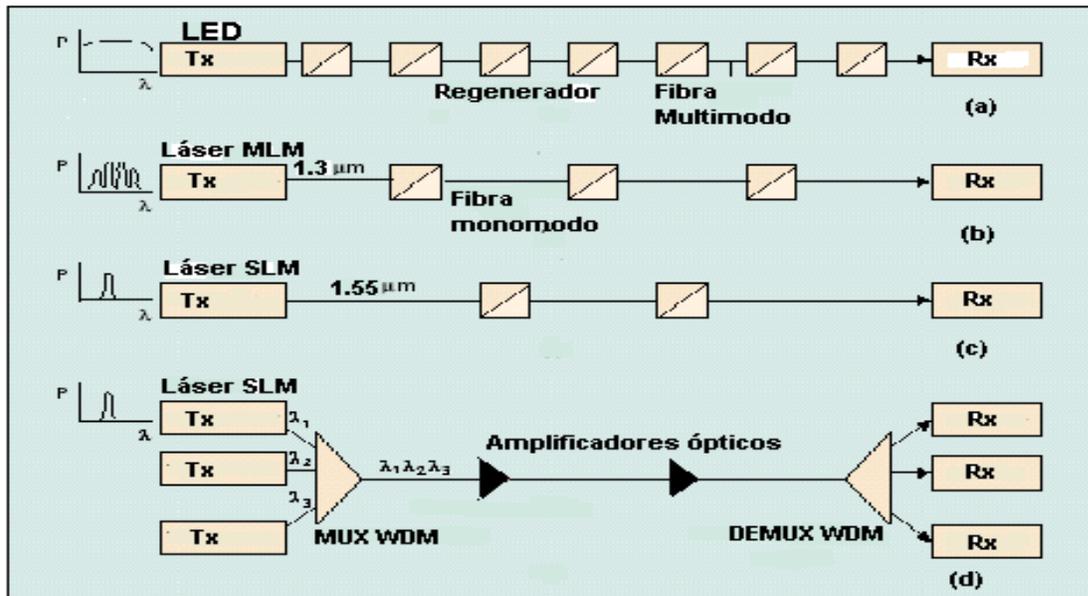


Figura 1.2. La Evolución de sistemas de transmisión de fibra óptica. a) primeros sistemas con LEDs sobre fibra multimodo a $0.8 \mu\text{m}$. b) los sistemas monomodo, usando láseres de modo multilongitudinal (MLM) a $1.3 \mu\text{m}$. c) Sistemas monomodo usando láseres de un solo modo longitudinal (SLM) a $1.55 \mu\text{m}$ d) sistemas WDM que usan longitudes de onda múltiples y amplificadores ópticos en lugar de los regeneradores.

1.2.1 Fibra Multimodo

La figura 1.2 captura la evolución de la fibra óptica en sistemas de transmisión. Los primeros experimentos fueron hechos en 1960 por Kao y Hockham, demostraron que la información podía ser codificada en señales de luz y que se podía transmitir por medio de una guía de onda de fibra de vidrio [4]. Estos primeros experimentos demostraron que la transmisión óptica sobre fibra era factible. Sin embargo, el desarrollo de los procesos para fabricar la fibra óptica con bajas pérdidas fueron realizados en los 70s por investigadores de

los laboratorios Corning y Bell en donde encontraron que esos sistemas de transmisión de fibra ópticos realmente se podrían hacer. La fibra óptica basada en silicio tiene tres ventanas de bajas pérdidas que se observan en la tabla 1.1, entre los 0.8, 1.3, y 1.55 μm de la longitudes de onda infrarrojas. La pérdida más baja está alrededor de 0.25 dB/km en 1.55 μm aproximadamente, de 0.5 dB/km en 1.3 μm , estas fibras habilitaron la transmisión de señales de luz sobre distancias de varios kilómetros antes de que ellas necesitaran ser regeneradas. Un regenerador convierte la señal de luz en una señal eléctrica y retransmite una copia de los datos como una nueva señal de luz. Las primeras fibras eran llamadas fibras multimodo estas tienen diámetros del núcleo aproximadamente de 50 a 85 μm , este diámetro es grande comparado con la longitud de onda de la luz de señal, por lo tanto son múltiples modos de luz propagándose a velocidad ligeramente diferente a través de la fibra.

1.2.2 Fibra Monomodo

La próxima generación de sistemas ópticos desplegó hacia 1984 [1,5], con la fibra monomodo usada como un medio para eliminar la dispersión intermodal, junto con los láseres de Modo Longitudinal MLM de Fabry-Perot en la ventana de 1.3 μm de longitud de onda. La fibra monomodo tiene un núcleo de diámetro relativamente pequeño de aproximadamente 8 a 10 μm , que es un múltiplo pequeño de la longitud de onda de operación del rango de la señal de luz, esto fuerza a la energía a viajar en forma de un solo modo eliminando eficazmente la dispersión intermodal y habilitando dramáticamente el

incremento en la velocidad de bits de información y las distancias posibles entre regeneradores.

Estos sistemas típicamente tienen espacio entre regeneradores de aproximadamente 40 km y una tasa de bit de operación de unos cientos de megabits por segundo. Al final de los 80s, el fin era desplegar sistemas en la ventana C de transmisión en la longitud de onda de 1.55 μm para aprovechar la baja dispersión cromática la cual provocaba pérdida de la señal en esta ventana, esto permitió alargar la distancia entre regeneradores, la dispersión cromática se volvió un factor limitante en el incremento de la velocidad de bit debido a que en una fibra óptica esta depende de la longitud de onda de la señal, entonces el ancho del espectro del pulso tiene más retardo y como el haz de luz o el pulso tiene un ancho de banda finito incluso en una fibra monomodo, los componentes de frecuencia son diferentes en cada pulso y se propagan con diferente velocidad debido a las propiedades físicas fundamentales del vidrio, este efecto causa un retardo del pulso a la salida. Esto se cumple con la fibra óptica basada en silicio que presenta baja dispersión cromática en la ventana de 1.33 μm pero tiene una significativa dispersión en la ventana de 1.55 μm , así la dispersión cromática no era un problema en los primeros sistemas a 1.3 μm . La alta dispersión cromática en la ventana de 1.55 μm motivó el desarrollo de la Fibra de Cambio de Dispersión (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*). La fibra de cambio de dispersión es diseñada cuidadosamente para que la dispersión sea cero en la ventana de 1.55 μm de longitud de onda. Sin embargo, para este tiempo había ya una gran base de fibra monomodo normal desplegada, así que esta solución no podría ser aplicada. En este momento, investigadores empiezan a buscar la manera de superar dispersión cromática con la fibra normal ya instalada. La técnica principal era reducir la anchura del espectro del pulso de transmisión, pero el ancho de

banda del pulso transmitido es mas o menos igual al ancho de banda de la modulación, en este caso se presentarían mayores pérdidas debido a la dispersión cromática sin embargo el ancho de banda puede determinarse completamente con la anchura del espectro usado por el transmisor.

1.3 BLOQUE TRANSMISOR

El bloque transmisor se observa en la figura 1.3 y consta de uno o varios transmisores generalmente diodos de emisión de amplio ancho espectral, si se trabaja con un solo transmisor los canales ópticos operan con longitudes de onda fijas inyectadas directamente a la fibra, entonces no se requiere de multiplexores. Cuando se opera con múltiples transmisores estos son sintonizables a una longitud de onda fija o dentro de un rango espectral predeterminado y cada transmisor óptico contiene un láser, su modulador y un filtro óptico. En la etapa de multiplexación o acoplamiento se combinan las señales de diversos dispositivos láser transmisores sobre una sola fibra.

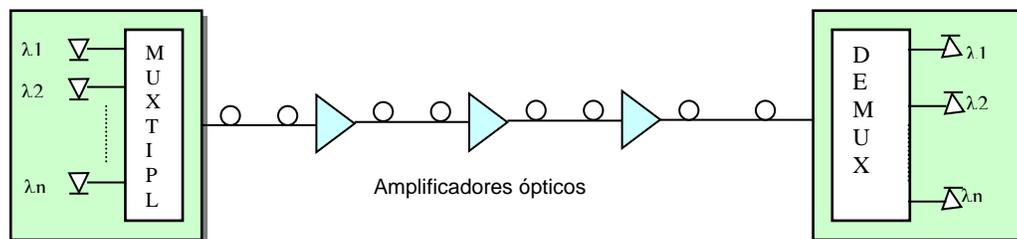


Figura 1.3. Transmisión punto a punto con WDM, longitudes de onda de entrada a los multiplexores, amplificadores ópticos conectados por enlaces de fibra óptica que llevan la señal a los demultiplexores.

1.3.1 Modulación Óptica

La señal a transmitir se codifica con datos utilizando modulación óptica sobre la señal de entrada del láser. Existen técnicas analógicas de modulación como Modulación en Amplitud (AM), Modulación en Frecuencia (FM), Modulación en Fase (PM). Las técnicas digitales son Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK), Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK), Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK).

En la práctica se usa modulación de amplitud, la modulación de la fase o la modulación de la polarización se utilizan en algunos sistemas como esquema de modulación complementaria para mejorar el rendimiento de la transmisión, pero estos esquemas de modulación adicionales no llevan información. La modulación de amplitud puede ser de No Retorno a Cero (NRZ) o de Retorno a Cero (RZ), dependiendo del sistema. En los dispositivos para la transmisión de larga distancia, la modulación de amplitud se logra generalmente con dispositivos fabricados con dos tipos de materiales [6]:

- Con un modulador basado en un material electro-óptico como el Litio-Niobato (LiNbO₃).
- Con un modulado basado en un material semiconductor del grupo III-V con las propiedades de electro-absorción convenientes.

Las características principales a las que van dirigidos estos dos esquemas de modulación de

amplitud son el ancho de banda, el porcentaje de extinción y el *chirp* que es una ligera modulación de la fase que aparece durante la modulación de amplitud.

Debido a su simplicidad actualmente la modulación ASK es preferida y también es conocida como modulación por Encendido y Apagado. La señal es conmutada entre dos niveles de potencia preestablecidos, nivel bajo (0), nivel alto (1), la modulación puede efectuarse mediante la alternación simple de la fuente láser entre el estado de encendido o apagado, conocida como modulación directa, pero esta técnica genera inestabilidades en la amplitud y en la frecuencia de operación del láser al ser conmutado, por ello se ha desarrollado otra alternativa de modulación espacial para velocidades altas de bit y consiste en ubicar una cavidad de modulación externa, la cual modula la luz proveniente del láser sintonizable mediante el bloqueo o la transferencia de la luz incidente, dependiendo de la ausencia o presencia de una corriente de polarización aplicada al modulador.

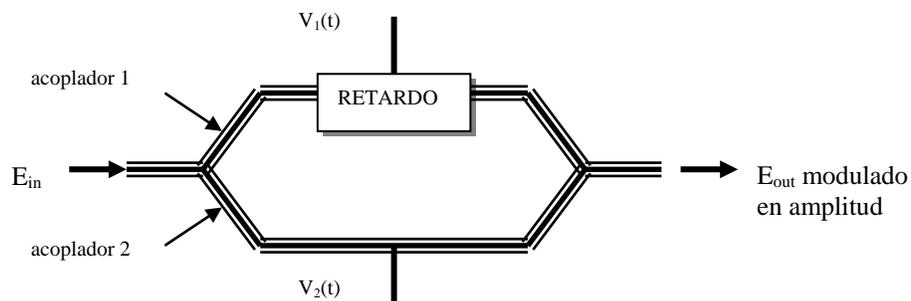


Figura 1.4. Interferómetro de Mach-Zehnder (MZI), modulador utilizado en sistemas WDM debido a su alta disintonía espectral el cual tiene dos acopladores de 3 dB conectados por guías de onda, el voltaje de conmutación $V_2(t)$ es aplicado para controlar el índice de refracción y controlar el paso de la luz proveniente del láser al modulador.

El interferómetro de Mach-Zehnder que se observa en la figura 1.4 es un modulador utilizado en sistemas WDM debido a su alta desintonía espectral, que es una diferencia de frecuencia óptica entre el láser y el pico de fotoluminiscencia del modulador. Los acopladores de 3 dB están conectados por medio de dos guías de onda que por medio del efecto electro-óptico, un voltaje de conmutación $V_2(t)$ es aplicado a el acoplador 2 con el fin de controlar el valor del índice de refracción en las dos guías de onda, y si es seleccionada apropiadamente la constante de propagación, generando una interferencia constructiva o destructiva en el acoplador de 3 dB a la salida del dispositivo, debido a que las dos señales se encuentran en fase o en contrafase, se controla el paso de la luz proveniente del láser a través del modulador, así la intensidad de salida puede variar entre 0 y la potencia de entrada disminuida por las pérdidas de inserción, obteniéndose un dispositivo que puede configurarse como modulador óptico.

1.3.2 Transmisores ópticos

El avance de la tecnología ha permitido la fabricación de dispositivos láser con características de alta calidad, que permiten una mejor utilización del ancho de banda de la fibra óptica, aumentando la capacidad de funcionamiento y así la implementación de la tecnología WDM. Los dispositivos láser para comunicaciones ópticas se pueden clasificar como dispositivos sintonizables y fijos. Las redes WDM requieren con frecuencia la capacidad de sintonizar diferentes longitudes de onda porque la técnica WDM trabaja con cadenas de luz.

1.3.3. Dispositivos para transmisión por fibra multimodo

Estos dispositivos necesitaron de fuentes ligeras y receptores para la transmisión por fibra óptica, Láser de semiconductor compactos, y Diodos Emisores de Luz (LED, *Ligth Emision Diode*) aprovisionaron unas fuentes prácticas de luz. Estos láseres y LEDs simplemente cumplen la función de interruptor para transmitir rápidamente los datos digitales. El transmisor cumple la función de medir la duración de un periodo para enviar un binario "1" y se regresa para medir la duración del periodo para señalar un binario "0". Esto se llama modulación de binario no-retorno-a cero. Los fotodetectores. de semiconductor habilitan la conversión de la luz en el regreso de la señal al dominio eléctrico.

El primer sistema de la telecomunicación (finales de los 70s y principios de los 80s) usó fibras multimodo, con LEDs o transmisores láser en las ventanas de 0.8 y 1.3 μm de longitud de onda. Los LEDs son relativamente dispositivos de bajo poder que emiten luz sobre un espectro bastante ancho de varios nanómetros. Un láser proporciona mayor potencia de salida que un LED y por lo tanto permite transmisión a mayores distancias sin regeneración. Los primeros láseres eran de modo multilongitudinal como el láser de Fabry-Perot que emiten luz sobre un espectro ancho de varios nanómetros, el espectro real consiste de líneas espectrales múltiples las que pueden suponerse como modos longitudinales diferentes, el término MLM se refiere a que estos Modos del Láser longitudinales son diferentes de los modos de la propagación dentro la fibra óptica. Los LEDs y los MLM son láseres que emiten luz sobre un espectro ancho, pero mientras el espectro del LED es continuo, el espectro de un MLM tiene algunas líneas periódicas.

Los primeros sistemas tenían regeneradores de señal no muy espaciados entre ellos, y los regeneradores eran dispositivos caros y continuaban siendo caros hoy lo que conlleva a aumentar al máximo la distancia entre regeneradores, en este caso, la limitación de distancia estaba principalmente afectada por un fenómeno conocido como dispersión intermodal como en una fibra multimodo, la energía en un pulso viaja en modos diferentes, cada uno con una velocidad diferente, al final de la fibra los modos diferentes llegan en tiempos ligeramente espaciados, produciendo un retardo del pulso. Este retardo en general se llama dispersión, y esta forma específica se llama dispersión intermodal. Típicamente, estos primeros sistemas operaron de 32 a 140 Mbps con regeneradores cada 10 km. Los sistemas de fibra multimodo todavía se usan como una forma económica de interconexión con la computadora a unos cientos de Mbps sobre unos kilómetros.

Los láseres MLM Fabry-Perot, emiten sobre un espectro bastante ancho de varios nanómetros (o, equivalentemente, cientos de gigahertz), que es mucho más grande que el ancho de banda de la modulación de la propia señal. Algunos dispositivos láser usan una cavidad Fabry-Perot, la cual está conformada por dos espejos de reflexión ubicados a una distancia variable. Si nosotros reducimos el espectro del pulso transmitido a lo largo del ancho de banda de la modulación, la dispersión cromática se reduce significativamente. Esto motivó el desarrollo de una fuente láser con una anchura espectral estrecha: el láser de distribución y regeneración DFB. Un láser de DFB es Longitudinal de un Solo Modo (SLM, *Single Laser Mode*). Un láser de SLM emite una sola longitud de onda señalada en una sola línea espectral, en contraste a láseres de MLM cuyo espectro consiste de muchas líneas espectrales. Este descubrimiento tecnológico incrementó la tasa de bit a más de 1 Gbps.

Dispositivo Láser Sintonizable Mecánicamente. externamente, conformada por dos espejos de reflexión E1 y E2 ubicados a una distancia variable, esta cavidad es adyacente al medio de emisión estimulada del láser, con el fin de filtrar longitudes de onda específicas. La sintonización se hace mediante el ajuste manual de la distancia entre los dos espejos de tal forma, que solo la longitud de onda deseada interfiere constructivamente con sus múltiples reflexiones, debido a esto se abarca todo el espectro de ganancia del láser y el tiempo de sintonización es muy alto, lo cual limita las velocidades de transmisión a menos que se use un modulador externo.

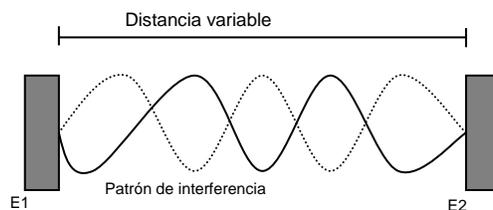


Figura 1.5. Cavidad de Fabry-Perot utilizada en el láser sintonizable mecánicamente donde los espejos reflectores ubicados a una distancia variable filtran longitudes de onda específicas.

Dispositivos Láser de Sintonización Acusto-Óptica y Electro-óptica. Este dispositivo usa filtros externos de sintonización, los cuales se construyen a partir de una cavidad. Aquí el índice de refracción de la cavidad es modificado, utilizando ondas de sonido y corriente eléctrica, respectivamente. El cambio en el índice de refracción permite la transmisión de luz a diferentes frecuencias. El tiempo de sintonización está dado por el tiempo que tarda la luz en establecerse en la cavidad a la nueva frecuencia [6,10]. Su rango de sintonización es moderado y su tiempo de sintonización es corto, sin embargo no es lo suficientemente rápido para permitir conmutación rápida de paquetes.

Dispositivo Láser Sintonizado con Corriente de Inyección. Conforman una familia de transmisores que permiten seleccionar la longitud de onda deseada por medio de una rejilla de difracción. El láser de DFB emplea una rejilla de difracción como la que se observa en la figura 1.6 ubicada en el medio de emisión estimulada. Las rejillas de difracción consisten en una guía de onda cuyo índice alterna periódicamente entre dos valores establecidos. Sólo las longitudes de onda que corresponden al periodo y a los índices de la rejilla interfieren constructivamente. Si la rejilla está fuera del medio de emisión estimulada, el láser se denomina Reflector de Rejilla Distribuido (DBR) y su sintonización es directa, y su rango de sintonización es bajo debido a que el margen de variación de índice de refracción es limitado, su inconveniente es que es susceptible al modo de saltos [3,4].

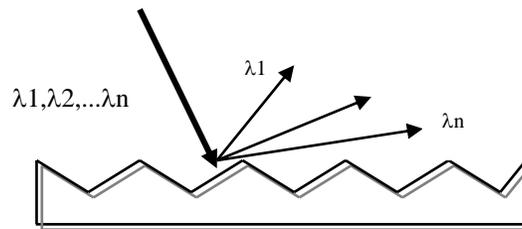


Figura 1.6. Rejilla de difracción, selecciona la longitud de onda y es una guía de onda cuyo índice de refracción se alterna periódicamente entre valores establecidos y se utilizada para sintonización.

Arreglo de Láser. Su utilidad se debe a que habilita múltiples transmisores de diferente formato, es un conjunto de dispositivos láser de sintonización fija integrados en un solo componente, cada uno opera con longitudes de onda diferentes en un rango fijo y limitado, permitiendo que cada longitud de onda sea modulada en forma independiente.

1.3.4. Características de los Dispositivos Láser

Las principales características de los dispositivos láser sintonizables para sistemas WDM, son:

- *Ancho de línea del láser*: Es el ancho espectral de luz generado por el láser. Afecta el espaciamiento entre canales y el valor de la dispersión, ocurrida al propagarse la luz a lo largo de la fibra.
- *Estabilidad de Frecuencia*: Capacidad del dispositivo láser para mantener estable la frecuencia de operación, asignada por el diseñador durante su tiempo de vida, las inestabilidades que pueden afectar en sistemas WDM son la ubicación y el espaciamiento de los canales son saltos de modo, que ocurre principalmente en los dispositivos láser de corriente de inyección, consiste en un salto repentino en la frecuencia causado por un cambio en la corriente de inyección con respecto a un umbral dado, alteración de modo en donde la frecuencia varía debido a cambios de temperatura; desviación de longitud de onda en donde la frecuencia varía debido a cambios en la corriente de inyección.
- *Número de modos longitudinales n*: Son el número de longitudes de onda aplicadas por el láser. Depende de la longitud de onda del canal λ y de la longitud de la cavidad L, y viene dada por la expresión: $n\lambda=2L$, es conveniente implementar dispositivos láser que produzcan un modo longitudinal simple, porque los modos longitudinales no deseados generan valores significativos de Dispersión Cromática y Dispersión de Modo de Polarización.

- *Rango de sintonización* : Es el rango de longitudes de onda sobre las cuales el láser es operado limitado por el espectro de ganancia del dispositivo, y el rango de longitudes de onda que pueden procesar los demás componentes ópticos del sistema WDM.
- *Tiempo de sintonización* : Tiempo requerido por el láser para sintonizar una longitud de onda a partir de la longitud de onda inicial de operación.
- *Continuidad de la sintonización* : Cuando el láser puede sintonizar cualquier longitud de onda dentro del rango de sintonización.

1.3.5. Enrutamiento

Las redes actuales se basan en el uso de señales ópticas para el transporte de información entre nodos, junto con el uso de señales eléctricas para el enrutamiento dentro de los nodos. Los transconectores digitales usan componentes ópticos solo como interfaces de la red, mientras que la central se sigue manejando eléctricamente. Se requieren numerosas conversiones eléctricas / ópticas con todas las restricciones asociadas de costo y tiempo. El enrutamiento y la protección en el nivel óptico son vitales para soportar las redes IP previstas actualmente por los operadores líderes. Los elementos claves de estos dispositivos totalmente ópticos son las unidades ópticas de añadir y quitar, las cuales pueden insertar y / o extraer una o varias longitudes de onda. Los transconectores ópticos son dispositivos que usarán la conmutación óptica para ofrecer transparencia de velocidad binaria y de protocolo.

1.3.6 Amplificadores Ópticos

El hito de mayor influencia en la evolución de los sistemas de transmisión de fibra óptica fue el desarrollo de amplificadores de fibra dopados con Erblio (EDFAs) que se observa en la figura 1.7, al final de los 80s y comienzos de los 90s. El EDFA consiste de un tramo del cable de fibra óptica dopadas con Erblio, el Erblio es un elemento de tierra rara cuyos átomos son excitados en la fibra usando una fuente de bombeo pasando de un estado fundamental a un estado excitado, en el proceso de pasar de un estado excitado al fundamental cada átomo emite un fotón, el fotón de señal ascendente hace que estos átomos regresen a su estado fundamental desencadenando una señal adicional de fotones produciendo la amplificación de la luz [7].

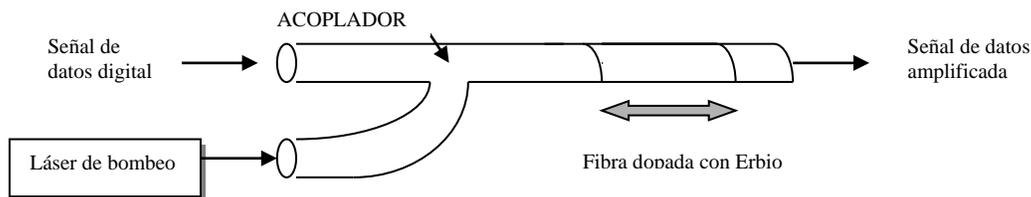


Figura 1.7. Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA), el cual tiene un tramo de fibra dopada con Erblio cuyos átomos al pasar de un estado excitado al fundamental desencadenan una señal adicional de fotones que amplifican la señal

En los sistemas de transporte de largo trayecto, la clave que permite la tecnología llevar información a estaciones intermedias es la amplificación óptica basada en fibra dopada de erbio. Aunque una señal óptica se puede propagar a lo largo de una gran distancia, antes de ser amplificada, el sistema básico WDM se puede beneficiar del proceso de amplificación

óptica, el cual usa el principio de emisión estimulada similar al método usado en un dispositivo láser de transmisión. Anteriormente cada estación intermedia contenía tantas funciones de repetidor como señales transmitidas había, hoy los avances en la amplificación óptica han hecho posible amplificar todas las señales transmitidas con los EDFA.

Existen tres tipos de amplificación óptica conocidos como: 1R, 2R, 3R. La amplificación 1R (Regeneración), consiste simplemente en la estimulación del nivel de la señal óptica de entrada. Provee transparencia total de datos, ya que es independiente del formato de modulación de la señal y de la temporización. En la amplificación 2R (Regeneración y Recuperación de la forma de la señal), las señales ópticas son amplificadas mediante una conversión inicial del flujo de información a una señal de datos eléctrica, realizando luego la retransmisión óptica de la señal, cuya forma ha sido recuperada. El proceso de recuperación de la forma de la señal reproduce la forma original del pulso de cada bit. La recuperación de la forma se aplica principalmente a señales moduladas digitalmente, pero en algunos casos puede también ser aplicadas a señales analógicas. En la amplificación 3R (Regeneración, Recuperación de la forma de la señal y Resincronización), la resincronización de la señal es resincronizar la señal a su modelo inicial de tiempo y de velocidad de bit, es decir se aplica únicamente a señales moduladas digitalmente. En los sistemas WDM actuales, las técnicas 3R y 2R proveen menos transparencia que la técnica 1R, ya que cada longitud de onda necesita ser separada antes de ser amplificada electrónicamente y luego re combinada antes de ser retransmitida. Por esta razón, actualmente la transferencia óptica está limitada a los sistemas con amplificación 1R. Sin

embargo, una desventaja de este tipo de amplificación consiste en que las señales ópticas son amplificadas sin recuperar su forma original.

Por las razones anteriores un importante reto a cumplir por los ingenieros de componentes, ha sido la falta de uniformidad de la respuesta de la ganancia espectral en los amplificadores ópticos, con técnicas de amplificación 3R efectuadas completamente en el dominio óptico, lo que evitaría los cuellos de botella electrónicos asociados a la ausencia de transparencia óptica de los sistemas actuales. Además de lograr un tratamiento completo de la señal óptica tanto en amplitud, forma y sincronización. Se amplificaban diferentes longitudes de onda con diferentes ganancias, mientras que el sistema requiere la misma amplificación para todas las longitudes de onda. Este problema se ha resuelto mediante el desarrollo de la fibra dopada con Erblio, con un alto contenido de Aluminio y por la realización de nuevos filtros de ecualización, basados en tecnologías tales como la Rejilla de Fibra de Bragg (FBG).

El amplificador de fibra dopado con Erblio, es el componente fundamental para amplificar las señales ópticas WDM a lo largo del enlace de transmisión de fibra. El EDFA bombeado por diodos láser que emiten a 980 o a 1480 nm, puede proporcionar varios valores de potencia de salida total llegando hasta un máximo de +23 dBm como se ve en la figura 1.8 del espectro de ganancia del EDFA en el máximo con una longitud de onda en la ventana C. Este amplificador incorpora un ecualizador de filtro de ganancia para proporcionar una respuesta de ganancia plana, la calidad de la amplificación requerida aumenta con la capacidad. La última mejora en amplificación óptica de alto tráfico, se alcanzó con los amplificadores Raman, en donde el medio amplificador es la misma fibra de transporte, el

efecto Raman es un fenómeno no lineal que ocurre en altas concentraciones de potencia en la fibra.

La combinación Raman con los EDFAs estándares pueden ofrecer amplificadores virtualmente sin ruido.

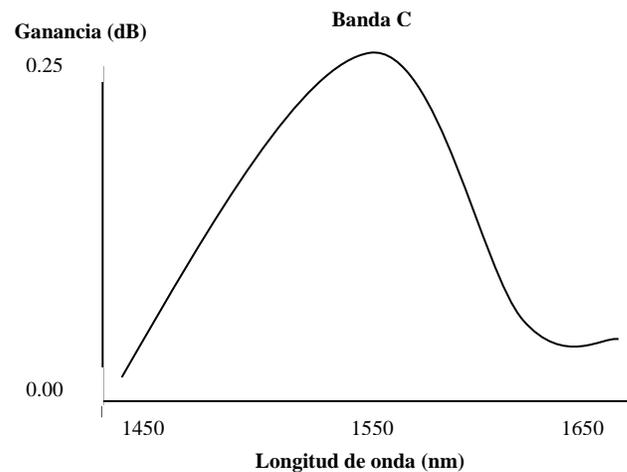


Figura 1.8. Espectro de ganancia del EDFA, donde su máxima ganancia está en la ventana C a la longitud de onda de 1550 nm.

Bombeo. Los láser de alta potencia con longitudes de onda de 980 nm o 1480 nm se usan para excitar el Erblio hacia estados de salida, de ahí el término láseres de bombeo. Potencias que van desde 1 mW hasta 60 mW se usan para bombear los EDFAs, dependiendo de la aplicación y del número de canales a amplificar los EDFA están en 890 nm para amplificadores de ruido bajo y 1480 nm en etapas de potencias altas.

1.3.7 Parámetros básicos para el Amplificador Óptico [8]

- *Ganancia*. Mide la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la señal óptica. Los amplificadores están caracterizados por la eficiencia de ganancia, la cual mide la ganancia como una función de la potencia de entrada en dB/mW.
- *Ancho de Banda de la Ganancia*: Se refiere al rango de frecuencias o longitudes de onda sobre las cuales el amplificador es efectivo. En una red WDM, la ganancia de ancho de banda define el número de longitudes de onda disponibles para un espaciamiento de canales dado.
- *Punto de Ganancia de Saturación*: Se referencia al valor de la potencia de salida a partir del cual esta no se incrementa con un aumento en la potencia de entrada. Cuando se incrementa la potencia de entrada más allá de cierto valor, los electrones en el amplificador no pueden emitir energía lumínica adicional.
- *Sensibilidad de Polarización*: Efecto de la polarización de la señal en la ganancia del amplificador óptico. La sensibilidad es medida en decibeles y se refiere a la diferencia de ganancia entre las polarizaciones en modo Transversal Eléctrico (TE) y Transversal Magnético (TM).
- *Ruido de Amplificador*: La fuente dominante de ruido es la Emisión Espontánea Amplificada (ASE), la cual surge de la emisión espontánea de fotones en la región activa del amplificador óptico. La cantidad de ruido generada depende de factores como el espectro de ganancia del amplificador, ancho de banda de ruido y la población de parámetros de inversión, la cual especifica el grado de población que ha sido logrado entre los dos niveles de energía.

Debido a una única coincidencia de la naturaleza, la diferencia entre los niveles de energía de los estados atómicos del Erblio, se alinea con la ventana de 1.55 μm de longitud de onda de bajas pérdidas en la fibra óptica, el bombeado se hace usando un láser a una longitud de onda típica de operación 980 o 1480 nm y son más bajas que la de la señal. Los amplificadores se volvieron una realidad comercial a comienzos de los 90s con el desarrollo del láser semiconductor compacto de bombeado, fiable, y de alto poder, los EDFAs estimularon el despliegue de una generación completamente nueva de sistemas.

Los amplificadores de fibra dopada con Erblio forman troncales de las redes ópticas de alta capacidad, tienen una región de ganancia de 1525 a 1560 nm, pero está limitada por la dispersión de Rayleigh de retorno en la cual la energía lumínica de la señal se dispersa y se dirige en la fibra hacia la fuente de señal. El ancho de banda es de 35 nm y se puede aumentar usando filtros de ecualización de Ganancia, la ganancia en dB de 25 a 51. Un alto nivel de inversión provee bajo ruido y alta eficiencia, para un Amplificador Óptico (OA) con dos o mas etapas de ganancia el ruido está determinado, por la etapa de entrada de alta ganancia y la potencia de salida está determinada por la etapa de salida fuertemente saturada.

El estado del arte de los sistemas WDM requieren que los EDFAs tengan baja figura de ruido, alta potencia de salida y espectro de ganancia uniforme, y según da la ubicación en el sistema a los EDFAs los clasificamos en:

- *Amplificador en Línea:* Su función es que periódicamente amplifica señales ópticas atenuadas por la transmisión en la fibra.
- *Amplificador de Potencia:* Estimula la potencia óptica durante la transmisión en la fibra.
- *Pre-amplificador:* Estimula la potencia de la señal en el receptor.

Con el fin de acceder a la región de ganancia plana entre 1565 y 1615 nm (banda L), se ha desarrollado la técnica de Amplificador de Banda Ultra-Ancha, con una Arquitectura de División de Banda en la cual, el EDFA ofrece un nivel considerable de ganancia en la banda L, utilizando en su rango de frecuencias un nivel de inversión mucho menor que en la banda C, como se muestra en la figura 1.9.

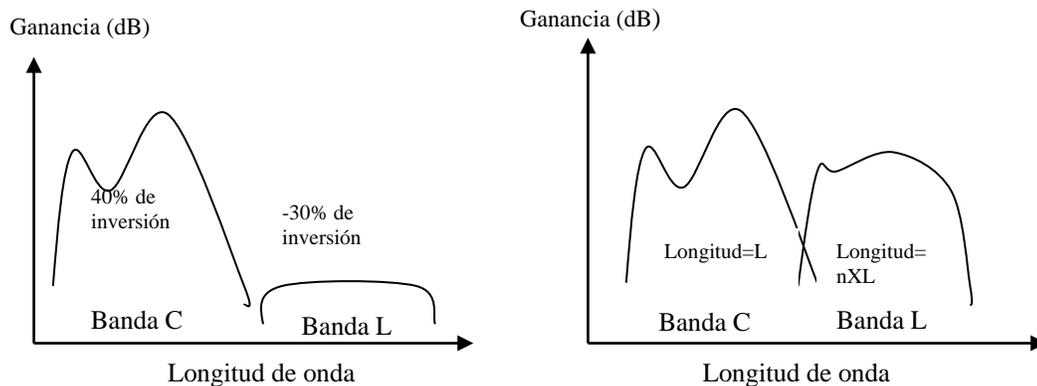


Figura 1.9 Principio del EDFA explotando las bandas C y L. con la arquitectura de División de Banda que se observa a la derecha de la figura, se ha desarrollado la técnica de Amplificación de Banda Ultra-Ancha para que el EDFA tenga un mejor nivel de ganancia.

En el diseño del EDFA se utiliza un aislador de fibra en línea, que previene la reflexión de retorno de la luz que puede degradar la señal de transmisión al pasar a través del amplificador, un multiplexor WDM es necesario para combinar la energía del láser de bombeo de 980 nm con la señal de un canal de información a 1550 nm en el EDFA; cubriendo así las bandas C y L.

1.3.8 Ventajas del EDFA en Sistemas WDM

- No necesita circuitos electrónicos de alta velocidad y permite realizar amplificación 1R.
- Produce alta ganancia, alta potencia y bajo ruido.
- Todas las señales ópticas pueden ser amplificadas simultáneamente en una fibra simple, lo cual facilita la introducción de la técnica WDM.
- Permite duplicar la cantidad de canales amplificados, mediante la utilización de las bandas C y L, alrededor de la ventana óptica de 1550 nm.
- Facilita aplicaciones con velocidades de transferencia de Tbps en el ámbito comercial.
- Su tiempo de amplificación espontánea es mucho mayor que las velocidades de bit de los formatos correspondientes a los servicios multiplexados en la fibra. Esto permite aplicaciones de conmutación óptica de paquetes de información.
- Como resultado de su dinámica lenta, la distorsión inter-simbólica y la interferencia entre canales son despreciables.

1.3.9. Multiplexación óptica

Antes de multiplexar los canales de información en la fibra óptica, se debe realizar el proceso de adaptación de las señales entrantes, las cuales dependen de la longitud de onda de operación estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sección de Estandarización de Telecomunicaciones (IUT-T, *International Telecommunications Union-Telecommunications Standardisation Saction*). Por lo tanto el bloque de acoplamiento de los diferentes canales entrantes, es un conjunto de acopladores de fibra con la cantidad apropiada de puertos de entrada.

Estos adaptadores se denominan Adaptadores de Longitud de Onda de Transmisión (TWA, *Transmission Wavelength Adapters*), los cuales retransmiten las señales ópticas procedentes de los terminales de entrada que corresponden a canales simples de información, por medio de interfaces que emiten señales ópticas en la región de 1200 a 1600 nm. Esto se lleva a cabo mediante la conversión Óptica-Eléctrica-Óptica (OEO) en el interior de dichas unidades de adaptación. El objetivo principal es realizar la conversión de la longitud de onda desconocida de la señal entrante, a una longitud de onda fija dentro de las ventanas ópticas de transmisión (recomendación G.692 según la UIT-T). Para realizar la adaptación, el TWA recibe el tráfico de la señal entrante por medio de un láser que opera en forma estable en una longitud de onda preseleccionada. Se requiere un TWA para cada señal óptica a multiplexar, cada señal óptica de entrada cuya longitud de onda ha sido adaptada por medio del TWA, conforma un canal WDM básico.

Con la ventaja de los EDFA capaces de amplificar la señal de muchas longitudes de onda simultáneamente, se proporcionó otra manera de aumentar la capacidad del sistema en lugar de aumentar la tasa de bit, aumentando el número de longitudes de onda de trabajo, es usando WDM. Los EDFA son quizás los mas grandes catalizadores que ayudaron al despliegue de sistemas WDM, pero dependiendo de las condiciones de diseño tales como la calidad de la fibra óptica instalada, el número de canales a multiplexar, la velocidad de transferencia de bits y la distancia del enlace pueden ser requeridos amplificadores ópticos.

1.3.10. Multiplexores por División de Longitud de Onda

Las señales provenientes de los diversos canales en las fibras ópticas de entrada son combinadas en una señal compuesta, la cual se inyecta en una fibra óptica de salida. Este proceso es realizado por el denominado Multiplexor por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength División Multiplexer*), el cual define el punto inicial de transporte de los múltiples canales.

Existen diversas técnicas de construcción de un WDM, las cuales determinan el número de canales y la longitud de los enlaces de fibra óptica. El WDM es independiente del tipo de información transportada en cada una de las señales ópticas entrantes y puede incluir etapas de amplificación en línea, con el fin de estimular la potencia de las señales. El diseño del WDM está basado en dos mecanismos:

Dispersión angular. Una rejilla de difracción puede combinar o separar las diferentes longitudes de onda, y está conformada por un conjunto de guías de onda las cuales tiene un número determinado de canales, dispuestos regularmente con una diferencia constante de longitud de trayecto entre canales vecinos, dada por $L=(m \cdot \lambda_c)/n_c$, donde m es un número entero que determina el orden de la fase de emisión de luz de la rejilla, λ_c es la longitud de onda central y n_c , es el índice de refracción de la guía de onda de cada canal.

Filtrado óptico. Los filtros ópticos están dentro de la familia de los dispositivos pasivos, que no necesitan potencia externa para realizar las funciones para lo que fueron diseñados, estos consisten en capas de materiales transparentes de diferentes índices de refracción, la interferencia dentro de las películas delgadas provoca que unas longitudes de onda pasen y otras sean reflejadas, y son elementos claves para la transmisión y el enrutamiento de señales WDM. Por ejemplo en la parte receptora de un enlace WDM, es necesario recuperar todas las señales transmitidas en diferentes longitudes de onda. Como el foto detector es intrínsecamente un dispositivo de banda ancha, es esencial utilizar técnicas ópticas de demultiplexación antes del fotorreceptor. Las soluciones mas frecuentes del filtrado óptico son [8,9]:

Filtros dieléctricos. Formados por capas en las cuales cada longitud de onda se filtra mediante una pila de capas diferentes. La organización de las capas permite al filtro trabajar a una longitud de onda específica con los siguientes dispositivos:

- Rejillas de Bragg, en las cuales la modulación periódica del índice de refracción, se alcanza usando rejillas producidas en la fibra de sílice
- Guías de onda en array, en las que diferentes longitudes de onda hacen refracción sobre arreglos de fibra colocados en ranuras en forma de V.
- Cavidades micro-ópticas Fabry-Perot, en las que se ajusta de acuerdo a la frecuencia requerida.

Los Guías de Onda en Arrays (AWG), se pueden fabricar usando tecnología de los semiconductores, dando lugar a una reproducción fácil, alto rendimiento y rentabilidad de la fabricación.

1.3.11 Entrelazado

La tecnología convencional usada en redes ópticas activas de gran ancho de banda, es la de multiplexores y demultiplexores ópticos pasivos de alta densidad, la segmentación y el entrelazado de la óptica ofrecen una solución alternativa. Los canales densos pueden resolverse por medio de una amplia anchura de banda con baja pérdida de inserción, aislamiento alto, alta precisión de canal y uniformidad. Típicamente, 80 canales con 50 Ghz de espaciado, pueden resolverse con dos conjuntos complementarios de 40 canales con 100 Ghz de espaciado. En la figura 1.10 se muestra el principio de operación de espaciado de un intercambiador. Este dispositivo se utiliza para aplicaciones de inserción / extracción y para mejoramiento de la granularidad de los canales.

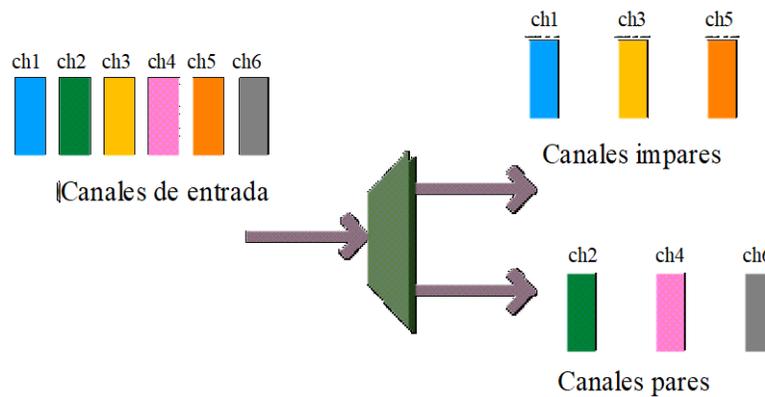


Figura 1.10. Principio de operación de un intercambiador, consiste en separación de los canales de entrada en pares e impares facilitando su manejo, este dispositivo puede usarse para aplicaciones de inserción / extracción y mejora de la granularidad entre canales.

1.3.12. Conmutación y Transconexión

Los sistemas de fibra WDM, están ampliamente desplegados en las redes de telecomunicaciones. Los operadores quieren poder gestionar redes ópticas en el ámbito de la longitud de onda, o de la fibra para reforzar la eficacia de la planta de fibra instalada y el equipo base, esto implica la necesidad de poder conmutar y transconectar fibras o longitudes de onda en los elementos de red, los aparatos siguientes revisan brevemente las distintas tecnologías a nivel de sistema, con una distinción clara entre el nodo y la transmisión punto a punto.

Conmutadores Ópticos. Existen cuatro aplicaciones principales como la Protección de la capa óptica (longitud de onda y fibra), inserción y extracción (longitud de onda), que

requieren conmutadores de pocos puertos, típicamente 1x2, 2x2, NxN, hasta un máximo de N=8 como el que se observa en la figura 1.11. Otras aplicaciones como la Conexión de cruce (Longitud de onda y fibra) y el encaminamiento (paquetes ópticos) requieren conmutadores con muchos mas puertos del tipo NxN donde N es 512 en una primera fase, y se espera que crezcan hasta por lo menos 4.000 puertos.

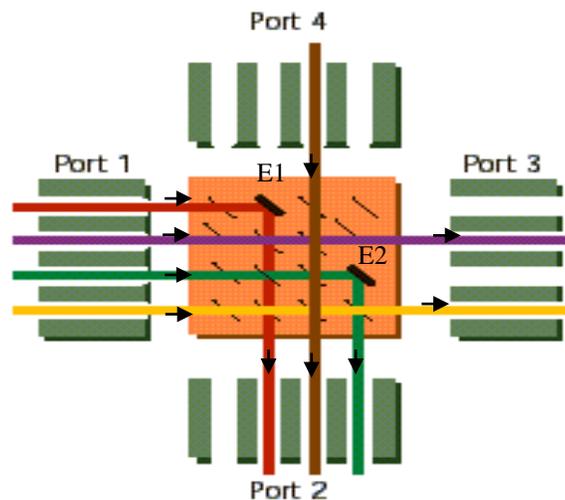


Figura 1.11. Estructura genérica de un conmutador óptico 2D 4x4, utilizando para la protección de la capa óptica y la inserción y extracción. Este dispositivo enruta las señales de luz o de información de entrada en este caso de los puertos 1 y 4 hacia los puertos de salida 2 y 3 a través de espejos reflectores.

Los conmutadores del tipo optomecánico, cristal líquido o polímero tienen normalmente una pérdida de inserción de 0,8 a 1,5 dB y un tiempo de conmutación de 5ms (<1ms para los tipos de cristal líquido). Los suministradores de conmutadores están buscando conmutadores 1x2 y 2x2 basados en la tecnología de sistemas mecánicos micro-electrónicos (MENS), estos ofrecerán las mismas características ópticas, pero serán mucho mas pequeños y significativamente mas baratos.

Los conmutadores basados en guías de onda planas se ordenan en arquitecturas multicapas para construir transconectores ópticos de hasta 512 puertos, típicamente un conmutador de 32x32 tiene una pérdida de inserción de 7dB y un tiempo de conmutación entre 5 y 10 ms. En el conmutador de la figura 1.11 la luz se desvía desde el puerto 1 (puerto de entrada) al puerto 2 (puerto de salida), por medio de la creación de una reflexión total de dos longitudes en el transconector, y por la inserción de un espejo en el transconector del camino luminoso, para las tecnologías MENS (óptica de espacio libre).

1.3.13. Dispositivos de Inserción / Extracción

Cuando el número de canales aumenta, el número de extracciones y adiciones también aumentará debido al incremento del tráfico, los métodos y tecnologías para los módulos de inserción y extracción pueden dividirse en tres clases principales:

- Multiplexación y demultiplexación de todos los canales.
- Dispositivos de inserción / extracción de canal individual en cascada.
- Dispositivos de inserción / extracción multicanal.

La figura 1.12, muestra un modulo reconfigurable basado en filtros dieléctricos multicapa en una configuración de inserción / extracción de canal simple en cascada pero se limita para un número mayor de 32 canales, tiene un espaciado pequeño de canal (50 Ghz) y presenta diafonía, pérdidas altas de inserción y filtrado de anchura de banda.

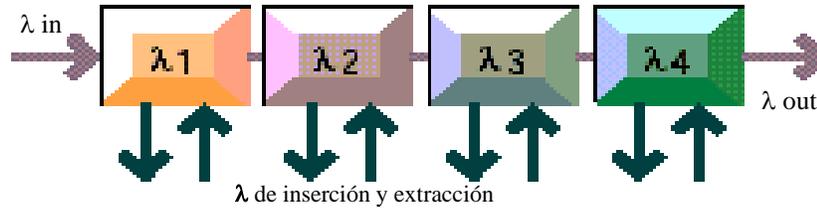


Figura 1.12. Dispositivo de inserción y extracción es una unidad de canal individual en serie y un módulo basado en filtros dieléctricos los cuales insertan o extraen las longitudes de onda deseadas en el mismo canal.

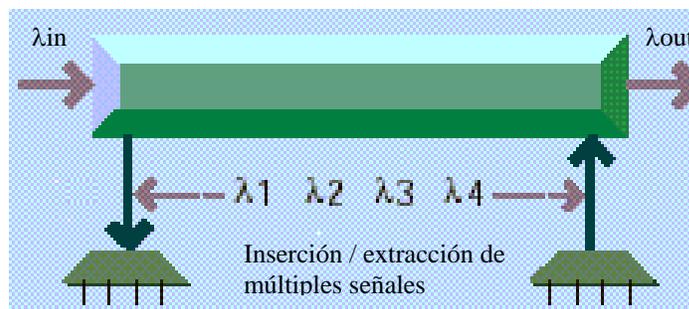


Figura 1.13. Dispositivo de inserción y extracción de unidad multicanal basado en rejillas de Bragg multicanal como filtros de ranura, el cual inserta y extrae a el canal principal un grupo de longitudes de onda deseadas por medio de filtros.

El dispositivo de inserción y extracción (add / drop) basado en el uso de las rejillas Fiber Bragg multicanal como el que se observa en la figura 1.13 el cual tiene filtros de ranura tiene las ventajas de baja pérdida de inserción (9 dB), y compatibilidad con los amplificadores en línea, conveniente para 50 Ghz (16 canales), 100 Ghz (8 canales), y 200 Ghz (4 canales) de espaciado de canal. Con la tecnología de cristal líquido en la construcción de dispositivos add / drop, se puede tener una capacidad y reconfigurabilidad total.

1.4. BLOQUE DE RECEPCION

En esta etapa es muy importante realizar el proceso de recuperación de los canales de información. Este bloque está compuesto por un demultiplexor y filtros foto detectores sintonizables, el proceso de demultiplexación se efectúa al filtrar la señal óptica compuesta.

1.4.1. Receptor Óptico Digital

El fotodiodo convierte la señal óptica en una corriente eléctrica, luego el pre-amplificador convierte esa foto corriente en un voltaje utilizable con un nivel apropiado de impedancia de salida, este pre-amplificador es un TIA (Amplificador de Trans-Impedancia) debido a la conversión de corriente a voltaje y al equilibrio entre el ancho de banda, ruido y sobrecarga. Luego este voltaje es transferido al amplificador principal, para una amplificación de voltaje adicional, como se ve en la figura 1.14.

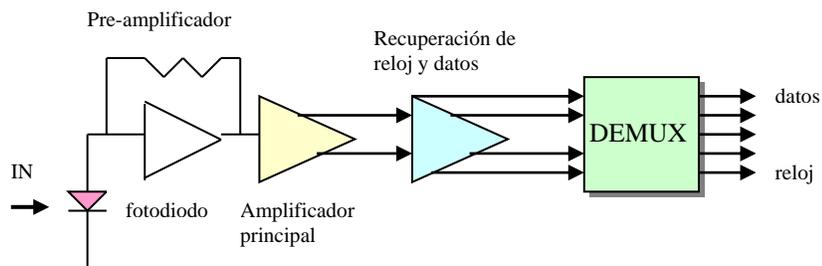


Figura 1.14. Receptor óptico para un sistema WDM, el fotodiodo detecta la señal de luz para después ser amplificada y recuperada en el demultiplexor en datos digitales.

La linealidad es importante aquí y dependiendo del requerimiento, el amplificador puede ser de limitación o de control automático de ganancia. Este alimenta los circuitos de Recuperación de Reloj y Datos (CDR), con el fin de extraer la señal de reloj y sincronizarla con la salida de datos digitales aquí se efectúa el primer nivel de procesamiento digital. La demultiplexación de los datos digitales ocurre después de la recuperación.

La sensibilidad en los receptores ópticos es la mínima potencia promedio incidente para la que el receptor mantenga un desempeño de BER mínimo. Está determinada principalmente por la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), la cual es dependiente del nivel de ruido de la corriente de entrada y del alto grado de respuesta óptica a la señal de luz entrante.

El adecuado funcionamiento del receptor óptico, está determinado por el rendimiento de los elementos analógicos de la parte frontal y su interconexión física. Idealmente los componentes ópticos y eléctricos deberían tener retardo constante sobre el ancho de banda de operación, pero en realidad las velocidades de datos muy altas son susceptibles a desviaciones de fase de los pulsos digitales debido a los periodos de bit muy cortos, incrementando la BER.

1.4.2. Detección Óptica de Señales

La detección óptica de las señales incidentes en el bloque receptor, puede ser realizada mediante dos técnicas: Detección Directa y Detección Coherente.

Detección Directa. Un foto detector convierte el flujo de luz de entrada en un flujo de electrones, el cual es amplificado y transferido a través de un dispositivo de umbral. El valor lógico de la señal de entrada en un instante de tiempo depende del valor de la magnitud del flujo con respecto a cierto umbral establecido para la duración de un bit; o sea la decisión se toma con base en la presencia o ausencia de luz durante la duración del bit [7].

Detección Coherente. La información de fase es usada para decodificar y detectar las señales, se usa un láser local monocromático que opera como oscilador, donde el rayo óptico entrante es adicionado a la señal del oscilador y la señal resultante detectada mediante un fotodiodo. La salida del fotodiodo es integrada sobre la duración del símbolo y se usa un umbral de detección para alcanzar el flujo de bits. Este tipo de detección permite la recepción de señales débiles en un ambiente de ruido, pero se limita debido a que la fase de la señal transmitida sufre fluctuaciones aleatorias alrededor de la fase deseada, porque los dispositivos láser de semiconductor tienen anchos espectrales diferentes de cero ya que la señal transmitida consiste de un número de frecuencias con varias fases y amplitudes [7,9].

1.4.3. Foto detectores

En general se usan dos tipos de foto detectores en la parte receptora de un enlace dependiendo de la sensibilidad requerida por el sistema, una estructura simple, como la de un fotodiodo PIN, suministra una sensibilidad de 1 A/W en la ventana de 1550 nm. Está formada por tres capas de InP, una dopada con p, la segunda sin dopar (también llamada

intrínseca) y la tercera dopada con n. Los fotodiodos de Avalancha (APD) tienen una estructura mas compleja con ganancia eléctrica interna suministrada por el efecto avalancha en la región intrínseca de alto voltaje. Se pueden alcanzar sensibilidades de 5 a 10 A/W con poca degradación del nivel interno de ruido [10,11].

Los fotodiodos basados en InP, son receptores de banda ancha que se usan para cubrir la segunda (1310 nm) y tercera (1550 nm) ventana de transmisión. La geometría del fotodiodo es un parámetro clave del dispositivo con respecto al ancho de banda eléctrico; a medida que aumente la velocidad, también llegarán a ser factores críticos: la vida del operador y la homogeneidad y los parásitos de las líneas eléctricas.

Los fotodiodos de superficie iluminada (la luz llega ortogonalmente con respecto al área sensible) también se optimizan para velocidades binarias de hasta 10 Gbps. Los dispositivos de borde iluminado (la luz y la región activa son colineales) tienen un rendimiento mejor que el de la velocidad de 40 Gbps [10].

Los actuales dispositivos receptores incluyen el fotodiodo con la sección de entrada del amplificador (por lo general un amplificador de transimpedancia), seguido por un iluminador o etapa de Control Automático de Ganancia (AGC).

El foto detector es intrínsecamente un dispositivo de banda ancha y es esencial utilizarlo en técnicas ópticas de demultiplexación antes del fotorreceptor para recuperar todas las señales transmitidas en diferentes longitudes de onda.

1.4.4. Filtros

Los filtros ópticos están dentro de la familia de los dispositivos pasivos, que no necesitan potencia externa para realizar las funciones para lo que fueron diseñados, estos consisten en capas de materiales transparentes de diferentes índices de refracción, la interferencia dentro de las películas delgadas provoca que unas longitudes de onda pasen y otras sean reflejadas, y son elementos claves para la transmisión y el enrutamiento de señales WDM.

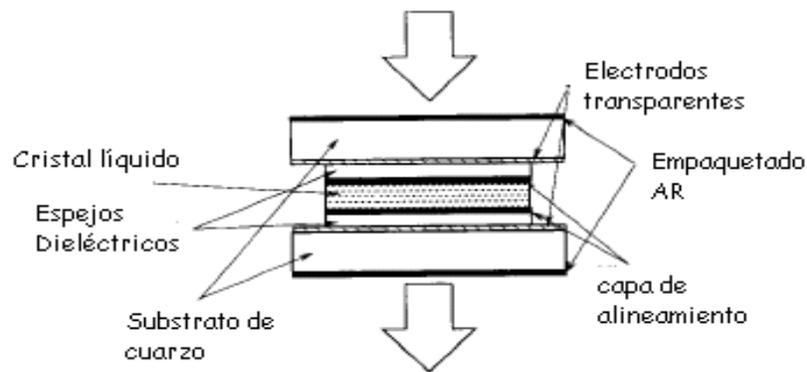


Figura 1.15. LC-FPI, es un filtro usado en sistemas WDM, compuesto por un interferómetro de Fabry-Perot y cristal líquido que usa espejos dieléctricos para encaminar la luz.

En la figura 1.15 se muestra un filtro LC-FPI usado en sistemas WDM por su simplicidad y bajo consumo de voltaje de conducción es adaptable y económico [12]. La viabilidad de los sistemas WDM, es dependiente de la velocidad y del rango de los filtros utilizados para recuperar los canales de información. Estos filtros son de dos tipos: Filtros fijos y filtros sintonizables.

Filtros Fijos. Estos dispositivos filtran una o mas señales de una o mas señales de fibra simple ,y puede ser usada para implementar multiplexores y demultiplexores ópticos o arreglos de receptores. Una rejilla separa la señal incidente en sus componentes de longitud de onda mediante la reflexión de la luz en las ranuras en todos los ángulos. A ciertos ángulos, una o varias longitudes de onda se adicionan constructivamente, permitiendo su selección mediante la ubicación de un filtro sintonizado, a la propia longitud de onda en el ángulo respectivo [11,12]. Un ejemplo de este tipo de filtros son las fibras de rejillas de Bragg

estas son fabricadas a partir de miles de secciones de modulación de índice de refracción impresas sobre el núcleo de fibras fotosensitivas utilizando dispositivos láser ultravioleta, tiene la desventaja de que el índice de refracción depende de la temperatura generando modificaciones en las longitudes de onda reflejadas. Este proceso crea patrones de interferencia que reflejan o dejan pasar ciertas longitudes de onda debido a que la variación del índice de refracción es directamente fotoinducida en el núcleo de la fibra

Características:

- *Reflectividad.* Definida como la variación de energía reflejada y transmitida.
- *Ancho de Banda espectral.* Determinado por la fineza del sistema.

Filtros Sintonizables. Se caracterizan por los siguientes parámetros [12]:

- *Rango de sintonización.* Longitudes de onda que pueden ser manejadas por el filtro.

- *Tiempo de sintonización.* Tiempo requerido para sintonizar una longitud de onda a partir de una inicial de sintonización.
- *Rango de espectro libre (FSR).* Función de transferencia que se repite cada cierto periodo, depende de parámetros propios del dispositivo tales como longitud de las cavidades o de las guías de onda.
- *Fineza.* Medida del ancho de la función de transferencia. $\text{Fineza} = \text{FSR} / \Delta f$, donde Δf es el ancho de banda de 3dB por canal.

Los filtros ópticos sintonizables más utilizados en sistemas WDM son el Etalón, Cadena Mach-Zehnder (MZI), Filtro Acusto-Optico Sintonizable (AOTF), Filtro Electro- Óptico Sintonizable (EOTF), Filtros Fabry-Perot de Cristal Líquido, Filtro de Interferencia de Película Delgada, Rejilla de Guía de Onda (AWG). Las soluciones mas frecuentes del filtrado óptico son [12,13]:

- Filtros dieléctricos, formados por capas en las cuales cada longitud de onda se filtra mediante una pila de capas diferentes. La organización de las capas permite al filtro trabajar a una longitud de onda específica.
- Rejillas de Bragg, en las cuales la modulación periódica del índice de refracción se alcanza usando rejillas producidas en la fibra de sílice.
- Guías de onda en array, en las que diferentes longitudes de onda hacen refracción sobre arreglos de fibra colocados en ranuras en forma de V.
- Cavidades micro-ópticas Fabry-Perot, en las que se ajusta de acuerdo a la frecuencia requerida.

Los dispositivos pasivos en las redes como los filtros necesitan señales con diferentes longitudes de onda propagándose en la fibra, que pueda ser multiplexada y demultiplexada en redes WDM, los filtros son desarrollados según la demanda y los mejor usados hoy día, son los filtros de interface en volúmenes de película delgada y los filtros de circuitos de onda ligera (PLC).

Los Filtros de Interface de multicapas de películas delgadas, son desarrollados usando la banda estrecha de filtros WDM. La estructura de filtro de película delgada es basada en el Etalón de Fabry-Perot, compuesto por una cavidad y espejos y con actuadores como un filtro pasabanda. La longitud de onda central del pasabanda es determinada por la longitud de la cavidad. La estrecha y delgada película del filtro de Interfaces para WDM consiste de mas de dos cavidades F-P como la que se muestra en la figura 1.25, separadas por capas de un dieléctrico reflectivo, y cada cavidad contiene estructuras de multicapas con más de 50 capas. Estas dos capas son depositadas alternadamente sobre un sustrato de vidrio. Los materiales usados para las capas son usualmente SiO_2 y TiO_2 porque presentan alta diferencia entre sus índices de refracción. La forma del filtro WDM mejora e incrementa el número de cavidades, con esto es posible obtener filtros con pérdidas de menos de 0.5 dB, aumentando el ancho de banda.

Un Mux / Demux WDM puede ser formado por filtros de películas delgadas en cascada con diferentes longitudes de onda en serie. Esto reduce el espacio entre longitudes de onda e incrementa el número de puertos. Recientemente, el rápido progreso hecho en las redes ha tenido mas demanda en el número de canales y a la vez a la reducción de costos, por lo que el filtro AWG es la llave para las redes fotónicas. Los Guías de Onda en Arrays (AWG)

que se muestra en la figura 1.16 se pueden fabricar usando tecnología de los semiconductores, dando lugar a una reproducción fácil, alto rendimiento y rentabilidad de la fabricación y son dispositivos ópticos para recuperar las señales transmitidas, como el foto detector es intrínsecamente un dispositivo e banda ancha, es esencial utilizar técnicas de demultiplexación antes del fotorreceptor, el filtrado óptico se hace a través de filtros dieléctricos, de rejillas de Bragg o de los AWG por medio de refracción [5,12].

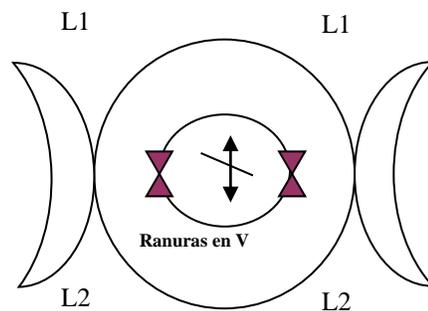


Figura 1.16. Guías de Onda en arreglos (AWG) de 2 canales L1 y L2, los cuales sirven de filtros para longitudes de onda en la etapa de recepción que son seleccionadas por medio de la refracción sobre los arreglos de fibra colocados en ranuras en forma de V.

2. TECNOLOGIAS DE COMUNICACIÓN UTILIZADAS POR TELECOM

La innovación en las tecnologías de comunicaciones ha llevado a la industria de las telecomunicaciones a suministrar a los clientes nuevos servicios con prestaciones y facilidades de funcionamiento. Sabemos que los factores que impulsan las telecomunicaciones en forma resumida son los requerimientos del mercado y el desarrollo de la tecnología, en este capítulo se hablará de las tecnologías y equipos de comunicación utilizados en TELECOM, el funcionamiento de la técnica WDM y la forma de aplicarla. Dentro del desarrollo tecnológico hacia un buen factor de calidad de servicio se tiene una tecnología de Banda Ancha, la cual implica: acceso integrado, asignación flexible de Ancho de Banda, servicios actuales y futuros, una sola red para todos los servicios, fácil comunicación entre oficinas; desarrollo tecnológico en la fibra óptica y dispositivos ópticos económicos, circuitos conmutadores de banda ancha de bajo costo, red óptica síncrona (SONET,SDH), multiplexación de etiquetas (ATM), distribución y combinación de celdas. En la Empresa Nacional de Comunicaciones TELECOM, la tecnología utilizada en la capa física para el transporte de información por fibra es la tecnología TDM y en la parte de transporte utiliza la tecnología de Jerarquía Digital Síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierachy*), de las cuales se hablarán en este capítulo, la idea es examinar estas tecnologías y el equipo que se utiliza en la empresa y describir los beneficios al implementar la tecnología WDM.

2.1 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO (TDM)

Multiplexación es un principio que permite la transmisión de varias señales por un único canal de comunicación de modo tal que cada señal puede ser recobrada en el terminal de recepción, o sea cuando un conjunto de señales independientes comparten un solo medio de transmisión.

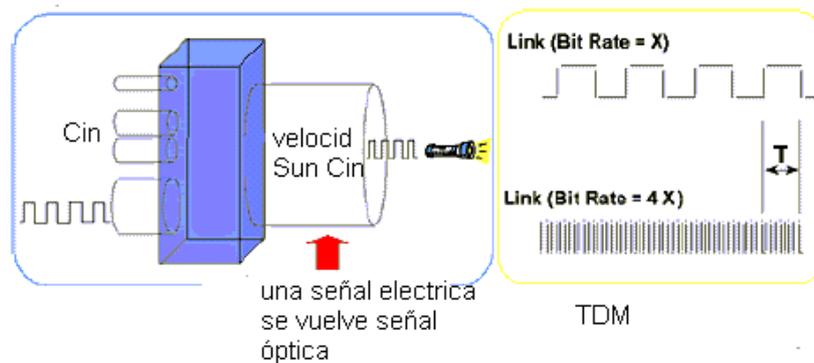


Figura 2.1. Multiplexación TDM. Esta técnica manipula cadenas de bits entrantes a un multiplexor donde a la salida mas bits pueden estar en un espacio de tiempo dado.

La técnica TDM opera de forma análoga a como lo hace por ejemplo un conmutador mecánico, en el cual el brazo se utiliza para tomar muestras de voltaje de cada una de las fuentes conectadas a las entradas, generando así una señal compuesta en su salida. También como se muestra en la figura 2.1, cadenas de bits tributarias entrantes a un multiplexor se convierten en una sola dado la suma de estas cadenas, la cual puede pasar por un espacio de tiempo dado. La técnica TDM ofrece una alternativa sencilla, confiable y económica para compartir un enlace de comunicaciones entre varios terminales de forma totalmente transparente, pero trabaja con cadenas de bits la cual la hace menos flexible a aumentos de tráfico de bits.

2.1.1 Sistema de Multiplexación TDM

En el sistema de multiplexación TDM de la figura 2.2 la señal de entrada es análoga, la cual debe ser filtrada, muestreada y codificada, pero en un sistema TDM digital existen dos tipos de multiplexación por distribución en el tiempo:

- Intercalación de bits.
- Intercalación de grupos.

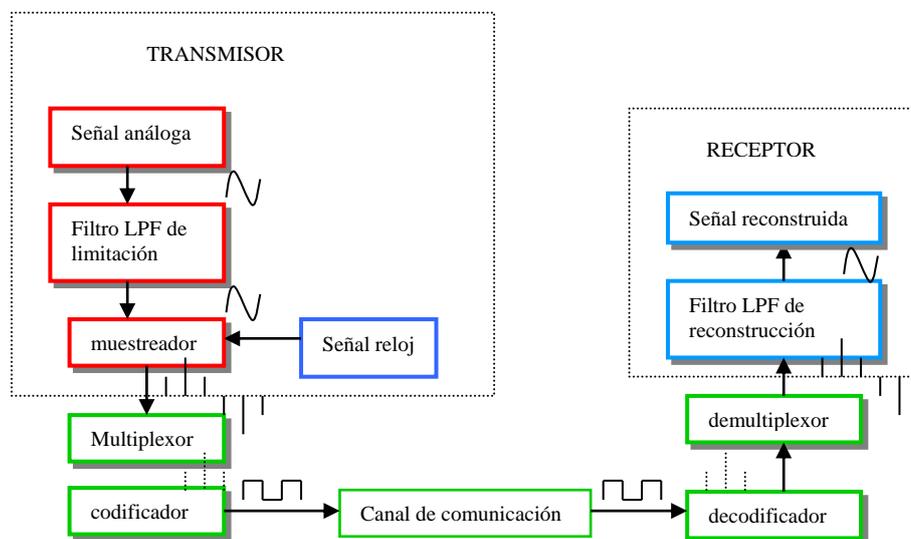


Figura 2.2. Sistema de multiplexación TDM, compuesta de la parte del transmisor, el multiplexor de cadenas de bits luego de se codifica la señal a pulsos binarios para pasar por el medio de transmisión que no necesariamente es fibra para luego decodificarse para llegar al receptor.

Una señal multiplexada es una sucesión de tramas, donde la trama consiste de un bit o de un grupo de bits sucesivos de cada señal (canal) participante (o tributario), acompañados por lo general de bits adicionales para la marcación de la trama u otras funciones.

Un sistema TDM comparte eficientemente un canal de comunicaciones puesto que es capaz de utilizar completamente el ancho de banda disponible. La técnica TDM puede

operar sobre líneas privadas o arrendadas con calidad telefónica a velocidades típicas de 9600 bps, mediante el uso de esta técnica se crea un intervalo de tiempo o subcanal, dedicado o permanente para cada terminal (en el caso de transmisión de datos) que está conectado al equipo TDM.

Los sistemas TDM pueden intercalar los datos de los terminales bit a bit o carácter a carácter. Cuando se utiliza la intercalación de caracteres para multiplexar terminales asíncronos (start-stop) se puede tener una pequeña compresión del ancho de banda, eliminando los bits de inicio y de parada antes de incluir los caracteres en la trama multiplexada, para posteriormente reinsertarlos en el extremo remoto antes de enviarlos hacia los terminales.

La intercalación de caracteres se puede usar para multiplexar datos síncronos de dos maneras diferentes:

- Sin hacer compresión sobre los datos de entrada, es decir, los caracteres se multiplexan sin tener en cuenta su contenido ni su significado [6].
- Analizando y eliminando antes de la multiplexación los caracteres de sincronismo, y aún caracteres de control (por ejemplo chequeo de errores) que se puede reconstruir en el otro extremo antes de entregar los datos al terminal correspondiente. Sin embargo, hacer estos análisis pueden aumentar la complejidad del equipo y posiblemente no justifican el aumento de la eficiencia .

En la figura.2.3 se muestra como los equipos convencionales permiten compartir un canal de comunicaciones síncrono explorando cíclicamente las líneas entrantes, tomando los bits o caracteres de dichas entradas y finalmente intercalándolos dentro de

tramas de mayor velocidad. La estructura interna de las tramas permite sincronizar los dispositivos TDM situados en cada extremo del canal de forma análoga, a como lo hace en la transmisión síncrona de datos, donde el equipo TDM del otro lado del canal realiza la operación inversa (extraer los caracteres o bits de la trama compartida, llevarlos hacia la posición del canal correspondiente y finalmente transmitirlos hacia el terminal).

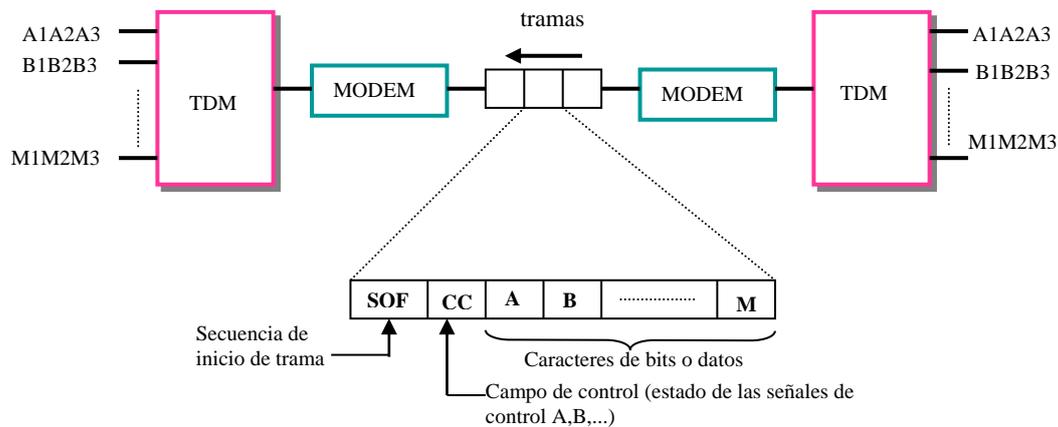


Figura 2.3. Formato típico de la trama TDM, la trama está compuesta por la secuencia de inicio de trama, campo de control y la cadena de bits o datos [6]

Como consecuencia de las posibilidades de compresión, así como de las necesidades de control, el ancho de banda utilizable en un multiplexor TDM corresponde a un 97% del total del ancho de banda disponible. En general, un sistema TDM convencional se caracteriza por cumplir la siguiente ecuación:

$$\sum b_i < B \quad (2.1)$$

donde:

$i = 1$ hasta n .

n es el número total de terminales.

B es la velocidad del canal compartido en bps.

b_i es la velocidad del terminal i en bps.

En técnica TDM la señal de información que se desea transmitir es procesada con el principio de Modulación por Codificación de Pulsos PCM (*Pulse Code Modulation*), de tal forma que pueda ser representada por una secuencia de mensajes discreta.

2.1.2 Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Es una técnica de transmisión multicanal, que explota las ventajas de una transmisión digital sobre la transmisión analógica. La señal de información (señal mensaje) transmitida en un sistema analógico es una representación continua de la señal original, mientras que la señal transmitida en un sistema digital es una serie de pulsos que caracterizan la señal original.

Un sistema de comunicación PCM genera una representación digital de la señal mensaje. Para esto, la señal mensaje se muestrea y la amplitud de cada muestra se aproxima al nivel mas cercano de un conjunto finito de niveles discretos, de tal manera que el tiempo y la amplitud se representan en forma discreta, permitiendo que el mensaje sea transmitido por medio de una forma de onda digital.

La conversión de una señal analógica a una señal PCM involucra tres operaciones básicas [7]:

- Muestreo de la señal mensaje.
- Cuantificación de las amplitudes muestreadas.
- Codificación con la cual se genera una señal digital que representa las muestras analógicas cuantificadas.

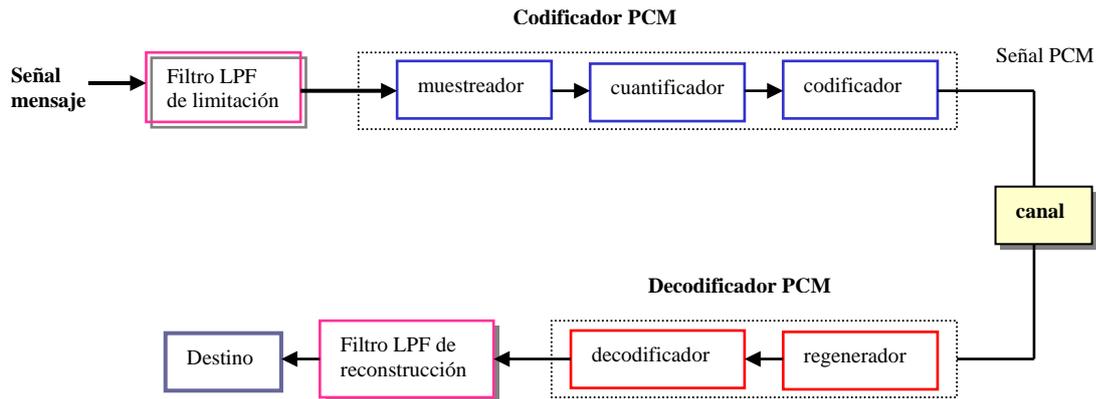


Figura 2.4. Sistema de comunicaciones PCM básico. Se utiliza para procesar la señal que se desea transmitir con la técnica TDM

2.2 JERARQUÍA DIGITAL SINCRONA SEGÚN NORMAS UTILIZADAS POR TELECOM

La Jerarquía Digital Síncrona SDH (*Synchronous Digital Hierachy*) es cubierta por las recomendaciones de la ITU-T G.707 - G. 709 [14,15]: :

- G.707 SDHBR (*Synchronous Digital Hierachy Bit Rates*)
- G.708 Interface nodo de red SDH
- G.709 Estructura de multiplexación síncrona.

Las normas proponen varias recomendaciones, incluso la transmisión Jerarquía Digital Pleseócrona (PDH) (excepto 8 Mbps), Las señales tributarias pueden empaquetarse en un contenedor estándar clásico, con una fácil identificación de la posición dentro de la estructura del multiplexador. La estructura del multiplexador incluye provisión para los canales de dirección de red.

las ventajas principales del SDH son [14]:

- Simplificar técnicas de multiplexación/demultiplexación comparadas con la técnica PDH.
- Acceso para tributarios de baja velocidad sin la necesidad de multiplexar / demultiplexar la señal entera de alta velocidad. Esto permite una eficaz inserción de canales y aplicaciones de conexión.
- Mantenimiento de red empotrado en canales, proporciona refuerzo en Funcionamiento, Administración, y Mantenimiento (OAM) y capacidad, permitiendo redes eficazmente controladas.
- Fácil crecimiento hacia los niveles altos de multiplexación.
- Permite el transporte de señales digitales, a las proporciones de la velocidad de bit de Jerarquía especificadas por las recomendaciones de la ITU-T G.702 (excepto 8 Mbps) y la velocidad de bit del ancho de banda del canal. Esto permitirá que el equipo SDH pueda ser introducido en una gama amplia de servicios.

La norma define una interfaz óptica que permite el transporte por fibra entre el equipo de diferentes proveedores.

2.2.1 Estructura de Multiplexación SDH

El primer nivel de SDH está en 155,520 Kbps y es conocido como Módulo 1 de Transporte Síncrono (STM -1). Las proporciones más altas son múltiplos de el valor de STM-1 en primer nivel, 155,520 es multiplicado por el entero correspondiente al nivel, así por ejemplo para STM-4 se multiplica $155,520 * 4$.

En la actualidad, las proporciones siguientes constituyen la jerarquía digital síncrona:

- STM-1: 155,520 Kbps
- STM-4: 622,080 Kbps
- STM-16: 2,488,320 Kbps (2.4 Gbps)

SDH permite cualquiera de las proporciones de transmisión actuales (excepto 8 Mbps) para ser mapeados en los contenedores, los Contenedores Virtuales son llamados (VCs). Estos pueden combinarse en los formatos normales en orden a la carga útil de la señal STM-1. Pueden mezclarse contenedores diferentes y puede permitirse que proporciones diferentes sean llevadas simultáneamente dentro de la misma estructura.

La estructura generalizada de los multiplexores de SDH se muestran en la Figura 2.5.

Los elementos de SDH son:

- **Contenedor** (C-n), n=1 a 4

Este es el elemento básico de la señal STM, que consiste en un grupo de bytes asignados para llevar las medidas de transmisión definidas por las recomendaciones de la ITU-T G.702 (1544 Kbps y 2048 Kbps jerarquías de transmisión).

- **Contenedor Virtual** (VC-n), n=1 a 4

Es el orden más bajo de contenedores VC-ns (n=1 o n=2) que se construyen de contenedores básicos (C-n,n=1 o 2) más capacidad adicional de llevar información POH (*Path OverHead*). El orden más alto VC-ns (n=3 o n=4) se construye con un solo contenedor básico (C-n,n=3 o 4), o un ensamblado de grupos de Unidades Tributarias

(Remolcadores), junto con la información apropiada de POH. La información de POH incluye VC supervisando el comportamiento, señales para el propósito de mantenimiento, e indicaciones de estado de alarma. La información de POH para la capa de alto orden también pide que VC-ns incluyan indicaciones de la estructura de multiplexación que detallan la composición de VC.

- **La Unidad tributaria (TU-n), n=1 a 3**

Este elemento consiste de un VC más un indicador de la Unidad Tributaria y proporciona adaptación entre la capa de orden más bajo y la capa de orden más alto. El valor del indicador indica la alineación de la fase del VC con respecto a el VC de nivel más alto.

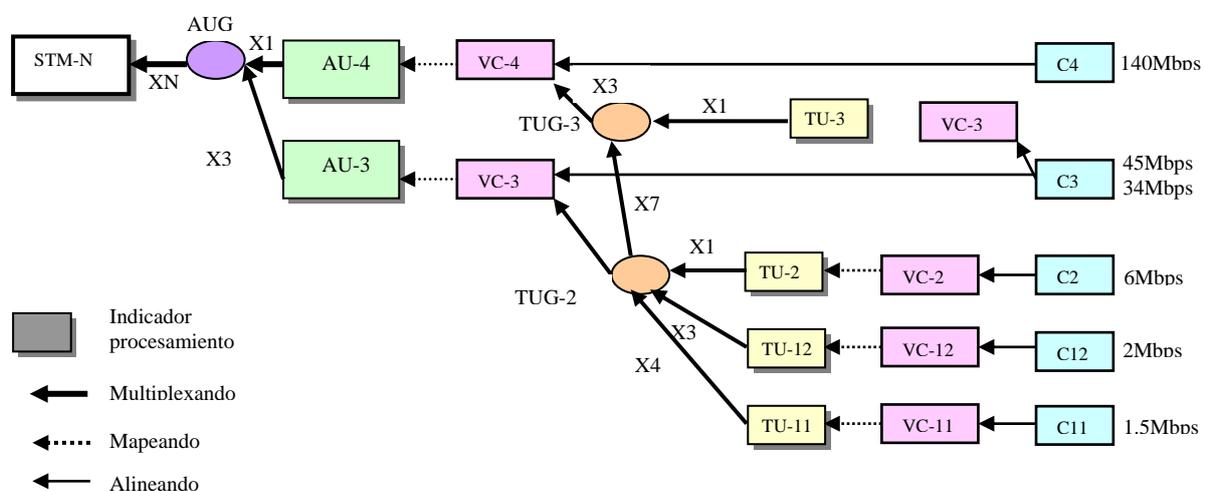


Figura 2.5. Estructura generalizada de los Multiplexores SDH, donde se especifica el alineado, multiplexado y mapeado.

- **El Grupo de Unidad tributaria (TUG-n), n=2 o 3**

Este elemento está formado por un grupo de TUs idénticos o Remolcadores y permite construir la carga útil de capacidad mixta.

- **La Unidad Administrativa (AU-n), n=3 o 4**

Este elemento consiste en un VC-n (n=3 o 4) más un indicador de AU y proporciona adaptación entre los caminos del orden más altos y la capa de la sección de multiplexación. El valor del indicador indica la alineación de la fase del VC-n dentro de la estructura STM-1.

- **El Grupo de la Unidad Administrativo (AGO)**

Este elemento está formado por un grupo de byte entrelazados AUs. El AGO tiene una posición fija en la carga útil de STM.

- **El Módulo de Transporte Síncrono Nivel 1 (STM-1)**

Éste es el elemento básico del SDH y comprende un solo AGO y la Sección de Información SOH (*Section OverHead*). La estructura STM-1 comprende una serie de 270 columnas por 9 filas de 8-bytes como se muestra en Figura 2.6.

La longitud del marco es 125 micrómetros. El orden de transmisión es de izquierda a derecha. Dentro de cada byte, el bit más significativo (bit 1) se transmite primero. La información de SOH incluye la trama STM-1, supervisión en el comportamiento de la sección, mantenimiento e información operacional.

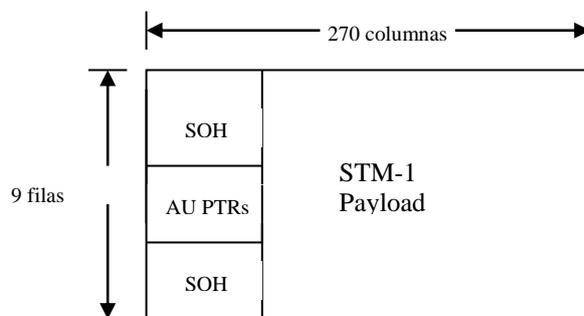


Figura 2.6. Estructura de la trama STM-1, donde se indican las secciones de cabecera SOH, y los punteros y la carga útil o información de la trama.

2.2.2. Módulo de Transporte Síncrono Nivel N (STM-N)

Este elemento define los N-ésimos niveles del SDH. Un STM-N contiene N AUGs junto con información de SOH. Los N AUGs son de un byte entrelazado y tiene una relación de fase fija con respecto al STM-N.

2.2.3 Nortel TN-1X.

El TN-1X usa un subconjunto de la estructura de multiplexación SDH como se muestra en la figura 2.7, donde se encuentran los elementos básicos SDH, los cuales cumplen las mismas funciones pero solo para 2 y 34 Mbps.

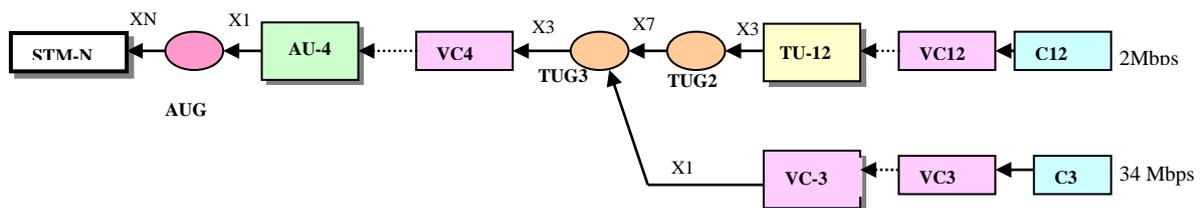


Figura 2.7. Estructura de multiplexación TN-1X, donde X_n indica las veces que se ha hecho la operación de multiplexación para pasar de 2 Mbps hasta la trama STM-N con los elementos expuestos anteriormente.

2.3 RANGO DE TRANSMISIÓN SDH DE NORTEL UTILIZADO POR TELECOM

2.3.1 Nuevo estándar para transporte óptico

Algunos de los beneficios de SDH son:

- Multi-vendedor.

- Sincronía en el trabajo de la red.
- Aumento en Operación, Administración, Mantenimiento y Provisionamiento OAM&P(*operations, Administration, Maintenance, and Provisioning*).

SDH está estandarizada por la ITU-T (*International Telecommunications Union-Telecommunications Standardisation Section*) [15] de la siguiente manera:

SDH define a el Modulo de Transporte Síncrono STM (*Synchronous Transport Module*) de niveles de señal. La velocidad transporte base es de 155.520 Mbps. A continuación se presenta la tabla 2.1 de velocidades de los diferentes elementos de red.

Nivel STM	Velocidad (Mbps)
STM-1	155.520
STM-4	622.080
STM-16	2488.320
STM-64	9953.28

Tabla 2.1. Velocidades de transporte de información de los diferentes elementos de red.

SDH define la capa física, y con eso la capa fotónica, requiere de interconectores para diferentes clientes. Está basado en el Modelo OSI (*Open Systems Interconnection*)

2.3.2. Equipo de Transmisión SDH de Nortel

Están basados en encontrar las necesidades de la industria de las Telecomunicaciones, comprenden equipos de la parte óptica, eléctrica, sistemas de transmisión de radio, switches digitales y conectores ,los equipos de fibra designados por aplicaciones de

accesos a multiservicios. Todos los elementos de la familia SDH juntos conforman una red síncrona sencilla como se observa en la figura 2.8.

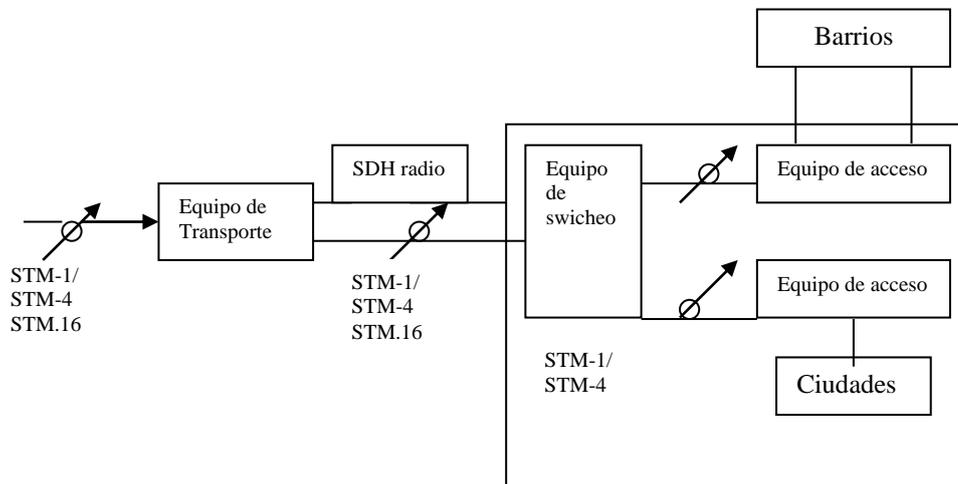


Figura 2.8. Red Síncrona sencilla conformada por los elementos de la familia SDH, en equipo de transporte, swicheo y acceso.

El equipo de transporte provee incremento en la demanda de nuevos servicios de ancho de banda y sistemas de alta capacidad. El equipo de transporte consiste de varios elementos de red (NEs) que juntos desarrollan varias aplicaciones de red.

2.3.3. Elemento de red TN-1X

El TN-1X EN provee de 2 Mbps a 155 Mbps, en el terminal de multiplexación, en las funciones de adición/sustracción, y en el anillo proporciona las características de conectividad. Consta de Tributarios STM-1 ópticos y eléctricos como se ve en la figura 2.9, soportados por sitios de clientes o interconexiones de grupos de multiplexores. Este multiplexor también soporta la capacidad de un agregado STM-4, así como un rango de interfaces tributarias pleséocronas.

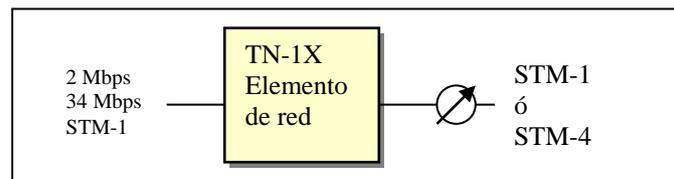


Figura 2.9. Elemento de red TN-1X, el cual soporta un conjunto de STM proporcionando de 2 a 155 Mbps en el terminal de multiplexación.

El elemento de red TN-1P provee de un terminal multiplexor para tributarias eléctricas de 2 Mbps dentro de un STM-1Ps de señal óptica como se ve en la figura 2.10, se pueden desarrollar conexiones punto a punto hasta conseguir una red SDH.

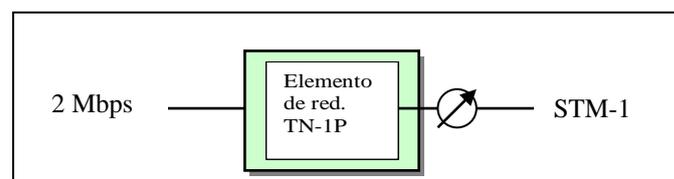


Figura. 2.10. TN-1P EN, es un elemento de red que provee de un terminal multiplexor para tributarias eléctricas de 2 Mbps.

El elemento de red TN-1C, provee de multiplexores de inserción / extracción, con mas de 6 ó 8 tributarios eléctricos de 2 Mbps (75Ω o 120Ω), y tributarios eléctricos de 34/45 Mbps (VC-3) dentro de un STM-1 de señal óptica como se ve en la figura 2.11, se pueden desarrollar configuraciones en anillo o configuraciones punto a punto.

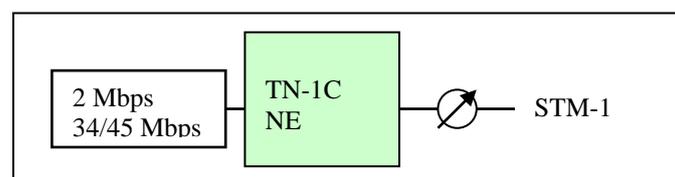


Figura 2.11. TN-1C EN, elemento de red que provee de multiplexores de inserción / extracción con 6 ó 8 tributarias eléctricas.

El elemento de red TN-4X, consta de Multiplexores STM-4 usados como redes STM-4 locales en anillo que puede ser configurado como un nodo en anillo STM-4 de núcleo de red. También configurados con baja capacidad, conectores en cruz, usados primordialmente como redes límites locales y regionales.

El TN-16X es un elemento de red que transporta más de 16 señales STM-1. Estas señales provienen de las tributarias como se ve en la figura 2.12, pueden ser una mezcla de un número de tipos de señal. Estas pueden ser:

- Cuatro tributarias de 3X34 Mbps.
- 32 tributarias de protección 1+1 STM-1°.
- 16 tributarias STM-1e o STM-1e/140 M
- 8 tributarias 1+1 de protección STM-4

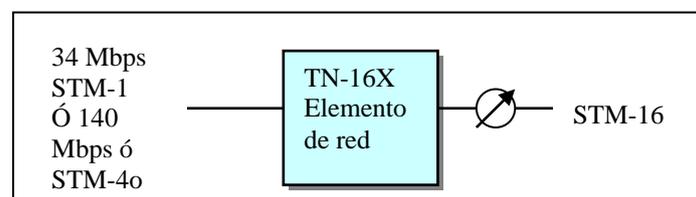


Figura 2.12. TN-16X EN, es un elemento de red que transporta las señales STM-1 que provienen de las tributarias.

Las señales son multiplexadas y convertidas a forma óptica dentro de SDH STM-16 para transmisión en fibra monomodo.

Dentro de las formas básicas posibles de topologías de red, se encuentran[15]:

- La topología lineal provee de transporte punto a punto entre dos terminales TN-16. El TN-16 es un regenerador / amplificador óptico que puede ser usado como extensiones de distancias límites de una línea de fibra óptica entre los terminales.
- La topología MS SPRing en anillo prevee de pérdidas en la línea de fibra óptica o en algunos de los nodos en el anillo. Cada terminal TN-16 es configurado como un nodo ADM (multiplexor add / drop). El nodo ADM puede definir números de adición y sustracción de STM-1 ó señales de 140 Mbps pudiendo pasar las señales entre nodos adyacentes. La topología en anillo también puede ser usada como regeneradores/amplificadores ópticos entre nodos ADM.

Terminales STM-16 y nodos ADM pueden ser interconectados por tributarias tipo 34 Mbps, STM-1e, STM-1°, STM-4° conectadas entre anillos.

El terminal TN-X/40 es un elemento de red del sistema de radio SDH, con terminales STM-1, de capacidad para varias frecuencias, para redes regionales y locales.

2.4 GENERALIDADES Y CONFIGURACIONES DEL SISTEMA MULTIPLEXOR

TN-1X

2.4.1. TN-1X NE

Hay dos versiones del TN-1X, la versión de altura aumentada (TN-1X) y la versión de altura disminuida (TN-1X/S) como se puede ver en la figura 2.13. El equipo provee multiplexación entre tributarias y agregados.

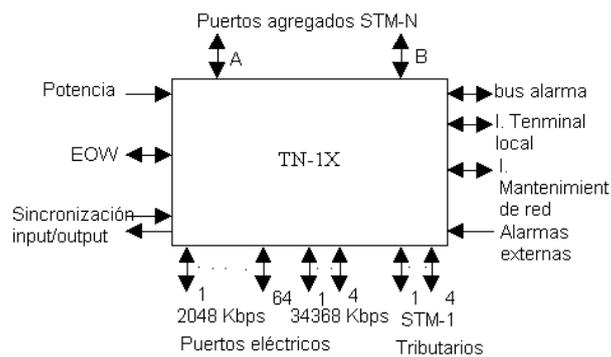


Figura 2.13.a. Interfaz externa asociada con el TN-1X versión de altura aumentada., es un sistema multiplexor convencional para configuraciones punto a punto.

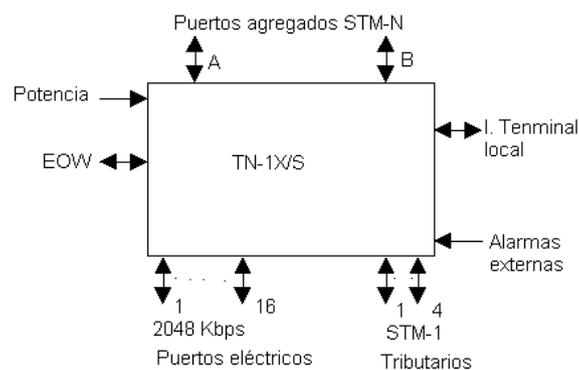


Figura 2.13.b. Interfaz externa del TN-1X de altura disminuida, es un terminal multiplexor con funciones de recorrido inverso al convencional.

- **Tributarias.** Es posible mezclar algunos tipos de tributarias y maximizar la capacidad a 63 tributarias. Tributaria Unit-12s (TU-12s). Por ejemplo puertos tributarios STM-1, así: más de cuatro puertos tributarios ópticos ó eléctricos STM-1 (TN-1X), más de cuatro puertos tributarios ópticos STM-1 (TN-1X/S).
- **Agregados.** Es posible mezclar al máximo más de dos puertos agregados. Así: uno o dos puertos agregados ópticos ó eléctricos STM-1 (TN-1X) ó (TN-1X/S), uno o

dos puertos ópticos agregados STM-4 (TN-1X y TN-1X/S). Un multiplexor con dos puertos STM-4 (TN-1X/4).

El TN-1X es manejado con aplicaciones software y funciones internas de protección y monitoreo manual o remota. Las cuales se mencionarán brevemente.

TN-MS elemento controlador para TN-1. Manejado por un paquete software, dividido en tres áreas:

- Configuración.
- Monitoreo alarma / evento y monitoreo en el desempeño.
- Manejo de seguridad y reporte de funciones.

Elemento controlador de espera. Se activa cuando hay un elemento de fracaso en el elemento controlador principal.

Recursos de manejo de la red. Manejado por software, provee de un simple punto de acceso a el manejo de las funciones OAM&P de la red. Esto incluye:

- Manejo de conexiones.
- Consolidación del desempeño monitoreando datos para múltiples elementos controladores y diferentes tipos de elementos de red.
- Jerarquía de despliegues, antecedentes de mapas, particiones de usuarios.

2.4.2. Configuración del Sistema.

Configuraciones de operación del TN-1X:

- Un terminal multiplexor convencional con dos unidades de agregados para configuraciones de protección punto a punto. Dos puertos agregados, A y B usados en modo principal / espera proporcionando protección 1 por 1 para puertos agregados.

- Un multiplexor de inserción y extracción con dos unidades de puertos agregados A y B (Este y Oeste) para conexión en anillo ó cadena. Cuando es conectado en un anillo de inserción y extracción, la protección del tráfico es provista por alternativas monitoreando alrededor del anillo.

- Un terminal multiplexor con un agregado simple usado en sistemas punto a punto sin protección, o en terminales en una cadena de adición y extracción.

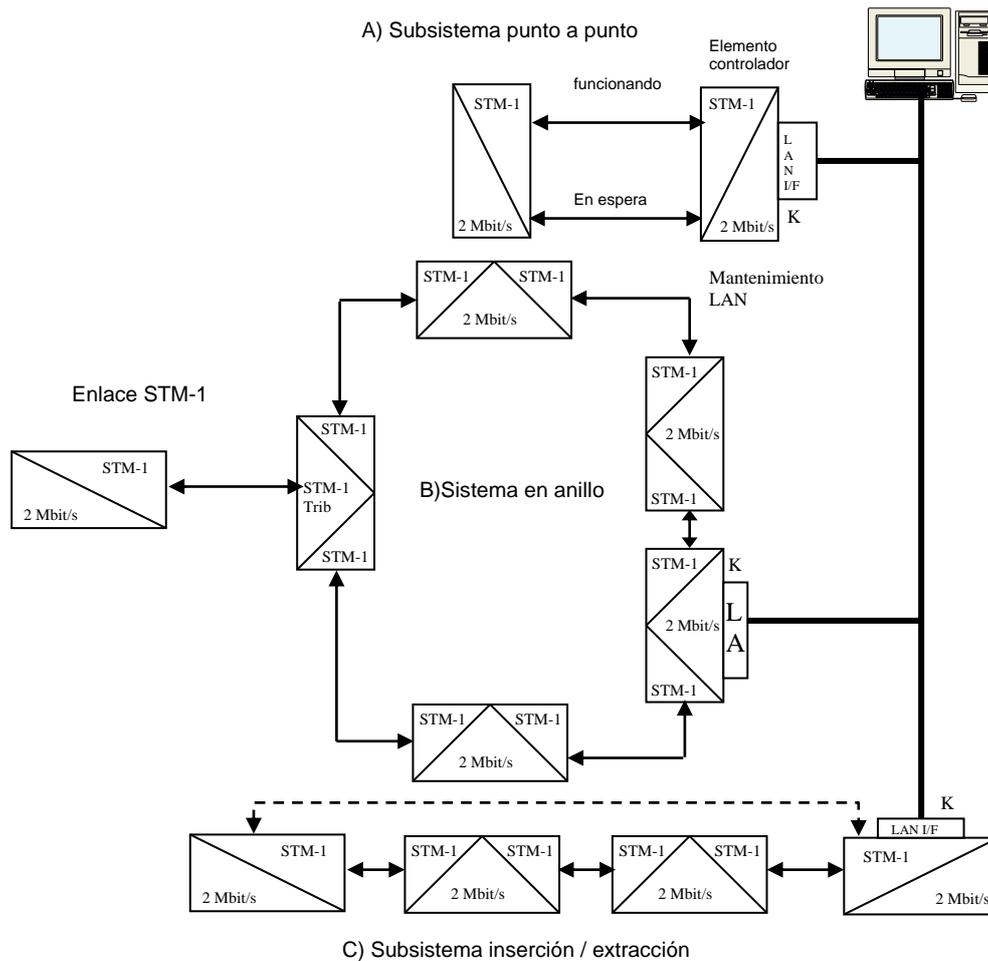


Figura 2.14. Sistema típico TN-1X. Diagrama en bloques donde se muestran las configuraciones punto a punto y en anillo del sistema, subsistemas de inserción/extracción y enlaces. Los multiplexores TN-1X pueden ser usados en las posiciones k.

Multiplexor terminal. Cuando es configurado como un terminal multiplexor convencional con unidades de agregados, El TN-1X provee un enlace punto a punto con protección 1 por 1 inherente, como se ve en la figura 2.15.

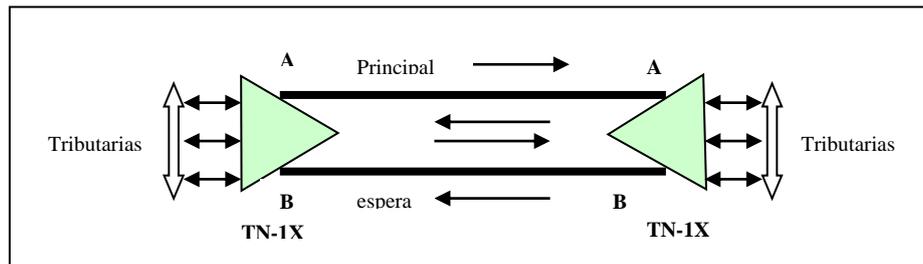


Figura 2.15. Multiplexor terminal de altura aumentada asociado al TN-1X, con configuración punto a punto.

La protección 1 por 1 en el terminal multiplexor puede ser configurada activando el multiplexor como un multiplexor de inserción y extracción, e instalarse en todos los 63 tributarios como conexiones de protección.

Una configuración de terminal multiplexor sin protección es activada de igual forma pero con los 63 tributarios con conexiones sin protección a un puerto agregado, y no equipando el puerto agregado nuevo.

Multiplexor de inserción y extracción. Puede ser usado en dos configuraciones, como se ve en la figura 2.16 y 2.17:

- Multiplexor de inserción y extracción en cadena.
- Multiplexor de inserción y extracción en anillo.

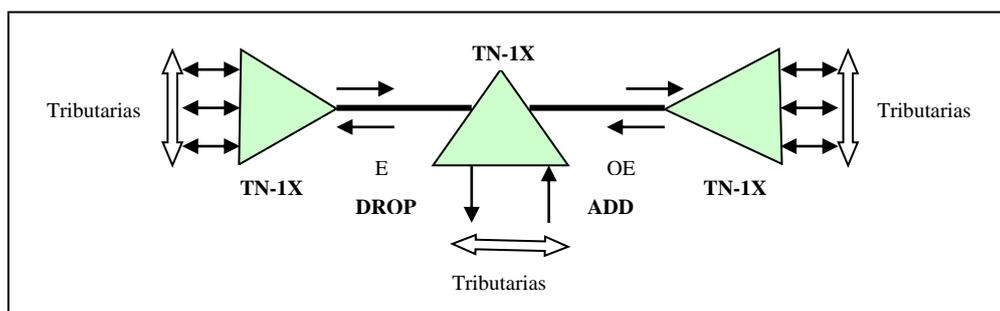


Figura 2.16. Multiplexor de inserción y extracción en cadena.

No usa protección en contra de fallas en el camino óptico y los multiplexores son configurados sin protección. En esta configuración los terminales requieren de un puerto agregado simple.

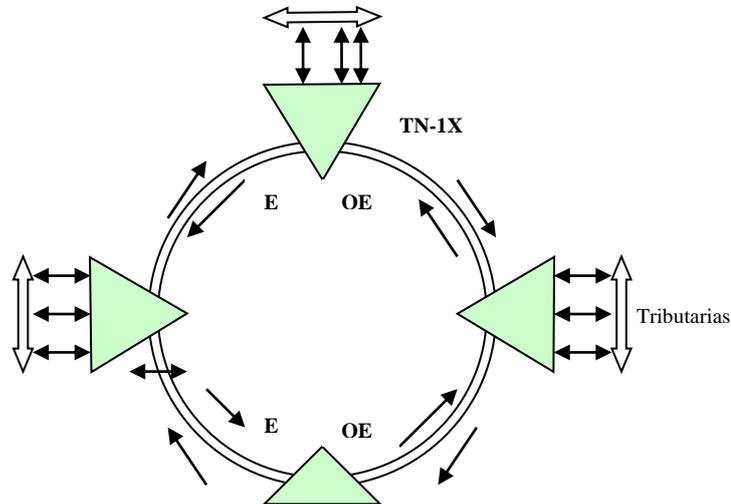


Figura 2.17. El multiplexor de inserción y extracción configurado en anillo donde el camino de fibra óptica de la señal de información circula de forma bidireccional de este a oeste.

Se disponen de diversos enrutadores con modos de fallas comunes sin protección en el camino óptico. Las tributarias que requieren protección son seguidas al mismo tiempo en el anillo. Donde A y B son los anillos bidireccionales o sea E y OE.

2.4.3 Agregados STM-4

Cuando se usa un agregado STM.4, el multiplexor TN-1X/4 que se muestra en la figura 2.18 facilita la función de inserción y extracción aumentando la carga útil del STM-4. Los tres AUG quedan en la ruta de los agregados A y B, para transmisión hacia delante. En este momento la carga útil en las direcciones E y OE quedan en mantenimiento. La principal aplicación del multiplexor TN-1X/4 es en el anillo óptico cuando es usado como acceso al tráfico e interrupciones, así:

- Circuito Privado (PC) donde el tráfico es enrutado a otros accesos en los terminales del anillo para algunas alternativas en sitios de acceso.
- Tráfico de interrupciones es enrutado a el Cambio Local Digital (DLC, Digital Local Exchange).

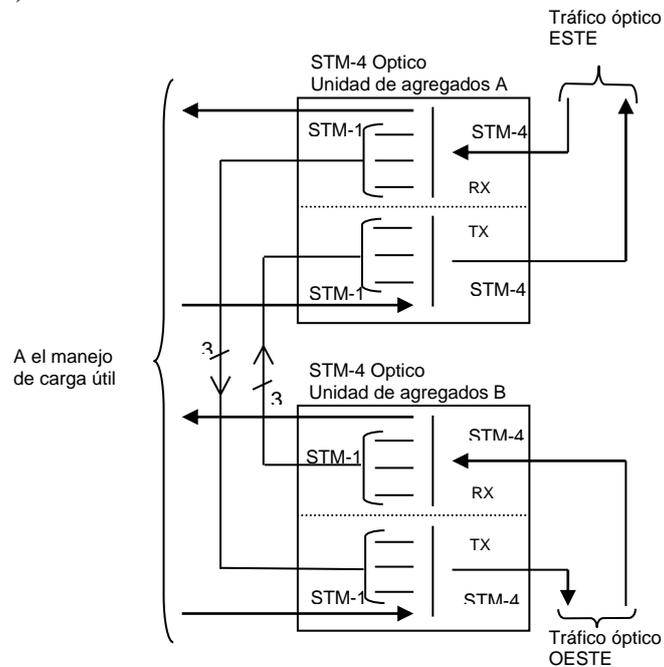


Figura 2.18. Multiplexor TN-1X/4 enrutando tráfico al STM-4 óptico de STM-1, facilitando la función de inserción/extracción aumentando la carga útil del STM-4.

Mientras más tráfico hay entre el nodo del anillo hacia la cabecera del anillo, hay mas interrupciones entre switches adjuntos al anillo.

2.5. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El TN-1X de Nortel puede ser dividido en tres áreas funcionales principales como se ve en la figura 2.19, estas áreas son: Procesamiento de tráfico, Mantenimiento de equipo, Sincronismo y potencia.

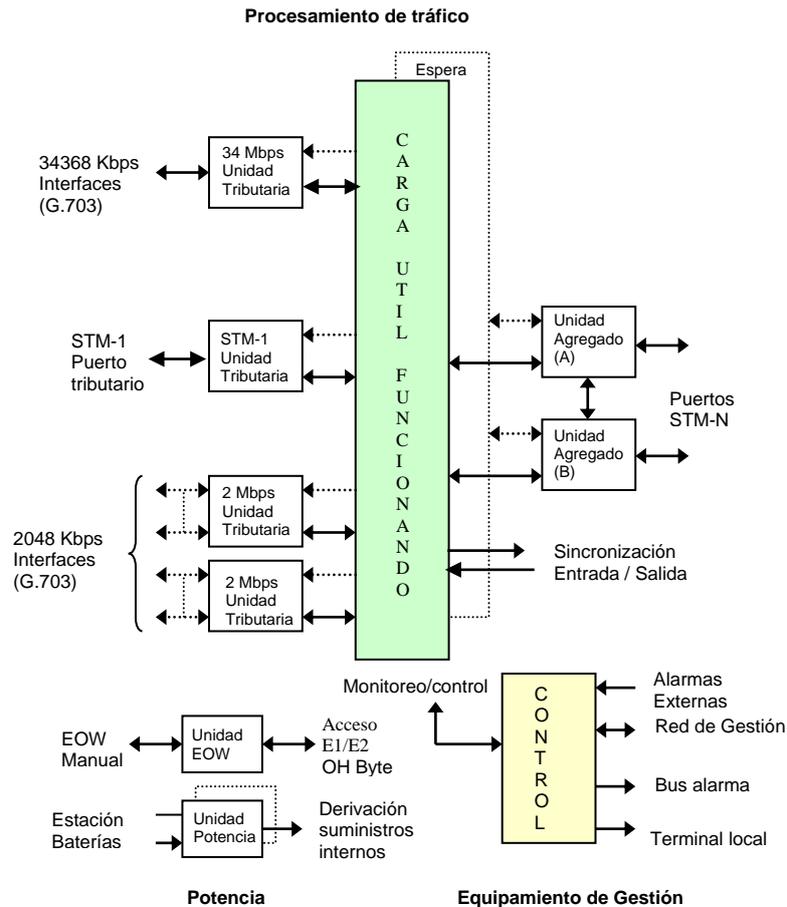


Figura 2.19. Diagrama en bloques del TN-1X donde se observan las principales áreas funcionales de procesamiento de tráfico, mantenimiento de equipo y sincronismo y potencia.

2.5.1 Multiplexor TN-1X con una única fibra

El TN-1X es capaz de trabajar sobre una fibra monomodo por lo cual cada fibra óptica es usada como portadora bidireccional de señales ópticas entre multiplexores adyacentes. La conversión entre dos fibras trabajando y una única fibra en funcionamiento, operando el multiplexor externamente por medio de un convertidor óptico 2 a 1, como se muestra en la figura 2.20.

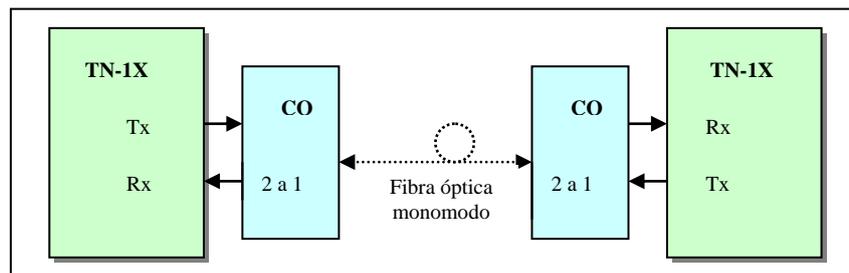


Figura 2.20. Esquema del multiplexor TN-1X trabajando con una única fibra monomodo por medio de un convertidor óptico (CO).

Si ocurre una ruptura en la fibra, hay la posibilidad de volver a transmitir el tráfico por la caja del convertidor óptico 2 a 1 que recibe el puerto de algún multiplexor accionándose la alarma del Modulo Interfase de tráfico. Esta señal podría ser reconocida como falta y el láser automático de cierre (*ALS Automatic Láser Shutdown*) retransmite cadena abajo. Aquí el multiplexor no trabajaría de manera normal con el evento de pérdidas en la señal entonces debe existir una señal de realimentación activada por la alarma de pérdida de señal RS-LOS que usa un gatillo para activar el ALS.

El láser se cierra si la alarma RS-LOS está activada por 525 ms aproximadamente ó inmediatamente por una alarma OS – *Optical -power – high*. Solo si la alarma se interrumpe el láser se reinicia.

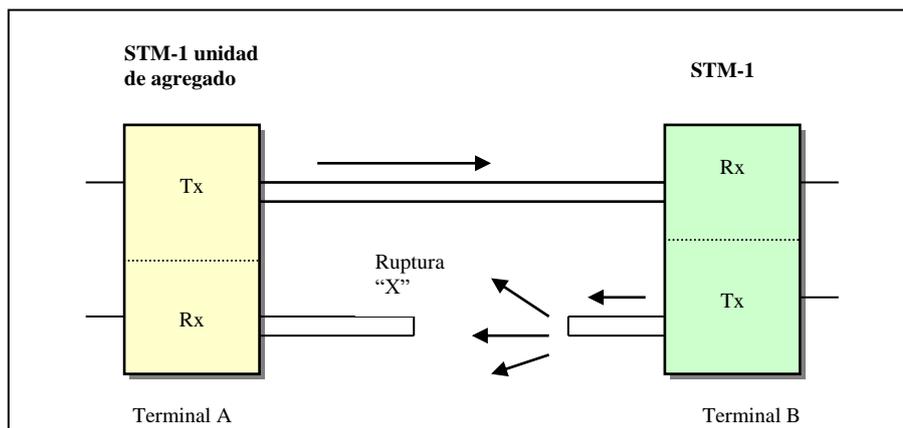


Figura 2.21. Láser Automático de cierre ALS (*Automatic Láser Shutdown*) en operación cuando hay ruptura en una fibra.

Si la fibra sufre una ruptura en el punto X, el terminal A activa la alarma RS-LOS el cual causa que el láser se cierre en el terminal A aproximadamente 525 ms después de que la fibra se rompe. El terminal B activa la alarma RS-LOS aproximadamente 525 ms después de que la fibra se rompe. Esto causa que el láser en el terminal B se cierre 525 ms después de que la alarma es desconectada, así la potencia óptica en el punto X es removida 1.05 segundos después de que se rompe la fibra. Hasta no ser reparada la señal del láser no pasará del terminal A al B.

2.5.2 Parámetros del sistema

- **STM-1 óptico de largo alcance.** El STM-1 óptico de largo alcance agregado/tributario, las entradas y salidas obedecen a las recomendaciones de la ITU-T G.957 para señales STM-1 de 155,520 Kbps.

El siguiente listado resume las interfaces ópticas para todos los parámetros ópticos del sistema:

- Potencia de salida: max 0dBm, min -5dBm, nominal -2.5 dBm
- Sensibilidad del receptor -35.5dBm (error velocidad 1 en 10^{10})
- Sobrecarga del receptor 0 dBm
- Sanción óptica. 1 dB
- Pérdida en sección 0 dB a 29.5 dB (TN-1X a TN-1X)
- Longitud de onda (nominal) 1310 nm
- Rango espectral 1285 nm a 1330 nm
- Tipo de fibra monomodo

- **STM-1 óptico de corto alcance**

- Potencia de salida: max -8 dBm, min -13.5 dBm, nominal -10 dBm
- Sensibilidad del receptor -34.5dBm (error velocidad 1 en 10^{10})
- Sobrecarga del receptor 0 dBm
- Sanción óptica. 1 dB
- Pérdida en sección 0 dB a 20 dB (TN-1X a TN-1X)
- Longitud de onda (nominal) 1310 nm
- Rango espectral 1280 nm a 1335 nm
- Tipo de fibra monomodo

- **Agregado óptico STM-4 longitud de alcance 1310 nm**

Para señales STM-4 de 622.08 Kbps.

- Potencia de salida: max +2 dBm, min -3 dBm, nominal -0.5 dBm
- Sensibilidad del receptor -32.5dBm (error velocidad 1 en 10^{10})
- Sobrecarga del receptor 6 dBm
- Sanción óptica. 1 dB
- Pérdida en sección 8 dB a 28.5 dB (TN-1X a TN-1X)
- Longitud de onda (nominal) 1310 nm
- Rango espectral 1298 nm a 1323 nm
- Tipo de fibra monomodo

- **Agregado óptico STM-4 intra-oficina 1310 nm**

- Potencia de salida: max -8 dBm, min -14 dBm, nominal -11 dBm
- Sensibilidad del receptor -27 dBm (error velocidad 1 en 10^{10})
- Sobrecarga del receptor -.5 dBm
- Sanción óptica. 1 dB
- Pérdida en sección 0 dB a 12.5 dB (TN-1X a TN-1X)
- Longitud de onda (nominal) 1310 nm
- Rango espectral 1200 nm a 1348 nm
- Tipo de fibra monomodo

- **Agregado óptico STM-4. Longitud de alcance de 1550 nm**

Para señales STM-4 de 1550 nm a 622,08 Kbps.

- Potencia de salida: max +2 dBm, min -3 dBm, nominal -0.5 dBm
- Sensibilidad del receptor -34 dBm (error velocidad 1 en 10^{10})
- Sobrecarga del receptor 6 dBm
- Sanción óptica. 1 dB
- Pérdida en sección 8 dB a 30 dB (TN-1X a TN-1X)
- Longitud de onda (nominal) 1550 nm
- Rango espectral 1540 nm a 1560 nm
- Tipo de fibra monomodo

2.5.3 Características de la fibra óptica utilizada en la Red Troncal Nacional de Fibra Óptica de TELECOM

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-T, describe que las características del cable de fibra monomodo G.652 y el cable de fibra monomodo de corte desplazado G.654, de la serie G para sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales utilizados en la RTNDFO de TELECOM soportan la aplicación de la tecnología WDM [16].

- Descripción en el Mapa de trayectoria de la Red Troncal Digital de Fibra Óptica (RTNDFO) de TELECOM en el Cauca.

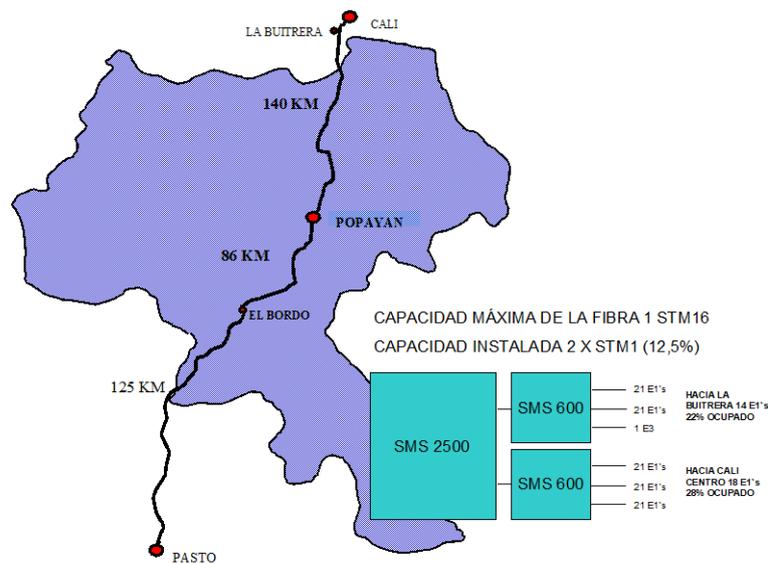


Figura 2.22. Red Troncal Nacional Digital de Fibra Óptica de TELECOM en el Cauca

Las distancias de la trayectoria de fibra óptica entre municipios vecinos son:

$D1(\text{Km}) = 140$ de fibra instalada de Popayán a Cali.

$D2(\text{Km}) = 86$ de fibra instalada de Popayán a El Bordo.

$D3(\text{Km}) = 125$ de fibra instalada de El Bordo a Pasto.

- Información de los atributos

En el transporte de información por fibra óptica se pueden presentar pérdidas a causa de macroflexiones, atenuaciones debido a la dispersión cromática, dispersión por modo de polarización. En un enlace concatenado incluyen por lo general largos cables de fibra empalmados y se ven afectados por factores ajenos al propio cable de fibra tales como los empalmes, conectores e instalación, esto hace que varíe la Potencia de salida y con ello que el valor de las pérdidas en [dB/Km] aumente.

Atenuación

La atenuación A de un enlace viene dada por:

$$A = \alpha L + \alpha_s X + \alpha_c Y \quad (2.2)$$

Donde:

α	coeficiente de atenuación típico de los cables de fibra en un enlace.
α_s	atenuación media por empalme.
X	número de empalmes de un enlace
α_c	atenuación media de los conectores de línea
Y	número de conectores de línea de un enlace
L	Longitud del enlace.

Dispersión Cromática

Cuando estas fibras se utilizan para transmitir en la región de 1550 nm, a menudo se emplea una forma de compensación de la dispersión cromática. En este caso en el diseño se utiliza la dispersión cromática media del alcance, esta dispersión en 1550 nm puede caracterizarse mediante una relación lineal con la longitud de onda. La relación se describe en función del coeficiente de dispersión cromática medio y del coeficiente de la pendiente de dispersión a 1550 nm.

En la ecuación se incluyen valores típicos del coeficiente de dispersión cromática, D_{1550} , y del coeficiente de la dispersión cromática, S_{1550} , a 1550 nm. Estos valores pueden utilizarse junto con la longitud del enlace, L_{Link} , para calcular la dispersión cromática típica que debe utilizarse en el diseño de enlaces ópticos.

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link}[D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (\text{ps/nm}) \quad (2.3)$$

Pérdidas

Se utiliza la expresión siguiente para determinar las pérdidas en general:

$$\text{LOSS (dB/Km)} = (10/D) \log (P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (2.4)$$

Donde:

D	Distancia entre terminales
P _{in}	Potencia de entrada
P _{out}	Potencia de salida (varía)

- Tablas de valores recomendados.

Cuadro 1/G.652 – G.652.A

Atributos de la fibra		
Atributo	Dato	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	±0,7 μm
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	±1 μm
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,8 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	2,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260
Pérdida de macroflexión	Radio	37,5 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1550 nm	0,50 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	λ _{0mín}	1300 nm
	λ _{0máx}	1324 nm
	S _{0máx}	0,093 ps/nm ² ·km
Atributos del cable		
Coeficiente de atenuación	Longitud de onda	
	Máximo a 1310 nm	0,5 dB/km
	Máximo a 1550 nm	0,4 dB/km

Tabla 2.2. Valores recomendados por la UIT-T para un cable de fibra óptica monomodo de la serie G. 652 [15]

La recomendación describe un cable de fibra monomodo cuya longitud de onda de dispersión nula está situada en torno a 1310 nm, optimizada en esta región, esta fibra puede utilizarse para transmisión analógica y digital.

Cuadro 1/G.654 – G.654.A (Categoría básica de cable)

Atributos de la fibra		
Atributo	Datos	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550 nm
	Gama de valores nominales	9,5-10,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,8 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	2,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1530 nm
Pérdida por macroflexión	Radio	37,5 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1550 nm	0,50 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$D_{1550\text{máx}}$	20 ps/nm \cdot km
	$S_{1550\text{máx}}$	0,070 ps/nm 2 \cdot km
Coeficiente de PMD de fibra no cableada	Máximo	ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (nota)

Cuadro 1/G.654 – G.654.A (Categoría básica de cable) (fin)

Atributos del cable		
Atributo	Datos	Valor
Coeficiente de atenuación	Longitud de onda	
	Máximo a 1550 nm	0,22 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD _Q máximo	0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – Los fabricantes de cable pueden especificar un coeficiente de PMD máximo facultativo de fibra no cableada para soportar los requisitos primarios de PMD _Q del cable si ésta ha sido verificada para un tipo de construcción de cable en particular.		

Tabla 2.3. Valores recomendados según la UIT-T para un cable de fibra monomodo de corte desplazado de la serie G.654 [15].

La fibra de corte desplazado de muy baja atenuación puede utilizarse en aplicaciones de transmisión digital de larga distancia tales como sistemas de línea terrestre y sistemas submarinos con amplificadores ópticos.

2.6. EXPLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRANSPORTE DE INFORMACIÓN UTILIZADA EN TELECOM

La Empresa Nacional de Telecomunicaciones TELECOM sede Popayán, cuenta con una infraestructura ligada TECNOLOGIA-NEGOCIO, en esta parte hablaremos de la tecnología empleada por TELECOM como sería la aplicación de la tecnología WDM en cuanto a mejora del ancho de banda, dispositivos necesarios, que para la empresa representaría la forma de aumentar servicios de mejor calidad, aumento de clientes a bajos costos.

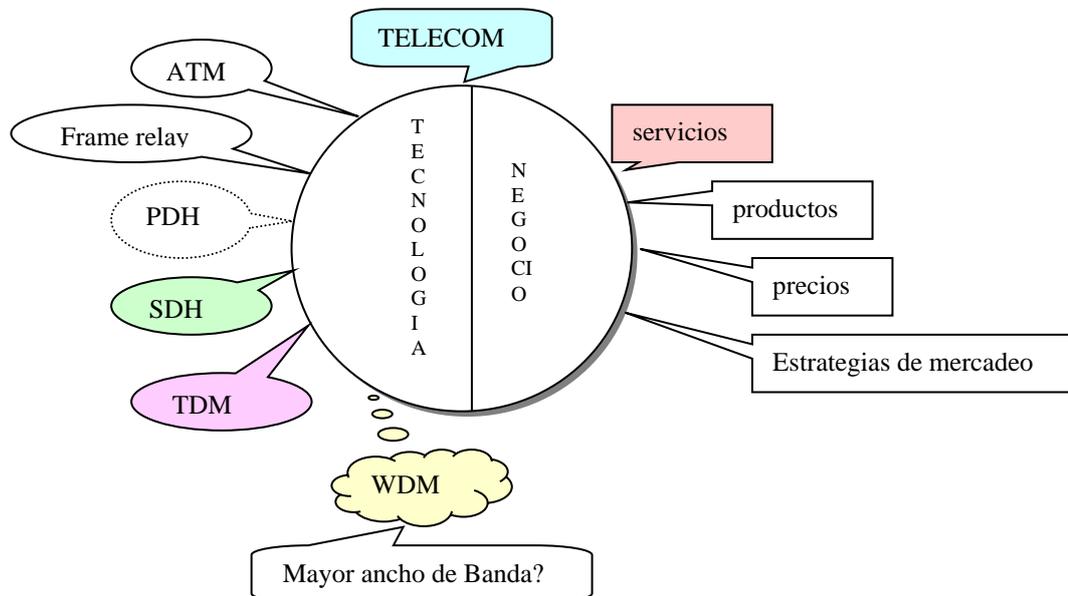


Figura 2.23. Diagrama representativo de tecnología SDH y TDM utilizadas actualmente en TELECOM y cuyo funcionamiento se ha explicado, junto con otras como ATM, Frame Relay, PDH, y la ubicación de la técnica WDM con miras a mejorar y aumentar los servicios de su negocio.

La Empresa Nacional de Telecomunicaciones TELECOM cuenta con una infraestructura de tecnología y negocio, con el fin de mejorar los ingresos operacionales de la empresa se hace el estudio de posibilidades de adquirir una nueva tecnología sin deshacerse de la infraestructura instalada. La aplicación de la tecnología WDM es una alternativa para mejorar el Ancho de Banda, y con ello mejorar la calidad del servicio, a

continuación se presenta un esquema de la figura 2.24 de la tecnología utilizada en la actualidad en la empresa.

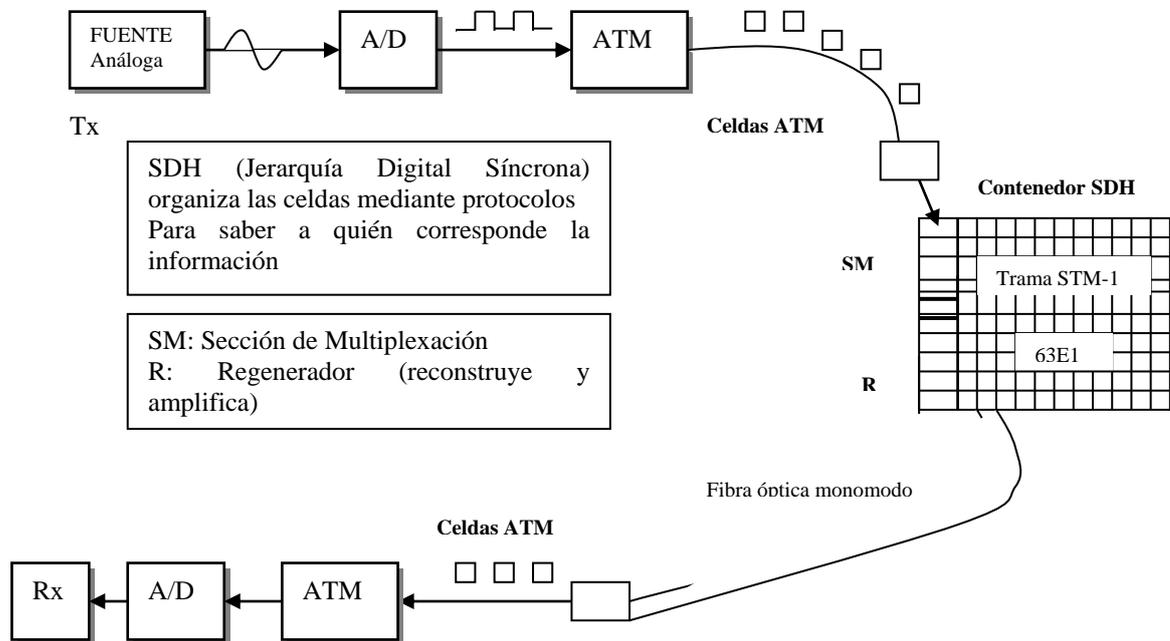


Figura 2.24. Esquema representativo de la tecnología utilizada en TELECOM

Ahora bien SDH compone la trama STM-1, con un total de 63 E1, dispuestos en un contenedor virtual (VC) de la siguiente manera:

2 Mbps equivale a un E1

34 Mbps equivale a un E3

140 Mbps equivale a un E4

SDH se justifica por medio de los tiempos de escritura y lectura, por ejemplo si el tiempo de escritura es mayor que el tiempo de lectura la justificación es negativa en caso contrario es positiva.

El siguiente ejemplo utiliza la trama STM-1 de SDH con 1E1, de la siguiente manera: 2 Mbps componen un C-12, un C-12 mas un POH (encabezamiento) componen un VC-12, luego un VC-12 mas un PTR (puntero) componen un TU-12, luego 3 TU-12 componen un TUG-2, y 7 TUG-2 componen un TUG-3, en la trama STM-1 hay 3 TUG-3 que equivalen a 63 E1 que es lo que se denomina VC-4 o payload (carga útil) de la trama, como se explicó en la sección 2.2 y como se observa en la figura 2.25.

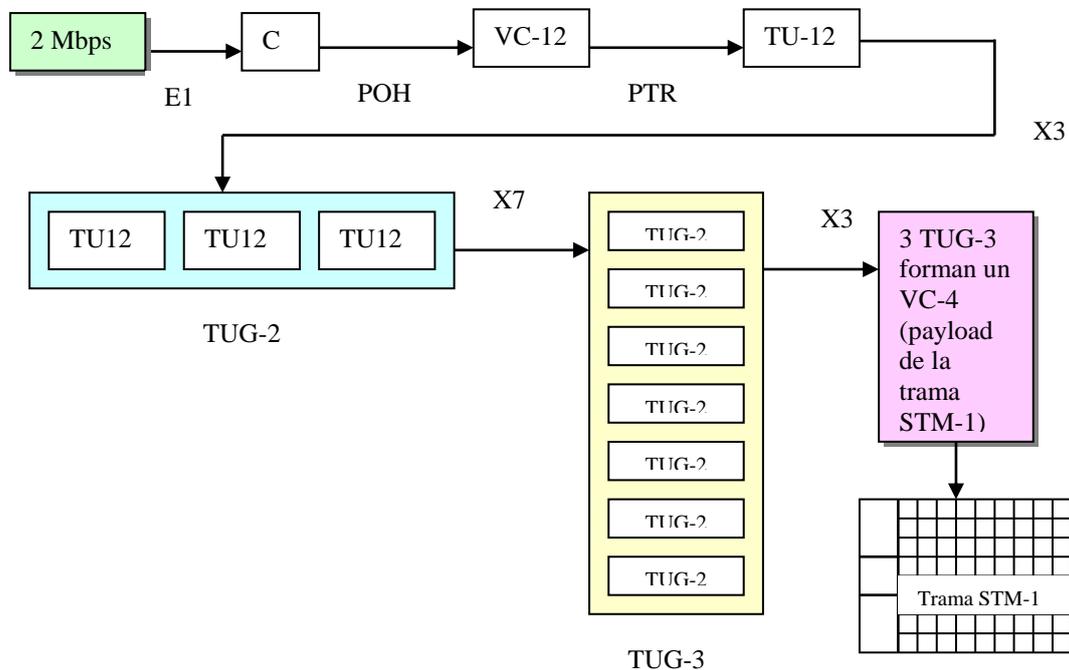


Figura 2.25. Ejemplo ilustrativo del manejo de las tramas con SDH, donde se observa la utilización de cabeceras POH en los contenedores C y VC, punteros PTR y finalmente la formación de la carga útil en los STM-1 con los TUG.

Como sabemos, SDH se encarga de organizar la información mediante protocolos de tal manera que se sabe que corresponde a cada cliente, en este caso la señal de pulsos donde es transportada la información SDH es la que modula a la señal del láser. Lo que nos interesa es de que manera esa matriz de “1” y “0” de información mediante la tecnología WDM se va a transportar en el medio de transmisión (fibra óptica

monomodo), que implica, aumenta o no el ancho de banda, y que equipos se utilizarían comparando con la técnica TDM utilizada actualmente.

2.7. MULTIPLEXACION POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM)

La señal de información en la trama STM-1 para poder ser transmitida por la fibra debe estar en forma de señales ópticas de entrada $S_n(t)$ aplicadas a un transmisor, donde n ($Z+$) es el número de canales con sus respectivos espectros de frecuencia $C_n(\lambda)$ de amplitud modulada el cual consiste de un rayo de luz con una longitud de onda estable que contiene toda la información como se ve en la figura 2.26. Para hacer el estudio de la tecnología WDM se debe tener en cuenta la Teoría de Fourier basándose en el principio de superposición aplicándose en la parte de multiplexación.

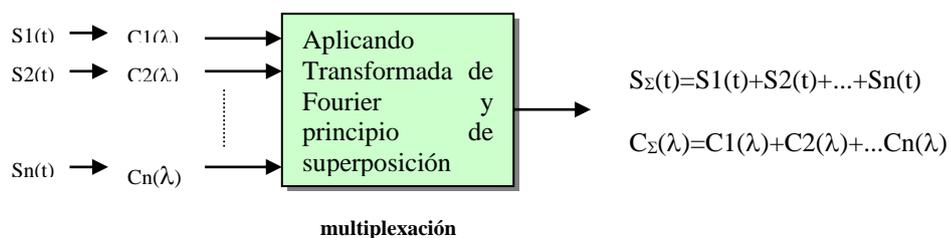


Figura 2.26. Representación de la forma de multiplexación de las señales ópticas aplicadas a un transmisor.

En la etapa de demultiplexación cada uno de los espectros $C_n(t)$ deben estar suficientemente separados de los espectros vecinos con el fin de recuperar satisfactoriamente los canales WDM, la recuperación de la señal será de la siguiente manera como se muestra en la figura 2.27.

$$\begin{array}{l}
 S_{\Sigma}(t) = S_1(t) + S_2(t) + \dots + S_n(t) \\
 C_{\Sigma}(\lambda) = C_1(\lambda) + C_2(\lambda) + \dots + C_n(\lambda)
 \end{array}
 \longrightarrow
 \boxed{S_n(t) = \sum_{\Delta\lambda} e^{j\omega t}}
 \longrightarrow
 \begin{array}{l}
 S_1(t) = C_1(\lambda) e^{j\omega t} \\
 S_2(t) = C_2(\lambda) e^{j\omega t} \\
 S_n(t) = \sum_{\Delta\lambda} e^{j\omega t}
 \end{array}$$

Figura 2.27. Recuperación de la señal óptica multiplexada en canales WDM.

Con el fin de mejorar el rendimiento de la capacidad de los sistemas de transmisión se debe tener en cuenta tres direcciones las cuales se observan en la figura 2.28.

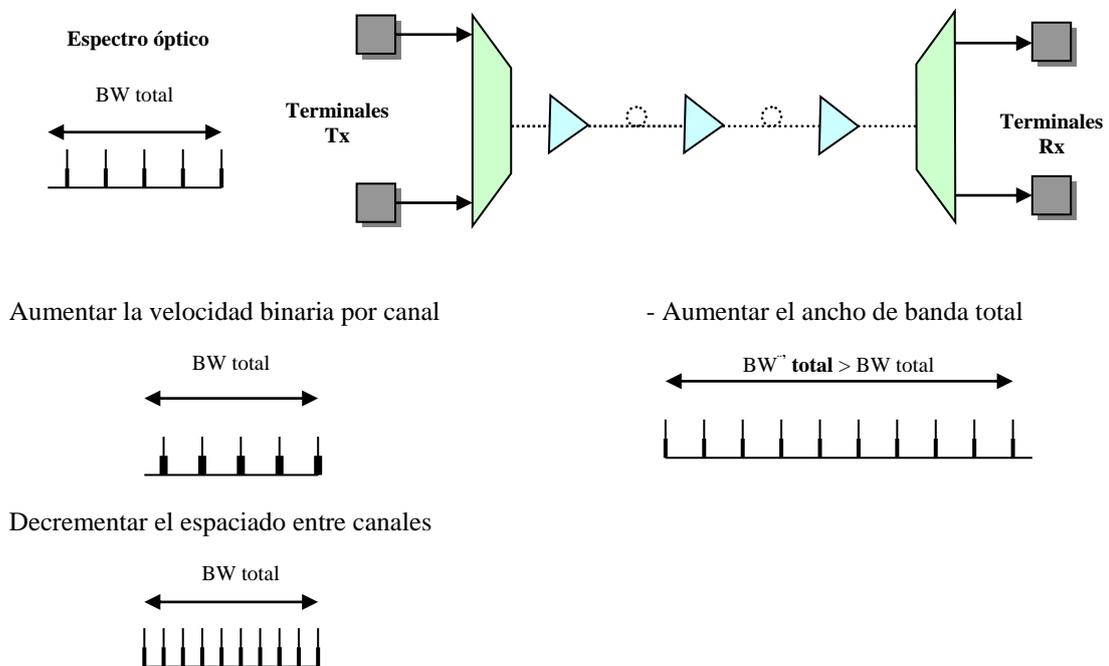


Figura 2.28. Camino a la transmisión de muy alta capacidad, se tiene en cuenta la velocidad binaria por canal, aumento del ancho de banda total y el espaciado entre canales [17].

Las tecnologías necesarias para la transmisión punto a punto a grandes distancias y gran capacidad comprenden [18]:

- Amplificadores ópticos de bajo nivel de ruido, elevada potencia, gran ancho de banda y ganancia plana.
- Una fibra óptica optimizada y técnicas de gestión de la dispersión asociadas, y una transmisión que permita los efectos de la propagación.
- Componentes electrónicos y optoelectrónicos rápidos para equipos emisores y receptores.
- Reducción de la dispersión por modo de polarización (PMD); con módulos de compensación compatibles con grandes anchos de banda ópticos.
- Una rápida tecnología de tratamiento óptico para regeneración.
- Equipos de gran velocidad de flujo binario, basados en una combinación de técnicas de multiplexación electrónica por división en el tiempo (ETDM) y multiplexación óptica temporal (OTDM).
- Facilitar la transmisión con presencia de ruido por medio de técnicas de corrección de errores en recepción.
- Formato de modulación optimizado para una gran eficacia espectral.
- Filtros ópticos con formas de amplitud y fase bien definidas para un filtrado muy estrecho.

La idea de hacer una migración a la tecnología WDM conlleva a migrar a DWDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa) y con eso a hacer conexión de multiplexores ópticos, o porque no a una red completamente óptica, como se ilustra en la figura 2.29:

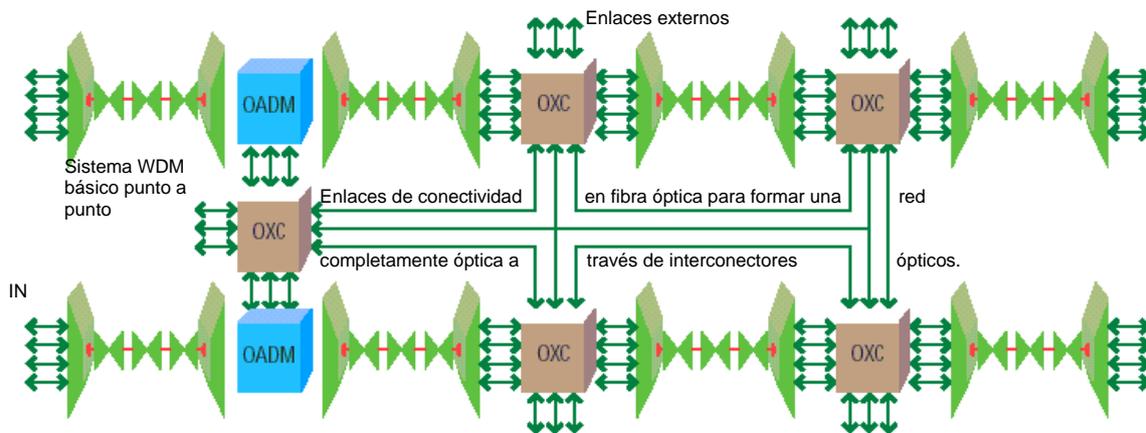


Figura 2.29. Migración hacia una red completamente óptica. Se muestra la evolución de la red troncal que soportará una conectividad totalmente flexible y gestionable, diferentes tipos y niveles de protección y facilidades para controlar la calidad del servicio en la red.

En el caso de la migración en TELECOM, tendría el siguiente esquema, como se observa en la figura 2.30, donde solo se necesitan de los multiplexores ópticos para el nivel físico y una tecnología de transporte multiprotocolo GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*).

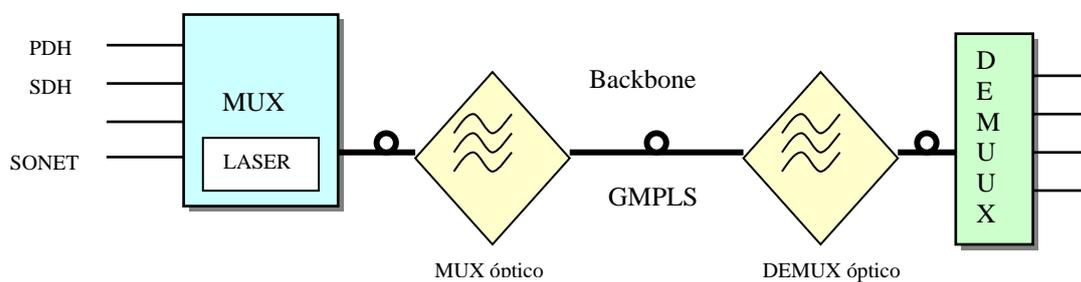


Figura 2.30 dinámicamente la red a nivel de longitud de onda

El LASER se encarga de entregar la señal óptica. Con la técnica WDM se requieren inicialmente de multiplexores ópticos o OXC llamados también interconectores ópticos, con el fin de reconfigurar dinámicamente la red a nivel de longitud de onda tanto para el restablecimiento como para la adaptación de los cambios en la demanda del ancho de banda, la idea es aumentar el Ancho de Banda a 2.5 Gbps enrutando cada STM-16 en una sola longitud de onda para un futuro de aumento de clientes y de servicios sin necesidad de aumentar las conexiones de fibra óptica. La tecnología GMPLS establece prioridades evitando así congestión en el tráfico de la información para mayor calidad del servicio.

La idea de multiplexación es aumentar la velocidad del tráfico por canal, aumentando así la capacidad en los enlaces debido a que es la suma de las velocidades por canal, la finalidad de la multiplexación es introducir toda la información en un solo enlace lo que implica ahorro de dinero para las empresas de comunicaciones. Multiplexar la información es colocar más de una cadena de bits “1s” y “0s” en una sola línea, las cadenas de información deben sincronizarse enviándose una después de la otra, por lo tanto la fibra puede llevar n (número de canales) veces más cadenas de información a menor espacio entre canales.

Para la multiplexación la cadena de bits básica es de 2 Mbps o 1 E1, así por ejemplo para TELECOM que utiliza SDH puede combinar en un solo canal hasta una capacidad de 63 E1, con SONET se pueden combinar en un solo canal de 1.55 Mbps una capacidad de 84 T1.

WDM toma las señales ópticas (portadoras de información a cierta velocidad) dándoles una longitud de onda característica o frecuencia específica (color) en un rango de longitudes de onda en las ventanas de transmisión, y enviándolas sobre una misma fibra. El tráfico por canal puede viajar a velocidades diferentes debido a que cada canal es independiente, TDM genera la cadena de bits más rápido en una parte de la red como se ve en la figura 2.31, suma cada una de las señales en una sola de mayor capacidad que puede ser llevada a un sistema WDM aprovechando así la capacidad de la fibra, si con el multiplexor síncrono TDM no se genera la longitud de onda apropiada para el sistema WDM se debe utilizar un adaptador o conversor de longitud de onda por lo tanto TDM manipula las cadenas de bits mientras que WDM manipula las cadenas de luz (cadenas de longitudes de onda).

El objetivo de una red de transmisión es conectar puntos, podemos tener enlaces punto a punto si no necesitamos flexibilidad, con multiplexores clásicos o MUX / DEMUX ópticos para aplicaciones WDM, enlaces multipunto con conectores en cruz para un enlace flexible con multiplexores add / drop (ADM).

Una red que emplee WDM, tiene una única frecuencia de transmisión asignada a cada uno de los canales de datos, estos son ópticamente multiplexados de tal manera, que múltiples canales de datos viajen a través de la fibra simultáneamente y con niveles de interferencia bastante insignificante.

Una multiplexación WDM presenta ventajas en cuanto a la transmisión de flujos de información en el mismo sentido, aumentando la capacidad del enlace porque multiplica el valor inicial por el número de longitudes de onda multiplexadas, un ejemplo es si

tenemos a la entrada del multiplexor TDM, 4 canales de 2.5 Gbps (cadenas de entrada) a la salida en la fibra tendremos la suma de las velocidades de las cadenas de bits entrantes en un solo canal de velocidad 10 Gbps (una sola cadena de bits) donde el láser le asigna la respectiva longitud de onda, si el número de longitudes de onda multiplexadas es de 160 (λ_n , donde $n=160$) entonces a la salida del multiplexor óptico WDM tendremos en total una velocidad de 1.6 Tbps (160×10 Gbps) como se observa en la figura 2.31, la ventaja en si no es el tráfico sino el aprovechamiento de la misma infraestructura, en flujos de datos opuestos aumenta la flexibilidad del sistema.

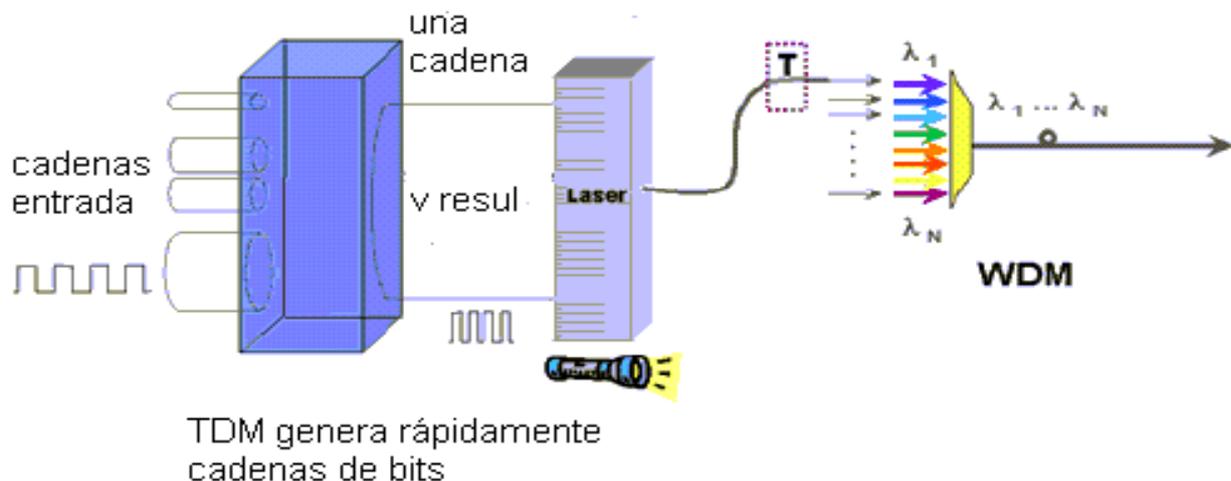


Figura 2.31. Relación entre TDM y WDM. El multiplexor TDM multiplexa las cadenas de bits que posteriormente son convertidas a señales de luz por medio del láser para poder ser multiplexadas en longitudes de onda.

Otra ventaja de la multiplexación WDM es que permite utilizar completamente el gran Ancho de Banda de la fibra aumentando la capacidad a n canales por fibra, cada canal opera al límite electrónico total permitiendo así agregar velocidad de datos multiterabit por segundo. Esta tecnología ofrece flexibilidad debido a que los canales ópticos son independientes tanto de la velocidad de bit como del formato de los datos. La

multiplexación WDM no divide la potencia entre canales multiplexados, proporcionando una mejor relación señal a ruido como se ve en la figura 2.32.

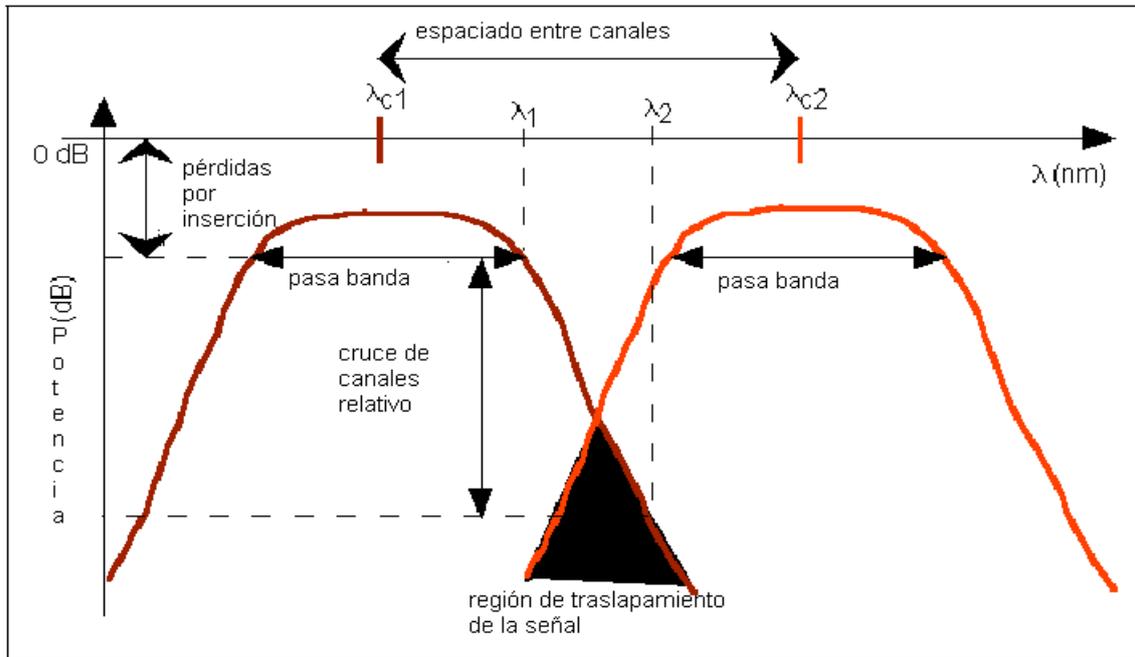


Figura.3.32 Canales multiplexados con WDM permiten aprovechar el gran ancho de banda de la fibra óptica aumentando la capacidad a n canales por fibra.

Las redes ópticas superan los cuellos de botella con la utilización de la tecnología WDM; la tarea de selección del canal es distribuida entre todos los nodos de la red y es posible simular un conmutador lógico virtual debido al suficiente Ancho de Banda físico, pudiendo enviar mensajes a cualquier lugar en la red, incluyendo código e instrucciones de corrección, desecho y lectura, permitiendo a cada canal sintonizar sus propios mensajes en su propia longitud de onda.

2.7.1. Transparencia de la red óptica

La transparencia óptica presenta múltiples ventajas [19]:

- Económica: ya que las conversiones optoelectrónicas representan la parte mayor del costo total de los actuales elementos de la red.
- Aumento de velocidades: los elementos de conmutación y de transmisión óptica ignoran frecuentemente la velocidad.
- Independencia de las tramas: diferentes clases de tramas físicas (y las capas superiores) podrían coexistir en una misma infraestructura óptica, siendo transparente a los elementos de conmutación que se encuentren en el camino óptico.

3. ARQUITECTURA DE LA RED BASADA EN LA TECNOLOGIA WDM

En este capítulo se hablará de la arquitectura de la red basada en la tecnología WDM con el sistema básico y de las condiciones de la red de larga distancia, con la construcción del sistema básico punto a punto se facilitó la construcción de redes ópticas flexibles a través del uso de tecnologías de conversión de longitud de onda y de conmutación óptica reconfigurables, permitiendo establecer una topología virtual sobre la capa física, la técnica de multiplexación WDM provee la consolidación de la capa óptica con redes independientes de formato, protocolo y velocidad de bit.

Se analizarán los mecanismos de la señalización óptica mediante el manejo de la longitud de onda, en cuanto a enrutamiento, conmutación y segregación de servicios. Teniendo en cuenta la importancia de la conversión de la longitud de onda, para facilitar la asignación del ancho de banda y la interconexión de los diversos flujos de información transportados sobre los canales WDM. En la tecnología WDM se tienen portadoras formadas por longitudes de onda discretas, que pueden ser separadas, enrutadas y conmutadas sin interferirse. Originalmente, el sistema punto a punto era la única topología usada en el despliegue de la tecnología WDM, como vemos en la figura 3.1 no es una capa óptica sino una topología aislada para reforzar la capacidad en rutas con fibra insuficiente.

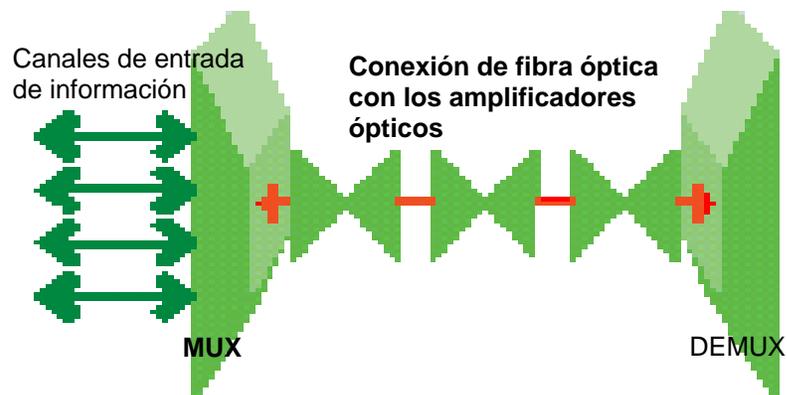


Figura 3.1. Sistema punto a punto era la única topología usada en el despliegue de la tecnología WDM, donde la señales de luz es multiplexada, con los amplificadores ópticos se garantiza que llegue completa la información a el demultiplexor óptico el cual la recupera.

Con multiplexores ópticos de inserción / extracción (OADM) con capacidades de protección y un número elevado de canales o longitudes de onda de adición / extracción, no se soporta una conectividad totalmente flexible y gestionable, pero hace posible un despliegue en la red troncal de topología de anillos ópticos simples, lineales y muy útiles, como se observa en la figura 3.2.

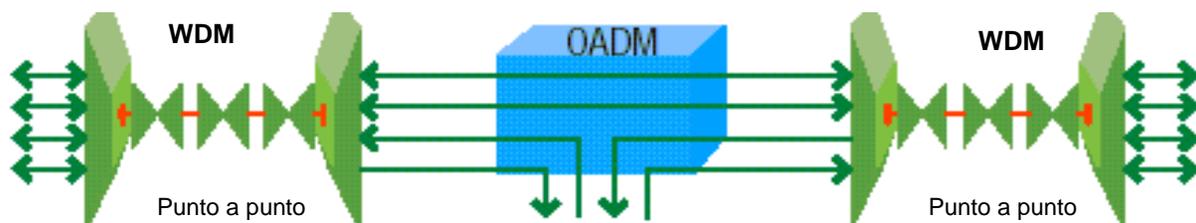


Figura 3.2. Sistema lineal con OADM, los multiplexores ópticos de inserción / extracción se hace posible el despliegue en la red troncal uniendo sistemas punto a punto inicialmente.

Sin embargo se necesita de un paso para el soporte de la conectividad total, que puede lograrse desplegando Conectores de Cruce Ópticos o trasconectores ópticos (OXC) para la conmutación de los canales en la capa óptica, como se ve en la figura 3.3.

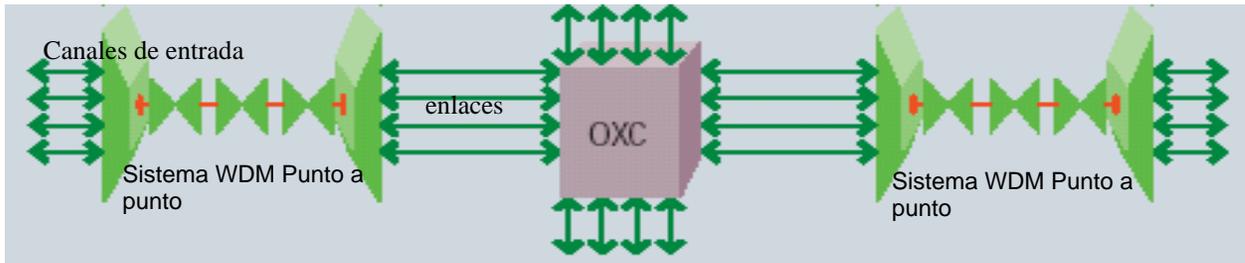


Figura 3.3. Sistema lineal con OXC, los transconectores ópticos se utilizan para la conmutación de canales para una transmisión completamente óptica entre sistemas punto a punto.

La transmisión completamente óptica está fundamentada en la posibilidad de reducir los costos de la red minimizando las conversiones ópticas / eléctricas en los puntos de regeneración en los sistemas troncales de larga distancia, no obstante debido al nivel de deterioros acumulados en las transmisión por efectos de la dispersión cromática, dispersión de modo de polarización, efectos no lineales, ruido del amplificador y estrechamiento del filtro, inicialmente será necesario superar estas limitaciones por medio de la utilización de interfaces ópticas / eléctricas debido a que tienen varias ventajas [12]:

- Facilitan el crecimiento de la capa fotónica impidiendo los problemas debidos a la acumulación y proporcionando la traducción de la longitud de onda.
- Impulsan la introducción de transconectores ópticos con los sistemas WDM.
- Facilitan la localización de fallas y la supervisión del rendimiento (Tasa de Error de Bit, BER) y simplifican la gestión de red.
- Permiten la interoperatividad multivendedor y garantiza la calidad entre vendedores.
- Facilitan la introducción de nuevas tecnologías.

3.1. TÉCNICAS DE CONMUTACION ÓPTICA DE PAQUETES EN LAS REDES WDM

Como el ancho de banda que requieren las redes de transporte se aumenta rápidamente, debido a la alta tasa de crecimiento del tráfico de datos, en especial el tráfico de Internet que sobrepasa el tráfico telefónico, por esto se deben optimizar las redes en todos los niveles (acceso, metropolitano, regional y dorsal) para aplicaciones de datos y especialmente para aplicaciones de Protocolo Internet (IP) como se ve en la figura 3.4. Aunque se espera que la transmisión con multiplexado en longitud de onda sea capaz de suministrar la capacidad requerida, para las tecnologías de enrutamiento y conmutación es menos evidente, por eso la evolución de la conmutación óptica de longitudes de onda hacia la conmutación óptica rápida de paquetes puede mejorar la flexibilidad y eficiencia espectral en las redes WDM [21].

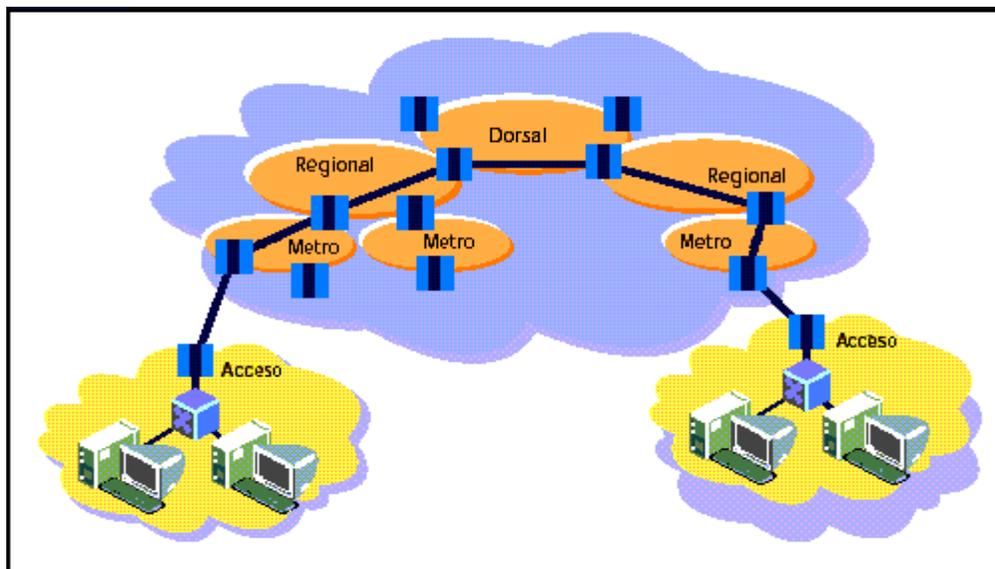


Figura 3.4. Red de transporte, optimizada en todos los niveles como acceso, metropolitano, regional y dorsal.

3.1.1. Conmutación

La conmutación de paquetes anteriormente reservadas para tráfico de datos ahora es utilizada para todo tipo de tráfico. Una primera manifestación de esta evolución ha sido la aparición de la conmutación celular de Modo de Transferencia Asíncrona (ATM) que estaba destinado a los múltiples tipos de tráfico, pero debido al crecimiento de las aplicaciones con el IP, se han enfocado en redes de servicios integrados basadas en IP. El progreso en la tecnología de enrutamiento y conmutación ha favorecido a los routers de encargarse de los servicios integrados, para esto se ha recurrido al concepto de enrutamiento a través de IP/ATM, como se observa en la figura 3.5. Para el establecimiento de circuitos transparentes de extremo a extremo bajo el control de una capa IP nativa.

En la actualidad se utiliza la conmutación multiprotocolo con etiquetado de los flujos generalizados GMPLS para diferenciación de servicios mediante etiquetas de prioridad [22].

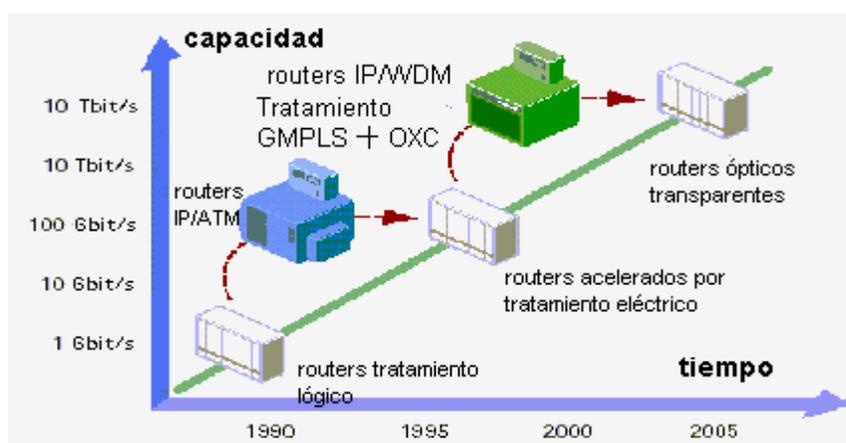


Figura 3.5. Evolución de la capacidad de los routers, enrutamiento a través de IP/ATM para solucionar el problema de capacidad de servicios integrados.

La conmutación óptica facilita la verdadera integración entre las capas de servicios ópticos, IP y ATM, con la habilidad de mejorar la eficiencia y flexibilidad de la red a bajo costo. El primer paso en esta integración es proveer el ancho de banda entre los diversos conmutadores ópticos en los nodos de la red WDM, luego facilitar la gestión del ancho de banda a lo largo de los enlaces de fibra en la red y de los componentes de procesamiento electrónico incluidos en los nodos, como enrutadores IP y conmutadores ATM.

La conmutación óptica permite acceso automático de gestión remota de la red y reducción del número de equipos de monitoreo, que incluyen la continuidad de los enlaces ópticos, calidad de las señales a través de la medición de la OSNR (Relación Señal a Ruido Óptico), y la BER (Error en la Velocidad de Bit), niveles de dispersión en la fibra y Pérdidas por Dependencia de la Polarización (PDL).

3.1.2. Matriz de conmutación óptica de paquetes

Es un sistema clave en la próxima generación de routers / conmutadores multiterabit para redes ópticas flexibles. Las necesidades en banda ancha de las nuevas aplicaciones interactivas basadas en IP están llevando a que las redes sean cada día mas flexibles, la tecnología de conmutación óptica de paquetes es una solución, la óptica tiene ventajas como las altas velocidades de tratamiento y su adecuación para la interconexión de sistemas y la transmisión de datos, en la construcción de matrices de conmutación de gran capacidad simplificando el núcleo de conmutador / encaminador, se facilita la gestión y se mejora el comportamiento, también ofrece ventaja económica en el costo del material del equipo.

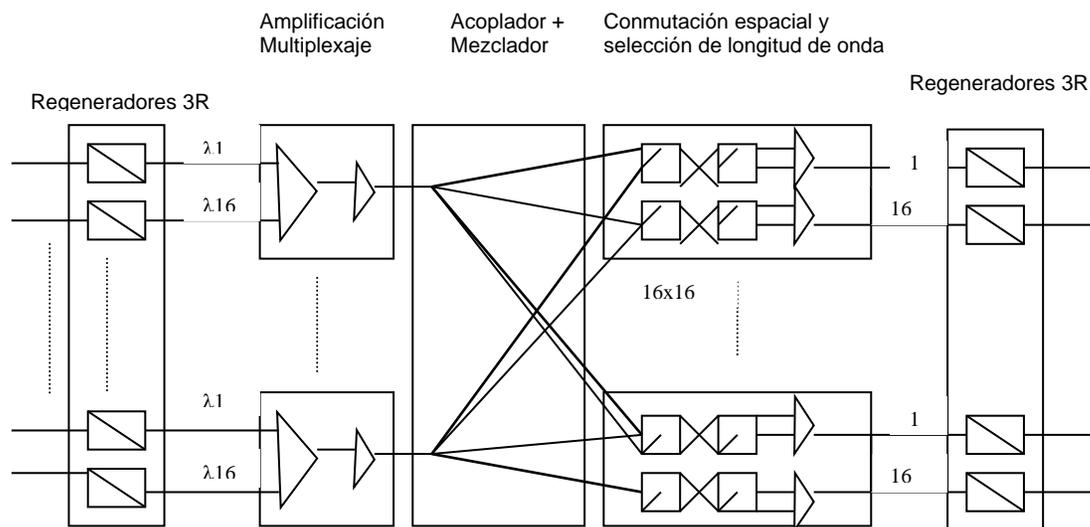


Figura 3.6. Conmutación óptica de paquetes por difusión y selección, se compone de una etapa de conmutación espacial WDM para la selección del puerto de entrada, etapas de selección de longitud de onda en el puerto de entrada [22].

Una matriz de conmutación óptica de paquetes debe ofrecer las características siguientes [22]:

- Tiempos cortos de conmutación (ns).
- Tasas de extinción elevadas para reducir al mínimo la diafonía interferométrica (40 dB).
- Baja sensibilidad a la polarización (< 1dB).
- Compatibilidad con técnicas WDM para reducir el número de elementos de conmutación.
- Pequeñas pérdidas.
- Ausencia de distorsión en la señal a través del elemento de conmutación.
- Ciertos efectos no lineales para limitar fluctuaciones de potencia de paquete a paquete.

Los amplificadores ópticos de semiconductores (SOA) utilizados como puertos ópticos proporcionan las anteriores características, reduciendo el costo de cualquier sistema. Otro elemento fundamental es el receptor en modo paquete, transparente a la fase de cada paquete y tolera una fluctuación de potencia superior a 5 dB entre dos paquetes consecutivos.

La matriz de conmutación óptica de paquetes de difusión y selección se compone esencialmente de:

- Una etapa de conmutación espacial WDM para la selección del puerto de entrada.
- Etapas de selección de longitud de onda, selecciona la longitud de onda correcta en el puerto de entrada seleccionado.

3.1.3. Conmutación óptica de ráfagas

Este es un potente concepto que conjuga las capacidades de uso de recursos y la diferenciación de servicios de la conmutación de paquetes con la capacidad de extensión de los sistemas de transconectores de longitudes de onda, aquí los routers IP se conectan a un sistema óptico para tratar las funciones de la capa física y la capa de enlace, este sistema óptico asegura la agregación del tráfico y la conmutación de una forma mas flexible que un transconector, pero a menor costo que un router IP, permite considerar los grupos de longitudes de onda entre los nodos como un único recurso, mejorando así el rendimiento de la red al tiempo que disminuye la capacidad de memoria requerida en cada router. La conmutación por ráfagas se adapta bien a la tecnología de conmutación óptica rápida, que

por lo general, necesita una trama específica para evitar la pérdida de información en el proceso de conmutación.

3.2. CONVERSION DE LONGITUD DE ONDA

Se refiere a la utilización de longitudes de onda para enrutar datos, en la figura 3.7 se observan los nodos de enrutamiento (transconectores) asignados como N1 y N2, estos se interconectan con fibras ópticas a las estaciones de acceso E1, E2, E3, E4 y E5, en las que los datos de usuarios son multiplexados en un canal WDM simple. Una estación de acceso también provee conversión OEO (óptica-electrónica-óptica), para permitir la interacción con los equipos electrónicos convencionales, con una Red de Enrutamiento de Longitud de Onda Completamente Óptica se pueden transportar los datos de una estación a otra con conversiones OEO como se observa en la figura 3.7, estas redes son utilizadas en la construcción de redes WAN WDM. Para transmitir los datos de una estación a otra se requiere del establecimiento de una conexión en la capa óptica mediante la determinación de una ruta en la red, que permite conectar la estación de origen con la estación de destino a través de la asignación de una longitud de onda común libre en todos los enlaces de fibra del trayecto (camino óptico si es un trayecto completamente óptico). El ancho de banda total disponible en este camino óptico es asignado a la conexión durante su tiempo de sostenimiento, en el cual la longitud de onda correspondiente no puede ser asignada a cualquier otra conexión, cuando la conexión es finalizada, el camino óptico asociado es apagado y la longitud de onda inmediatamente retorna al estado libre en todos los enlaces a lo largo de la ruta.

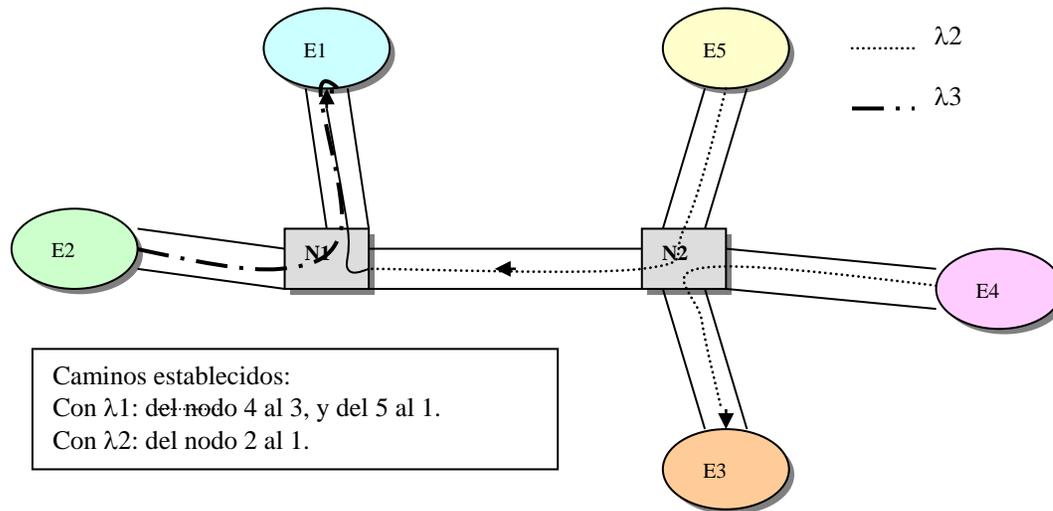


Figura 3.7. Enrutamiento de datos en longitudes de onda, los nodos de enrutamiento o transconectores asignados como N1 y N2 se interconectan con las fibras a las estaciones de acceso E1, E2,...,E5, la ruta se hace a través de la asignación de una longitud de onda.

3.2.1. Establecimiento del camino óptico

Se requiere que la misma longitud de onda sea asignada en todos los enlaces del trayecto. Este requerimiento es llamado Restricción de Continuidad de Longitud de Onda. Esta restricción distingue a las redes con continuidad de longitud de onda de una red conmutada por circuitos, la cual bloquea llamadas solo si no hay capacidad a lo largo de los enlaces en el trayecto asignado a la llamada. Un camino óptico simple en tal red puede usar una longitud de onda diferente a lo largo de cada enlace en este trayecto. Así, la conversión de longitud de onda puede mejorar la eficiencia en la red resolviendo los conflictos de longitud de onda en los caminos ópticos.

3.2.2. Conversor de longitud de onda

Este dispositivo cumple la función de convertir datos a partir de una longitud de onda de entrada, a una longitud de onda de salida determinada entre las n longitudes de onda disponibles en el sistema, en la figura 3.8 se observa el mecanismo.

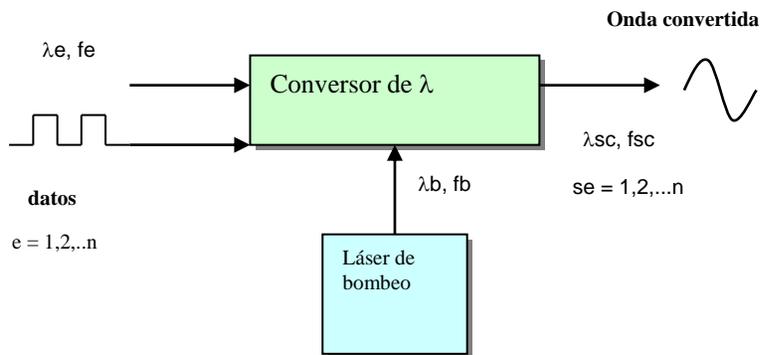


Figura 3.8. Funcionamiento del conversor de longitud de onda, convierte los datos a partir de una longitud de onda de entrada.

La longitud de onda de la señal de entrada con su respectiva frecuencia, donde se encuentran los datos viene dada por λ_e , el láser hace el bombeo con una longitud de onda dada por λ_b , entregando la señal convertida con una longitud de onda λ_{sc} , donde se representa el número de longitudes de onda a la salida del conversor. Un conversor de longitud de onda completamente óptica permite que la señal incidente permanezca en el dominio óptico durante el proceso de conversión, esta técnica puede emplear Efectos Coherentes, donde se mezclan ondas a partir de la respuesta no lineal, se pueden generar mas ondas con una onda de entrada simple como sucede en la dispersión Raman, estas ondas están presentes en la fibra, esta mezcla de ondas preserva la información tanto de la amplitud como de la fase. Otro efecto que se emplea es la Modulación Cruzada, que emplea

la conversión de longitud de onda de compuerta lógica utilizando dispositivos ópticos de semiconductor activos como amplificadores SOA, y dispositivos que operan en modos de Modulación de Ganancia Cruzada (XGM).

Un conversor opto electrónico convierte primero la señal óptica al dominio electrónico usando un foto detector, el flujo eléctrico de bits se almacena en un dispositivo de memoria temporal, la señal electrónica es luego usada para impulsar la entrada de un láser sintonizable, sintonizado a la longitud de onda deseable.

3.3. INTERCONECTORES OPTICOS

Un transconector o interconector óptico OXC (*Optical Crossconnect*), consiste en un conmutador matricial de fibras ópticas de dimensión número de fibras de entrada por número de fibras de salida. La función clave del OXC es gestionar el enrutamiento de los canales ópticos WDM, disminuyendo el nivel de congestión, reconfigurando dinámicamente la red a nivel de la longitud de onda, tanto para el restablecimiento como para la adaptación en los cambios en la demanda de ancho de banda. Con el fin de realizar una conmutación efectiva de las señales ópticas, el OXC debe realizar tres operaciones básicas: Interconexión de elementos de fibra, conmutación óptica y conversión de longitud de onda. Los OXCs están previstos para [23]:

- La gestión de la conexión y del ancho de banda, para suministrar conexiones de canales libres (para servicios de longitud de onda privada) y de canales ópticos, así como para proveer funciones de inserción / extracción.
- La reagrupación de la longitud de onda, para mejorar la utilización de la infraestructura instalada.
- El gradual crecimiento de los servicios, reduciendo el costo de la red.
- Protección / restablecimiento, a nivel de la longitud de onda, para aumentar la eficiencia y fiabilidad de la infraestructura de la red principal a un costo mas bajo de la red.
- El enrutamiento e interconexión en el nivel de la longitud de onda, como un repartidor óptico automatizado con acceso integrado, reemplazando potencialmente algunos paneles de conmutación de fibra; gestión de las longitudes de onda entre anillos conectados entre sí.
- La asignación dinámica de la longitud de onda, acoplando el OXC con el núcleo de routers para realizar una solución rentable frente a los cambiantes requisitos de ancho de banda en una red de datos.

Estas aplicaciones son para un sistema unificado de gestión de red, permitiendo un rápido suministro de servicios extremo a extremo así como acuerdos del nivel de servicios del nivel de red. La red principal seguirá soportando tramas SONET / SDH donde los OXC's deberán adoptar las velocidades de funcionamiento.

Independiente de la posición los OXC tienen otros atributos obligatorios como [23]:

- Puerto único de longitud de onda.

- Conectividad total en un modo estrictamente no bloqueado. No se perturban las conexiones existentes.
- Soporte a la multidistribución.

La combinación de conectividad total y capacidad de multidistribución tiene especial interés para insertar y extraer con la funcionalidad de extraer y continuar, así como para el acceso de pruebas, permitiendo la asignación de cualquier subconjunto de puertos de entrada / salida del OXC, a criterio del usuario, como puertos de inserción / extracción (longitud de onda única) o como puertos de acceso de pruebas, donde el operador puede conectar cualquier puerto(s) a los puertos de acceso de pruebas asignados mediante el establecimiento de las conexiones apropiadas a través de la estructura de conmutación. De esta forma, los puertos de acceso de pruebas se pueden conectar directamente al equipo externo, permitiendo que las conexiones terminales y de paso que se prueben en el OXC tengan:

- Escalabilidad.
- *Modularidad*. Facilidad para dimensionar el OXC como una función de la capacidad requerida, reducirá el costo de la instalación inicial y del crecimiento futuro.
- Tiempos rápidos de conmutación para suministro y establecimiento. Tiempos de suministro que toleran las líneas.
- Supervivencia mediante redundancia total del centro de conmutación y de la plataforma de control. La arquitectura dual también representará mejora en el servicio eficiente sin riesgo de afectarlo.

- El OXC debe suministrar las facilidades de verificación de la conexión y de supervisión.

Las aplicaciones del OXC están condicionadas por el desarrollo y nivel de madurez que se pueda conseguir en el entorno DWDM. La primera aplicación es la restauración del tráfico y los enlaces en caso de cortes en la fibra y fallos en los nodos, debido a que en una red DWDM, la restauración se realiza en la capa óptica ya que el medio de intercambio es la longitud de onda, los problemas mas graves están dados por la complejidad de los algoritmos para monitorear el tráfico. En términos generales, el OXC desempeña las funciones de Gestión de Ancho de Banda Por Medio de Capas, Aprovisionamiento y Restauración.

- *Gestión de Ancho de Banda por Medio de Capas.* Cada capa realiza ciertas funciones y provee diversos servicios a la capa siguiente en el nivel superior. Los sistemas con OXC se desempeñan mejor cuando tienen un conmutador óptico independiente de la velocidad de bit y diversos formatos tales como SONET, ATM e IP.
- *Aprovisionamiento.* A medida que se aumenten las longitudes de onda o se instalen más fibras, la necesidad de gestionar la capacidad y el cableado aumentará. Un OXC permite enrutar el tráfico en forma más eficiente en el nivel óptico, al transportar y gestionar las longitudes de onda de sistemas de transporte de alta velocidad mediante el desempeño de funciones tales como conmutación óptica, conversión, multiplexación, demultiplexación y monitoreo de señales de longitud de onda.

- *Restauración.* Dado que la conmutación en el OXC se realiza en el dominio óptico, este es capaz de restaurar la red ante caídas abruptas del sistema en una forma mucho más rápida que con los equipos de conmutación electrónica.

3.3.1. Tipos de interconectores ópticos

La construcción de una estructura de conmutación escalable ha sido difícil debido a la falta de bloques funcionales ópticos de conmutación. Esta limitación ha tenido un impacto directo en la posible arquitectura de los OXC, en el tamaño final y en los costos, esto ha llevado a la construcción del interconector de capa óptica basado en una matriz eléctrica, por eso la mayoría de interconectores ópticos tienen sistemas electrónicos y no ópticos en su núcleo y procesan señales en las cuales la mayor velocidad binaria es la eléctrica de 2,5 Gbps como en la figura 3.9. La razón es que las señales ópticas que entran y salen del OXC van a través tanto de interfaces ópticas como eléctricas.

- Interconector óptico con núcleo eléctrico

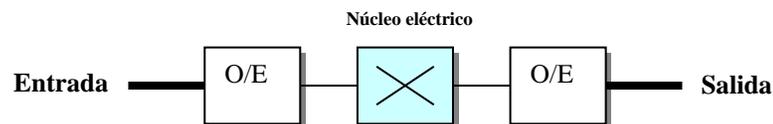


Figura 3.9. OXC con núcleo eléctrico, procesan señales de velocidad eléctrica es de 2,5 Gbps las señales ópticas que entran van a través de interfaces ópticos y eléctricos.

Para una optimizada eficiencia del transporte en volumen, las redes de larga distancia continuarán soportando cargas útiles se SONET / SDH durante varios años mas, por ello la transparencia al protocolo no es un problema inmediato en esta parte de la red. Es improbable que un operador de larga distancia que desea manejar sus longitudes de onda al máximo con la mayor velocidad binaria posible, este dispuesto a consumir una longitud de onda para un servicio que termina a través de una red local utilizando unos pocos Mbps. Es por eso que la regeneración 3R sigue siendo una función clave para disminuir los costos, aunque se han obtenido resultados buenos con la regeneración óptica, la regeneración optoelectrónica sigue siendo mas eficiente y rentable por eso el OXC de la figura 3.10 es el elegido.

- Interconector con núcleo óptico

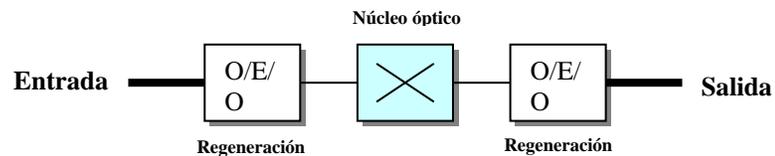


Figura 3.10. OXC con regeneración optoelectrónica, desde un punto de vista de costo y transparencia, se espera que una solución opaca, basada en un núcleo óptico rodeado por una función 3R sea lo mejor.

- Interconector óptico

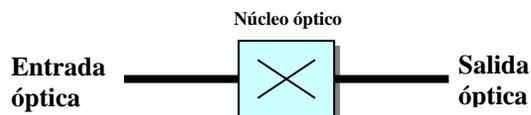


Figura. 3.11. OXC totalmente óptico y totalmente transparente, una solución a futuro debido a su alto costo frente a los incrementos de velocidad binaria y a los nuevos tipos de tráfico.

La regeneración 3R, tanto para velocidad única como múltiple, sigue siendo una función clave de la red principal y en cuanto a costo se refiere, este dominio crecerá con el aumento del número de canales y de la velocidad por canal, la regeneración opto electrónica (O/E/O) es la mas eficiente y rentable de las instalaciones actuales.

Dentro de los OXC totalmente ópticos hay tres tipos generales que a continuación se nombran:

- Interconector de Conmutación de Fibra

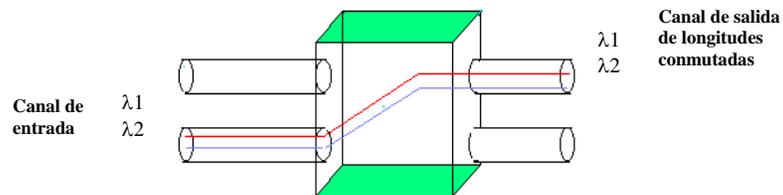


Figura 3.12. FXC, Interconector Óptico de Conmutación de Fibra, conmuta todos los canales de longitud de onda desde una fibra de entrada a una de salida.

El FXC conmuta todos los canales de longitud de onda desde una fibra de entrada a una fibra de salida como se ve en la figura 3.12, actuando como un panel de conmutación de fibra automatizado son menos complejos que los interconectores de selección de longitud de onda o de intercambio de longitud de onda y suministran capacidades simples de suministro y restablecimiento.

- Interconector de Selección de Longitud de Onda.

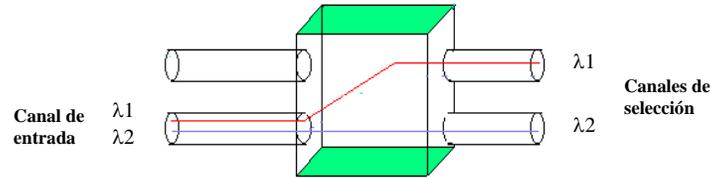


Figura 3.13. WSXC, Interconector de Selección de Longitud de Onda, puede conmutar un subconjunto de canales de longitudes de onda desde una fibra de entrada a una fibra de salida.

El WSXC o interconector de selección de longitud de onda, puede conmutar un subconjunto de los canales de longitud de onda desde una fibra de entrada a una fibra de salida como se ve en la figura 3.13, requieren de demultiplexación en el área de frecuencia, ofrece mas flexibilidad, permitiendo el suministro de servicios de longitud de onda, los cuales a su vez pueden suministrar servicios de vídeo, aprendizaje a distancia, o ser un host de otros servicios.

- Interconector de Intercambio de Longitud de Onda

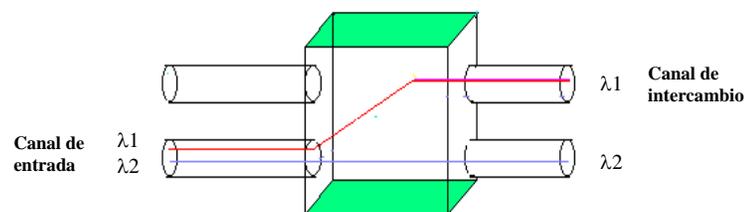


Figura. 3.14. WIXC, Interconector de Intercambio de Longitud de Onda, ofrece una mejor flexibilidad para el restablecimiento del servicio y puede traducir o cambiar la frecuencia del canal a otra.

El WIXC es un WSXC que traduce o cambia la frecuencia (o longitud de onda) del canal de una frecuencia a otra como se ve en la figura 3.14. Esto reduce la probabilidad de que no sea capaz de encaminar una longitud de onda desde una fibra de entrada a una fibra de salida a causa de la contención de la longitud de onda. Ofrece mayor flexibilidad para el restablecimiento y suministro de servicios.

3.4. CONDICIONES EN REDES WDM DE LARGA DISTANCIA

El crecimiento en el tráfico, alimentado por la explosión de las comunicaciones de datos, el acceso a Internet y la telefonía móvil, así como la aparición de servicios multimedia de nueva generación, ha dado lugar a un gran aumento de los requerimientos de capacidad en las redes de transporte metropolitanas y de larga distancia.

La mayoría de los intercambiadores de portadoras de larga distancia han adoptado la WDM como tecnología a usar para enfrentarse a esta rápida y creciente demanda de ancho de banda, debido a su compatibilidad con la infraestructura de fibra existente y su rentabilidad, si se compara con los métodos mas convencionales. La técnica WDM ofrece una enorme capacidad de transmisión al aprovecharse del mayor ancho de banda de las fibras ópticas. Al aumentar el número de canales ópticos transportados por fibra, es necesario gestionar y restablecer estos canales ópticos de una forma mas rentable que en los niveles STM-1, llevando a la tecnología de conmutación óptica / fotónica.

La amplia adopción de la técnica WDM está dando lugar al aumento de capacidad, y dirigiendo a la red troncal hacia una infraestructura de próxima generación conocida como *capa fotónica*, en la figura.3.15 se observa una red multiservicios, mejorando el ancho de banda.

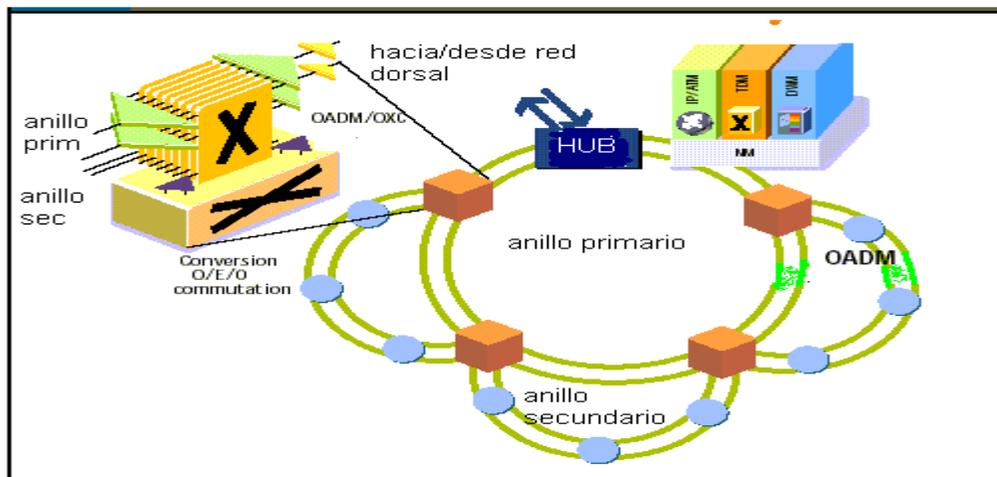


Figura 3.15. Arquitectura red metropolitana transparente en anillos jerarquizados por DWDM en nodos de concentración, el tráfico se concentra hacia un número limitado de grandes nodos ofreciendo una flexibilidad completa en términos de concentración y multiplexado.

En las redes principales de larga distancia, se requiere de una manera eficiente de reagrupar las longitudes de onda, encaminar y proteger / restablecer la red de la información de alta velocidad binaria. Se espera que los servicios de longitud de onda extremo a extremo sean de diferentes tipos, por ejemplo, intercambio de ancho de banda entre dos operadores de larga distancia en dos centros principales de red.

Las redes MAN presentan muchas diferencias importantes con respecto a las redes LAN, entre otras como:

- Las redes MAN son mas sensibles a los costos en equipos y explotación, debido al gran número de sistemas a desplegar y el número menor de usuarios que comparten el equipo.
- Mas necesidad de transparencia frente a los protocolos debido a su multiplicidad en su periferia : Frame Relay (FR), Modo de Transferencia Asíncrono (ATM), Jerarquía Digital Síncrona (SDH / SONET), ethernet.
- Mas necesidad de flexibilidad y de facilidad de evolución, considerando la dinámica inherente a las redes desplegadas en la proximidad del cliente.

El nodo metropolitano consiste en una plataforma modular, que permite reunir bajo una gestión de red común, tecnologías diferentes tales como el Protocolo Internet (IP), conmutación multiprotocolo con etiquetado de los flujos generalizados (GMPLS) para la diferenciación de servicios, la SDH / SONET, y la DWDM para la robustez y el ancho de banda, así como ATM o evoluciones metropolitanas Ethernet [24], como se observa en la figura 3.16.

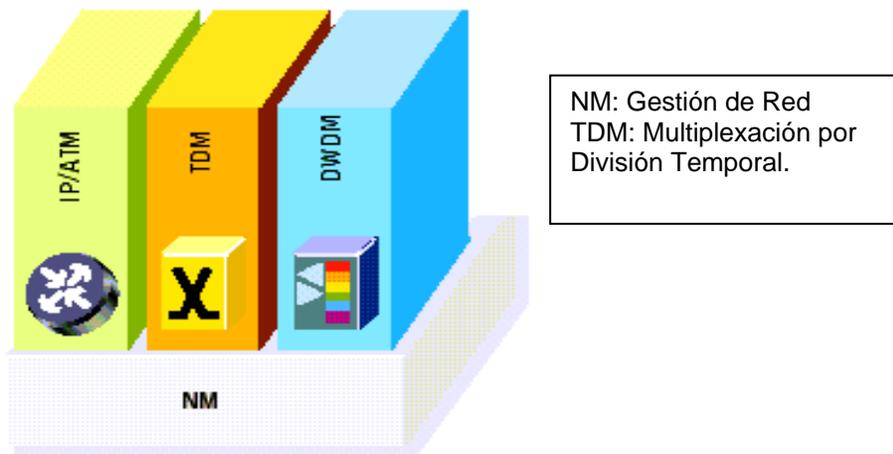


Figura 3.16. Nodo Metropolitano Multiservicio, plataforma modular que permite reunir bajo una gestión de red común, tecnologías como IP, GMPLS, SDH / SONTET, DWDM.

3.4.1 Transparencia Óptica

Las redes transparentes tanto en forma de estrella como de malla, se basan en la explotación de pequeños sistemas ópticos de inserción / extracción o de transconexión. Una red de malla ofrecerá una mayor facilidad de extensión y una mayor eficiencia de uso, especialmente debido a que el tráfico se reparte uniformemente pero el material es mas costoso. La figura 3.15 representa un anillo metropolitano con nodo principal de concentración, aquí el tráfico se concentra hacia un número limitado de grandes nodos ofreciendo una flexibilidad completa en términos de concentración y multiplexado, el papel de los demás nodos de inserción / extracción es el de organizar y suministrar el ancho de banda de transmisión hacia uno de los nodos de concentración.

3.4.2 Redes de enrutamiento de longitud de onda

Este tipo de redes WDM han sido dirigidas hacia redes WAN o redes de larga distancia, como se observa en la figura 3.17. Aquí el enrutamiento de longitud de onda es selectivo, las señales ópticas son seleccionadas de acuerdo a sus longitudes de onda y es posible reutilizar las longitudes de onda en diferentes partes de la red, por lo tanto son escalables con el número de nodos en la red. Las estaciones de acceso contienen transmisores y receptores sintonizables, y los conmutadores contienen el conmutador óptico, amplificadores ópticos, conversores de longitud de onda.

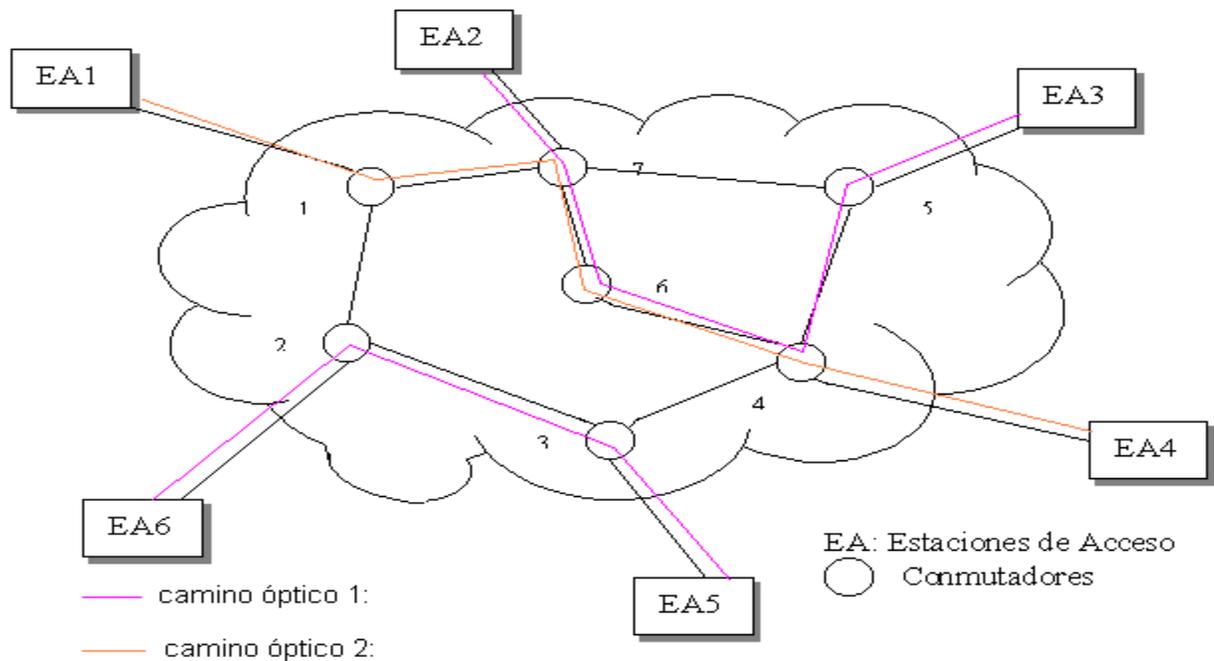


Figura 3.17. Enrutamiento en una red WAN WDM, el enrutamiento de las señales es seleccionando las longitudes de onda, y es posible de reutilizar las longitudes de onda en diferentes partes de la red.

Un camino óptico entre dos nodos en una red WAN WDM puede ser usado para transportar tráfico de conmutación de paquetes o de circuitos, así el diseño de la red no está restringido a un protocolo específico, y soportará protocolos de alto nivel como SDH, SONET, ATM, IP, etc, esta propiedad de las redes WDM es llamada transparencia óptica. En la figura 3.17, donde los caminos ópticos 1 y 2 atraviesan enlaces en común 7, 6, 4, al conectar las estaciones 1 con 4 y 2 con 3, entonces necesitan operar a longitudes de onda diferentes para no intervenir.

3.4.2. Redes de salto simple

Este tipo de redes especialmente en topología de estrella han sido propuestas para el desarrollo de redes MAN WDM, debido a que se pueden soportar un mayor número de usuarios sin añadir etapas de amplificación intermedia óptica que la topología de bus lineal, en este tipo de redes de salto las dos estaciones que necesitan comunicarse seleccionan un canal, basadas en algún método arbitrario (protocolo de acceso al medio) para comunicarse una con otra, por lo tanto se requiere una cantidad significativa de coordinación dinámica entre los nodos, para que la transmisión de paquetes ocurra los transmisores y receptores deben estar sintonizados a la misma longitud de onda. El sistema de salto simple puede configurarse como una red de difusión y selección en el cual todas las entradas de varios nodos son combinadas en un acoplador PSC (Acoplador de Estrella Pasivo) y la información óptica combinada es difundida en todas las salidas, como se observas en la figura 3.18.

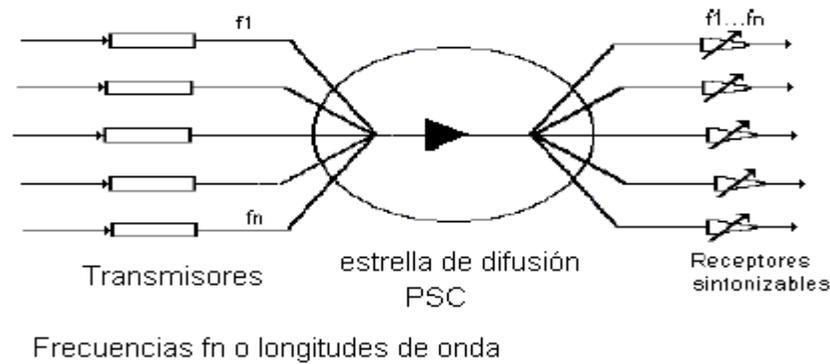


Figura 3.18. Red WDM de salto simple de difusión y selección, seleccionan un canal basadas en algún método arbitrario para comunicarse por lo que requiere una coordinación dinámica entre nodos, en la red de selección y difusión todas las entradas de varios nodos son combinadas en un acoplador PSC.

Con las redes de transmisión que necesitan adaptarse flexiblemente a diferentes arquitecturas y modelos de tráfico, la topología inicial punto a punto ha evolucionado a topologías en anillo y en estrella, pero arreglos híbridos proporcionan soluciones óptimas, como se observa en la figura 3.19.

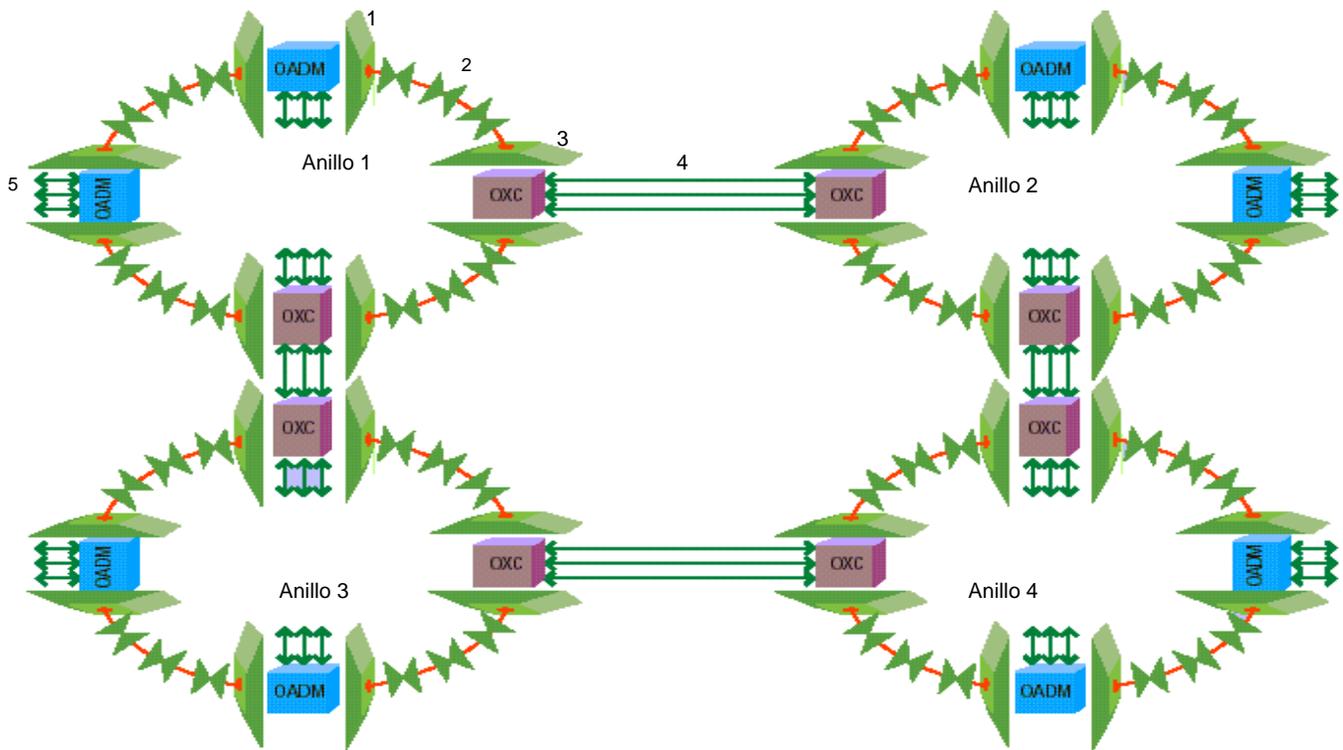


Figura 3.19. Red de anillo interconectada, una evolución para facilitar el transporte transparente y la gestión de los canales en el dominio óptico. En 1 está el multiplexor, en 2 los amplificadores ópticos, en 3 el demultiplexor, en 4 los enlaces a los OXCs y en 5 las entradas a los amplificadores ópticos de inserción y extracción.

4. POTENCIALIDADES DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA WDM POR PARTE DE LA EMPRESA NACIONAL DE COMUNICACIONES EN POPAYAN USANDO EL CRITERIO DE COSTO-BENEFICIO

En este capítulo se evaluarán las potencialidades en costos y beneficios que representaría la implementación de la técnica WDM por parte de la Empresa Nacional de Telecomunicaciones sobre la RTDNFO en el Cauca para portadoras de larga distancia Popayán-Pasto con datos reales proporcionados por la empresa del recaudo de servicios de Larga Distancia Nacional e Internacional facturados en la Central Popayán, el trabajo de evaluación de costos y beneficios se realizó con el simulador de *EVOLUTION 2.0a* el cual trabaja con un diagrama causal donde se representan los flujos a tener en cuenta para el diagrama de Forrester o de simulación que se ejecuta con datos en forma de escenarios y *Excel*, partiendo de un escenario real según los datos entregados y utilizando datos proyectados para los escenarios siguientes según sugerencias del técnico de TELECOM.

Uno de los factores que impulsan las telecomunicaciones son los requerimientos del mercado que tienen que ver con las necesidades de los usuarios, que para la empresa representan clientes comerciales, industriales, empresarios y residenciales, dentro de los servicios existentes están voz, datos (Frame Relay), líneas arrendadas (sub-64 kbps, 2 Mbps, 34 Mbps), servicios de datos de alta velocidad (ATM-SMDS), servicios de imágenes y vídeo como teleconferencia, correo electrónico, T.V conmutada y HDTV, servicios sobre demanda, televentas. Con una nueva tecnología como WDM que permite establecer

múltiples topologías virtuales sobre la física, facilita el intertrabajo en un ambiente multivendedor y permite la presentación de una gran diversidad de servicios de telecomunicaciones sobre una planta de fibra óptica instalada, ampliando el ancho de banda y con ello aumentando el volumen, velocidad y confiabilidad en el transporte de información satisfaciendo las necesidades de los clientes como la integración de los servicios de voz, datos y vídeo, variedad de velocidades de información hasta cientos de Mbps en diferentes modos de transporte como punto a punto/ multipunto, servicios interactivos/servicios de distribución unidireccional (T.V), control sobre el servicio, rapidez y confiabilidad en el suministro del servicio, servicios a la medida del cliente, disponibilidad uniforme en toda la red, accesibilidad permanente, buena calidad a bajos costos.

Una arquitectura de transporte basada en la conmutación óptica permite aumentar los ingresos a los operadores, si se compara con las redes SONET-SDH. Los bajos costos en arquitectura incluyen economía en los equipos, requerimientos espaciales de la oficina central mínimos y necesidades reducidas de potencia. El costo de construir la red puede ser disminuido mientras que se mejora la recuperación ante fallas del servicio y se reduce sustancialmente el tiempo para entregar nuevos servicios.

La conmutación óptica entrega a los operadores la flexibilidad en la capa óptica para realizar la configuración de sus redes bajo demanda, facilitando la consolidación de la Red Completamente Óptica (AON), a través de la introducción de servicios de transporte de datos de muy alta velocidad con conectividad extremo a extremo basada en el dominio de la longitud de onda.

4.1 RELACIÓN DE COSTO Y BENEFICIO

La actividad económica de un país está orientada a combinar los recursos eficientemente y convertirlos en bienes y servicios que satisfagan las necesidades de la comunidad, pero dado que los recursos son limitados con relación a la magnitud de las necesidades se deberá a través de los planes y programas de desarrollo establecer tablas de priorización atendiendo criterios de crecimiento y también de equidad y bienestar, por lo tanto la tarea de los planificadores a todos los niveles es establecer la forma en que los recursos se deben utilizar con el fin de satisfacer el mayor nivel de necesidad. Cada país posee cuatro tipos de recursos: la tierra y otros recursos naturales, mano de obra disponible, recursos de capital que hacen más eficiente la producción de bienes y servicios, capacidad empresarial (información e inteligencia) que garantiza la buena gestión y mejor aprovechamiento de los insumos puestos a disposición de cada proyecto. Podemos afirmar que los costos constituyen el valor de los recursos utilizados en la producción o en la prestación del servicio y los beneficios son el valor de los bienes y servicios generados por el proyecto.

El análisis económico del “costo-beneficio” es una forma de evaluación que se emplea para determinar la conveniencia y oportunidad de un proyecto, comparando el valor actualizado de unos con otros [24].

La técnica de evaluación que se va a emplear para el análisis de costos y beneficios, se desarrolla mediante los pasos de modelamiento y simulación utilizando el programa EVOLUTION 2.0a del Grupo Simón de la Universidad Industrial de Santander y Excel

para la elaboración de tablas y gráficas respectivas, los pasos del modelamiento y la simulación son:

- Identificación del modelo teórico.
- Identificación del modelo conceptual.
- Diagrama Causal.
- Diagrama de Forrester.
- Modelo matemático.
- Modelo de escenarios y resultados.
- Realización de una gráfica en Excel con los datos utilizados en los escenarios para hacer una comparación.

4.2. EVALUACION DE LA RELACIÓN DE COSTO-BENEFICIO QUE REPRESENTA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGIA WDM EN LA RTDNFO DE TELECOM POPAYAN.

4.2.1 Modelo Teórico.

En la actualidad son requeridas velocidades muy altas de integración y capacidades de conmutación e interconexión óptica de datos, debido a esto se ha copado la capacidad de la fibra significativamente y se requieren soluciones que proporcionan flexibilidad para el despliegue e integración de diversas tecnologías en una sola infraestructura física, y para

utilizar la capacidad real de transmisión que la fibra puede ofrecer se requieren de técnicas de multiplexación.

El objetivo de hacer la migración a la tecnología WDM por parte de TELECOM Popayán sobre la RTDNFO en el Cauca es incrementar sus utilidades con la infraestructura existente, con WDM se aumenta el ancho de banda en un 820% del ancho de banda actual porque pasa de 311,04 Mbps que es el actual a 2550,3 Mbps ó 2,49 Gbps con WDM lo que representa un 8.2 del ancho de banda actual, con esto la empresa puede aumentar el número de clientes y mejorar la calidad de la prestación de servicios e ir a la vanguardia del adelanto tecnológico, por esta razón con la convergencia de voz datos y vídeo se crea la necesidad de interfazar nuevas tecnologías con la infraestructura ya creada de los servicios existentes.

4.2.2 Modelo Conceptual

La idea es modelar un escenario con datos reales de TELECOM Popayán donde intervengan variables que representen los ingresos y egresos actuales y proyectarlos a la tecnología WDM para obtener así las utilidades y con eso la rentabilidad de la adquisición de la nueva tecnología, de acuerdo a datos proyectados por parte de la empresa dado que hay que hacer un estudio de mercado el trabajo sólo se realizó con las proyecciones sugeridas por TELECOM, con esto se va a determinar el comportamiento de las variables. Para este se tendrá en cuenta que el análisis se tendrá en cuenta portadoras de larga distancia nacional.

Donde **U** representa las utilidades, **I** los ingresos que generan los servicios de datos (Internet) y el servicio de voz de larga distancia nacional, **E** representa los egresos que generan los costos fijos y costos variables.

Datos Reales de TELECOM

TELECOM Popayán maneja el Ancho de Banda con comunicaciones por fibra óptica y por microondas, distribuidas de la siguiente manera:

- Microondas 63 E1 divididos en: 61 E1 para voz y 2 para datos.
- La capacidad instalada de Fibra óptica 32 E1 o sea un 25% ocupados divididos en: 30 E1 para voz y 2 para datos, en total hay 2 STM-1 ó 125 E1.

Un STM-1 equivale a 63 E1 o 155,52 Mbps (1 E1 equivale a 2 Mbps) y un E1 es la unidad mínima de bits manejada en TELECOM.

$BW_{TOTAL} = 311,04 \text{ Mbps } (100\%)$ distribuidos en 2 STM-1.

$BW_U = 183,56 \text{ Mbps } (25\%)$

$BW_{VOZ} = 182 \text{ Mbps } (23\%),$

$BW_{DATOS} = 1,56 \text{ Mbps } (2\%).$

El Ancho de Banda utilizado es equivalente a el número de clientes:

- Voz: 91 E1 llenos (182 Mbps).

- Para datos 4 E1: 2 E1 ó 1600 Kbps (1.56 Mbps) ocupados.

Proporciones: El Ancho de banda ocupado representa el 25%, donde: el 23% corresponde a voz y 2% corresponde a datos.

A continuación se presenta la facturación y recaudo de TELECOM para Servicios de Voz y Datos:

- Lista de datos para voz de Larga Distancia Nacional:

LARGA DISTANCIA NACIONAL	SUBTOTAL	29.977.686	0,0	3.314.412.730	4.248.472.317
AUTOMATICO	SUMA	29.888.000	0,0	3.302.552.514	4.232.540.844
NACIONAL AUTOMATICO EN CONVENIO	2	29.888.000		3.302.552.514	4.232.540.844
NACIONAL AUTOMATICO	52	0	0,0	0	0
NACIONAL AUTOMATICO - TELEFONOS MONEDEROS		0	0,0	0	0
NACIONAL AUTOMATICO - OPERADORES LOCALES		0	0,0	0	0
NACIONAL AUTOMATICO - OPERADORES CELULARES	SUMA	0	0,0	0	0
Comcel		0		0	0
Occel		0		0	0
Celcaribe		0		0	0
Celumovil		0		0	0
Cocelco		0		0	0
SEMIAUTOMATICO	SUMA	89.686	0,0	11.860.217	15.931.473
NACIONAL SEMIAUTOMATICO 100%	75	0	0,0	0	0
NACIONAL SEMIAUTOMATICO EN CONVENIO	82	89.686		11.860.217	15.931.473
NACIONAL SEMIAUTOMATICO - OPERADORES LOCALES		0	0,0	0	0
NACIONAL SEMIAUTOMATICO - CAP'S		0	0,0	0	0
NACIONAL SEMIAUTOMATICO - SAI		0	0,0	0	0
NACIONAL SEMIAUTOMATICO - OPERADORES CELULARES	SUMA	0	0,0	0	0
Comcel		0		0	0
Occel		0		0	0
Celcaribe		0		0	0
Celumovil		0		0	0
Cocelco		0		0	0

Tabla 4.1. Lista de Facturación y Recaudo para el 2001 para servicios de voz Larga Distancia Nacional de TELECOM.

Gráfica de comportamiento del servicio de Larga Distancia Nacional (LDN)



Figura 4.1. Se describe el comportamiento del servicio de Larga Distancia Nacional en meses por millones de pesos para 2001 en cuanto a Facturación y recaudo entregado por TELECOM

El total recaudado para voz en el 2001 es:

$$\text{LDN} = \$4'248.472.317$$

Para saber cuanto produce un E1 al año para voz, se realiza la siguiente operación:

$$\$/\text{LDN} / 91 = \$ 49'297.668,88$$

Donde 91 representa el número total de E1 para voz utilizados.

- Lista de Facturación y Recaudo para el 2001 para servicios de comunicación de datos:

Internet Conmutado: Son los Clientes residenciales, se dispone de 700 circuitos, con canales de velocidad fija límite de 64 Kbps en fibra óptica llamados *Clear Chanel* y canales *Frame Relay* donde se puede utilizar para otro cliente si no se está usando. La siguiente tabla muestra los valores.

CANALES FRAME RELAY DEDICADOS

Vel (Kbps)	CX(\$)	PTO(\$)	CVP(\$)
64	900000	250000	150000
128	900000	346000	553600
256	900000	540500	864800
38,4	540000	150000	90000

INTERNET CLEAR CHANEL

Vel(Kbps)	CX(US\$)	01:01(US\$)	01:02(US\$)	01:03(US\$)
64	200	215	150	102
128	200	361	253	171
256	200	678	475	323
19,2	60	64,5	45	30,6

Tabla 4.2. Datos entregados por TELECOM de precios de servicios de datos de Internet conmutado según la tecnología utilizada Frame Relay (FR) y Clear Chanel, donde se muestra el precio por velocidad en Kbps y por conceptos de conexión (CX), por puertos (PTO) y por la velocidad de puertos conectados (CVP), 01:01 es de punto a punto, 01:02 de punto a multipunto (a 2 puertos) y 01:03 de punto a multipunto (3 puertos).

Red de alta velocidad (p-m) servicio FR

Vel(Kbps)	Num.Clientes	Valor(\$)	Valor Total(\$)	Valor Anual(\$)
64	8	1.300.000	10.400.000	5.700.000
128	5	1.799.600	8.998.000	11.695.200
256	2	2.305.300	4.610.600	17.763.600
38,4	1	780.000	780.000	3.420.000

IDNX(F.O) Servicio Clear Chanel (p-p)

Vel(Kbps)	Num.Clientes	Valor(\$)	Valor Total(\$)	Valor Anual(\$)
64	6	2.001.000	12.006.000	17.412.000
128	2	2.955.000	5.910.000	28.860.000
256	1	5.028.000	5.028.000	53.736.000
19,2	1	600.300	600.300	5.223.600

IDNX(F.O) Servicio FR

Vel(Kbps)	Num.Clientes	Valor(\$)	Valor Total(\$)	Valor Anual(\$)
64	4	1.300.000	5.200.000	3.900.000
128	2	1.799.600	3.599.200	5.052.000

Tabla 4.3. Lista de precios para clientes de internet conmutado teniendo en cuenta el número de clientes, el valor unidad, el valor mensual y el anual para los diferentes servicios como la red de alta velocidad punto multipunto (p-m) y IDNX de fibra óptica con servicio FR y la IDNX de fibra óptica con servicio Clear Chanel punto a punto (p-p).

Internet Dedicado: Actualmente TELECOM Popayán cuenta con dos clientes que son UNICAUCA y LEGIS:

Cliente	Vel(Kbps)	Recaudo Anual (\$)
UNICAUCA	1536	159.103.979
LEGIS	64	7.740.000
	Total(\$)	166.843.979

Tabla 4.4. Lista del recaudo anual de TELECOM para clientes de internet dedicado.

Costos: Se refiere a los costos independientes de la tecnología o costos fijos y dependientes de la tecnología o costos variables, que afectan en los Egresos.

Costos Fijos: Son los costos que no se van a modificar con la implementación de la tecnología WDM :

- *Personal*, son los empleados contratados ya sean temporales o permanentes, con la tecnología WDM se requiere solo de técnicos para la instalación de equipos.
- *Logística*, es la parte de planeación la cual se asume que se debe cambiar pero sin representar variación de costos.

Costos Variables: Representan los costos que van a variar en algún momento. Se va a suponer que se necesita de la instalación y mantenimiento del OXC del MUX óptico y del multiprotocolo.

- *Instrumentación*, se necesita la compra del multiplexor óptico, del OXC y del multiprotocolo GMPLS, se asume que con la fibra instalada y los regeneradores no serán cambiados.

El modelamiento se proyectará a 5 años del 2003 al 2008, pero las variables se van a modificar año tras año por eso interesa una variable de tiempo en años.

Tabla de utilidades según los datos reales.

Ingresos voz(\$)	Ingresos datos(\$)	Egresos(\$)	Utilidades(\$)
4.248.472.317	319.606.379	725.000.000	3'843.078.696

Tabla 4.5. Representa el ingreso, el egreso es un dato por concepto de empleados y mantenimiento según la empresa, con estos datos se obtienen las utilidades actuales de TELECOM según datos reales suministrados.

Ingresos = Ingresos voz + Ingresos datos

Ingresos datos = Internet conmutado + Internet dedicado

Egresos = Empleados + Mantenimiento de equipo

4.2.3 Diagrama Causal

Descripción: Se trata de modelar el flujo de ingresos y egresos produciendo las utilidades teniendo en cuenta la ecuación 4.1:

$$U = I - E \quad (4.1)$$

El BW es el factor reaccionante o parámetro específico para producir el flujo de ingresos y egresos de la siguiente forma como se ve en la ecuación de reacción 4.2:

$$U \xrightarrow{\text{BW}} FI - FE \quad (4.2)$$

Si se aumenta el ancho de banda aprovechando toda la capacidad de la fibra instalada se mejora la calidad del servicio y con ello se aumenta el número de clientes, por lo tanto se incrementan las utilidades debido a que el flujo de ingresos se aumenta. Con todo esto se

puede considerar que se puede disminuir el precio del Kb y de esa forma se garantiza el cliente no ocasionando pérdidas.

- Con la tecnología WDM hay una mejor utilización del ancho de banda de la fibra instalada, por lo que se garantiza una mejor velocidad de transmisión sin disponer de circuitos costosos de alta velocidad.
- Se pueden vender o arrendar longitudes de onda brindando el mismo ancho de banda de una fibra dedicada.
- Con WDM hay una mejor flexibilidad de los sistemas sobre la topología física.
- Se pueden ofrecer múltiples servicios como acceso de mayor velocidad a internet, CATV, Teleconferencias, etc. debido a que WDM es independiente de la velocidad de bit.
- Hay flexibilidad de expandir la capacidad en cualquier punto de red a través de nodos intermedios de inserción/extracción de canales de acuerdo a los requerimientos de tráfico.

El flujo de egresos se puede aumentar debido a gastos de instalación y mantenimiento de los equipos, dependiendo de la fibra óptica instalada se pueden necesitar transceptores de acuerdo a el número de canales multiplexados dificultando la gestión del sistema.

- Se puede degradar la señal al transportar varias señales ópticas.
- WDM presenta naturaleza analógica en el proceso de multiplexación por lo tanto trae asociado inconvenientes.

Diagrama. Es la representación en diagrama de flujo del comportamiento de las utilidades según cambios en los flujos de ingresos (FI) y egresos (FE), en la figura 4.1 se muestra que si el Flujo de ingresos aumenta, aumentan las utilidades y por el contrario si el flujo de egresos aumenta las utilidades disminuyen.



Figura 4.2. Diagrama Causal o de flujo donde se representa el movimiento de los flujos de Ingresos y Egresos ocasionando variación de las utilidades.

Clasificación de variables y parámetros adicionales

CLASE	SÍMBOLO	DEFINICION	UNID.	OBSERVACIONES
Nivel	U	Utilidades	\$	Ingresos - Egresos
Flujo	FI	Flujo de Ingresos	\$	Corresponde a la variación de los ingresos según cambios en los costos por Kb.
Flujo	FE	Flujo de egresos	\$	Corresponde a la variación de los egresos según costos fijos y variables, empleados y mantenimiento.
Exógen	BW	Parámetro específico	Kbps, Mbps,	BW actual y con WDM y lo que esto representa
Parámetro	IV	Ingresos Voz	\$	Corresponde los ingresos por servicio de voz.
Parámetro	ID	Ingresos Datos	\$	Corresponde a los ingresos por servicios de Internet.

Tabla 4.6. Clasificación de las variables y los parámetros utilizados del diagrama de modelamiento y simulación o de Forrester.

En la parte de Egresos también hay parámetros que afectan la variable.

Parámetro	ME	Mantenimiento de Equipo	\$	Corresponde a los costos por mantenimiento que la empresa asume.
Parámetro	E	Empleados	\$	Corresponde a los pagos a empleados.

Tabla 4.7. Se muestra los parámetros utilizados en el de diagrama de modelamiento y simulación o de Forrester para el flujo de egresos.

4.2.4. Diagrama de Forrester

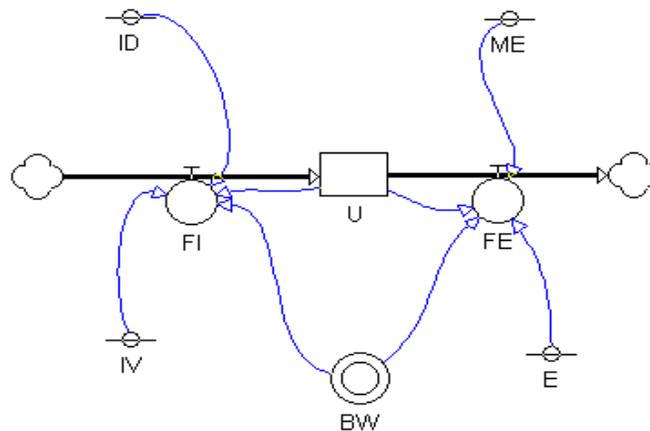


Figura 4.3. Este diagrama es una representación gráfica utilizando la herramienta de modelamiento y simulación EVOLUTION 2.0a, donde se tienen las variables de interés para realizar el diagnóstico de las utilidades actuales con las utilidades empleando la técnica WDM.

Para llegar a este diagrama es necesario primero un Modelo teórico de lo que sería la utilización de la tecnología WDM en TELECOM y tener claro lo que se desea modelar, otro paso importante es reunir las variables en un Modelo Matemático que se asumen se

necesitan, como estas intervienen y para ello se realiza el diagrama causal o de flujo. Luego se realiza el diagrama de Forrester con la herramienta EVOLUTION 2.0a teniendo en cuenta las variables estudiadas previamente en un modelo matemático el cual se observa en la figura 4.4.

4.2.5. Modelamiento Matemático

⊙	BW = IntPaso(1,1,311,311,2550,2550,2550,2550) Ancho de banda actual 311
⇒	FE = $U - BW * (me + e) / 100000$ Flujo de egresos afectado por BW con el aumento de mantenimiento de equipo y pago a empleados, donde el factor # de clientes es 10000.
⇒	FI = $U + BW * (id + iv) / 100000$ Flujo de ingresos afectado por BW en el aumento de ingresos de voz y de datos representando aumento de clientes asignando en factor de 10000.
□	U = 3800 $U = I (iv + id) - E (me + e)$ representa las utilidades
⊖	e = 100 egresos por concepto de pago a empleados.
⊖	id = 400 ingresos por concepto de servicios de datos.
⊖	iv = 4000 ingresos por concepto de servicios de voz.
⊖	me = 100 egresos por concepto de mantenimiento de equipo.

Figura 4.4. Se muestra el diagrama de ecuaciones utilizadas en la simulación. Representadas en variable de nivel (U), variables de flujo (FI, FE), variable exógena (BW) y parámetros (IV, ID, ME, E).

Se representa mediante ecuaciones las interacciones de las variables de simulación de la siguiente manera:

- Ecuaciones de Nivel (Utilidades)

$$U = I (IV + ID) - E (ME + E) \quad (4.3)$$

La ecuación 4.3 representan las utilidades como la diferencia entre los ingresos (Ingresos de voz mas ingresos de datos) y los egresos (Mantenimiento de equipo y empleados).

- Ecuaciones de Flujo (Flujo de Ingresos FI, Flujo de Egresos FE)

$$\begin{aligned} FI &= U + BW * (IV + ID) / \text{factor \# clientes} \\ FE &= U - BW * (ME + E) / \text{factor \# clientes} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde el Factor # de clientes = 10000 y es para ajustar los datos.

La ecuación 4.4 representa el FI y FE afectado por el Ancho de Banda BW y este afectando a las utilidades, donde en el FI se suman los Ingresos de Voz IV y los Ingresos de Datos ID y en FE se resta Mantenimiento de Equipo ME y Empleados E.

- Ecuaciones Exógenas (Ancho de Banda)

$$BW = \text{IntPaso}(1,1,311,311,2550,2550,.2550) \quad (4.5)$$

La ecuación 4.5 representa la variación del Ancho de Banda en forma lineal como IntPaso en el programa de simulación y va del actual 311,04 Mbps y después 2550,3 Mbps con tecnología WDM escritos en las dos últimas coordenadas, en un tiempo de 5 años donde a

la mitad del primer año se ha implementado la tecnología, en las primeras coordenadas se escribe la división en la coordenada x en este caso años los cuales se ordenan de 0 años, a 5 años, como se puede observar en la figura 4.5 donde se muestra la Interfaz de usuario.

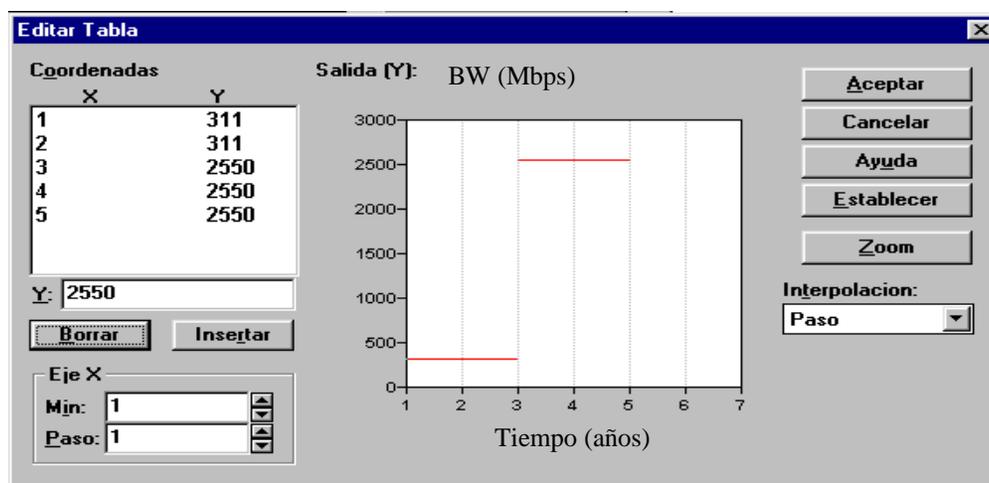


Figura 4.5. Interfaz de Usuario del manejo del Ancho de Banda en la simulación. En el eje Y(BW), y el en eje X(tiempo) donde se ve la forma del paso del año 1 con un BW de 311 Mbps y cuando se ha implementado la tecnología WDM y por lo tanto aumentado el BW a 2550 Mbps.

Este parámetro en tecnología WDM es de valor 2.49 Gbps (2550 Mbps), 8.2 veces mayor que el ancho de banda actual.

4.2.6 Simulación

Se representan escenarios con datos asignados teniendo en cuenta el objetivo de la simulación, para este modelo se tendrán en cuenta escenarios en cada año de la siguiente manera:

En el año cero se tiene el escenario actual con datos reales hasta la mitad del año donde se hace la implementación de la tecnología WDM aumentando el ancho de banda, en la siguiente tabla se muestra un escenario inicial.

Variables	Valor
Ingresos (I)	\$ 4'568.078.696
Egresos (E)	\$ 725'000.000
Utilidades (U)	\$ 3'843.078.696
Ancho de Banda	311,04 Mbps

- **Escenario 2** (Mitad primer año): Según la implementación de la tecnología WDM, se tiene en cuenta los gastos del MUX Optico (\$600'000.000), el transconector óptico (OXC) (\$ 450'000.000) y la instalación (\$200'000.000).

Variable	Valor
I	\$ 4'568.078.696
E (Eactual + OXC+MUX O)	\$ 1'975.000.000
MUX O (costo + inst)	\$700.000.000
OXC (costo+instalac)	\$ 150'000.000
U	\$ 2'593.078.696
BW	2.49 Gbps

- **Escenario 3** (segundo año): Al aumentar el BW, se requiere de mantenimiento para la inscripción de nuevos usuarios y la adquisición del multiprotocolo GMPLS para mejorar el QoS. Los datos de mantenimiento de equipo y empleados son sugeridos por la empresa.

Variable	Valor
I	\$ 4'568.078.696
E (Eactual + ME+E)	\$ 1'225'000.000
ME (Mant. Equipo) E (Empleados capacitados)	\$500'000.000
U	\$ 3'343.078.696
BW	2.49 Gbps

- **Escenario 4** (tercer año): Se tienen nuevos clientes donde se utilizan datos de proyecciones sugeridas por la empresa (50% de los clientes actuales de datos) o sea un incremento del 25% de los ingresos actuales, y con ello aumento en las utilidades. Aquí el mantenimiento se reduce porque ya se ah hecho la instalación.

Variable	Valor
I	\$ 5'710.698.370
E (Eactual + ME+E)	\$ 925'000.000
ME (Mant. Equipo) E (Empleados capacitados)	\$ 200'000.000
U	\$ 4'785.098.370
BW	2.49 Gbps

- **Escenario 5** (cuarto año): Se mejora la calidad del servicio y se implementan nuevos servicios con los clientes nuevos y actuales con una proyección de ingresos del 50% del actual, con ello se tiene la posibilidad de bajar los precios en servicios especialmente de datos y seguir aumentando las utilidades.

Variable	Valor
I	\$ 6'852.118.044
E (Eactual + ME+E)	\$ 925'000.000
ME (Mant. Equipo) E (Empleados capacitados)	\$ 200'000.000
U	\$ 5'927.118.044
BW	2.49 Gbps

Resultado según los escenarios.

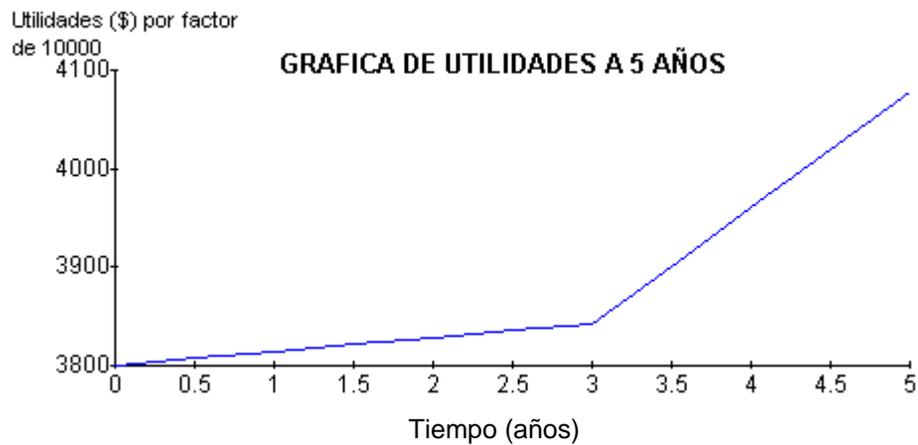


Figura 4.6. Gráfica de utilidades según escenarios anteriores respecto al tiempo utilizando la herramienta de simulación EVOLUTION 2.0a.comparando las pendientes de las gráficas de simulación de utilidades sin WDM y con WDM.

Tabla de diagnóstico implementando tecnología WDM

Años	Ingresos(\$)	Egresos(\$)	Utilidades(\$)
1	4'568.078.696	725.000.000	3'843.786.696
1	4'568.078.696	1'975.000.000	2'593.078.696
2	4'568.078.696	1'225.000.000	3'343.078.696
3	5'710.698.373	925.000.000	4'785.098.370
4	6'852.118.044	925.000.000	5'927.118.044
5	6'852.118.044	925.000.000	5'927.118.044

Tabla 4.8. Se tiene en cuenta los escenarios de la simulación para los valores en los siguientes 5 años después de implementada la tecnología WDM, en el último año se proyectan según la empresa bajar los costos a los usuarios pero con las mismas utilidades.

Teniendo en cuenta los valores reales de los Ingresos por servicios de voz de larga distancia nacional y de datos y los egresos, se hallan las utilidades actuales, posteriormente se asumen porcentajes en el incremento del número de clientes con un valor real de Egresos según dato de la empresa. La figura 4.7 se muestra el diagnóstico donde se observa la viabilidad de la implementación puesto que aumentan las utilidades.

Gráfica de representación del diagnóstico

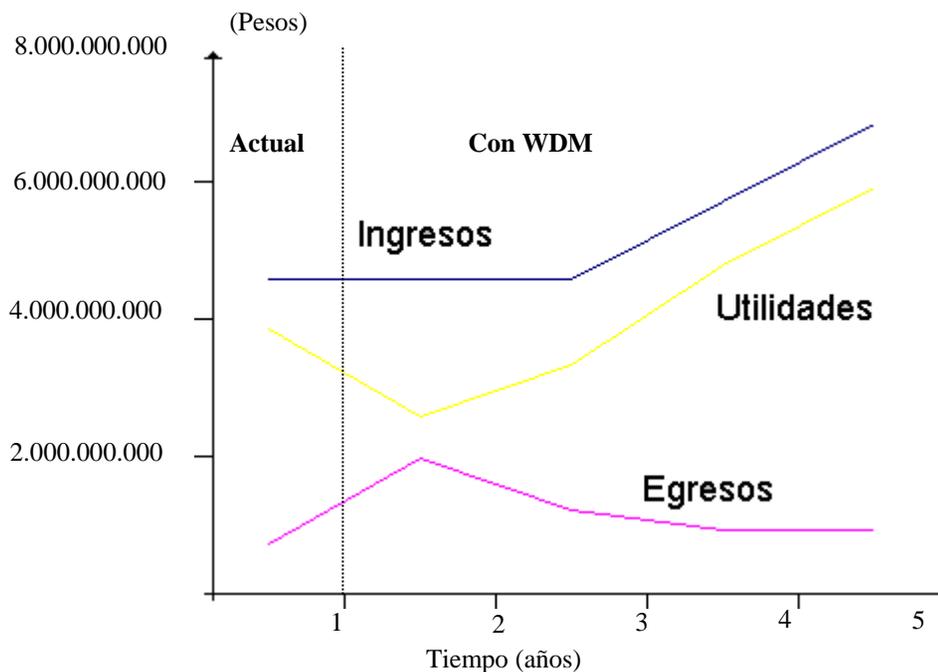


Figura 4.7. Gráficas de diagnóstico para los Ingresos, Egresos y Utilidades con la implementación de la tecnología WDM teniendo en cuenta la tabla de diagnóstico y utilizando Excel.

Con WDM el diagnóstico será de un aumento de utilidades de la siguiente manera:

$$\text{Ingresos WDM} = 8.2 * \text{Ingresos actuales}$$

$$\text{Egresos WDM} = \text{costo OXC} + \text{instalación y mantenimiento} + \text{Egresos actuales}$$

$$\text{Utilidades WDM} = \text{Ingresos WDM} - \text{Egresos WDM}$$

Del siguiente estudio se obtiene que la tecnología WDM es rentable para la Empresa Nacional de Telecomunicaciones TELECOM adquirirla para portadoras de larga distancia, teniendo en cuenta que este estudio se hizo con datos reales de recaudo pero sin tener en cuenta todo los gastos operacionales

BIBLIOGRAFIA

1. OPTICAL FIBER COMUNICATION: FROM TRANSMISSION TO NETWORKING.
Rajiv Ramaswami, IEEE Communications Magazine, Mayo 2002.
2. L'ÉVOLUTION DES RÉSEAUX D'INFRASTRUCTURE DWDM Á HAUT DÉBIT,
F.X.Oliver, C. Zugno. Revue des Télécommunications d'Alcatel. 3 trimestre 2000
3. TENDENCES ET ÉVOLUTION DES RÉSEAUX ET TECHNOLOGIES OPTIQUES.
M. Erman, Revue d'e Télécommunications d'Alcatel, 3 trimestre de 2001.
4. A MEAN FIELD APPROACH FOR SIMULATING WAVELENGTH DIVISIÓN
MULTIPLEXING SYSTEMS, T.Yu, W.M. Reimer, IEEE Fotonics thechology.Letters,
vol 12, N 4, 2000.
5. REDES SUBMARINAS OPTICAS EN EL UMBRAL DE LOS Tbits/s POR
CAPACIDAD DE FIBRA. O. Gautheron, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre
de 2000.
6. CONFERENCIAS SISTEMAS DE COMUNICACIONES, Ing Giovany López.
7. AMPLIFICADORES DE FIBRA DOPADA DE ERBIO DE REVESTIMIENTO
BOMBEADO PARA APLICACIONES WDM. D. Bayart, L. Gasca. Revista de
Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001.

8. INTRODUCTION TO OPTICAL TRANSMISSION IN A COMMUNICATIONS NETWORK, Proforum Tutorial, International engineering Consortium. 2000.
9. SISTEMA WDM ÓPTICO. Sergio Estrada, Fortunecity, España, 1999
10. DYNAMIC GAIN EQUALIZATION IN WDM SYSTEMS. An Introduction To Optical Communications. Sulaiman A Sheriff, Dic 2001.
11. TUNABLE LIQUID CRISTAL FABRY PEROT INTERFEROMETER FILTER FOR WEVWLENGTH DIVISIÓN MULTIPLEXING COMUNICATIONS SYSTEMS, Katsuhiko Hirabayashi, Hiroyuki Tsuda, Journal of Lighthwave Technolgt, vol.11, n 12, Dic.1993.
12. OPTICAL FIBER COMUNICATION: FROM TRANSMISSION TO NETWORKING. Rajiv Ramaswami, IEEE Communications Magazine, Mayo 2002.
13. JERARQUIA DIGITAL SINCRONA SDH. B. Fernando, Santafé de Bogotá, Noviembre de 1991..
14. MANUAL TELECOM: NORTEL TN-1X Systems Description. 1996.
15. MANUAL DE LA UIT-T. G.562, 564 DE 2000.
16. SDH/SONET EVOLUCIONAN HACIA UNA PLAFORMA DE SERVICIOS MÚLTIPLES. D. Marazza, H. Kleine-Altekap, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2000.
17. . COMPONENTES OPTICOS PARA EL MUEVO MILENIO. G. Cherétein, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2000.
18. CAMINO HACIA LA TRANSMISION DE MUY ALTA CAPACIDAD. S. Bigo, A. scavennecc. Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001.
19. LA TRANSMISION ÓPTICA AVANZA HACIA UN MUNDO IP. C. Coltro, G. Grammet, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2000.

20. COMPONENTES DWDM DE BAJO COSTO. J. Jacquet, K. Satzke, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001.
- 21.
22. INTRODUCCIÓN DE TÉCNICAS DE CONMUACION ÓPTICA DE PAQUETES EN LAS REDES WDM. M. VANDENHOUTE, d. Chiaroni, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001.
23. MATRIZ DE CONMUTACION ÓPTICA DE PAQUETES. D. Chiarini, P. Bonno, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001.
24. INTERCONECTORES OPTICOS. P. Perrier, S. Thompson, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2000.
25. GESTION DE PROYECTOS, Miranda M Juan J, cuara esición, editores MM, 2001.

Bibliografía Complementaria

- ◆ QUE CANTIDAD DE ÓPTICA HABRA EN LAS FUTURAS REDES METROPOLITANAS?, A. Jourdan, T. Pfeiffer, Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3 trimestre de 2001
- ◆ MANUAL TELECOM: AMPLIFICADOR OPTICO SMS.
- ◆ OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS. J. Gowar, Practice Hall International, U.K. 1983.
- ◆ NONLINEAR OPTICAL COMMUNICATION NETWORKS. E. Iannone, A. Mecozzi., Cánada 1998.

- ◆ AMPLIFICADORES DE FIBRA DOPADOS CON ERBIO. Revista de Comunicaciones. IEEE, 2001.
- ◆ DENSE WAVELENGTH DIVISIÓN MULTIPLEXING (DWDM) PERFORMANCE AND CONFORMANCE TESTING, Profurum Tutorials. International Engineering Consortium. 2001.

Referencias Internet

www.alcatel.com

www.fiberoptics.com

www.photonicsonline.com

www.opticalswitch.com