

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE LA RED DE BACKHAUL PARA UNA NUEVA SALIDA DE CABLE SUBMARINO, UTILIZANDO LA FIBRA ÓPTICA DEL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS A DISPOSICIÓN DEL ESTADO ECUATORIANO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y REDES DE INFORMACIÓN**

SANGUCHO MOROCHO CRISTINA ELIZABETH
cristi_elizabeth@hotmail.com

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

MOROCHO ASIMBAYA WASHINGTON BOLÍVAR
wbolivarma@yahoo.com

DIRECTOR: M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ
sjimenez@mailfie.epn.edu.ec

Quito, abril 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Washington Bolívar Morocho Asimbaya y Cristina Elizabeth Sangucho Morocho, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Washington Morocho

Cristina Sangucho

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Cristina Elizabeth Sangucho Morocho y el Sr. Washington Bolívar Morocho Asimbaya, bajo mi supervisión.

M.Sc. María Soledad Jiménez
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios eterno, nuestro soporte y fortaleza.

A nuestros padres, por su inmenso cariño y por haber sembrado en nosotros la constancia y el anhelo de superación.

Gracias por su apoyo incondicional.

Este triunfo les pertenece.

Un agradecimiento especial a la M.Sc María Soledad Jiménez por su paciencia, por su valioso apoyo y acertada dirección en el desarrollo de este proyecto de titulación.

Gracias a nuestros amigos, compañeros de sueños e ideales, por su amistad incondicional.

A nuestra universidad la Escuela Politécnica Nacional, por darnos la oportunidad de aprender y forjarnos como profesionales.

A todos ellos, de corazón, GRACIAS.

***Cristina Sangucho
Washington Morocho***

DEDICATORIA

Con profundo cariño dedicamos este trabajo a nuestros padres, por ser un ejemplo a seguir, por ser un apoyo incondicional y por sus palabras de aliento para seguir adelante en todo momento.

A todos aquellos luchadores quienes tienen el coraje para seguir caminando, a los valientes que enfrentan sus temores, vencen y se superan.

*Cristina Sangucho
Washington Morocho*

CONTENIDO GENERAL

CONTENIDO GENERAL.....	I
RESUMEN.....	XVII
PRESENTACIÓN.....	XIX

1. CAPÍTULO I.....1

CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS Y DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DWDM

1.1	PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS	1
1.1.1	LEY DE REFRACCIÓN DE SNELL.....	1
1.1.2	ÁNGULO CRÍTICO (θ_c)	2
1.1.3	REFLEXIÓN INTERNA TOTAL.....	3
1.1.4	ÁNGULO DE ACEPTACIÓN Y CONO DE ACEPTACIÓN.....	3
1.1.5	APERTURA NUMÉRICA (AN)	4
1.1.6	TEORÍA DE PROPAGACIÓN.....	5
1.1.6.1	<i>Modo de Propagación.....</i>	5
1.1.6.2	<i>Frecuencia de corte normalizada (V)</i>	5
1.1.7	CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	6
1.1.7.1	<i>Clasificación según el modo de propagación</i>	6
1.1.7.2	<i>Clasificación según el perfil del índice de refracción</i>	6
1.1.8	PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	8
1.1.8.1	<i>Atenuación.....</i>	9
1.1.8.1.1	<i>Pérdidas intrínsecas.....</i>	10
1.1.8.1.2	<i>Pérdidas extrínsecas</i>	12
1.1.8.2	<i>Dispersión en las Fibras.....</i>	13
1.1.8.2.1	<i>Dispersión modal</i>	13
1.1.8.2.2	<i>Dispersión cromática.....</i>	14
1.1.8.2.3	<i>Dispersión por Modo de Polarización (PMD, Polarization Mode Dispersion).....</i>	17

1.1.8.3	<i>Efectos no lineales en la fibra óptica</i>	19
1.1.8.3.1	<i>Scattering estimulado no lineal</i>	19
1.1.8.3.2	<i>Efecto Kerr (Fenómeno de índice de refracción)</i>	23
1.2	FUENTES O EMISORES DE LUZ	27
1.2.1	LED (DIODO EMISOR DE LUZ)	27
1.2.2	LÁSER (AMPLIFICACIÓN DE LUZ POR EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN)	28
1.2.2.1	<i>Características generales de los láseres de semiconductor</i>	29
1.2.2.1.1	<i>Comportamiento de la señal de salida en función de la corriente aplicada</i>	29
1.2.2.1.2	<i>Espectro de la radiación de salida</i>	29
1.2.2.1.3	<i>Influencia de la temperatura</i>	31
1.2.2.1.4	<i>Confinamiento de la luz dentro de la zona activa</i>	31
1.2.2.2	<i>Láseres monomodo</i>	32
1.2.2.2.1	<i>Láseres de Cavidad Vertical o VCSEL</i>	32
1.2.2.2.2	<i>Láseres por reflexiones de Bragg</i>	33
1.2.2.2.3	<i>Láseres sintonizables</i>	34
1.2.2.2.4	<i>Láseres de Pozo Cuántico</i>	35
1.3	DETECTORES ÓPTICOS	36
1.3.1	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN DETECTOR DE LUZ	36
1.3.1.1	<i>Coefficiente de absorción (α)</i>	36
1.3.1.2	<i>La eficiencia cuántica</i>	37
1.3.1.3	<i>La Responsividad</i>	38
1.3.1.4	<i>Corriente de oscuridad (Dark Current)</i>	38
1.3.2	FOTODIODO P-N	39
1.3.3	FOTODIODO PIN	39
1.3.4	FOTODIODO APD	40
1.4	MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA (DWDM)	42
1.4.1	DIFERENTES TIPOS DE WDM	42
1.4.2	SISTEMAS DWDM DE LARGO ALCANCE	44
1.4.3	COMPONENTES CARACTERÍSTICOS DE UN SISTEMA DWDM	45

1.4.3.1	<i>Terminales multiplexores ópticos (OTMs)</i>	45
1.4.3.2	<i>Transpondedores</i>	46
1.4.3.3	<i>Multiplexores/demultiplexores ópticos</i>	48
1.4.3.4	<i>Amplificadores ópticos (OA)</i>	48
1.4.3.4.1	<i>Funcionamiento del amplificador óptico</i>	49
1.4.3.4.2	<i>Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA)</i>	49
1.4.3.4.3	<i>Amplificador de Fibra Óptica (OFA)</i>	50
1.4.3.4.4	<i>Tipos de amplificadores ópticos según su aplicación</i>	56
1.4.3.5	<i>Multiplexores ópticos de inserción/extracción (OADM)</i>	58
1.4.3.5.1	<i>F-OADM (Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción Fijos)</i> . 58	
1.4.3.5.2	<i>R-OADM (Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción Reconfigurables)</i>	59
1.4.3.5.3	<i>Arquitectura ROADM mejorada (eROADM)</i>	62
1.4.3.6	<i>Conmutador cruzado óptico (OXC, Optical Cross-Connect)</i>	64
1.4.3.7	<i>Control de la dispersión (DM, Dispersion Management)</i>	64
1.4.3.7.1	<i>Mapas de dispersión en enlaces ópticos</i>	64
1.4.3.7.2	<i>Compensación de dispersión cromática</i>	65
1.4.3.7.3	<i>Compensaciones de PMD</i>	68
1.4.4	VENTAJAS DE DWDM	69
2.	CAPÍTULO II	71

INFORMACIÓN BÁSICA DE LA NUEVA CABEZA DE CABLE SUBMARINO

2.1	SITUACIÓN ACTUAL DE LA SALIDA INTERNACIONAL DEL ECUADOR	71
2.2	CONECTIVIDAD INTERNACIONAL DE ECUADOR - RUTAS ACTUALES.	73
2.2.1	CABLE SUBMARINO PANAMERICANO	74
2.2.2	SALIDA POR EL NORTE	75
2.2.2.1	<i>Cable Submarino ARCOS (Americas Region Caribbean Optical-ring System)</i> . 76	
2.2.2.2	<i>El cable submarino MAYA-1</i>	77

2.2.3	SALIDA POR EL SUR	78
2.2.3.1	<i>El cable submarino Global Crossing</i>	79
2.2.3.2	<i>El cable submarino Emergia</i>	80
2.2.4	CABLE SUBMARINO DE TELEFÓNICA <i>INTERNACIONAL</i> <i>WHOLESALE SERVICES (TIWS)</i>	82
2.2.5	ENLACES SATELITALES	83
2.3	ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL	84
2.4	FACTIBILIDAD DE SITUAR UNA UNIDAD DE RAMIFICACIÓN EN COSTAS ECUATORIANAS.....	86
2.4.1	UBICACIÓN DE LOS POSIBLES PUNTOS DE RAMIFICACIÓN DE LOS CABLES SUBMARINOS QUE PASAN FRENTE A LAS COSTAS ECUATORIANAS.....	87
2.5	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PUNTO DE ATERRIZAJE.....	89
2.5.1	CABEZA DE PLAYA EN PUNTA CARNERO.....	90
2.5.2	CABEZA DE PLAYA EN MANTA	91
2.5.3	CABEZA DE PLAYA A UBICAR EN ESMERALDAS	92
3.	CAPÍTULO III.....	95

DISEÑO PROPUESTO PARA LA RED DE BACKHAUL

3.1	INTRODUCCIÓN.....	95
3.2	SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DE LAS TELECOMUNICACIONES EN ECUADOR	96
3.2.1	ACCESO A INTERNET.....	99
3.2.2	EVOLUCIÓN DE ACCESO A INTERNET EN ECUADOR.....	101
3.2.3	PARTICIPACIÓN DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIO DE INTERNET (ISP) EN EL MERCADO	102
3.3	CAPACIDAD DE CONEXIÓN AL BACKBONE INTERNACIONAL ACTUAL Y FUTURA DEL ECUADOR (2008- 2013)	104
3.3.1	ANCHO DE BANDA PARA EL ACCESO A INTERNET	105
3.3.1.1	<i>Acceso conmutado y dedicado</i>	105
3.3.1.2	<i>Internet Social</i>	108
3.3.1.3	<i>NAP</i>	111

3.3.2	CAPACIDAD PARA DATOS INTERNACIONALES	118
3.3.3	CAPACIDAD PARA LOS SERVICIOS DE VOZ	121
3.3.4	PROYECCIÓN DE LA CAPACIDAD INTERNACIONAL	124
3.4	ANTECEDENTES DEL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS	126
3.4.1	TERMINALES Y ESTACIONES.....	126
3.4.1.1	<i>Terminal y Estación de Bombeo Amazonas (PS1).....</i>	<i>128</i>
3.4.1.2	<i>Estación Cayagama (Estación de bombeo intermedia - PS2).....</i>	<i>129</i>
3.4.1.3	<i>Estación Sardinias (Estación de bombeo intermedia – PS3).....</i>	<i>129</i>
3.4.1.4	<i>Estación Páramo (Estación de bombeo intermedias – PS4).....</i>	<i>130</i>
3.4.1.5	<i>Chiquilpe (estación de reducción de presión PRS-1) y Puerto Quito (estación de reducción de presión PRS-2).....</i>	<i>131</i>
3.4.1.6	<i>Terminal Marítimo OCP</i>	<i>131</i>
3.4.2	INFRAESTRUCTURA ACTUAL DE LA RED SDH DEL OCP.....	132
3.4.3	SITUACIÓN DE LOS CUATRO HILOS DE FIBRA PERTENECIENTES AL ESTADO ECUATORIANO	134
3.5	PROPUESTA DE LA RED DE BACKBONE	136
3.5.1	ENLACE PRINCIPAL	138
3.5.2	FACTORES DE DISEÑO PARA LA RED DWDM.....	142
3.5.2.1	<i>Descripción de las características de la fibra óptica del OCP</i>	<i>142</i>
3.5.2.2	<i>Fibras comerciales actuales</i>	<i>144</i>
3.5.2.3	<i>Equipos DWDM comerciales.</i>	<i>147</i>
3.5.2.4	<i>Cálculos del presupuesto de potencia (Power Budget)</i>	<i>148</i>
3.5.2.5	<i>Pérdidas.....</i>	<i>149</i>
3.5.2.5.1	<i>Pérdidas en la fibra.....</i>	<i>149</i>
3.5.2.5.2	<i>Pérdidas en conectores</i>	<i>150</i>
3.5.2.5.3	<i>Pérdidas en los empalmes.....</i>	<i>150</i>
3.5.2.6	<i>Componentes internos de los equipos terminales y del amplificador de línea que serán utilizados en este diseño.</i>	<i>154</i>
3.5.2.7	<i>Estudio de los parámetros de dispersión.....</i>	<i>157</i>
3.5.2.7.1	<i>Dispersión cromática</i>	<i>157</i>
3.5.2.7.2	<i>Dispersión por modo de polarización PMD.....</i>	<i>162</i>
3.5.2.8	<i>Densidad de canales</i>	<i>164</i>
3.5.2.9	<i>Tabla de frecuencias normalizadas</i>	<i>165</i>

3.5.2.10	<i>Asignación de las longitudes de onda para el enlace principal</i>	167
3.5.2.11	<i>Configuración específica de los nodos del enlace principal</i>	170
3.5.2.11.1	<i>Nodo Estación de Amarre</i>	170
3.5.2.11.2	<i>Nodo Río Silanche</i>	173
3.5.2.11.3	<i>Central Pomasqui Ex_Andinatel</i>	175
3.5.2.12	<i>Dimensiones Físicas del Enlace Principal</i>	176
3.5.2.13	<i>Reparto óptico ODF</i>	177
3.5.3	REDUNDANCIA	177
3.5.3.1	<i>Protección Óptica del Sistema</i>	178
3.5.3.1.1	<i>Apagado Automático del Láser (ALS)</i>	179
3.5.4	EQUIPOS <i>HOT SPARE</i> PARA EL ENLACE PRINCIPAL	180
3.5.5	ADMINISTRACIÓN DE LA RED	180
4.	CAPÍTULO IV	182

ANÁLISIS DE COSTOS

4.1	INTRODUCCIÓN	182
4.2	DEFINICIONES PREVIAS	182
4.2.1	PROYECTO	182
4.2.2	EL CICLO DEL PROYECTO	183
4.2.2.1	<i>Preinversión</i>	183
4.2.2.2	<i>Identificación de Proyectos</i>	183
4.2.2.2.1	<i>Selección de Proyectos</i>	184
4.2.2.2.2	<i>La Formulación del Proyectos</i>	184
4.2.2.2.3	<i>La Evaluación Ex - ante</i>	185
4.2.2.3	<i>Ejecución</i>	185
4.2.2.4	<i>Operación</i>	185
4.2.3	INVERSIÓN	185
4.2.3.1	<i>Inversiones Fijas</i>	186
4.2.3.2	<i>Inversiones Diferidas</i>	187
4.2.3.3	<i>Capital de Trabajo</i>	188
4.2.4	COSTOS	189
4.2.4.1	<i>Costos de Fabricación</i>	190

4.2.4.1.1	<i>Costo directo</i>	190
4.2.4.1.2	<i>Gastos de Fabricación</i>	190
4.2.4.1.3	<i>Gastos de Administración:</i>	191
4.2.4.1.4	<i>Gastos de Ventas:</i>	192
4.2.5	INGRESOS	192
4.3	INGENIERÍA DEL PROYECTO	193
4.3.1	TAMAÑO	193
4.3.2	LOCALIZACIÓN	193
4.3.3	INGENIERÍA	193
4.3.3.1	<i>Survey de Infraestructura</i>	196
4.3.3.2	<i>Survey de Contratación</i>	196
4.3.3.3	<i>Survey de Fibra Óptica</i>	196
4.3.3.4	<i>Informe de ingeniería</i>	197
4.4	ESTRUCTURA FINANCIERA DEL PROYECTO	197
4.4.1	PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	197
4.4.1.1	<i>Inversiones Fijas</i>	197
4.4.1.2	<i>Inversiones Diferidas</i>	198
4.4.1.3	<i>Capital de Trabajo</i>	199
4.4.2	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	200
5.	CAPÍTULO V	202
5.1	CONCLUSIONES	202
5.2	RECOMENDACIONES	208
6.	BIBLIOGRAFÍA	210
ANEXOS		215
GLOSARIO		252

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS Y DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DWDM

Fig. 1.1 Representación de la ley de Snell.	2
Fig. 1.2 El fenómeno de «reflexión total» confina la luz (es decir, la guía).....	3
Fig. 1.3 (a) Cono de aceptación en fibras ópticas (b) Relaciones geométricas.....	3
Fig. 1.4 Fibras multimodo.....	6
Fig. 1.5 Fibras monomodo.....	6
Fig. 1.6 Corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación del índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras de índice escalón... ..	7
Fig. 1.7 Propagación de los rayos ópticos de una fibra multimodo de índice escalón.....	7
Fig. 1.8 Corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación del índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras de índice gradual. ..	8
Fig. 1.9 Propagación de los rayos ópticos de una fibra multimodo de índice gradual.	8
Fig. 1.10 Atenuación total en función de la longitud de onda.	9
Fig. 1.11 Influencia de las microcurvaturas existentes sobre la trayectoria que siguen diferentes rayos.	12
Fig. 1.12 Variación de la velocidad de grupo como función de la longitud de onda.	15
Fig. 1.13 Dispersión del material, de guía de onda y total para una fibra monomodo estándar.	17
Fig. 1.14 Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente.....	18
Fig. 1.15 Corte transversal del núcleo de una fibra óptica en la que se aprecian dos casos de geometría: circular y elíptica. Son casos de un material no birrefringente y birrefringente, respectivamente.	18
Fig. 1.16 El scattering de Raman: La componente Stokes y anti-Stokes.	21

Fig. 1.17 Espectro de ganancia Raman en una fibra convencional.....	22
Fig. 1.18 Efecto del Scattering de Raman estimulado en WDM.....	22
Fig. 1.19 Impacto de los efectos no lineales en el número de canales en sistemas ópticos WDM.....	27
Fig. 1.20 Concepto General del Láser.....	28
Fig. 1.21 Potencia óptica de salida de un láser en función de la corriente aplicada	29
Fig. 1.22 Espectro característico de un láser de semiconductor	30
Fig. 1.23 Variación del espectro de salida de acuerdo con la variación de corriente	30
Fig. 1.24 Variación de la potencia óptica de salida, en función de la corriente para diferentes temperaturas	31
Fig. 1.25 Ejemplos de distintas estructuras de confinamiento de luz utilizadas en láseres.....	32
Fig. 1.26 Esquema básico del láser DFB o de realimentación distribuida.....	33
Fig. 1.27 Esquema básico del láser DBR o de reflexión de Bragg.....	34
Fig. 1.28 Láser de tres secciones.....	35
Fig. 1.29 Variación del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para diferentes semiconductores	37
Fig. 1.30 Curva teórica y real de la responsividad de los diodos p-n en función de λ	38
Fig. 1.31 Configuración de un fotodiodo p-n y el campo existente en su interior	39
Fig. 1.32 Estructura de un fotodiodo PIN y el campo eléctrico existente en su interior	40
Fig. 1.33 Estructura de un fotodetector APD y el campo eléctrico existente en su interior	41
Fig. 1.34 Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM.....	42
Fig. 1.35 Esquema básico de un sistema DWDM.	45
Fig. 1.36 Transpondedor.	46
Fig. 1.37 Funcionamiento de un amplificador óptico.	49
Fig. 1.38 Diagrama de niveles energéticos del erbio.....	51
Fig. 1.39 Configuraciones de un EDFA.	52

Fig. 1.40 Amplificación de un EDFA en función de la longitud de onda (línea discontinua) y amplificación aplanada mediante filtros (línea continua).	53
Fig. 1.41 Esquema de ganancia de un EDFA en la banda C y la banda L.....	53
Fig. 1.42 Ruido ASE en relación con la señal de bombeo.	54
Fig. 1.43 Modelo teórico de la amplificación por el efecto Raman.	54
Fig. 1.44 Obtención de una ganancia constante con la longitud de onda, emplenado un EDFA junto con un amplificador Raman.....	55
Fig. 1.45 Una posible localización de un amplificador óptico – Ubicación en línea.	57
Fig. 1.46 Una posible localización de un amplificador óptico.	58
Fig. 1.47 Una posible localización de un amplificador óptico	58
Fig. 1.48 Arquitectura de un ROADM basado en Bloqueadores de longitudes de onda.	60
Fig. 1.49 ROADM basado en PLC segunda generación.	62
Fig. 1.50 Arquitectura del eROADM	63
Fig. 1.51 Esquema general de un mapa de control de dispersión cromática	65
Fig. 1.52 Técnicas de compensación de la dispersión mediante fibras compensadoras de dispersión.....	66
Fig. 1.53 Compensación de la dispersión de segundo orden por un CFBG.....	67

CAPITULO II

INFORMACIÓN BÁSICA DE LA NUEVA CABEZA DE CABLE SUBMARINO

Fig. 2.1 Ruta de cable submarino Panamericano.....	75
Fig. 2.2 Ruta de cable submarino Arcos.	77
Fig. 2.3 Ruta de cable submarino MAYA-1.	78
Fig. 2.4 Ruta de cable Global Crossing en América del Sur.	80
Fig. 2.5 Ruta de cable Global Crossing en América del Sur.	81
Fig. 2.6 La conexión de Punta Carnero – Ecuador al SAM-1	83
Fig. 2.7 Unidad de ramificación del cable <i>Emergia</i>	87
Fig. 2.8 Punto de ramificación del cable Global Crossing	88

Fig. 2.9 Redes de Backhaul para Punta Carnero 90
 Fig. 2.10 Redes de Backhaul para Manta 91
 Fig. 2.11 Red de Backhaul para Esmeraldas 92

CAPITULO III

DISEÑO PROPUESTO PARA LA RED DE BACKHAUL

Fig. 3.1 Número de abonados de telefonía fija y telefonía móvil desde el año 2000 hasta diciembre del 2008 remitidos por los operadores a la SENATEL 97
 Fig. 3.2 Participación en el mercado de los operadores de telefonía fija a diciembre del 2008 97
 Fig. 3.3 La participación en el mercado de los operadores de telefonía móvil 98
 Fig. 3.4 Distribución de subscriptores de Internet en el Ecuador a diciembre 2008 100
 Fig. 3.5 Comparación de costos de acceso a Internet entre los años 2005-2006-2008 100
 Fig. 3.6 Evolución de los subscriptores de Internet a nivel nacional desde el año 2001 hasta diciembre del 2008. 102
 Fig. 3.7 Participación de los proveedores según el número total de subscriptores de Internet conmutado y dedicado a diciembre del 2008 103
 Fig. 3.8 Participación de los proveedores de acuerdo al número de cuentas dedicadas para acceso a Internet a diciembre del 2008 104
 Fig. 3.9 Curvas que se ajustan al crecimiento de cuentas dedicadas y conmutadas 106
 Fig. 3.10 Curvas que se ajustan al crecimiento de las conexiones dedicadas y conmutadas en el periodo comprendido entre Diciembre 2009 – Diciembre 2013 108
 Fig. 3.11 Crecimiento del Internet Social en el periodo 2007 - 2010 111
 Fig. 3.12 Curva que se ajusta al crecimiento del tráfico de *peering* en STM-1 entre los años 2005-2007 114
 Fig. 3.13 Proyección del crecimiento del tráfico de *peering* en STM-1 desde el año 2008 hasta el año 2013 114

Fig. 3.14 Crecimiento de acceso a Internet desde el año 2008 hasta el año 2013	117
Fig. 3.15 Crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos entre los años 2008 - 2013	120
Fig. 3.16 Crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos entre los años 2008 - 2013	124
Fig. 3.17 Crecimiento del ancho de banda internacional para el periodo 2008 - 2013	125
Fig. 3.18 Diagrama de los terminales y estaciones del OCP	127
Fig. 3.19 Imágenes del Terminal Amazonas	128
Fig. 3.20 Estación Sardinas.....	129
Fig. 3.21 Estación Sardinas.....	130
Fig. 3.22 Estación Chiquilpe.....	131
Fig. 3.23 Terminal Marítimo.....	132
Fig. 3.24 Las conexiones en el ODF	135
Fig. 3.25 Conector SC.....	135
Fig. 3.26 Ejemplo de un <i>Multirate</i> – Módulo SFP	137
Fig. 3.27 Panel frontal del Muxponder NRZ 10G.....	137
Fig. 3.28 Ruta Terminal Marítimo OCP – Punto de Amarre	139
Fig. 3.29 Ruta Central Pomasqui Ex_Andinatel – Nodo Pomasqui OCP.	140
Fig. 3.30 Ruta Estación de Amarre - Nodo Pomasqui Ex_Andinatel [Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]	141
Fig. 3.31 Atenuación espectral de las fibras ópticas G.652 y G.652.C.....	144
Fig. 3.32 Empalmes	151
Fig. 3.34 Amplificador de doble etapa (DSA) con DCM en la etapa intermedia.	161
Fig. 3.33 Diseño de Amplificadores para el enlace principal.	161
Fig. 3.35 Estándar UIT-T G.692	164
Fig. 3.36 Unidad de multiplexación de un grupo de 40 canales formado por cinco GMU-8.....	168
Fig. 3.37 Estándar UIT-T G.692	170
Fig. 3.38 Esquema del equipo Terminal para la Estación de Amarre.....	170
Fig.3.39 Parte frontal del Rack de la Estación de Amarre.....	172
Fig. 3.40 Esquema del Amplificador de Línea en el Nodo Río Silanche	173

Fig. 3.41 Parte frontal del <i>Rack</i> del Nodo Río Silanche	174
Fig. 3.42 Esquema del equipo Terminal para la Central de Pomasqui Ex_Andinatel	175
Fig. 3.43 Parte frontal del <i>Rack</i> de la Central Pomasqui de Ex_Andinatel.....	176
Fig. 3.44 Splitter/acoplador óptico 2:1	178
Fig. 3.45 Protección OSNCP 1+1.....	178
Fig. 3.46 Mecanismo ALS	179
Fig. 3.47 Administración de la red.....	181

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

Fig. 4.1 El ciclo del proyecto.....	183
Fig. 4.2 Horizonte del proyecto.....	186
Fig. 4.3 Ubicación de la estación de amarre.	194

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS Y DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DWDM

Tabla 1.1 Características de los amplificadores EDFA, Raman y R-EDFA.....	56
---	----

CAPITULO III

DISEÑO PROPUESTO PARA LA RED DE BACKHAUL

Tabla 3.1 Distribución de subscriptores de Internet en el Ecuador 2007 – 2008 .	99
Tabla 3.2 Distribución y las tasas de crecimiento de subscriptores de Internet en el Ecuador en el periodo comprendido entre Diciembre 2001 – Diciembre 2008 .	101
Tabla 3.3 Proyección de crecimiento de los subscriptores de Internet en el Ecuador.....	107
Tabla 3.4 Tasa de crecimiento de las conexiones de Internet en el Ecuador en el periodo comprendido entre Diciembre 2009 – Diciembre 2013.....	108
Tabla 3.5 Desarrollo de proyectos sociales estimado por ASETA.	110
Tabla 3.6 Proyecciones del número de beneficiarios del Internet Social	110
Tabla 3.7 Crecimiento del tráfico <i>peering</i> en STM-1 hasta el año 2007.....	113
Tabla 3.8 Proyección del crecimiento del tráfico de <i>peering</i> en STM-1 del periodo 2008-2013	113
Tabla 3.9 Proyecciones de crecimiento a nivel mundial y estimaciones propias de ASETA.	116
Tabla 3.10 Proyecciones de crecimiento del ancho de banda promedio para los años 2011 - 2013.	116
Tabla 3.11 Crecimiento de la capacidad internacional para el acceso a Internet del periodo 2008 - 2013	117
Tabla 3.12 Crecimiento del ancho de banda de conexiones de datos internacionales del periodo 2005 - 2007	118

Tabla 3.13 Proyecciones del crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos	119
Tabla 3.14 Número de enlaces de datos dedicados en el periodo 2005-2007...	119
Tabla 3.15 Proyecciones del número de enlaces de datos dedicados.....	119
Tabla 3.16 Proyecciones del ancho de banda requerido para conexiones de datos internacionales	120
Tabla 3.17 Crecimiento de la telefonía internacional con la tecnología VoIP	122
Tabla 3.18 Proyecciones de la telefonía internacional con la tecnología VoIP ..	122
Tabla 3.19 Proyecciones del ancho de banda para tráfico de voz internacional TDM	123
Tabla 3.20 Proyecciones de la telefonía internacional en la modalidad TDM	123
Tabla 3.21 Proyecciones de ancho de banda para el tráfico de voz internacional	123
Tabla 3.22 Crecimiento de ancho de banda para tráfico internacional.....	125
Tabla 3.23 Ubicaciones de los nodos conectadas por fibra óptica.....	133
Tabla 3.24 Las características de los conectores SC de fibra óptica monomodo	135
Tabla 3.25 Características de la interfaz óptica STM-16 (S-16.1).....	138
Tabla 3.26 Principales características de la fibra óptica del OCP	143
Tabla 3.27 Proveedores de fibra ópticas	146
Tabla 3.28 Proveedores de equipos DWDM para largas distancias	147
Tabla 3.29 Rangos permitidos por el Multihaul MHL 3000.....	149
Tabla 3.30 Parámetros para el cálculo de las pérdidas.....	151
Tabla 3.31 Pérdidas del enlace.....	152
Tabla 3.32 Pérdidas del tramo Estación de Amarre a Río Silanche.....	153
Tabla 3.33 Pérdidas del tramo Río Silanche a la Central Pomasqui Ex_Andinatel.	153
Tabla 3.34 Tipo de amplificadores EDFA.....	155
Tabla 3.35 Módulos compensadores de dispersión cromática estándares	159
Tabla 3.36 La velocidad de transmisión con sus respectivos T_B y su $\Delta\tau_{m\acute{a}x}$	163
Tabla 3.37 Longitud máxima del tendido con $PMD = 0.5 \text{ ps/Km}^{1/2}$	163
Tabla 3.38 Esquema de frecuencias en sistemas DWDM para la banda C	166
Tabla 3.39 Esquema de frecuencias para la banda C.....	169

Tabla 3.40 Dimensiones físicas de los *Racks* para el enlace principal 177

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

Tabla 4.1 Presupuesto de la inversión para 10 años 200

Tabla 4.2 Costo de operación y mantenimiento 201

RESUMEN

El objetivo de este proyecto de titulación es diseñar la Red de *Backhaul* para una nueva salida de Cable Submarino, utilizando los cuatro hilos de fibra óptica del cable Primario del Oleoducto de Crudos Pesados OCP S.A. a disposición del Estado Ecuatoriano, instalado en el trayecto Esmeraldas – Lago Agrio empleando la técnica Multiplexación Densa por Longitud de Onda (DWDM).

Para cumplir con el objetivo planteado, se ha dividido este proyecto de titulación en los siguientes capítulos:

En el capítulo uno se revisa los conceptos básicos de fibra óptica para entender el funcionamiento de los sistemas de comunicaciones ópticos de gran capacidad y larga distancia. Además se incluye un estudio de la técnica DWDM con sus principales características, componentes y ventajas.

En el capítulo dos se estudia la situación actual de las salidas internacionales del Ecuador y principalmente se busca determinar la factibilidad de situar una unidad de ramificación en costas ecuatorianas considerando a Esmeraldas como punto de aterrizaje para utilizar los cuatro hilos de fibra óptica a disposición del Estado Ecuatoriano. Además se hace un análisis del marco legal en el Ecuador para determinar la factibilidad de legal de colocar una cabeza de cable submarino en Esmeraldas.

En el capítulo tres se parte de un estudio de tráfico para dimensionar el ancho banda internacional que se tomará en cuenta en el diseño de la red de Backhaul. Este análisis se apoya en estadísticas oficiales, las cuales fueron proporcionadas por la Superintendencia de Telecomunicaciones del Ecuador (SUPTTEL) y por el estudio realizado por ASETA con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino. Con la recopilación de estos datos se realiza las proyecciones del ancho de banda para la conectividad internacional en el periodo 2008-2013. En este capítulo también se desarrolla el diseño de la Red *Backhaul* para iluminar la fibra óptica del OCP en el tramo Esmeraldas – Quito con tecnología DWDM, que le permitirá transportar información a 10Gbps por cada longitud de onda.

En el capítulo cuatro se efectúa un análisis de costos en base a los criterios técnicos tomados en el diseño del *Backhaul*, para así establecer la inversión necesaria en diseñar, instalar, operar y mantener la red DWDM.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan algunas conclusiones obtenidas en el transcurso de la elaboración de este proyecto, así como recomendaciones generadas al realizar las investigaciones relacionadas con el proyecto de titulación.

Por último es necesario destacar que por las características del tema desarrollado se utilizan varios términos en idioma inglés; sin embargo, para facilitar la lectura y comprensión del mismo se ha incluido un glosario de términos.

PRESENTACIÓN

Este proyecto surge por la necesidad de incrementar la capacidad de salidas internacionales utilizadas por los servicios de Telefonía, Internet y datos en el Ecuador, además de la introducción de nuevos servicios de valor agregado tales como vídeo bajo demanda o aplicaciones multimedia que requiere de una gran cantidad de ancho de banda para satisfacer las necesidades de los usuarios.

El Ecuador no cuenta con una conexión adecuada para abastecer la demanda del mercado actual, mucho peor la demanda proyectada al futuro, a pesar de que la penetración de Internet en el país es la menor respecto a los países andinos, tanto en banda angosta como en banda ancha. El ancho de banda del cable Panamericano está cerca de la saturación, además los costos de conexiones a través de países vecinos son sumamente elevados, porque se debe pagar el tránsito en dichos países, por esta razón se plantea la adquisición de otra cabeza de cable submarino considerando a Esmeraldas como punto de aterrizaje, porque el estado dispone de cuatro hilos de fibra óptica en el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), que interconecta a Esmeraldas con Lago Agrio pasando por Pomasqui en la ciudad de Quito. Es evidente la ventaja que tendrán los ecuatorianos, ya que los costos de acceso a Internet bajarán y la velocidad de acceso aumentará.

Buscando optimizar el uso de la fibra óptica de la OCP se recurre a la técnica DWDM (Multiplexación Densa por Longitud de Onda) que permite aumentar la capacidad de transporte y proporciona una solución óptima para satisfacer los requerimientos de conectividad del Ecuador, típicamente implementada en redes regionales y de *backbone*, de forma que pueda atender las demandas de tráfico y crecer en el futuro sin la instalación de nuevos terminales, amplificadores, etc.

Se proporciona las bases técnicas para la implementación de la Red de *Backhaul*, pero queda en manos del Estado promover y ejecutar el proyecto.

1. CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS Y DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DWDM

1.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

En su forma más simple, una fibra óptica está formada por un núcleo de silicio con índice de refracción n_1 rodeado por una capa de silicio dopado (conocida como revestimiento) con un índice de refracción n_2 , siendo n_2 menor a n_1 para aprovechar el fenómeno de reflexión total entre los dos medios.¹

$$n_1 > n_2$$

El índice de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra se controlan durante la etapa de fabricación para conseguir un perfil con una forma determinada, se controla la cantidad y el tipo de dopantes que se introducen en el cilindro de silicio. Los dopantes pueden aumentar o disminuir el índice de refracción (por ejemplo el sulfuro de zinc aumenta el índice de refracción, mientras que el fluoruro de magnesio lo disminuye).

1.1.1 LEY DE REFRACCIÓN DE SNELL

Según la ley de refracción de Snell, cuando un rayo incide en la frontera entre dos medios con diferentes índices de refracción, el rayo incidente será refractado con distinto ángulo, de acuerdo a:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

De donde

¹ Entre los tipos de fibra también existe la fibra óptica de plástico, que tiene una atenuación más alta que todas las fibras, por lo que se recomienda para redes de corta distancia.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (1.2)$$

n_1 = índice de refracción del material 1 (adimensional)

n_2 = índice de refracción del material 2 (adimensional)

θ_1 = Ángulo de incidencia (grados)

θ_2 = Ángulo de refracción (grados)

La Fig. 1.1 representa la ley de Snell, muestra cómo se refracta un rayo de luz al pasar de un material más denso (mayor índice de refracción) a uno menos denso (menor índice de refracción).

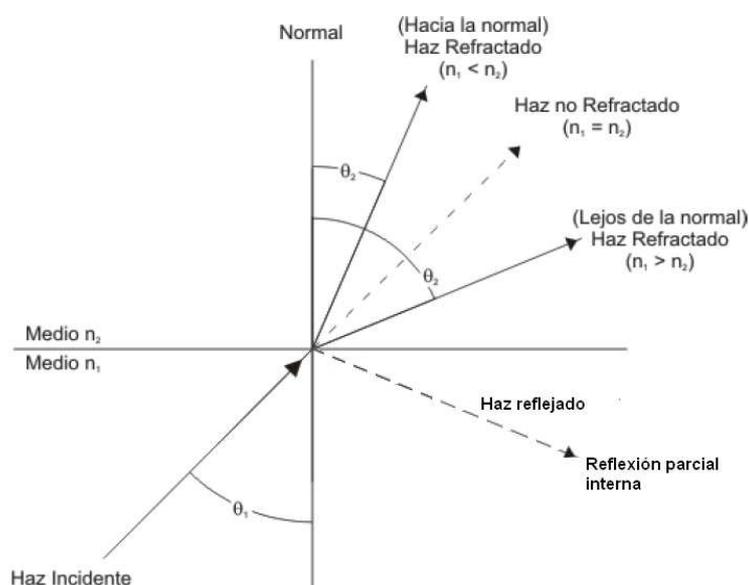


Fig. 1.1 Representación de la ley de Snell.

[Fuente: <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propagacion>]

1.1.2 ÁNGULO CRÍTICO (θ_c)

Puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, el ángulo de incidencia, denominado ángulo crítico, resulta cuando el rayo refractado forma un ángulo de 90° con la normal, (Fig.1.2).

Por Snell:
$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.3)$$

1.1.3 REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, se produce la reflexión interna total, es decir los rayos de luz serán totalmente reflejados.

$$\theta_1 > \theta_c \Rightarrow \text{Reflexión interna total}$$

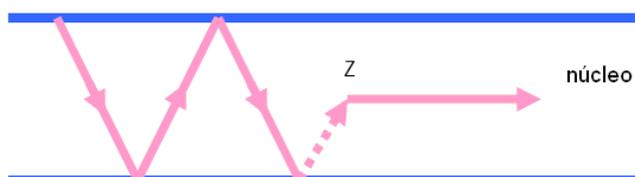


Fig. 1.2 El fenómeno de «reflexión total» confina la luz (es decir, la guía).

[Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/loranca_r_ya/capitulo3.pdf]

La reflexión total permite, por lo tanto, que el rayo quede confinado en el núcleo de la fibra, (Fig.1.2).

1.1.4 ÁNGULO DE ACEPTACIÓN Y CONO DE ACEPTACIÓN

El ángulo de aceptación θ_{ent} , define el ángulo máximo que pueden formar los rayos luminosos externos al llegar a la interfaz aire-fibra con respecto al eje de la fibra para poder propagarse por la fibra.

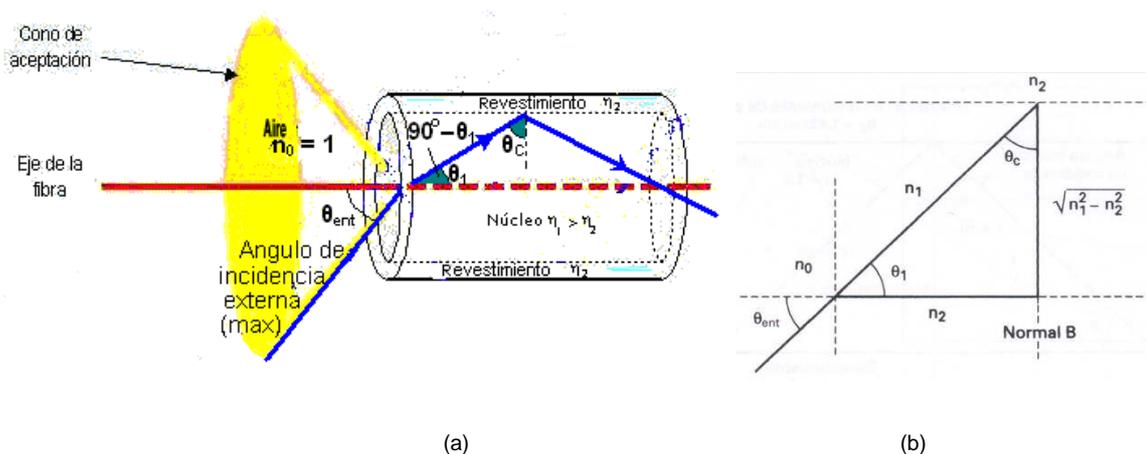


Fig. 1.3 (a) Cono de aceptación en fibras ópticas (b) Relaciones geométricas.

[Fuente: http://es.geocities.com/redeslan2003/fibra_optica.htm]

Si se aplica la ley de Snell y el teorema de Pitágoras (Fig.1.3.b) al ángulo externo de incidencia, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\theta_{\text{ent(max)}} = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.4)$$

Al girar este ángulo en torno al eje de la fibra se obtiene el cono de aceptación de la fibra, (Fig.1.3.a).

1.1.5 APERTURA NUMÉRICA (AN)

Es un parámetro que determina la cantidad de rayos de luz externos que pueden ser guiados por una fibra óptica, mientras mayor sea la apertura numérica, la fibra acepta mayor cantidad de luz.

La apertura numérica se define con el seno del ángulo máximo que forma el rayo de luz que entra a la fibra con respecto al eje de la misma, es decir, el seno del ángulo de aceptación.

$$AN = \text{sen} \theta_{\text{ent}} \quad (1.5)$$

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.6)$$

Por tanto, la apertura numérica depende exclusivamente de los materiales de que están hechos el núcleo y el revestimiento.

La apertura numérica también se puede expresar como:

$$AN \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

Llamando Δ a la diferencia relativa de índices de refracción de los dos medios:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.8)$$

1.1.6 TEORÍA DE PROPAGACIÓN

La propagación se realiza cuando un rayo de luz ingresa al núcleo de la fibra óptica y la forma en que se propague depende del modo de propagación y del perfil de índice de refracción de la fibra.

1.1.6.1 Modo de Propagación

Si se desea estudiar con rigor la propagación de la luz en el interior de una fibra óptica, es preciso trabajar con las ecuaciones de Maxwell. Resolviéndolas se encuentra que la ecuación de propagación de la onda tiene varias soluciones y cada solución equivale a un modo o forma diferente de propagación de la onda (la palabra modo significa trayectoria o rayo de luz).

1.1.6.2 Frecuencia de corte normalizada (V)

El sentido físico de la frecuencia de corte indica el grado de confinamiento que proporciona el núcleo, es decir que está relacionado con el número de veces que el radio (a) de la fibra contiene a la longitud de onda λ .

De esta manera, el número de modos soportado por una fibra óptica está relacionado con la frecuencia de corte normalizada V, que se encuentra definida como:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.9)$$

Donde λ es la longitud de onda y a es el radio del núcleo de la fibra.

Para valores de V inferiores a 2.405 ($V < 2.405$) existe un único modo de propagación, las fibras que satisfacen esta condición se llaman «fibras monomodo», de lo contrario se llaman «fibras multimodo», porque a medida que V se incrementa, aumenta el número de modos transmitidos.

1.1.7 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Las fibras ópticas se clasifican atendiendo a dos criterios: en función del perfil del los índices de refracción y en función de los modos de propagación.

1.1.7.1 Clasificación según el modo de propagación

a) Fibras ópticas Multimodo.- Son aquellas que pueden guiar y transmitir varios rayos de luz por diferentes modos de propagación, (ver fig. 1.4).

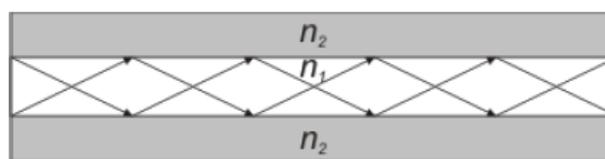


Fig. 1.4 Fibras multimodo.

[Fuente: <http://razatapa.com/images/Fibra%20optica%20monomodo%20unidireccional.doc>]

b) Fibras ópticas Monomodo.- Son aquellas que por su especial diseño pueden guiar y transmitir un solo rayo de luz (un único modo de propagación) y tienen un gran ancho de banda, (ver fig.1.5).

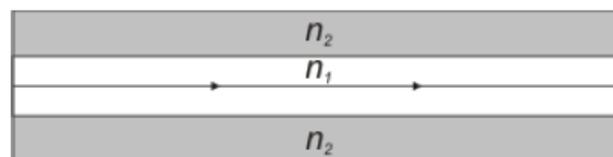


Fig. 1.5 Fibras monomodo.

[Fuente: <http://razatapa.com/images/Fibra%20optica%20monomodo%20unidireccional.doc>]

1.1.7.2 Clasificación según el perfil del índice de refracción

Perfil de índice de refracción.- Es la variación del índice de refracción conforme se desplaza en la sección transversal de la fibra óptica, es decir a lo largo del diámetro, se tiene dos tipos: índice escalón e índice gradual.

a) Fibras de índice escalón (*stepped-index*).- Son aquellas que tiene un núcleo central con un índice de refracción n_1 constante, este núcleo está rodeado por un

revestimiento también con un índice de refracción n_2 constante, pero menor que n_1 . El perfil del índice de refracción toma la forma de la figura 1.6.

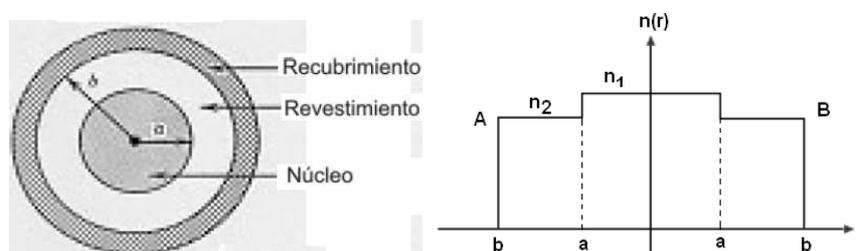


Fig. 1.6 Corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación del índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras de índice escalón.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Fibras multimodo de índice escalón.- Como el índice de refracción n_1 es constante la velocidad de los modos de propagación será la misma, siendo distinta la distancia recorrida por cada uno de ellos, provocando un retardo relativo y en consecuencia, un ensanchamiento del pulso de entrada, a este fenómeno se le conoce como dispersión modal, (Fig.1.7).

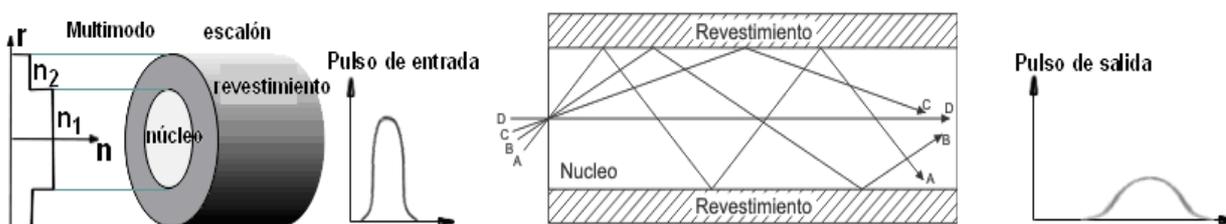


Fig. 1.7 Propagación de los rayos ópticos de una fibra multimodo de índice escalón.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Fibras monomodo de índice escalón.- Este tipo de perfil es también utilizado en fibras monomodo, dado que se propaga un único modo de propagación el fenómeno del ensanchamiento del pulso es despreciable, por lo que estas fibras no presentan dispersión modal.

b) Fibras de índice gradual (graded-index).- El índice de refracción n_2 es constante en el revestimiento, pero n_1 decrece de forma gradual desde el centro del núcleo hacia la frontera y se tiene un máximo en el centro del núcleo (Fig.1.8).

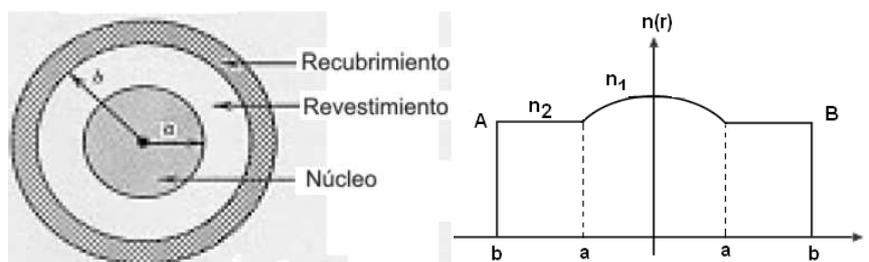


Fig. 1.8 Corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación del índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras de índice gradual.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Fibras multimodo de índice gradual.- Como el índice de refracción es mayor en el centro del núcleo, la velocidad de las ondas que transitan por él es menor que las que viajan por puntos más periféricos, sin embargo los rayos que viajan en la zona más externa de la fibra recorren mayor distancia, pero se compensa por su mayor velocidad, en consecuencia tardan aproximadamente lo mismo en recorrer la longitud de la fibra. Por lo que el retardo entre modos y la dispersión modal será menor, en consecuencia también será menor el ensanchamiento del pulso original en la recepción, (Fig. 1.9).

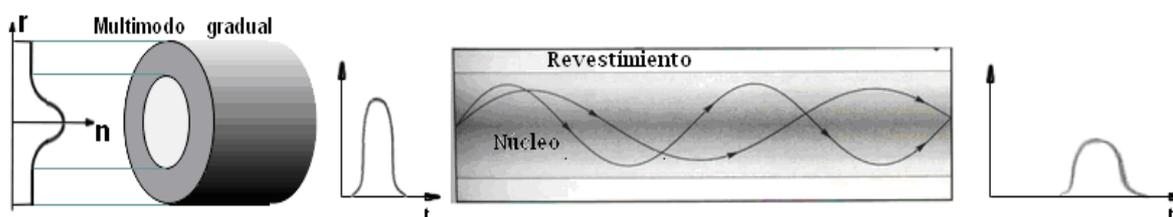


Fig. 1.9 Propagación de los rayos ópticos de una fibra multimodo de índice gradual.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

1.1.8 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Se considera a aquellos efectos físicos relevantes para sistemas de gran capacidad y larga distancia. En concreto, se analiza la influencia de la dispersión de segundo orden, la no linealidad de la fibra, la atenuación, así como los efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD).

1.1.8.1 Atenuación

La atenuación es la pérdida de potencia que sufren las señales a medida que se propagan por la fibra. La forma de obtener la pérdida o atenuación $A(\lambda)$ en el interior de la fibra será la relación entre las potencias luminosas a la salida y a la entrada, expresada típicamente en decibelios.

$$A(\lambda) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \right) [\text{dB}] \quad (1.10)$$

Siendo λ la longitud de onda, P_{sal} la potencia de salida y P_{ent} la potencia de entrada.

El coeficiente de atenuación $\alpha(\lambda)$ se define como la atenuación por unidad de longitud (L), generalmente en Km.

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \log \left(\frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \right) [\text{dB/Km}] \quad (1.11)$$

Como es de esperar, el coeficiente de atenuación depende de la longitud de onda a la que trabaje la fibra, (Fig.1.10).

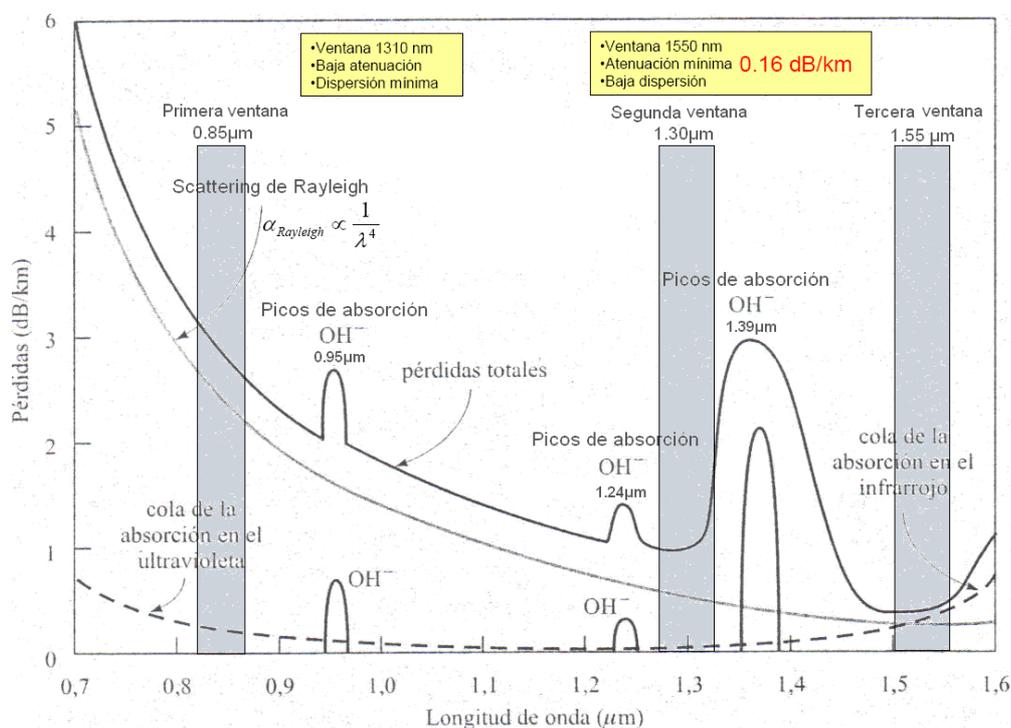


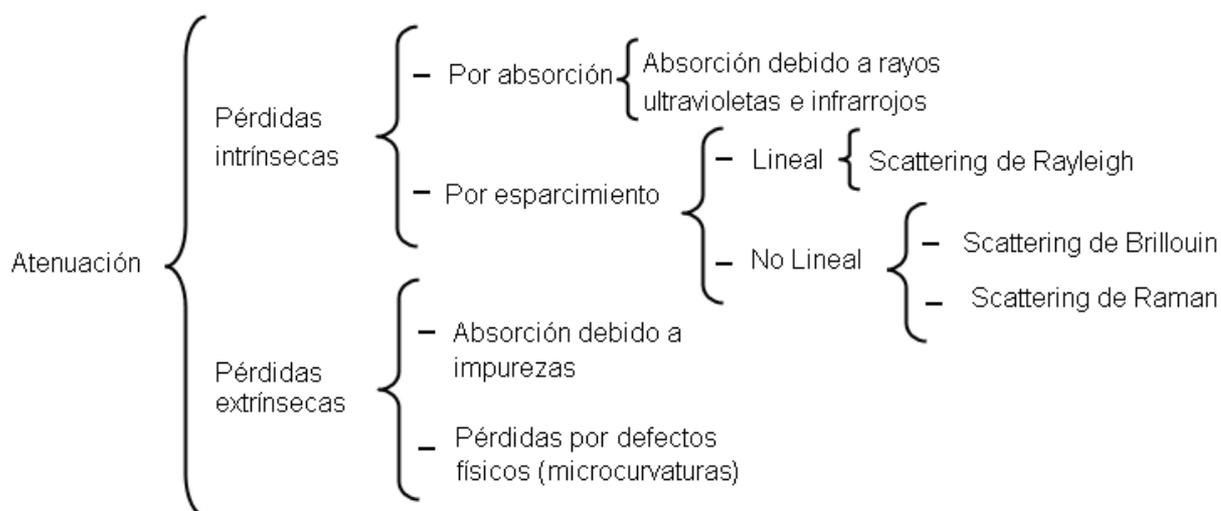
Fig. 1.10 Atenuación total en función de la longitud de onda.

[Fuente: Sistemas y Redes ópticas de Comunicaciones]

Las principales longitudes de onda en las telecomunicaciones corresponden a los puntos en donde la atenuación es mínima. Estas longitudes de onda son conocidas como ventanas de transmisión. El estándar UIT-T G.692 ha definido ventanas adicionales llamadas bandas, las cuales son utilizadas en sistemas de transmisión DWDM. Por lo tanto se tiene:



Las causas de la atenuación de las fibras ópticas se agrupan en intrínsecas y extrínsecas como se detalla en el cuadro 1.1.



Cuadro 1.1 Principales fenómenos que producen la atenuación en la fibra óptica.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

1.1.8.1.1 Pérdidas intrínsecas

a) Absorción debida a rayos ultravioletas e infrarrojos

La absorción de radiación electromagnética se produce cuando pasa un electrón desde un cierto nivel energético a otro superior, que se encuentra desocupado. La mayor parte de estos saltos tiene lugar a frecuencias dentro del margen

ultravioleta y su borde inferior el que linda con el visible. Esta absorción decrece exponencialmente con la longitud de onda y su influencia es despreciable a partir de los 1000nm.

Otro fenómeno aparece cuando se pasa a la región del infrarrojo. Los fotones que transportan la radiación infrarroja no tienen suficiente energía para provocar transiciones electrónicas pero sí pueden conseguir vibraciones de los enlaces entre los átomos que constituyen el material. Se dice entonces, que una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se de una transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja. Este tipo de absorción crece exponencialmente con la longitud de onda, pero es apreciable a partir de los 1400nm, (ver Fig. 1.10).

b) Scattering Rayleigh y Mie

El *scattering* de Rayleigh se origina por las irregularidades submicroscópicas, que generan variaciones bien sean de densidad, de constante dieléctrica o de índice de refracción. Cuando los rayos de luz que se propagan por la fibra chocan con alguna irregularidad submicroscópica cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda, se difracta. La difracción hace que la luz se disperse en muchas direcciones, algo de luz continúa recorriendo la fibra y algo escapa a través del revestimiento. Los rayos que salen representan una pérdida denominada *scattering* de Rayleigh (P_{Rayleigh}). Esta pérdida de energía decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda es decir:

$$P_{\text{Rayleigh}} \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.12)$$

Esto lleva consigo el que, sea conveniente trabajar a una longitud de onda lo mayor posible, (ver Fig. 1.10).

El *scattering* de Mie ocurre debido a inhomogeneidades que son de una magnitud equivalente o mayor, que la longitud de onda de radiación que se propaga. Puede provenir de pequeñas alteraciones a lo largo de la fibra, en la geometría de la

misma o causada por pequeñas burbujas o tensiones mecánicas en el material, afortunadamente la mayor parte de todas estas imperfecciones pueden ser eliminadas gracias a los procesos de fabricación, por ello, no suele ser tomada en cuenta en las fibras actuales.

1.1.8.1.2 Pérdidas extrínsecas

a) Absorción debida a impurezas

Dadas las condiciones en que se lleva a cabo la fabricación de las fibras, es prácticamente imposible asegurar que no se hayan introducido un cierto número de impurezas en el sílice. Entre las principales impurezas que se han encontrado, están los iones de algunos metales de transición como el hierro, el cromo, el cobalto, el cobre, y además los iones OH que generan las mayores pérdidas.

Los modernos procesos de manufactura de fibras han reducido considerablemente el contenido de OH, llegando a ser menor de 0.001ppm (partes por millón).

b) Pérdidas por curvatura y microcurvaturas

Cuando una fibra se someta a una curvatura por bobinado, tendido, etc. se origina una atenuación adicional por el hecho de que el interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geométricamente uniforme y no se cumple el principio de reflexión interna total, en consecuencia se produce una fuga de modos hacia el revestimiento, estas pérdidas son despreciables hasta que se sobrepasa una curvatura crítica.

Los defectos que provocan las llamadas pérdidas por microcurvaturas son las irregularidades entre el núcleo y el revestimiento, (ver Fig.1.11).

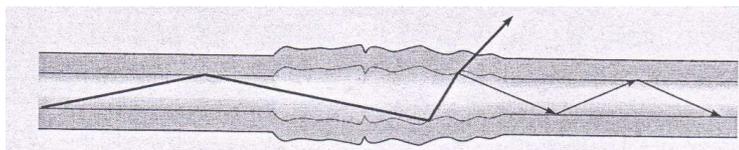


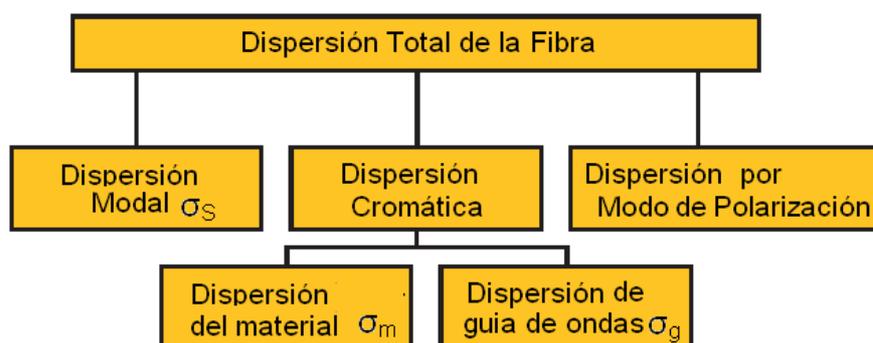
Fig. 1.11 Influencia de las microcurvaturas existentes sobre la trayectoria que siguen diferentes rayos.

[Fuente: Sistemas y Redes ópticas de Comunicaciones]

1.1.8.2 Dispersión en las Fibras

La dispersión es una medida del ensanchamiento que sufren las señales ópticas en su propagación a través de la fibra y limita el ancho de banda de la fibra, puesto que la velocidad de transmisión debe ser tal que el ensanchamiento de los pulsos producido por la dispersión no consiga que éstos se solapen.

El fenómeno global de la dispersión se debe a los siguientes factores:



Cuadro 1.2 Clasificación de la dispersión

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

La dispersión modal y la dispersión cromática por su diferente naturaleza, han de sumarse cuadráticamente. Por el contrario las dispersiones del material y guía de ondas se suman de modo lineal.

El valor cuadrático medio de la dispersión total será:

$$\sigma^2 = \sigma_S^2 + (\sigma_m + \sigma_g)^2 \quad (1.13)$$

1.1.8.2.1 Dispersión modal

La dispersión modal se presenta cuando se transmiten más de un modo de propagación. Los diversos modos de propagación, llegan desfasados en el tiempo al extremo receptor por viajar por caminos diferentes, provocando un retardo relativo y en consecuencia un ensanchamiento del pulso de entrada.

Para una fibra óptica multimodo escalón se tendrá más dispersión modal y el ensanchamiento del pulso en nanosegundos o picosegundos está dado por:

$$\sigma_s \approx \frac{L(AN)^2}{4\sqrt{3}n_1c} \quad (1.14)$$

Donde L es la longitud del tramo de fibra considerada y c la velocidad de la luz.

Mientras que el ensanchamiento del pulso en nanosegundos o picosegundos para una fibra óptica multimodo gradual está dado por:

$$\sigma_s \approx \frac{Ln_1\Delta^2}{20\sqrt{3}c} \quad (1.15)$$

1.1.8.2.2 *Dispersión cromática*

La dispersión cromática se presenta en todos los tipos de fibras ópticas, sin embargo como en las fibras multimodo la dispersión cromática es despreciable frente a la dispersión modal, sólo suele considerarse en fibras monomodo.

Este fenómeno tiene como origen, el hecho de que las fuentes de luz disponibles no emiten una sola longitud de onda, sino un cierto ancho espectral² $\delta\lambda$, distribuido alrededor de esta longitud de onda central, en virtud a este efecto la velocidad de grupo³ es diferente para cada componente espectral emitida por la fuente de luz, lo que trae consigo que cada componente espectral llegue al extremo de la fibra en un tiempo diferente, produciéndose un ensanchamiento de los pulsos. El valor del ensanchamiento del pulso (σ_c) está dado por:

$$\sigma_c = DL\delta\lambda \quad (1.16)$$

² El ancho espectral es una medida de la extensión de la longitud de onda de un espectro. Se utiliza para determinar la anchura óptica de las fuentes de luz.

³ **Velocidad de grupo.**- Es la velocidad a la que viaja la onda constituida por una portadora modulada por la señal de información (envolvente) dentro de la guía de onda y se la representa como v_g . Es decir, la velocidad de grupo es la velocidad a la que se propaga la envolvente y, consecuentemente el valor de la velocidad con la que se transmite la información, está dada por:

$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$, donde β es la constante de propagación, ω es la velocidad angular de la onda.

Donde D recibe el nombre de coeficiente de dispersión cromática y se suele expresar en ps/km.nm, L la longitud de la fibra en kilómetros y la anchura del emisor $\delta\lambda$ en nanómetros.

La dispersión cromática depende de dos factores: La dispersión del material D_m y la dispersión de guía de onda D_g , por esta razón se obtiene sumando los dos efectos que lo componen.

$$D = D_m + D_g \quad (1.17)$$

El parámetro de dispersión cromática D también viene determinado por la expresión:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \left[\frac{\text{ps}}{\text{Km nm}} \right] \quad (1.18)$$

A este parámetro β_2 se le denomina parámetro de dispersión de la velocidad de grupo (parámetro GVD, *Group Velocity Dispersion*), el cual es utilizado para definir dos regiones de funcionamiento dependiendo del signo de la dispersión cromática, como puede verse en la figura 1.12. Si $D < 0$, es decir $\beta_2 > 0$, se trata del régimen de dispersión normal, donde las componentes de baja frecuencia viajan más rápido que las componentes de alta frecuencia, pero en el régimen de dispersión anómala ($\beta_2 < 0$) ocurre lo opuesto. En particular, la mayor parte de las fibras ópticas que se emplean en los sistemas de comunicación trabajan a $1.55\mu\text{m}$, zona de dispersión anómala.

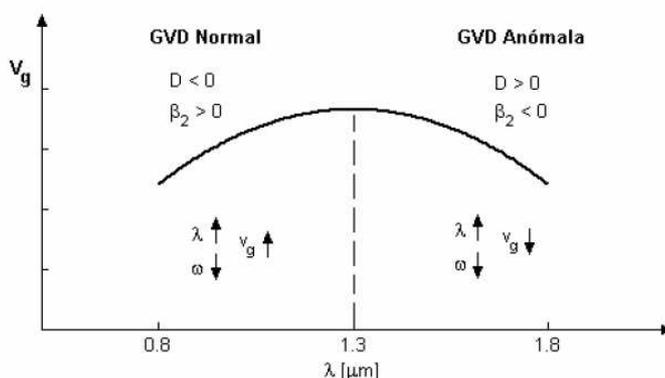


Fig. 1.12 Variación de la velocidad de grupo como función de la longitud de onda.

[Fuente: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=21&resId=5&materialId=slides&confId=36>]

a) Dispersión del material

Se conoce por este nombre al efecto que produce la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra con la frecuencia. Como la velocidad de fase⁴ es función del índice de refracción, cada componente espectral dentro de un mismo modo se desplazará a velocidad diferente, originando la dispersión del material a causa del ensanchamiento del pulso.

La dispersión del material del pulso de entrada, tras recorrer una distancia L, está dada por:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \left[\frac{\text{ps}}{\text{Km nm}} \right] \quad (1.19)$$

Las unidades típicas para la dispersión son [ps / (nm.Km)], describe el ensanchamiento (en ps) que experimenta un pulso por unidad de longitud recorrida (km) cuyo espectro tiene una anchura de 1 nm.

La dispersión del material aumenta con la longitud de la fibra (ver Fig. 1.12), se puede minimizar, usando fuentes de espectro estrecho.

b) Dispersión de guía de onda

Surge de la existencia de la propia guía de onda⁵, suponiendo que el índice de refracción de la fibra no varía con la frecuencia, aparecería el efecto de dispersión de guía de onda debido a que la constante de propagación β es función de la frecuencia (aunque n no cambie), lo que se traduce en un camino recorrido diferente para cada componente espectral del modo de propagación.

⁴ **Velocidad de fase (v_f).**- Es la velocidad a la cual la fase de una onda monocromática se propaga, es decir la velocidad a la que se mueven sus ciclos internos y viene dada por:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n}, \text{ donde } n \text{ es el índice de refracción del medio.}$$

⁵ **Guía de Onda.**- El nombre de guía de onda se utiliza para designar a un tubo de material conductor de sección rectangular, circular o elíptica, en el cual la dirección de la energía electromagnética debe ser conducida a lo largo de la guía y limitada en sus fronteras; en las fibras el transporte de energía se lleva a cabo mediante reflexiones continuas.

Una forma de cuantificar la dispersión de guía de onda, está dada por:

$$D_g(\lambda) \approx -\frac{1}{4\pi^2 n_1 c} \left(\frac{\lambda}{a^2} \right) \left[\frac{ps}{nm Km} \right] \quad (1.20)$$

La dispersión por la guía de onda tiene signo contrario a la dispersión del material, esto quiere decir que podrían anularse la una con la otra, por ello, puede lograrse una dispersión mínima en 1.31μm como puede observarse en la figura 1.13, en esto se basa la técnica de dispersión cero. En las fibras de dispersión desplazada DSF (*Dispersion Shifted Fibers*) G.653, se modifica el perfil del índice de refracción para desplazar el punto de dispersión cero a la longitud de 1550nm.

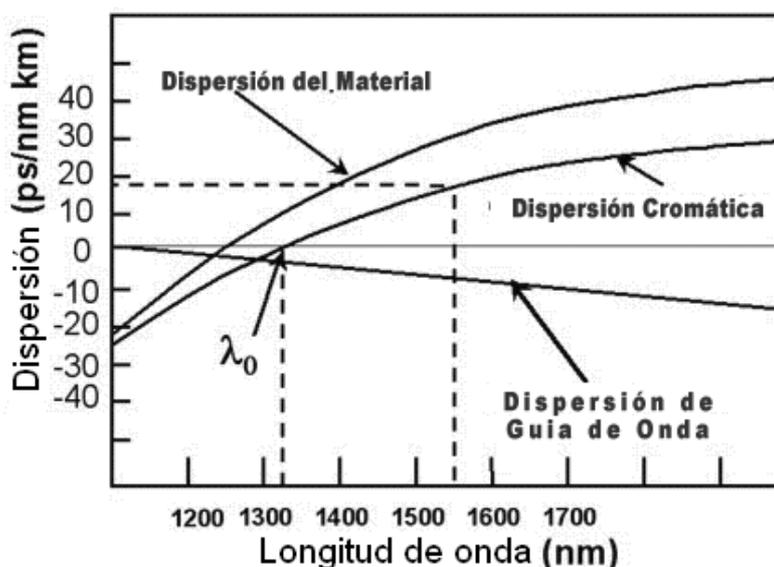


Fig. 1.13 Dispersión del material, de guía de onda y total para una fibra monomodo estándar.

[Fuente: <http://orbita.starmedia.com/fortiz/Articulo01.htm>]

1.1.8.2.3 *Dispersión por Modo de Polarización (PMD, Polarization Mode Dispersion)*

La dispersión por modo de polarización ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, llamadas modos de polarización, viajan a distinta velocidad de grupo, llegando en distintos tiempos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos ópticos, lo que provoca interferencia entre símbolos y, por lo tanto, un aumento de la tasa de bits errados (BER). Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo

diferencial de grupo DGD (*Differential Group Delay*) y puede observarse en la figura 1.14.

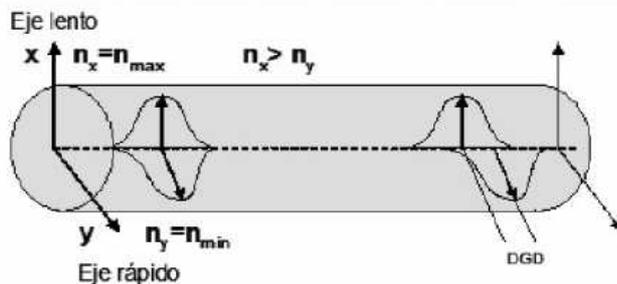


Fig. 1.14 Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente.

[Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>]

Esta variación de la velocidad de grupo se produce por la birrefringencia⁶ de la fibra. La birrefringencia se debe a la pérdida de simetría en el índice de refracción del núcleo de la fibra debido a cambios moleculares del material (anisotropía) y/o pérdida de la geometría circular del núcleo de la fibra óptica, (ver Fig. 1.15).

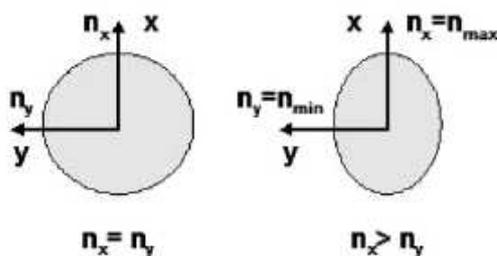


Fig. 1.15 Corte transversal del núcleo de una fibra óptica en la que se aprecian dos casos de geometría: circular y elíptica. Son casos de un material no birrefringente y birrefringente, respectivamente.

[Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>]

Las causas por las que una fibra óptica puede perder su geometría circular son: esfuerzos en el proceso de fabricación e instalación, contracción y dilatación debido a cambios de temperatura, tensiones, curvaturas, etc.

En general, el DGD promedio o σ_{PMD} cumple con la siguiente relación:

$$\langle \sigma_{PMD} \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (1.21)$$

⁶ La birrefringencia es una propiedad que presentan algunos cristales, por la cual se desdobra un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos.

Donde L es la distancia del enlace y D_{PMD} es el coeficiente de PMD, medido en ps/\sqrt{Km} y su valor suele estar entre 0.1 y 1 ps/\sqrt{Km} .

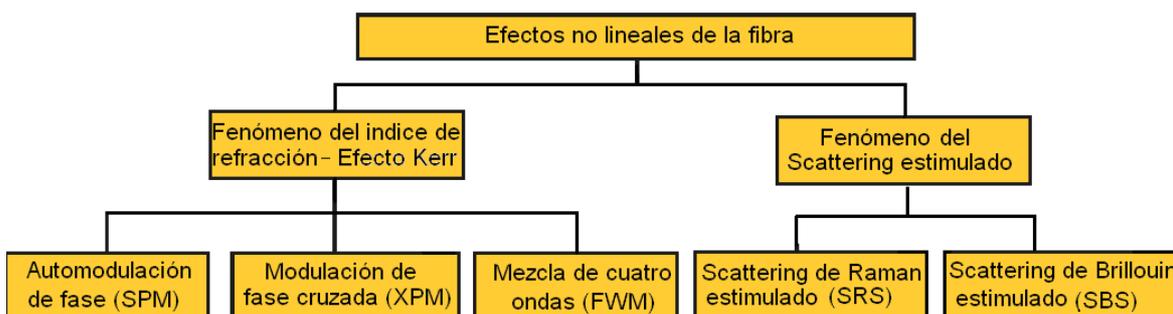
La birrefringencia tiene un carácter aleatorio en función de la distancia y del tiempo, lo que implica que el DGD también varía de forma aleatoria. Los valores que da el fabricante son tentativos sirviendo de indicación, por lo que es obligatorio realizar medidas in situ, una vez instalada la fibra.

La importancia de PMD aumenta con la velocidad de transmisión, por lo que es una limitante en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (≥ 10 Gbps) y de larga distancia, ya que distorsiona la señal.

1.1.8.3 Efectos no lineales en la fibra óptica

Los efectos no lineales se producen en todos los dieléctricos principalmente cuando existen potencias ópticas grandes (campos electromagnéticos intensos) propagándose por ellos. En las comunicaciones de fibra óptica las largas distancias y la utilización de la multiplexación WDM hacen que los efectos no lineales sean cada vez más importantes.

Los efectos no lineales de la fibra se deben a los siguientes factores:



Cuadro 1.3 Clasificación de los Efectos no lineales de la fibra.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

1.1.8.3.1 Scattering estimulado no lineal

“Uno podría pensar que, salvo los fenómenos dispersivos, bastaría con inyectar suficiente potencia en una fibra óptica para compensar las pérdidas por atenuación. Los fenómenos de *scattering* no-lineal implican que a partir de una

determinada potencia de entrada no se gana potencia en la salida, sino que da lugar a pérdidas adicionales en la fibra óptica.”⁷

Los efectos de *scattering* no-lineal se clasifican en:

- Esparcimiento Estimulado de Brillouin (SBS: *Stimulated Brillouin Scattering*)
- Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS: *Stimulated Raman Scattering*)

a) *Scattering* Estimulado de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*)

El *scattering* estimulado de Brillouin tiene lugar con potencias reducidas como algunos milivatios y es causada por la presencia de la señal óptica en sí. Pues a pesar de que el nivel de la señal sea de unos pocos milivatios, en la pequeña sección transversal del núcleo de la fibra monomodo el campo es muy intenso. Este campo provoca vibraciones mecánicas (acústicas) que inducen cambios periódicos en el índice de refracción. Esto puede ser descrito virtualmente como una red de difracción⁸ y determina que parte de la luz que se propaga por el material se disperse en dirección opuesta a la de propagación dando origen a otra onda denominada onda *Stokes* que tiene una frecuencia menor a la de la onda incidente, con ello ocurre una transferencia de potencia óptica desde la onda incidente a la onda *Stokes*, provocando que la intensidad de la radiación incidente disminuya de manera análoga a como va generándose la que se dispersa.

Para evitar los efectos no deseados de SBS, es necesario trabajar con potencias menores a la potencia umbral SBS, que se encuentra en torno a los 3 mW.

b) *Scattering* Estimulado de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*)

***Scattering* de Raman.**- Se refiere a la interacción entre los fotones que inciden sobre un material y las vibraciones que tienen las moléculas del mismo. Estas vibraciones que siempre están presentes en todo cuerpo reciben el nombre de

⁷ Efectos no lineales en Fibras Ópticas

http://diec.unizar.es/asignaturas/defaultWebs/11958/2_6_No_lineales.pdf

⁸ Red de difracción.- Está compuesta por un distribución regular de elementos como una serie de surcos, capaces de difractar la luz.

fonones ópticos y por ello este tipo de fenómenos suele designarse como una interacción fonón-fotón. Al incidir un fotón sobre un fonón óptico, surgen dos componentes. Una de ellas con una frecuencia menor a la incidente denominada componente *Stokes* y otra de mayor frecuencia denominada componente *anti-stokes* (ver Fig.1.16). A temperatura ambiente, el 99% de las moléculas se encuentran en estado vibracional de menor energía, por lo tanto, la probabilidad de que se produzca el *scattering* de Raman *Stokes* es mayor, esto implica que la intensidad de la componente *Stokes* es 100 veces superior a la *anti-Stokes*. Por ello, en la mayor parte de los casos, únicamente será necesario considerar a la primera.

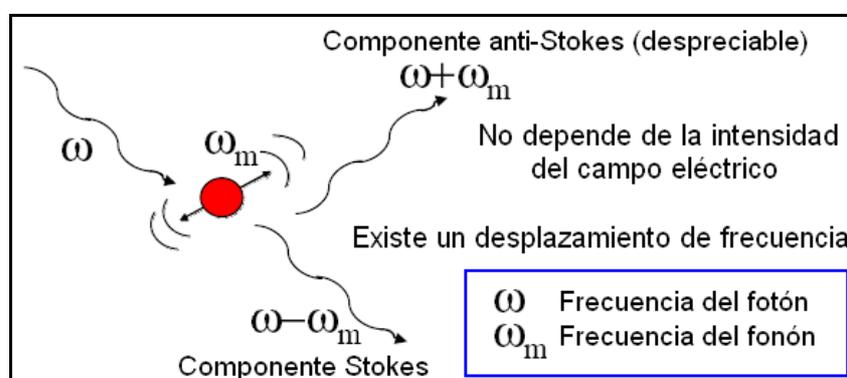


Fig. 1.16 El *scattering* de Raman: La componente *Stokes* y *anti-Stokes*.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Como consecuencia de este proceso, el fotón inicial deja de estar presente en la radiación. En otras palabras, el fotón de bombeo pierde su energía para generar un nuevo fotón, de menor energía (menor frecuencia) en la misma dirección de la onda de bombeo y la energía restante es transferida al material donde se convierte en vibraciones moleculares (fonones ópticos).

El *scattering* estimulado de Raman.- Depende de la intensidad del campo y se produce cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas por una frecuencia dentro del margen de ganancia Raman⁹, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada a expensas de la onda

⁹ El margen de ganancia Raman se refiere a que sus frecuencias se encuentren dentro de la zona en que el material puede generar efecto Raman. Esta zona vendrá caracterizada por el coeficiente de ganancia Raman del material empleado.

de mayor frecuencia, mediante una transferencia de potencia que es máxima cuando la señal destino se encuentra a 13THz por debajo de la señal origen (equivalente a una separación de unos 100nm, cuando la longitud de onda es de 1550nm).

En la figura 1.17, se muestra el coeficiente de ganancia Raman de una fibra monomodo convencional. Como puede apreciarse el coeficiente de ganancia crece de forma lineal hasta llegar a una separación entre portadoras de unos 100nm -110nm luego la ganancia empieza a caer.

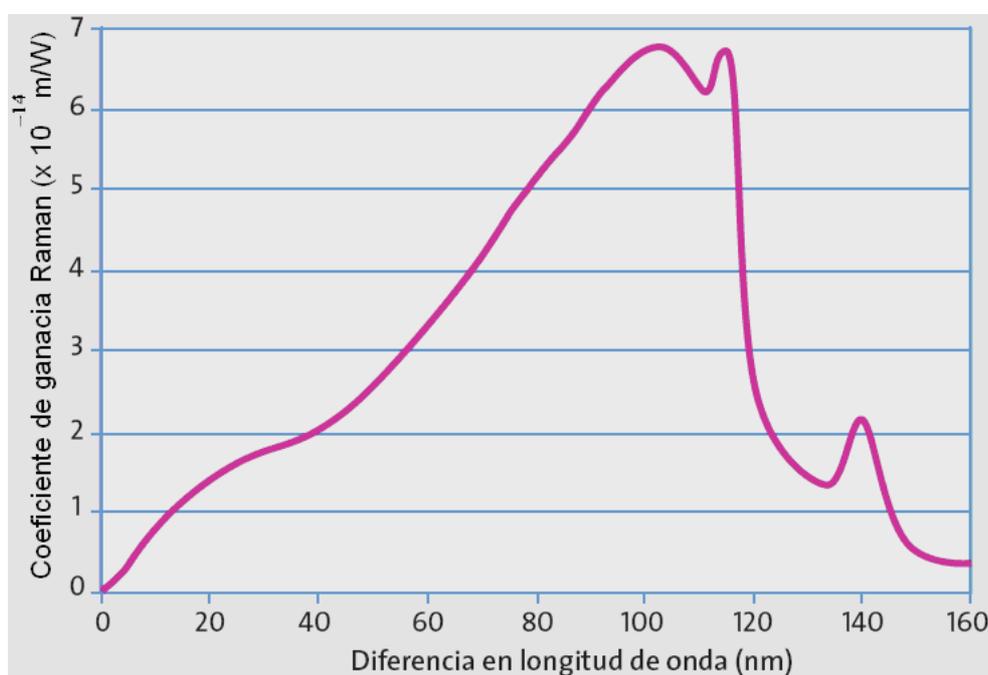


Fig. 1.17 Espectro de ganancia Raman en una fibra convencional

[Fuente: http://195.235.92.45/documentos/revista_comunicaciones_i%2Bd/numero38.pdf]

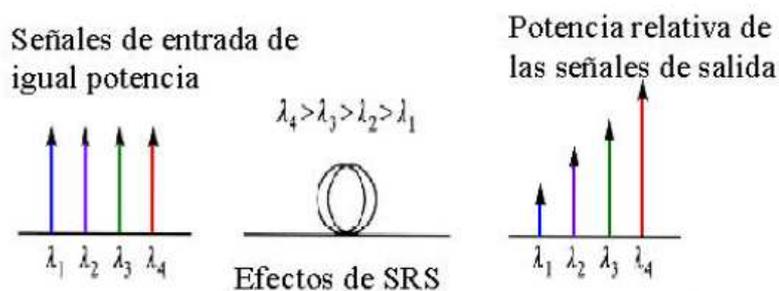


Fig. 1.18 Efecto del *Scattering* de Raman estimulado en WDM

[Fuente: <http://www.tel.uva.es/descargar.htm;jsessionid=0E59402A645A5CC88B553CB82E70639F?id=4926>]

En un sistema WDM¹⁰, existen multitud de canales y si entre ellos hay una separación que coincida con el margen de ganancia Raman, habrá transferencia de potencia de cada canal al siguiente, (ver Fig. 1.18).

Al ser un efecto acumulativo, el canal de mayor longitud de onda habrá recibido energía de todos los que le preceden, por ello su intensidad será superior al resto y será también el que más interferencia reciba.

1.1.8.3.2 Efecto Kerr (Fenómeno de índice de refracción)

El efecto Kerr también se denomina efecto de no linealidad del índice de refracción, y consiste en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos transmitidos. Ya que a niveles de potencia elevados, el índice de refracción presenta una dependencia no-lineal con la intensidad, de la forma:

$$n(t) = n_0 + n_{NL}I(t) \quad (1.22)$$

Donde n_0 es el índice de refracción a baja intensidad, n_{NL} es el índice de refracción no lineal o también llamado coeficiente de Kerr y para las fibras ópticas de silicio, tiene un valor aproximado de $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; $I(t)$ es la intensidad de los pulsos transmitidos (Potencia por unidad de área). Los efectos relacionados con el efecto Kerr son:

- Automodulación de fase (SPM)
- Modulación cruzada de fase (XPM) (sólo en WDM)
- Mezclado de cuatro frecuencias (FWM) (sólo en WDM)

a) Automodulación de fase (SPM, *Self Phase Modulation*)

La aparición de este efecto se debe a la variación que experimenta el índice de refracción ante la propia intensidad de la señal óptica (pulso) que se propaga por la fibra. Esta variación da lugar a un desplazamiento inducido de fase que, en consecuencia, dependerá de la intensidad que posea dicha señal. Como ésta

¹⁰ WDM, *Wavelength Division Multiplexing*, se tratará en la sección 1.4.1

tendrá diferentes amplitudes en cada parte del pulso que se transmite, en cada una de ellas se originará una variación diferente de fase.

Como ya es sabido, la frecuencia no es sino la derivada con respecto al tiempo de la fase y así sus variaciones están relacionadas con la variación de la fase a través de la expresión:

$$\delta\omega(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (1.23)$$

El hecho más significativo de lo anterior son las variaciones de frecuencia que aparecen, lo que provoca que el pulso adquiera un cierto chirp, que es una especie de modulación gradual de frecuencia que hace que cada parte del pulso tenga una frecuencia diferente.

Este chirp crece con la distancia, es decir, nuevas componentes de frecuencia son generadas a lo largo de la propagación del pulso en la fibra. Estas componentes en frecuencia generadas por la SPM causan el ensanchamiento de los pulsos transmitidos.

Un hecho adicional que es preciso considerar es que el pulso se puede ensanchar, comprimir y hasta mantener su ancho, dependiendo de la región de dispersión, en que interactúe la SPM y la GVD. Si se encuentra en la región de dispersión normal (β_2 positiva), se genera un ensanchamiento sustancial del pulso, mientras para fibras monomodo trabajando a $1.55\mu\text{m}$, zona de dispersión anómala (β_2 negativa), interactuando GVD y SPM bajo determinadas condiciones, darán origen a los solitones¹¹.

b) Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross-Phase Modulation*)

En el caso anterior el efecto no lineal (SPM) aparecía cuando por la fibra se transmitía por un único canal, sin embargo XPM se presenta cuando a través de

¹¹ Los solitones mantienen su forma a través de distancias en las que cualquier otra onda se distorsionaría apreciablemente, gracias a la compensación de dos efectos dispersivos de signos opuestos: la dispersión cromática de la fibra óptica y la dispersión introducida por efectos no lineales. Para mayor detalle de los solitones revisar el Anexo A.

la fibra viajan varias señales de distinta longitud de onda, por ejemplo en sistemas WDM. En SPM las variaciones de fase venían determinadas por la presencia de la intensidad de un único campo presente, pero la modulación de fase cruzada se refiere al desplazamiento de fase en un campo óptico inducido por otros campos copropagantes¹² en la fibra, en diferentes longitudes de onda.

El desplazamiento de fase total dependerá de la potencia de todos los otros canales, y variará de bit a bit, dependiendo del patrón de bits de los canales vecinos.

Para comprender los efectos de XPM se consideran únicamente dos canales y resolviendo matemáticamente las ecuaciones de onda, se encuentra que las variaciones de la fase vienen determinadas por la suma $E_1^2 + 2E_2^2$.

El primer término se debe a la SPM, mientras que el segundo término procede de la presencia del segundo campo y cómo afecta al primero. Este fenómeno es al que se le designa como XPM. Como se puede observar “la influencia del segundo campo sobre el primero es más importante que la que ejercía un campo sobre sí mismo, ya que si tienen igual intensidad, la del segundo tendrá un efecto doble.”¹³ Por ello, el chirp¹⁴ inducido por el efecto de la SPM se agrava a causa de las intensidades de las señales de los otros canales.

c) Mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*)

La mezcla de cuatro frecuencias es un efecto no lineal complejo. Su presencia es significativa en sistemas DWDM¹⁵ y su efecto final es la aparición de nuevos pulsos de señal con nuevas longitudes de onda. En su desarrollo matemático,

¹² Los campos copropagantes de una onda se refieren al campo de cualquier otra onda que se propague junto a ella.

¹³ Pereda, José A. Martín, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, Madrid, Editorial Pearson Prentice Hall, 2004, pg. 435.

¹⁴ El chirp es una especie de modulación gradual de frecuencia que hace que cada parte del pulso tenga una frecuencia diferente.

¹⁵ DWDM (Multiplexación por división de longitud de onda Densa) es una técnica óptica que permite enviar muchas señales a diferentes longitudes de onda por la misma fibra óptica.

cuyo detalle no se planteará aquí, aparecen nuevos campos que tendrían frecuencias de la forma $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. La aparición de estas nuevas frecuencias, que surgen de la suma o resta de los valores de las tres iniciales, justifica el nombre que se da a este fenómeno, Mezcla de cuatro ondas, ya que de tres de ellas surge una cuarta. Si esta cuarta frecuencia coincide con alguna de las tres anteriores, aparecerá diafonía.

El FWM se produce cuando múltiples longitudes de onda viajan en la misma fase durante un largo periodo de tiempo (constantes de propagación y velocidad similares) generando nuevas frecuencias. El problema del FWM es muy severo en sistemas WDM que utilizan fibras de dispersión desplazada (DSF) ya que la ausencia de dispersión provoca que las señales permanezcan en fase y la generación de frecuencia FWM sea muy alta.

Menor dispersión -> Más tiempo en la misma fase -> más frecuencias FWM

Un método para reducir el FWM es utilizar fibras dispersivas para garantizar que las diferentes señales no permanezcan en fase durante mucho tiempo. Sin embargo, dado que valores elevados de dispersión cromática conducen a otro tipo de degradaciones, suelen emplearse fibras G.655 llamadas NZDSF (*Non Zero Dispersion-Shifted Fibers*), que se caracterizan por valores de dispersión suficientemente reducidos, pero no nulos, para evitar simultáneamente los efectos dispersivos y no lineales.

Otra forma de disminuir el efecto de FWM es un espaciado de canales no-uniforme, con ello disminuirá la probabilidad de que las distintas combinaciones entre las frecuencias coincidan con los canales presentes, sin embargo esta opción no suele ser utilizada en la práctica.

En general, para sistemas de muy alta capacidad, los efectos de XPM son mucho más importantes que los de FWM y son el factor determinante del desempeño del sistema, (Fig.1.19).

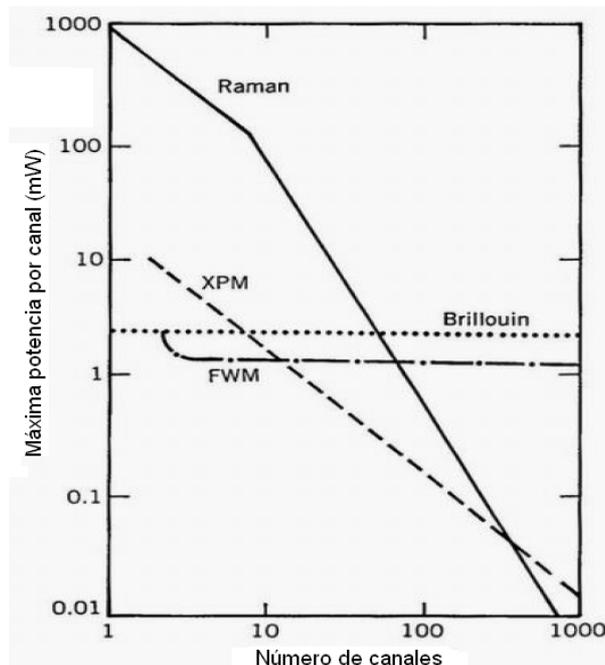


Fig. 1.19 Impacto de los efectos no lineales en el número de canales en sistemas ópticos WDM
 [Fuente: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=21&resId=5&materialId=slides&confId=36>]

1.2 FUENTES O EMISORES DE LUZ

“Las fuentes ópticas son componentes activos en un sistema de transmisión por fibra óptica, cuya función es convertir la energía eléctrica en energía óptica, de modo que permita que la emisión de luz sea efectivamente inyectada o acoplada dentro de la fibra óptica.”¹⁶

Existen dos tipos de fuentes de luz básicas, el diodo emisor de luz (LED) y el láser, sin embargo se mencionará con más detalle al láser, por ser un componente esencial en los sistemas multicanal WDM.

1.2.1 LED (DIODO EMISOR DE LUZ)

Un LED es, esencialmente, un diodo semiconductor de unión p-n que para emitir luz se polariza directamente. La luz que emiten proviene de emisiones espontáneas, como consecuencia de este hecho, se obtendrá una radiación no

¹⁶ <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/932/6/T10695CAP1.pdf>

coherente, será menos direccional que un láser y será escasamente monocromático.

Debido al ancho espectral tan amplio que presenta un LED es usado sólo cuando se requiere realizar transmisiones a cortas distancias y con poca salida de potencia. Derivado también de sus características, el LED requerirá menor cuidado en sus condiciones de trabajo, los circuitos que le alimentarán serán más sencillos y sobre todo, su costo será mucho menor.

1.2.2 LÁSER (AMPLIFICACIÓN DE LUZ POR EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN)

El láser es un dispositivo que produce haces de luz coherente de gran intensidad, muy direccional. La generación de luz en láseres se basa en la emisión estimulada de fotones debida a una realimentación óptica para lograr la oscilación. Por lo tanto el láser, siendo un oscilador óptico, depende de dos factores: la amplificación de la señal y la realimentación positiva. La amplificación de señal es realizada por la existencia del medio activo (medio con ganancia óptica¹⁷), que causa una inversión de población¹⁸. La realimentación positiva es realizada por el confinamiento del láser en una cavidad óptica, (Fig. 1.20).

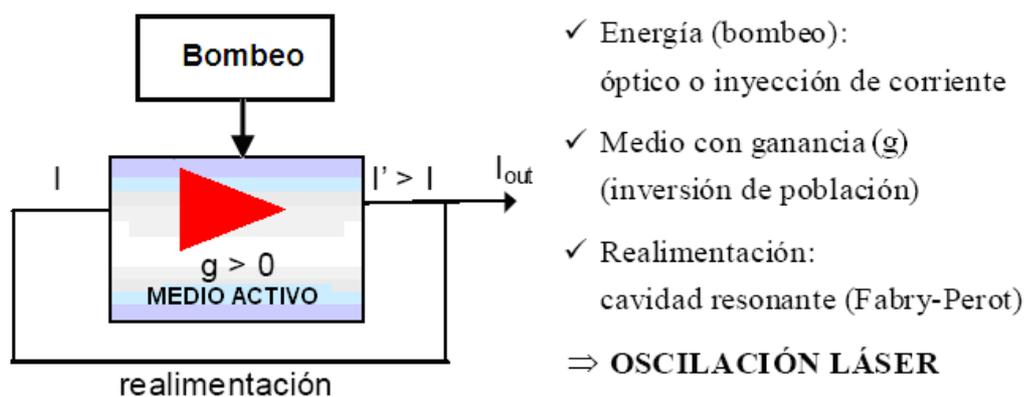


Fig. 1.20 Concepto General del Láser

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

¹⁷ La ganancia óptica es una propiedad que se adquiere cuando se produzca el fenómeno de emisión estimulada, y que éste predomine frente al de emisión espontánea.

¹⁸ Inversión de población significa aumentar el número de átomos existentes en el nivel 2 (N_2), con respecto al nivel 1 (N_1).

1.2.2.1 Características generales de los láseres de semiconductor

1.2.2.1.1 Comportamiento de la señal de salida en función de la corriente aplicada

En un LASER semiconductor, la emisión estimulada de fotones depende de la densidad de corriente que se aplique, si ésta es lo suficientemente alta, alcanza el umbral de corriente necesario para conseguir la inversión de población.

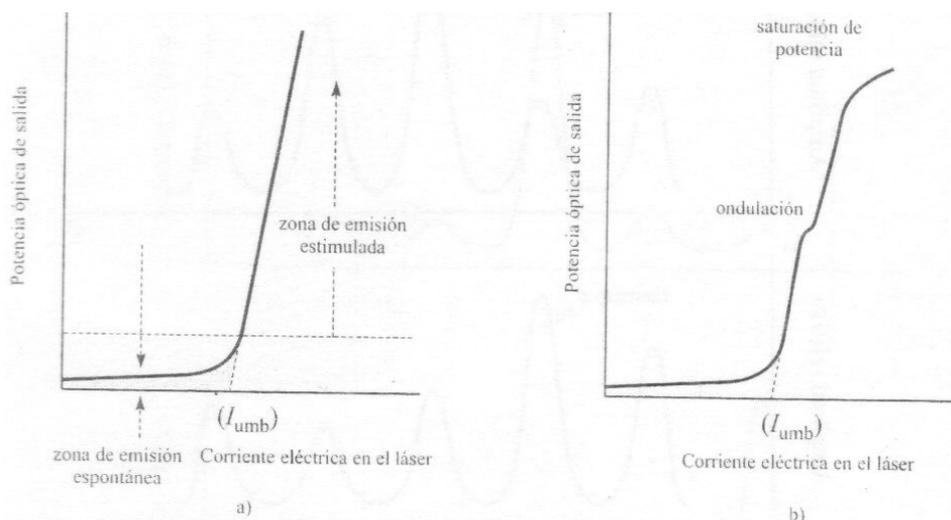


Fig. 1.21 Potencia óptica de salida de un láser en función de la corriente aplicada

a) Curva teórica b) Curva real

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 169]

A niveles inferiores a la corriente umbral (I_{umb}) el dispositivo no cumple con la condición de "Inversión de Población" y los fotones se emiten por emisión espontánea, lo que constituye la base de operación de un LED, mientras que a niveles superiores cuando altas corrientes pasan a través del diodo, la emisión espontánea se transforma en emisión estimulada y la potencia de salida se incrementa notablemente frente a un pequeño incremento de corriente, donde el dispositivo actúa como láser, (Fig.1.21).

1.2.2.1.2 Espectro de la radiación de salida.

El espectro de salida depende del espectro propio del material, del espectro correspondiente a la cavidad resonante en la que está introducido, etc. Como resultado de estos factores aparecen una serie de picos correspondientes a diferentes modos longitudinales. La separación entre ellos viene dada por los

parámetros de la cavidad de Fabry-Perot¹⁹ y es, en frecuencia, $c/2nL$ siendo n el índice de refracción de la cavidad, c la velocidad de la luz y L la longitud de dicha cavidad. En estas condiciones se dice que el láser está trabajando en condiciones multimodo, (Fig. 1.22).

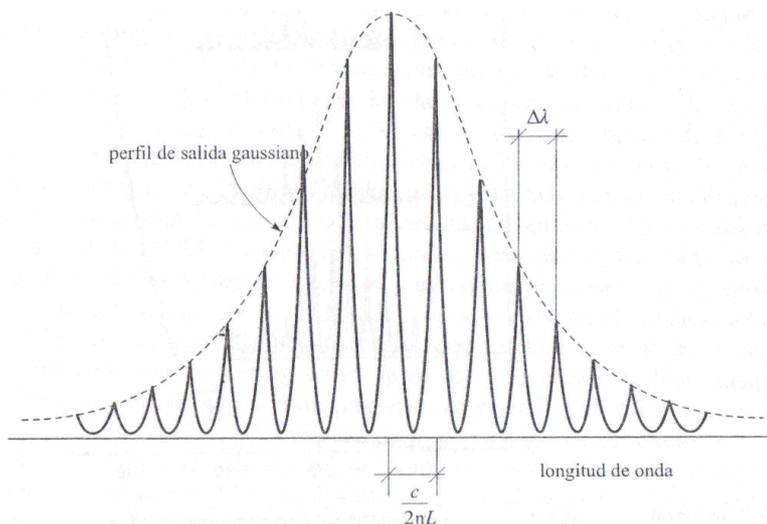


Fig. 1.22 Espectro característico de un láser de semiconductor
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 169]

Un efecto a considerar es la dependencia del espectro de emisión de un láser con la corriente que circula por el diodo, al aumentar la intensidad eléctrica por encima del umbral, el número de modos va disminuyendo apreciablemente hasta convertirse casi en un espectro monomodo, (Fig. 1.23).

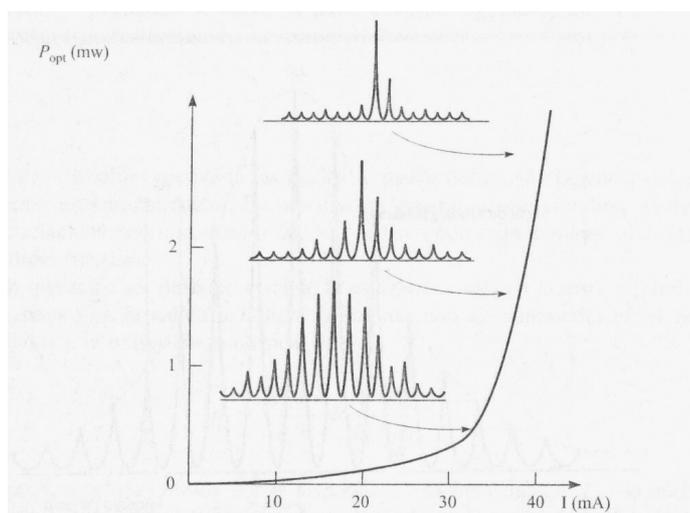


Fig. 1.23 Variación del espectro de salida de acuerdo con la variación de corriente
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 170]

¹⁹ El Resonador de Fabry-Perot (FP) se detalla en el Anexo B

1.2.2.1.3 Influencia de la temperatura

Uno de los problemas básicos de los diodos láser es el aumento de la corriente con la temperatura. A medida que la corriente fluye por el láser, se genera calor. Si la disipación no es adecuada, la temperatura aumenta, con lo que aumenta también la corriente umbral, (Fig. 1.24).

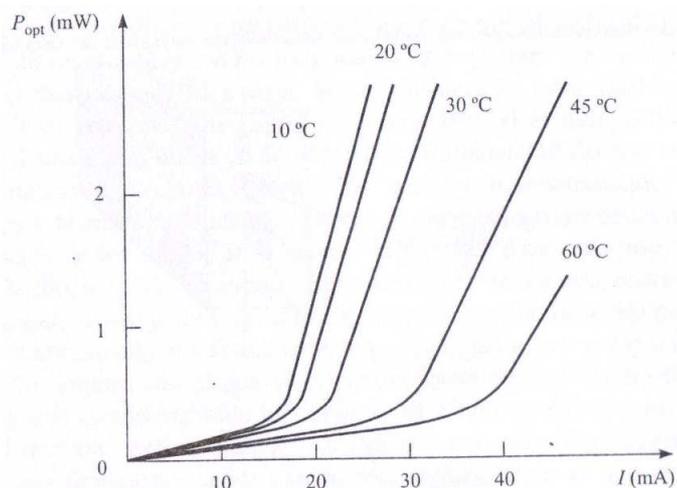


Fig. 1.24 Variación de la potencia óptica de salida, en función de la corriente para diferentes temperaturas
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 174]

Se hace así necesario disponer de mecanismos que incrementen de manera automática la corriente suministrada al diodo para alcanzar el umbral de corriente, si se desea que la potencia óptica de salida se mantenga constante.

1.2.2.1.4 Confinamiento de la luz dentro de la zona activa

Un factor importante en la construcción de un diodo láser es el confinamiento de la luz dentro del área activa, dicho confinamiento se acompaña por la colocación de distintos materiales cerca de la zona activa. En consecuencia, la primera clasificación de los láseres semiconductores²⁰ considera los tipos de estructura de la figura 1.25.

²⁰ La clasificación de los láseres semiconductores se detallan en el Anexo C.

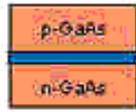
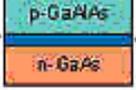
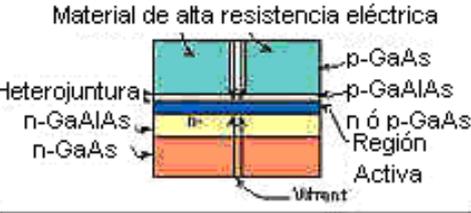
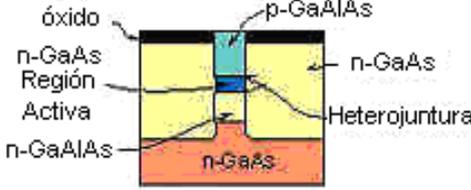
TIPO	ESTRUCTURA
Homojuntura	
Heterojuntura Simple	
Heterojuntura Doble	
Láseres guiados por Ganancia	
Láseres guiados por el índice	

Fig. 1.25 Ejemplos de distintas estructuras de confinamiento de luz utilizadas en láseres

[Fuente: <http://www.seeic.org/articulo/laser/las-diodo.htm>]

1.2.2.2 Láseres monomodo

Los láseres monomodo son aquellos que oscilan con un sólo modo longitudinal, pero en realidad no se emitirá una sola frecuencia sino una línea con una anchura espectral que aunque reducida, cubrirá un cierto margen de frecuencias.

1.2.2.2.1 Láseres de Cavity Vertical o VCSEL

La estructura típicamente emplea dos tipos de materiales el GaAlAs y GaInAsP/InP, la reducción más significativa de la corriente umbral se consiguió mediante la realización de una heteroestructura enterrada de forma circular, obteniéndose al mismo tiempo, el efecto láser a temperatura ambiente aunque de forma pulsada.

El láser VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), está diseñado para operar a 850nm, proporciona la capacidad de modular a altas velocidades con un reducido ancho espectral y la emisión de luz es más concentrada que un típico diodo láser, con un consumo de menor potencia. Es aplicado en redes de corta distancia y son baratos.

1.2.2.2 Láseres por reflexiones de Bragg

Una red de difracción de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Gratings*) se construye introduciendo una perturbación periódica de elementos capaces de difractar la luz. En general se realiza mediante la variación del índice refracción del núcleo de la fibra.

Estas variaciones en el índice de refracción de la fibra provocan la refracción de la luz, el llamado efecto Bragg. Una red de difracción de Bragg, tiene la propiedad de reflejar selectivamente una banda de frecuencias estrecha centrada en la longitud de onda de Bragg.

a) Láseres de realimentación distribuida (DFB)

La realimentación se hace de una manera continua a lo largo de la zona que abarca la región activa de los mismos. La manera de conseguir la realimentación es mediante una red de difracción de Bragg dispuesta a lo largo de la estructura del dispositivo, (Fig. 1.26).

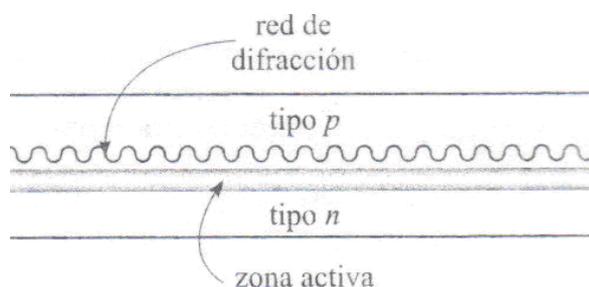


Fig. 1.26 Esquema básico del láser DFB o de realimentación distribuida

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 219]

Los láseres DFB (*Distributed Feedback Lasers*) tienen estabilidad de la longitud de onda de emisión, en un rango de temperatura de 20° a 70°C y con una alta

velocidad de transmisión en el orden de Gbps. También tienen un ancho espectral muy angosto (menor a 1 nm), ofrecen una alta potencia de salida, pero su rango sintonizable es limitado.

b) Láseres de Reflexión de Bragg distribuida (DBR)

El fin perseguido en los láseres DBR (*Distributed Bragg Reflector*) es introducir alguna forma de selectividad adicional en la cavidad, imponiendo mayores pérdidas a los modos no deseados, con este propósito la realimentación no toma lugar dentro de la región activa de bombeo y se sustituye a los espejos por dos regiones en donde se sitúan redes de difracción de Bragg, (Fig 1.27).

Con ello, la realimentación sigue siendo continua, pero no ocurre al mismo tiempo que la emisión estimulada. Ambas regiones se encuentran separadas físicamente y cada fenómeno tiene lugar de manera aislada.

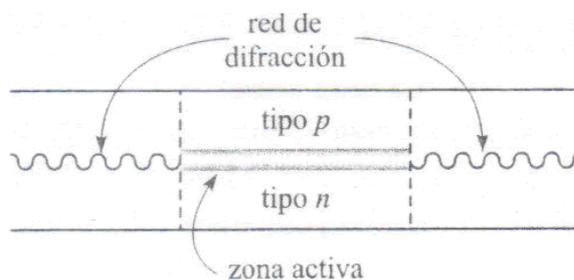


Fig. 1.27 Esquema básico del láser DBR o de reflexión de Bragg
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 219]

El DBR es un láser de banda ancha que provee gran estabilidad y sintonización, y puede tener espaciamiento de canales de 50 a 100 GHz.

1.2.2.2.3 Láseres sintonizables

Son láseres que pueden emitir radiaciones ópticas en cualquier zona de las ventanas e incluso la longitud de onda de emisión puede ser sintonizada a voluntad. La configuración básica de este tipo de láseres está compuesta por tres secciones: la primera denominada región activa, que es la verdadera sección láser; la segunda de control de fase y finalmente la tercera con estructura de Bragg. Cada una de las secciones puede ser polarizada independientemente por

lo que las tres corrientes que pasan por ella no guardan entre sí ninguna relación, (Fig. 1.28).

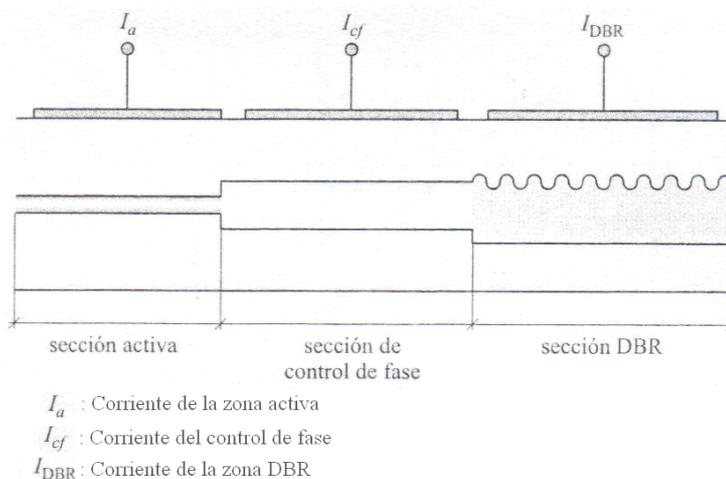


Fig. 1.28 Láser de tres secciones

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 227]

La manera usual de conseguir el efecto láser es ajustar primero la corriente que pasa por la sección DBR, de manera que se ajuste el índice de refracción y con ello determinar la longitud de onda de emisión y a continuación la de la zona de control de fase para el desplazamiento espectral de los modos posibles.

1.2.2.2.4 Láseres de Pozo Cuántico

Una estructura semiconductor se designa de *pozo cuántico* cuando las dimensiones de las zonas en las que se ve confinado el movimiento de electrones y huecos son, como máximo, del orden de los 100 nm. La estructura básica aparece constituida por una delgada capa de GaAs, introducida entre otras dos de AlGaAs, mucho más anchas y que, adecuadamente dopadas, constituyen un diodo láser.

Mediante la realización de estructuras conocidas como pozo cuántico múltiple (MQW – *Multi-Quantum Well*) que son un conjunto de pozos cuánticos, configurando una especie de apilado de capas cuánticas, se consigue disminuir la corriente umbral, disminuir el efecto del “chirp”, disminuir la anchura espectral y aumentar la frecuencia de modulación.

1.3 DETECTORES ÓPTICOS

El principal componente de los receptores ópticos es el denominado genéricamente como **fordetector**, que convierte la señal óptica que procede de la fibra en señal eléctrica. La base de todos ellos es el efecto de generación de pares electrón-hueco (por absorción).

Mediante el proceso de absorción, el fotón incidente cede su energía a un electrón en la banda de valencia, éste incrementa su energía y pasa a la banda de conducción dejando en la banda de valencia un hueco, generándose un par electrón-hueco, si no existiera ningún mecanismo adicional, en un cierto tiempo el electrón volverá a caer a la banda de partida, generándose de nuevo el fotón. Para evitarlo, la única forma sería utilizar una juntura p-n polarizada inversamente.

1.3.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN DETECTOR DE LUZ

En un detector de luz lo primero que se precisa conocer es, cuál es su capacidad para transformar luz en corriente eléctrica y con qué rendimiento lo hace. De una manera general, los dos parámetros que determinan lo anterior son la eficiencia cuántica η y responsividad \mathfrak{R} .

1.3.1.1 Coeficiente de absorción (α)

El coeficiente de absorción es función del tipo de semiconductor empleado y depende fuertemente de la longitud de onda. Cuando mayor sea el coeficiente de absorción, mayor será la probabilidad de que un electrón absorba un fotón.

Para longitudes de onda (λ) que estén por debajo del valor hc/E_g , el coeficiente de absorción aumenta según disminuya λ , pero para valores mayores los fotones dejan de ser absorbidos y el material se vuelve transparente a la luz.

Como puede apreciarse en la figura 1.29, existen dos tipos de curva netamente diferenciadas: las que siguen los semiconductores de gap^{21} indirecto, como el Si y

²¹ Gap o ancho de banda prohibida.

el Ge, y las que tienen los de *gap* directo, como el AsGa. La razón de todo ello proviene de la forma de absorción de fotones que tienen ambos materiales.

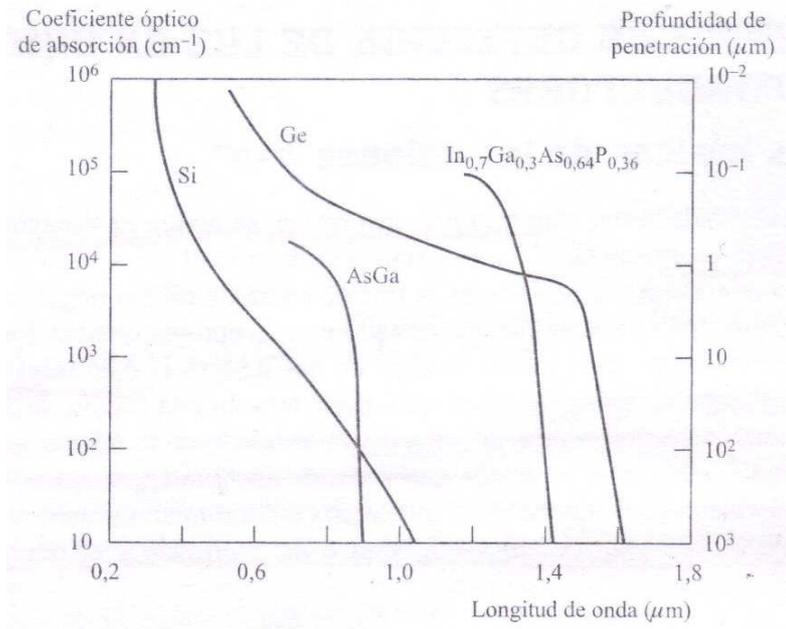


Fig. 1.29 Variación del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para diferentes semiconductores

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 247]

1.3.1.2 La eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica se define como el número de pares de portadores electrón-hueco generados en cada fotón de energía $h\nu$ incidente y viene dada por:

$$\eta = \frac{\text{Número pares electrón - hueco generados}}{\text{Número fotones incidentes}} = \frac{I_f}{\frac{e}{P_0} h\nu} \quad (1.24)$$

Donde I_f es la corriente media generado por una potencia óptica de valor P_0 , incidente sobre el fotodiodo, y e es la carga del electrón.

En función del coeficiente de absorción se tiene una clasificación de los semiconductores: si el coeficiente de absorción varía fuertemente con la energía del fotón incidente, se dice que son materiales de “*gap*” directo. Si por el contrario varía suavemente, se habla de materiales de “*gap*” indirecto.

Como no todos los fotones incidentes son absorbidos (lo que depende de α), la eficiencia cuántica será menor que 1 y dependerá de la longitud de onda.

1.3.1.3 La Responsividad

Es un indicativo de la calidad del fotodiodo, se determina como la relación entre la corriente eléctrica resultante, I_f , y la potencia óptica incidente, P_0 .

$$\mathfrak{R} = \frac{I_f}{P_0} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{e\eta\lambda}{hc} \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right] \quad (1.25)$$

El comportamiento típico de la responsividad de un fotodiodo real, en función de la longitud de onda aparece en la figura 1.30, donde el valor máximo sería el ideal como punto de trabajo, y en la zona de la caída los fotodetectores pasan a ser ineficientes.

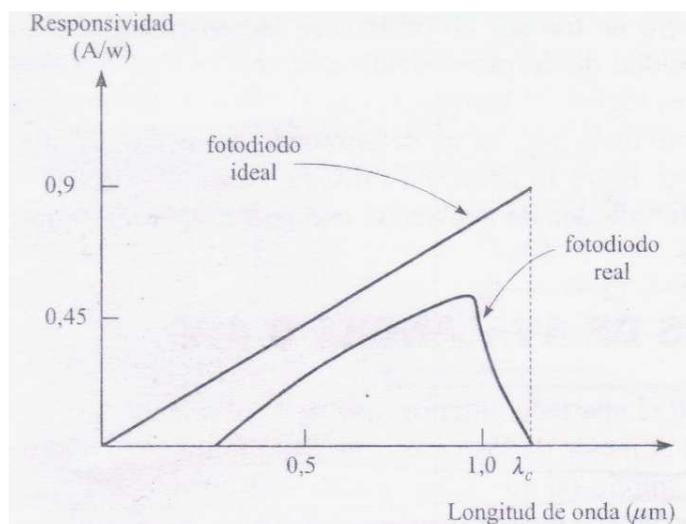


Fig. 1.30 Curva teórica y real de la responsividad de los diodos p-n en función de λ .

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 252]

1.3.1.4 Corriente de oscuridad (*Dark Current*)

Se define como la corriente que genera un fotodetector en ausencia de potencia óptica aplicada, producida por pares electrón-hueco generados térmicamente.

Para un buen fotodetector esta corriente debe ser despreciable, un nivel aceptable es: $I_d < 10\text{nA}$.

1.3.2 FOTODIODO P-N

Es el fotodetector más sencillo, compuesto por una simple unión p-n, que si se aplica una tensión inversa, se crea una zona espacial o de deplexión (libre de portadores). Cuando, en estas condiciones incide sobre el fotodiodo un fotón con una longitud de onda adecuada, genera el ya conocido par electrón-hueco en la región de carga espacial. Al mismo tiempo que ocurre esto, y dada la polarización inversa, en esta misma región aparece un campo eléctrico de gran intensidad. Este campo va a expulsar a los electrones y huecos de dicha zona con rapidez y va a dar lugar a una corriente eléctrica. Esta corriente denominada fotocorriente es recogida en un circuito externo, en el caso de la figura 1.31, en una resistencia R.

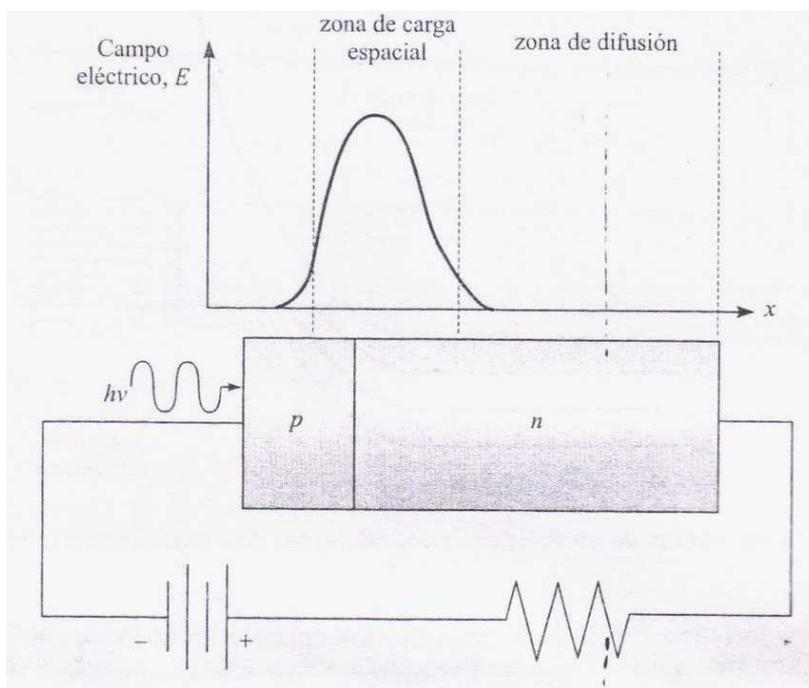


Fig. 1.31 Configuración de un fotodiodo p-n y el campo existente en su interior
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 249]

1.3.3 FOTODIODO PIN

En el fotodiodo PIN la zona de unión se ensancha mediante la adición de una capa semiaislante y de alta resistividad, de silicio intrínseco o ligeramente dopado, entre las regiones p y n. Con ello se consigue una zona de deplexión extensa que

favorece la absorción de fotones y su conversión a corriente útil. En principio, este dispositivo puede funcionar bajo las mismas condiciones que el fotodiodo pn, y presentan una serie de ventajas sobre éste, (Fig. 1.32).

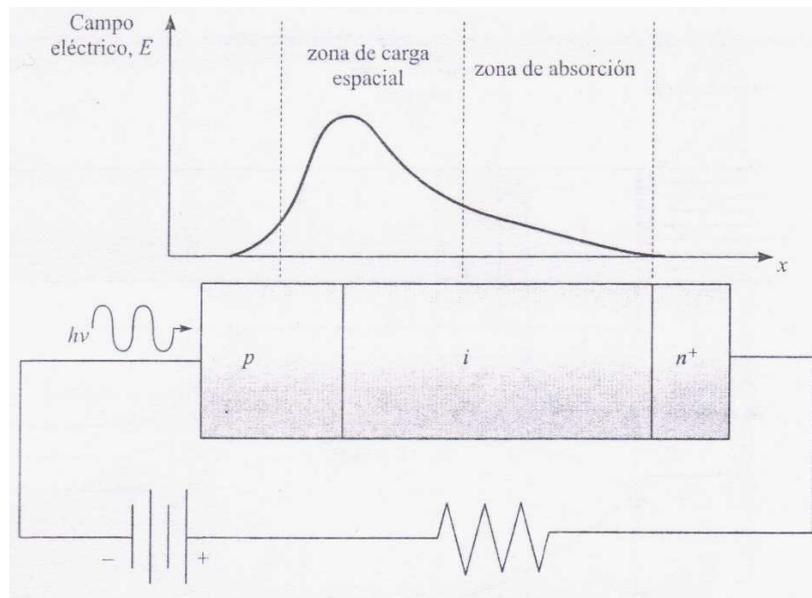


Fig. 1.32 Estructura de un fotodiodo PIN y el campo eléctrico existente en su interior
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 254]

Por otra parte, si se aumenta la polarización aplicada, la zona de depleción se ensancha con lo que la respuesta del dispositivo será más rápida, al mismo tiempo el número de fotones absorbidos se incrementará y consecuentemente, los pares generados. Su velocidad de desplazamiento será mayor y el fotodiodo será así más sensible y más rápido.

El fotodiodo PIN se caracteriza por su facilidad de fabricación, bajo ruido y compatibilidad con los amplificadores de bajo voltaje.

1.3.4 FOTODIODO APD

Los fotodiodos que aprovechan el efecto de avalancha se conocen como APD (*Avalanche Photo Diodes*), los que mediante un mecanismo de multiplicación pueden obtener ganancias superiores a 100. El mecanismo que permite alcanzar estos valores de ganancia no es otro que la posibilidad de crear pares electrón-hueco, no sólo por la incidencia de fotones sino también por el choque de

portadores con la malla cristalina de la zona de depleción. Estos nuevos portadores vuelven a ser acelerados y por análogos mecanismos van repitiendo el proceso que constituye así una verdadera avalancha. El valor del campo necesario para llegar a alcanzar el proceso antes descrito es del orden de los 10^5 V/cm para el caso del silicio.

La configuración más simple que adoptan estos nuevos diodos es algo más complicada que la de los PIN, (Fig. 1.33).

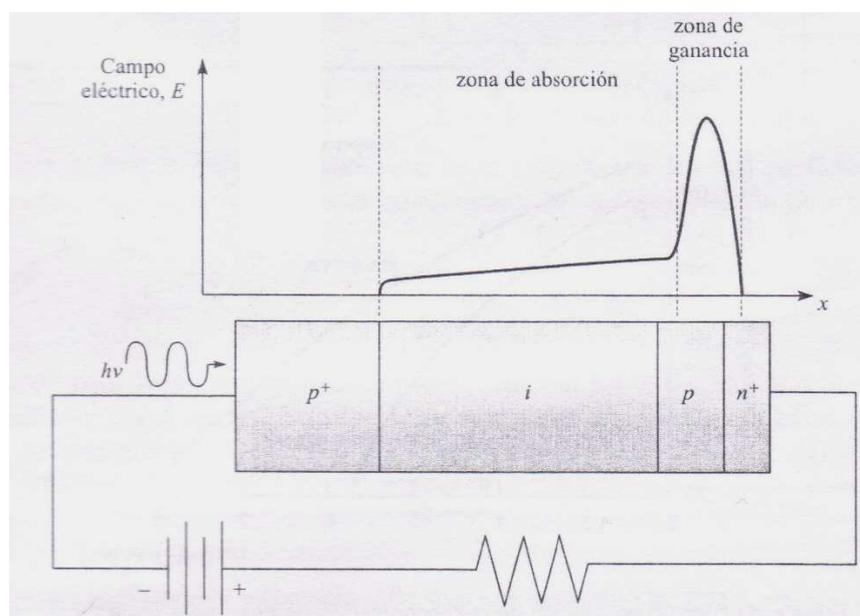


Fig. 1.33 Estructura de un fotodetector APD y el campo eléctrico existente en su interior
[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 256]

El dispositivo tiene dos capas externas n^+ y p^+ , entre las que aparecen ahora dos nuevas zonas. Una primera, de características casi intrínsecas o con un dopaje muy leve y cuyas dimensiones son superiores a las de las otras zonas y la segunda, en la que aparece el campo intenso y está próxima a la unión $p-n^+$, en ella es donde se produce el proceso conocido como multiplicación.

El fotodiodo APD presenta una sensibilidad mucho menor pero necesita altos voltajes de alimentación para su funcionamiento. Actualmente existen fotodiodos APD funcionando con voltajes bajos pero su precio se encarece mucho.

1.4 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA Densa (DWDM)

1.4.1 DIFERENTES TIPOS DE WDM

WDM (Multiplexación por división de longitud de onda), es una técnica que permite enviar varias señales a diferentes longitudes de onda por una misma fibra óptica, además puede transmitir señales de distintas velocidades y formatos (SONET/SDH, *Fibre Channel*, *Gigabit Ethernet*, ATM/IP, etc.).

En la figura 1.34 se muestra un esquema del funcionamiento típico de un sistema WDM. Para cada uno de los canales hay un láser emitiendo a diferente longitud de onda, posteriormente se multiplexan todos los canales en una fibra óptica de gran capacidad. En el receptor un filtro óptico selecciona cada uno de los canales.

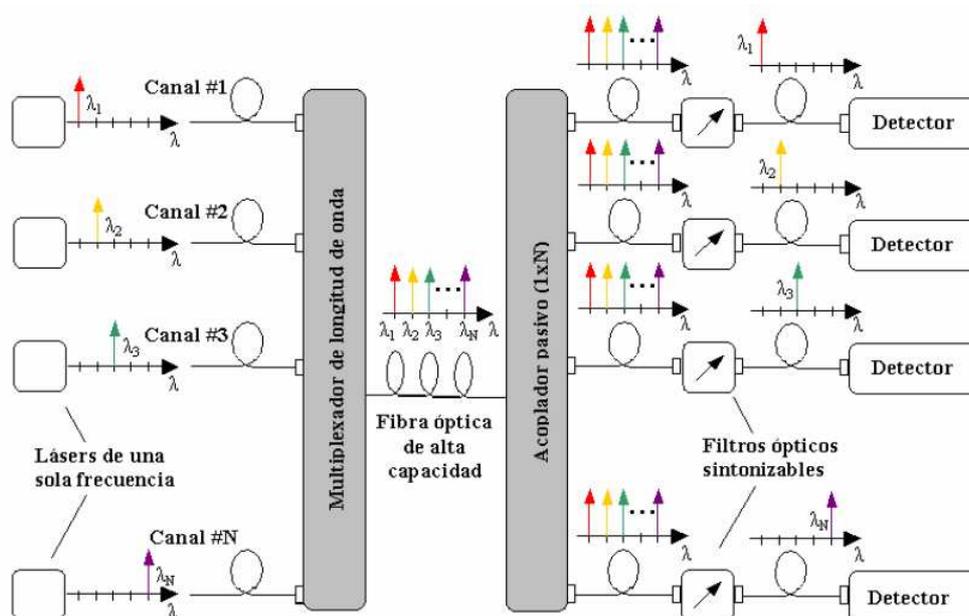


Fig. 1.34 Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM.

[Fuente: <http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>]

DWDM, acrónimo de *Dense WDM*, se diferencia de WDM fundamentalmente en el rango de las longitudes de onda que se multiplexan en una sola fibra. DWDM introduce más longitudes de onda en la fibra, es decir un espaciamiento entre las longitudes de onda más estrecho que WDM, de manera que es posible

incrementar la velocidad de los sistemas de transmisión a Terabits por segundo, sin necesidad de hacer nuevos tendidos de fibra. No existe una frontera claramente definida para el calificativo “densa”, pero puede considerarse así a partir de las 10 longitudes de onda.

El principal problema que presentaban tradicionalmente los sistemas DWDM para las operadoras era su enorme precio, sin embargo, la madurez de esta tecnología ha posibilitado el desarrollo de sistemas DWDM cada vez más asequibles y optimizados a los distintos entornos de red (acceso, metropolitano y larga distancia).

Actualmente, Las tendencias y avances recientes en el campo de los componentes optoelectrónicos y electrónicos a 40 Gbit/s, han demostrando que los sistemas de transmisión DWDM de larga distancia, son capaces de transportar sobre una fibra óptica monomodo hasta 160 canales a 40Gbps en el entorno de la tercer ventana, empaquetados densamente a intervalos de 50GHz (0.4nm) y cubrir distancias de hasta 5000Km sin regeneración eléctrica. De hecho algunos sistemas adoptan una separación entre canales de 25GHz.

Investigaciones de laboratorio han podido realizar experimentos para transmitir 1022 λ en una misma fibra, sistema denominado *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing* (UDWDM), con una separación entre canales de 10 GHz.

CWDM²² acrónimo de *Coarse WDM*, al contrario a DWDM, es un tipo de WDM en el que las frecuencias portadoras de las señales se encuentran distanciadas mucho más que lo determinado por la norma UIT G.692²³.

“Las ventajas que tiene una solución CWDM con respecto a una DWDM es que, en primer lugar, los dispositivos que pueden emplearse son significativamente menos costosos: los láseres requieren una mínima estabilización térmica y los

²² CWDM, Multiplexación por longitud de onda gruesa.

²³ La UIT en su recomendación G.692 ha determinado una separación entre canales de 100GHz o 50GHz, pero esta normativa no indica que sólo puedan ser empleadas esas frecuencias. De hecho algunos sistemas adoptan una separación entre canales de 25GHz.

elementos de separación de frecuencias ópticas son mucho menos sofisticados.”²⁴

Los sistemas CWDM suelen emplearse en distancias cortas, donde no es necesario el uso de amplificadores ópticos, por lo que puede abarcan tanto la tercera ventana como la segunda e, incluso usar la primera. La separación entre canales puede llegar en esas condiciones, a encontrarse alrededor de los 20nm.

1.4.2 SISTEMAS DWDM DE LARGO ALCANCE

Las tecnologías DWDM necesarias para la transmisión punto a punto a gran distancia y gran capacidad comprenden:

- 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.
- Componentes electrónicos y optoelectrónicos rápidos para equipos emisores y receptores.
- La reducción de la dispersión por modo de polarización (PMD).
- Módulos de compensación de dispersión.
- Una rápida tecnología de tratamiento óptico para la regeneración 2R-3R²⁵.

²⁴ Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones, José A. Martín Pereda, Editorial Pearson Prentice Hall, Madrid 2004, pg. 400.

²⁵ El grado de regeneración se califica normalmente por el número de Rs que tenga: 1R (Re-amplificación), 2R (Re-amplificación más Re-modelado o *reshaping*), 3R (Reamplificación más Remodelado más Re-temporización). Los amplificadores de fibra óptica son excelentes regeneradores ópticos 1R.

- **Re-amplificación.-** Es una etapa en la cual se incrementa la potencia de la señal transmitida, por tanto es transparente al formato de la modulación y se puede aplicar a señales analógicas.
- **Re-modelado.-** Es el proceso que reproduce los pulsos originales de la señal, eliminando en gran parte el ruido que puede estar presente en la misma. Principalmente se centra en señales moduladas digitalmente aunque en algunos casos puede también centrarse en señales analógicas.
- **Re-sincronización.-** Se encarga de sincronizar la señal a su patrón original de sincronización y a su tasa de bit. Se enfoca sólo en las señales moduladas digitalmente.

- Técnicas de corrección de errores en recepción, para facilitar la transmisión en presencia de ruido.
- Filtros ópticos con formas de amplitud y fase bien definidas para un filtrado muy estrecho (más estrecho que el ancho de banda de canal WDM).

1.4.3 COMPONENTES CARACTERÍSTICOS DE UN SISTEMA DWDM

Básicamente los elementos que generalmente se encuentran en un sistema DWDM son: los OTMs (*Optical Terminal Multiplexer*), los OLAs (*Optical Line Amplifier*) y los OADMs (*Optical Add/Drop Multiplexer*), ver Fig. 1.35.

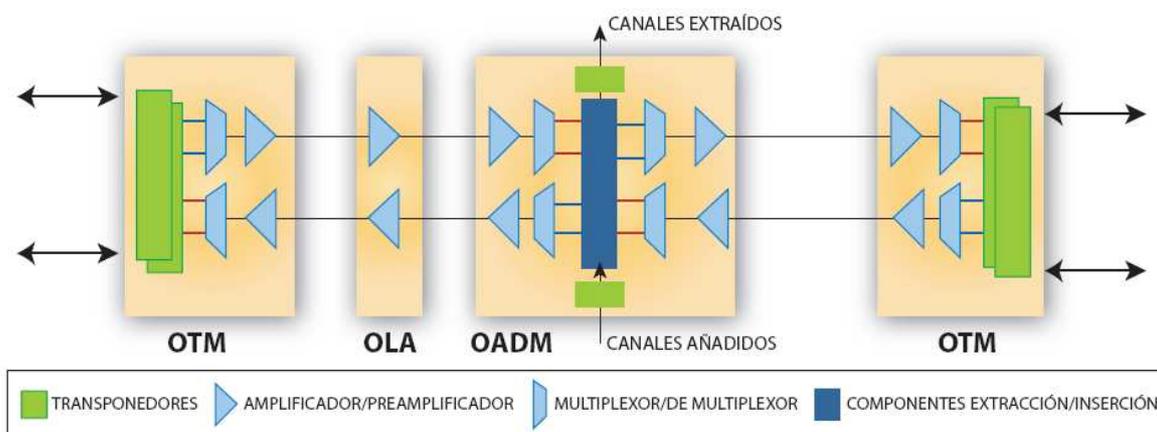


Fig. 1.35 Esquema básico de un sistema DWDM.

[Fuente: http://www.ramonmillan.com/documentos/dwdm_redestelecom.pdf]

1.4.3.1 Terminales multiplexores ópticos (OTMs)

Los terminales son necesarios en cada extremo del enlace, ellos realizan la función esencial de multiplexar en transmisión y demultiplexar en recepción. El componente encargado de recibir las señales cliente y adaptarlas a una longitud de onda estandarizada, estabilizada y susceptible de ser multiplexada y demultiplexada, es el transpondedor, el de inyectar las distintas longitudes de onda sobre la misma fibra óptica es el multiplexor, el de separarlas es el demultiplexor y el de regenerarlas a nivel óptico es el amplificador.

El equipo Terminal también utiliza un canal de supervisión óptico OSC²⁶ (λ_{osc}) sustentado por una longitud de onda separada a las que llevan el tráfico y se emplea para monitorizar el funcionamiento de los amplificadores a lo largo del enlace, como se verá en el capítulo 3.5.2.9.

1.4.3.2 Transpondedores

La misión del transpondedor de transmisión es adaptar la longitud de onda recibida del equipo cliente a una longitud de onda estandarizada por la UIT-T o compatible a la red óptica y con una potencia óptica determinada, que será la entrada al multiplexor²⁷. El transpondedor de recepción debe recibir el canal óptico procedente del demultiplexor, eliminar el ruido óptico, reducir la diafonía entre canales y enviarlo al equipo cliente con una potencia óptica determinada y dentro del rango de longitudes de onda susceptibles de ser recibidas por los detectores ópticos del equipo cliente, (Fig. 1.36).

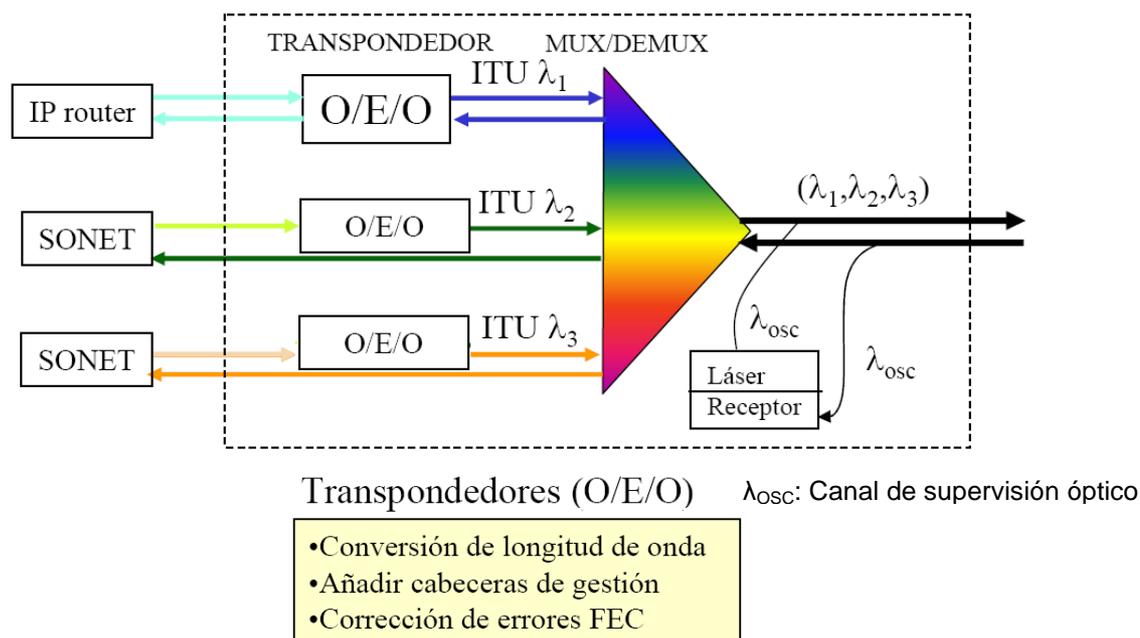


Fig. 1.36 Transpondedor.

[Fuente: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/redes/transpar/ro3nuevo.pdf>]

²⁶ OSC, *Optical Supervisory Channel*

²⁷ Los multiplexores de longitud de onda se encargan de multiplexar las señales procedentes de los diferentes transpondedores de diferentes longitudes de onda en una sola fibra empleando alguna de las tecnologías existentes: AWGs, etc.

Los transpondedores son equipos que permiten la conversión de la longitud de onda, la forma más directa de realizar la conversión de longitud de onda es la basada en un convertidor electro-óptico, donde la señal se fotodetecta para modular posteriormente un láser. Sin embargo, esta técnica es válida para tasas de 2,5 Gbps e inferiores, ya que a mayores velocidades el consumo de potencia y el costo aumentan considerablemente. De hecho, a 40 Gbps sólo resulta factible la conversión de longitud de onda mediante dispositivos completamente ópticos.

Los transpondedores actuales ya no emiten a una frecuencia fija a su salida, sino que pueden ser sintonizados para trabajar con cualquier longitud de onda.

Los transpondedores implementan también el estándar G.709 de la UIT-T, se trata de una cabecera óptica de bajo *overhead* alrededor del 3%, que permite transportar de forma transparente cualquier tipo de protocolo, incluido IP. Los transpondedores, como únicos puntos donde se realiza la conversión electro-óptica dentro de los sistemas WDM, se encargan así de añadir bytes en el *overhead* que soportan la gestión y el control del canal óptico. Dentro de esta cabecera se reserva un campo para la inserción de bits, que permiten la corrección de errores hacia adelante o FEC²⁸ (*Forward Error Correction*).

“Mediante otros componentes denominados *muxponders*²⁹, estos transpondedores también son capaces de multiplexar en el tiempo las señales clientes, de modo que se aproveche al máximo el espectro óptico disponible. Por ejemplo, un transpondedor de 10 Gbps con capacidades de *muxponder* podría agregar 4 señales STM-16 (2.5 Gbps) u 8 señales clientes GbE (1.25Gbps).”³⁰

²⁸ FEC, *Forward Error Correction*, es una técnica de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Se utiliza en sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos. Existe dos tipos principales de FEC utilizados: *In-Band* FEC y *Out-of-Band* FEC

In-Band FEC es el método más usado, los *bytes* FEC se añaden como parte de la cabecera.

Out-of-Band FEC es usado en sistemas DWDM, los *bytes* FEC se añaden por encima de la señal. Por ejemplo, al añadir OOB-FEC cambia la señal de 9,958 Gbps a 10,7 Gbps.

²⁹ *Muxponder*.- Son transpondedores que utilizan la técnica TDM (Multiplexación por división de tiempo) para multiplexar en el tiempo las señales cliente.

³⁰ http://www.ramonmillan.com/documentos/dwdm_redestelecom.pdf

1.4.3.3 Multiplexores/demultiplexores ópticos

Los dispositivos multiplexores/demultiplexores son elementos esenciales en los sistemas DWDM. A medida que el número de canales aumenta, su espaciamiento disminuye, la tecnología AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) denominada Matriz de guía-ondas, ha ganado bastante interés porque el AWG no solamente se utiliza como multiplexor/demultiplexor sino que además puede utilizarse como un encaminador³¹ de longitudes de onda, proporcionando así funcionalidad a nivel de red.

La tecnología utilizada para la fabricación de estos dispositivos es la óptica integrada debido a la precisión necesaria en el diseño de la matriz de guía-ondas. Actualmente, ofrece el precio más bajo por puerto, junto con bajas pérdidas y un alto rendimiento en la fabricación, además tienen una densidad de puertos muy alta. Así, sólo se necesita un chip AWG para un demultiplexor DWDM completo, mientras que para otras tecnologías como un FBG³² se necesita un componente por canal.

1.4.3.4 Amplificadores ópticos (OA)

Estos dispositivos generan una réplica de la señal óptica de entrada pero con mayor nivel de potencia, son utilizados para compensar las pérdidas inherentes de la fibra óptica, sustituyendo a los regeneradores electrónicos convencionales.

La principal característica de un OA (*Optical Amplifier*) es que no requiere convertir la señal óptica en eléctrica y viceversa para su posterior envío, son sistemas totalmente ópticos (*all-optical systems*), Además puede ser usado con cualquier esquema de modulación y velocidad de transmisión y si es lo suficientemente lineal, un único dispositivo puede amplificar al mismo tiempo las diferentes señales, de distintas longitudes de onda y velocidad de transmisión.

³¹ El Encaminador es un dispositivo de capa tres que selecciona la vía óptima para el tráfico de la red.

³² FBG, *Fiber Bragg Gratings*.- Es una pequeña sección de fibra que ha sido modificada por la exposición a radiación ultravioleta para crear cambios periódicos en el índice de refracción de la fibra. Estas variaciones en el índice de refracción de la fibra provocan la refracción de la luz, el llamado efecto Bragg.

Como desventaja clara, el amplificador óptico no regenera la señal; por lo tanto, la limitante de la dispersión continúa existiendo.

1.4.3.4.1 *Funcionamiento del amplificador óptico*

El fundamento de un amplificador óptico es el proceso de emisión estimulada al igual que en un láser. Su estructura es similar a la de un láser salvo que no posee una realimentación para evitar que el dispositivo oscile, de forma que puede elevar el nivel de potencia de la señal, pero no generar una señal óptica coherente, puesto que si el resonador óptico no estuviera allí, después de disparar la fuente de bombeo los átomos que fueron excitados pasarían a su estado base debido al proceso de emisión espontánea.

Como la condición necesaria para tener amplificación es lograr la inversión de población, es necesaria una fuente de bombeo que inyecte energía en la zona activa³³ del amplificador. Esta energía es absorbida por los electrones que incrementan sus niveles de energía produciéndose la inversión de población. Al ser alcanzados estos electrones por los fotones de la señal óptica de entrada con una longitud de onda adecuada, se produce el proceso de emisión estimulada y así la amplificación de la señal, (Fig.1.37).

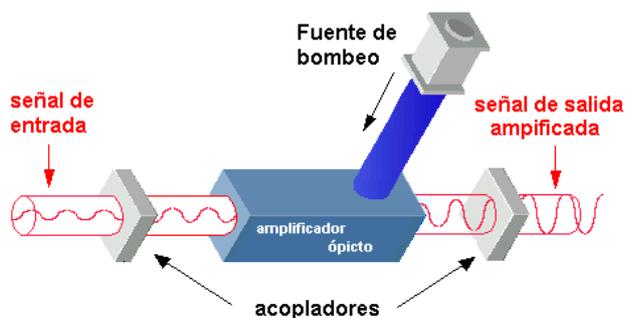


Fig. 1.37 Funcionamiento de un amplificador óptico.

[Fuente: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm]

1.4.3.4.2 *Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA)*

La estructura de un SOA (*Semiconductor Optical Amplifiers*), es muy similar a la de un láser semiconductor pero sin la realimentación que hace que éste oscile.

³³ La zona activa es la región donde se produce la amplificación. Es decir donde los portadores de carga inyectados quedan atrapados y la gran acumulación de carga eléctrica aumenta la probabilidad de que se produzca la amplificación.

La señal se amplifica con una serie de picos asociados a los picos de resonancia de Fabry-Perot³⁴, tiene una propiedad que ninguno de los otros tipos de amplificadores ofrece y en la que radica parte de su atractivo: puede trabajar tanto en segunda ventana como en tercera.

Los principales inconvenientes que presentan son: Por su geometría rectangular produce pérdidas al acoplarlo con la fibra, y no amplifica por igual las dos polarizaciones de la señal y cuando las señales transmitidas poseen ciertos niveles de potencia aparecen fenómenos de naturaleza no lineal que producen distorsión y diafonías. Sin embargo, aunque estos problemas sean factibles de resolver, no han logrado un significativo interés en los sistemas ópticos, a pesar de haber sido la primera técnica en ser estudiada y aplicada. Por el contrario, su aplicación en otros entornos, como el de conversión de longitudes de onda para redes ópticas, ha resultado ser más factible y por ello está hoy muy extendido este uso.

1.4.3.4.3 Amplificador de Fibra Óptica (OFA)

Dado que una señal se transmite a través de una fibra óptica, sería lógico que la propia fibra pueda realizar el proceso de amplificación. Estos nuevos tipos de amplificadores son los que se denominan amplificadores de fibra óptica OFA (*Optical Fiber Amplifiers*) o de fibras dopadas. Dado que el elemento más usado como dopaje de las fibras suele ser el erbio, el nombre de EDFA es actualmente el más empleado, pero en los últimos años está entrando con fuerza una nueva tecnología que está basada en el efecto Raman.

a) Amplificadores de fibra dopados con Erblio (EDFA)

El amplificador EDFA es un segmento de fibra de algunos metros de longitud, dopada con iones de tierras raras, principalmente erbio, iterbio y praseodimio. De todos ellos el erbio tiene mayor interés debido a que su zona de trabajo se centra en la tercera ventana. Cuando se bombea, es decir, inyecta a la fibra una señal láser de alta potencia y longitud de onda adecuada, los iones proporcionan ganancia óptica por inversión de poblaciones.

³⁴ Los picos de resonancia de Fabry-Perot se explican con detalle en el Anexo B.1

Esto produce que los átomos del nivel energético fundamental E_1 ($^4I_{15/2}$) sean excitados mediante el bombeo a un nivel de energía superior E_3 ($^4I_{11/2}$) que corresponde al primer nivel excitado. Este nivel no es estable por lo que después de un corto espacio de tiempo ($1\mu s$) desciende a un nivel inferior E_2 ($^4I_{13/2}$), denominado metaestable, en el que el electrón permanece estable alrededor de 10 ms y acabará cayendo al nivel fundamental E_1 por emisión estimulada, produciéndose la amplificación, (ver Fig.1.38).

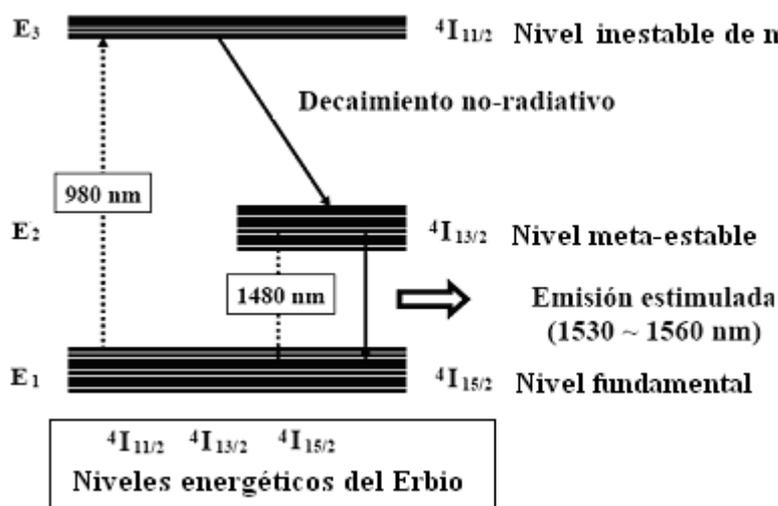


Fig. 1.38 Diagrama de niveles energéticos del erbio.

[Fuente: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=21&resId=6&materialId=slides&confId=36>]

Las dos longitudes de onda más convenientes de bombeo son las de 980nm y de 1480nm, porque la energía fotónica liberada está en el rango de las longitudes de onda de 1520 a 1620nm.

Existen tres formas para introducir la radiación de bombeo a lo largo de la fibra:

Como primera posibilidad, la radiación de bombeo se introduce a la fibra mediante un acoplador, conjuntamente con la señal de entrada y por ellos ambas se propagan en igual sentido a lo largo de la fibra, (Fig. 1.39.a).

La segunda posibilidad, es lo contrario, es decir, el bombeo se propaga en sentido contrario a la señal que se va a amplificar, permite ganancias más altas que la anterior, pero sus características de ruido son peores, (ver Fig.1.39.b).

Una tercera posibilidad, es realizar un doble bombeo con las dos configuraciones anteriores actuando simultáneamente. La ganancia en este caso, puede llegar a duplicar la de un bombeo simple, (ver Fig. 1.39.c).

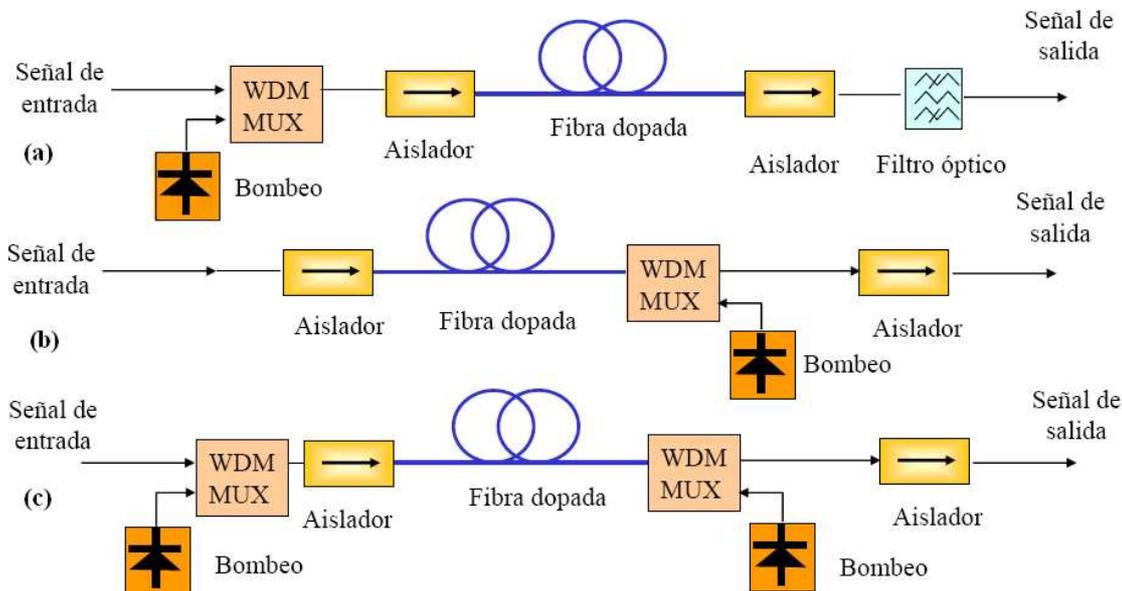


Fig. 1.39 Configuraciones de un EDFA.

[Fuente: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/cocos/transpar/cocos10.pdf>]

El primer aislador³⁵ se emplea para impedir la propagación del ruido ASE³⁶ que se genera y se propaga en sentido contrario al de la transmisión. Por último, un aislador ubicado en el extremo de salida impide la realimentación, evitando con ello que el amplificador oscile.

Espectro de ganancia y ancho de banda del amplificador EDFA

Los amplificadores EDFA no presentan una ganancia uniforme con la longitud de onda, pero es posible obtener una respuesta plana de los mismos mediante la utilización de filtros ecualizadores como se muestra en la Fig. 1.40, la principal limitación es su reducido ancho de banda alrededor de 30nm, pero los sistemas DWDM actuales permiten la posibilidad de tener 40 canales espaciados de 100 GHz u 80 canales espaciados a 50 GHz en una ventana de 30 nm.

³⁵ Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Éstos son muy importantes en los sistemas de comunicaciones ópticas para evitar que las reflexiones de las señales alcancen a otros dispositivos y puedan dañarlos.

³⁶ Ruido por Amplificación de la Emisión Espontánea (ASE).

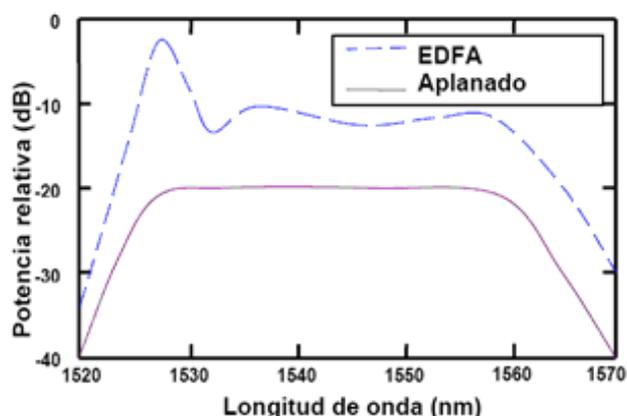


Fig. 1.40 Amplificación de un EDFA en función de la longitud de onda (línea discontinua) y amplificación aplanada mediante filtros (línea continua).

[Fuente: <http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>]

En la Fig. 1.41 se muestra la ganancia del EDFA en las bandas C y en la banda extendida L, el ancho de banda total utilizable es de, aproximadamente 64nm. Con los actuales sistemas DWDM, es posible acomodar 160 longitudes de onda de 10Gbps en las bandas «C+L», con una separación entre canales de 0.4nm.

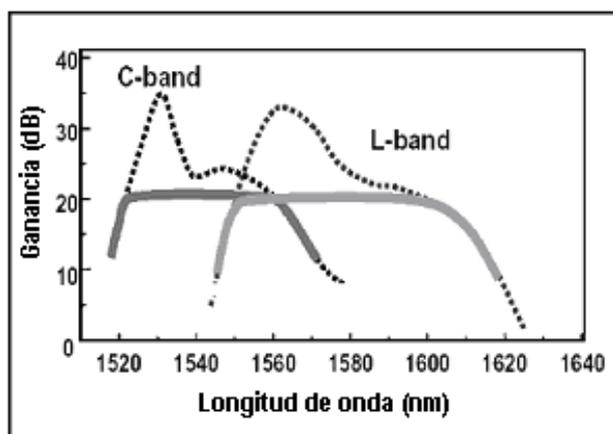


Fig. 1.41 Esquema de ganancia de un EDFA en la banda C y la banda L

[Fuente: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin51/enPDF/a03.pdf>]

Ruido por Amplificación de la Emisión Espontánea (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*).

Los amplificadores EDFA presentan un tipo de ruido que es característico de ellos. Cuando se bombea el material, no todos los electrones que se encuentran en un nivel excitado caerán al nivel inferior a través de un proceso de emisión estimulada; algunos de ellos lo harán mediante emisión espontánea y, a su vez, el

medio amplificador no sólo amplifica la señal de información sino que, al mismo tiempo, amplifica las emisiones espontáneas que se presentan como ruido a la salida del amplificador EDFA, conocido como ruido ASE, (ver Fig. 1.42).

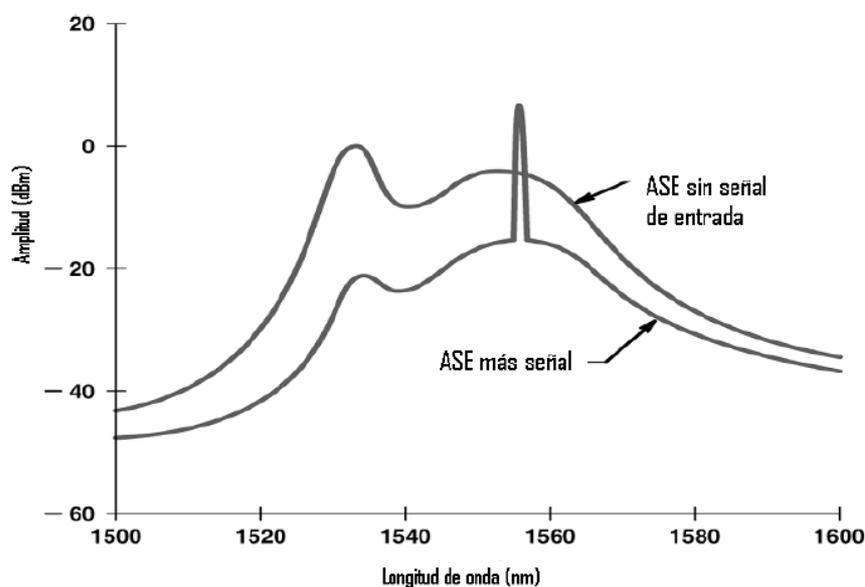


Fig. 1.42 Ruido ASE en relación con la señal de bombeo.

[Fuente: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=21&resId=6&materialId=slides&confId=36>]

b) Amplificadores Raman

Un amplificador Raman se basa en el efecto Raman SRS (*Stimulated Raman Scattering*), que permite la fabricación de amplificadores de fibra para cualquier ventana óptica. Este fenómeno consiste en que la propia fibra, sin dopar, se comporte como un amplificador cuando se bombea con un láser de alta potencia desplazada aproximadamente 100nm por debajo de la señal que se desea amplificar (La señal a amplificar debe ser menor en frecuencia a la de bombeo), (ver Fig.1.43).



Fig. 1.43 Modelo teórico de la amplificación por el efecto Raman.

[Fuente: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialraman/pagina_2.asp]

La señal de bombeo se puede acoplar a la fibra tanto en la misma dirección en la que se transmite la señal (bombeo codireccional) o en sentido contrario (bombeo contradiereccional), que es la más recomendada.

Si el bombeo es el adecuado, todos los distintos canales que pueden transmitirse por una fibra podrán amplificarse, siempre que sus frecuencias se encuentren dentro de la zona en que el material puede generar efecto Raman, esta zona vendrá caracterizada por el espectro de ganancia Raman del material empleado que puede observarse en la figura 1.17.

c) Amplificación Híbrida: Raman + EDFA

La Amplificación híbrida Raman-EDFA (R-EDFA), permite obtener un ancho de banda de 80nm (9.7 THz) combinando la ganancia de un amplificador Raman distribuida con EDFAs, este hecho está reflejado en la figura 1.44, en la que se representa de forma aproximada las zonas de trabajo de cada uno y se obtiene una curva de ganancia prácticamente plana en el rango comprendido entre los 1530 y 1600 nm. Mediante esta combinación se obtiene un bajo nivel de ruido y una fuerte amplificación.

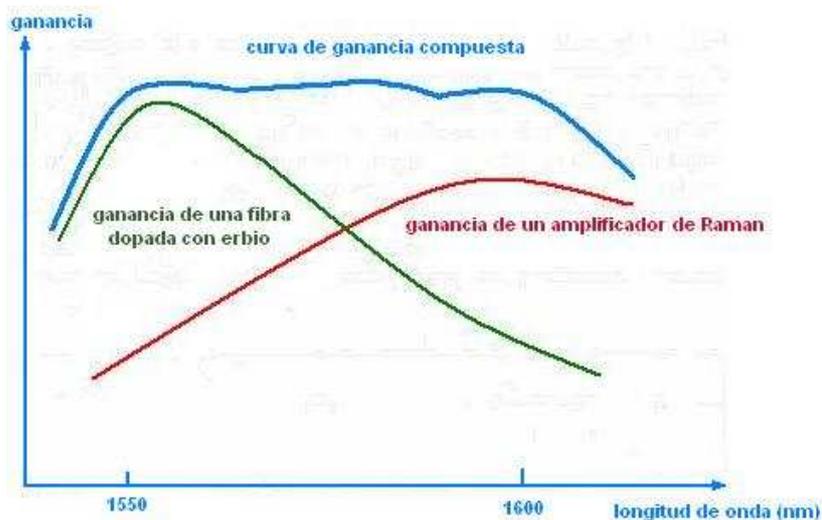


Fig. 1.44 Obtención de una ganancia constante con la longitud de onda, empleando un EDFA junto con un amplificador Raman

[Fuente: http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm]

En la tabla 1.1 se presentan las características principales de los amplificadores Raman y EDFA:

Principales características de los Amplificadores Fibra Óptica (OFA)		
Características	EDFA	Raman
Amplificación de Banda	Las bandas "C" y "L" (alrededor de 1550nm); no trabajan en el rango de 1300nm.	Funciona en todas las bandas, mediante la adecuada elección de la frecuencia de bombeo.
Ganancia	20dB, dependiendo de la concentración de los iones, la longitud de la fibra y la configuración de bombeo.	De 4 a 11 dB, proporcional a la intensidad de bombeo y la longitud efectiva ³⁷ de la fibra
Potencia de saturación	Depende de la ganancia ³⁸ y las constantes del material.	Se aproxima a la potencia de las ondas de bombeo.
Ruido	Amplifica el ruido.	No amplifica el ruido.
Longitud de onda de la fuente de bombeo	980 nm. ó 1480 nm.	Aproximadamente 100 nm más abajo que la longitud de onda de la señal para obtener la máxima transferencia
Número de amplificadores (en cascada)	Alrededor de 6.	Alrededor de 12.
Distancia (span)	80 a 100 Km.	Alrededor de 65 Km.
Características	Configuración Híbrida EDFA y Raman	
Número de amplificadores (en cascada)	Alrededor de 12	
Distancia (span)	80 a 100 Km	

Tabla 1.1 Características de los amplificadores EDFA, Raman y R-EDFA

[Fuente: <http://www.iec.uia.mx/proy/titulacion/proy04/Capitulo%20I.htm>]

1.4.3.4.4 Tipos de amplificadores ópticos según su aplicación.

La ubicación de un amplificador óptico depende del uso que se le pretenda dar. De esta ubicación dependerá la potencia que la señal tenga a su entrada y con

³⁷ La longitud efectiva es un parámetro que señala de una manera aproximada la distancia en que son apreciables los efectos no lineales. Ya que como consecuencia de la atenuación, la intensidad de la señal irá disminuyendo según se propague y a la ser los efectos lineales dependientes de dicha intensidad, su incidencia variará con la distancia. Incorporar este efecto al estudio de los fenómenos no lineales resulta complicado; por ese motivo, en la práctica se asume la potencia constante a lo largo de una cierta longitud efectiva.

³⁸ La ganancia del amplificador es la relación en decibelios de la potencia de entrada de la potencia de salida.

ello su comportamiento. Tres son las aplicaciones más comunes de un amplificador óptico en sistemas de comunicaciones a larga distancia.

a) Amplificador óptico de línea (OLA, *Optical Line Amplifier*)

Es un dispositivo OFA de muy bajo ruido que se utiliza entre secciones de fibra óptica pasiva, (Fig.1.45).

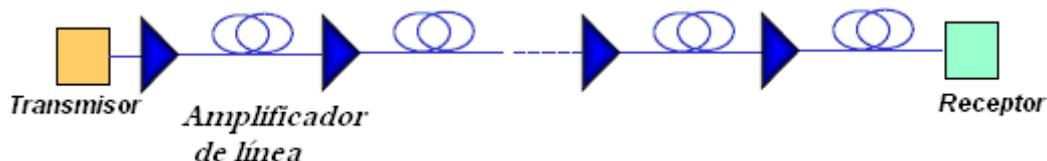


Fig. 1.45 Una posible localización de un amplificador óptico – Ubicación en línea.

[Fuente: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/cocos/transpar/cocos10.pdf>]

Frecuentemente están formados por una secuencia de segmentos (*spans*) de fibra óptica seguidos por EDFAs. Típicamente están alejados entre 50Km y 120Km de distancia, dependiendo del tipo de atenuación de la fibra óptica.

Los amplificadores EDFAs colocados al final de cada segmento de fibra compensan las pérdidas del segmento precedente, volviendo la potencia de la señal al nivel que tenía al comienzo del sistema. Es importante notar que el EDFA no sólo amplifica la señal, sino que, como todo amplificador introduce ruido. De esta forma, la relación señal-ruido se degrada en la cadena de amplificadores; esta degradación sumada a las distorsiones lineales y no-lineales, determinan la distancia máxima que la señal puede recorrer.

b) Amplificador de potencia (BA, *Booster Amplifier*)

Es un dispositivo OFA de potencia de saturación elevada (típicamente hasta 23 dBm) que se utiliza inmediatamente después del transmisor óptico para aumentar el nivel de potencia de señal de salida e incrementar la distancia de transmisión, (Fig. 1.46). Es importante que el nivel de la señal de entrada al EDFA se mantenga por debajo de un cierto nivel para no alcanzar el nivel de saturación. Típicamente los Amplificadores EDFA de potencia tiene una potencia de salida de alrededor de 100 mW.



Fig. 1.46 Una posible localización de un amplificador óptico.

[Fuente: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/cocos/transpar/cocos10.pdf>]

c) Preamplificador (PA, *Pre-Amplifier*)

Es un dispositivo OFA de muy bajo ruido que se utiliza antes del receptor óptico para mejorar así la relación señal a ruido y con ello la calidad de la comunicación (Fig. 1.47).



Fig. 1.47 Una posible localización de un amplificador óptico

[Fuente: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/cocos/transpar/cocos10.pdf>]

1.4.3.5 Multiplexores ópticos de inserción/extracción (OADM)

Estos dispositivos operan directamente sobre la señal DWDM, extrayendo en un punto intermedio de una ruta un determinado canal caracterizado por su longitud de onda (puerto “*drop*”) e insertando en su lugar otra señal de información en la misma longitud de onda (puerto “*add*”), dejando inalterados todos los demás canales de la señal DWDM. Es decir, para las longitudes de onda o bandas que no son de interés en ese nodo, el OADM es transparente.

Los canales denominados “*through*”, son los que pasan de largo por el OADM y los canales “*add-drop*”, son los que entran o salen en el OADM.

Existen dos arquitecturas, los OADM fijos (estáticos) y los OADM reconfigurables (dinámicos).

1.4.3.5.1 F-OADM (*Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción Fijos*)

En los OADM de longitud de onda fija, los canales que se añaden/retiran están preasignados de antemano y no podrán variar durante el funcionamiento del dispositivo.

1.4.3.5.2 R-OADM (*Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción Reconfigurables*)

Los ROADMs son elementos de red en los que cualquier longitud de onda puede extraerse, insertarse o encaminarse de forma flexible, sin afectar el tráfico de la red existente.

Los ROADMs proveen los siguientes beneficios:

- Servicio remoto, proporciona la habilidad de reconfigurar los servicios sin intervención manual en sitios intermedios, abaratando los costos de mantenimiento.
- La asignación del ancho de banda no necesita ser configurada al inicio del sistema. Los ROADMs permiten gestionar el ancho de banda de las redes DWDM de una forma flexible y eficiente, suministrando y conmutando los diferentes canales DWDM en función de las necesidades de tráfico.
- Provee la habilidad de monitorear y arreglar los problemas de los servicios “extremo a extremo”.
- Conmuta el tráfico a nivel óptico (Sin necesidad de Routers IP).

La arquitectura de un ROADM es muy simple, y sus dispositivos constitutivos son conocidos. Sin embargo hasta el año 2005 algunos operadores empezaron a introducir ROADMs en sus redes de larga distancia y recientemente lo están haciendo en el entorno metropolitano.

Los ROADMs se basan en dos elementos: transceptores³⁹ sintonizables y matrices de conmutación óptica⁴⁰. Dependiendo de la tecnología en que se basan estas últimas se distinguen tres tipos de ROADM: Bloqueadores de longitud de onda (WB, *Wavelength Blocker*), Circuito de guía de onda planar (PLC, *Planar*

³⁹ El término transceptor se aplica a un dispositivo que realiza, dentro de una misma caja o chasis, funciones tanto de transmisión como de recepción.

Los transceptores sintonizables se pueden ajustar a través de software para enviar diferentes longitudes de onda de luz por una fibra.

⁴⁰ Una matriz de conmutación óptica es un dispositivo capaz de conmutar una longitud de onda de uno sus puertos de entrada hacia un puerto de salida distinto.

Lightwave Circuit), los eROADMs basados en los conmutadores de longitud de onda selectivos⁴¹ (WSS, *Wavelength Selective Switch*)

Las dos primeras arquitecturas brindan la capacidad necesaria para extraer/insertar una longitud de onda en un sitio específico, pero no brindaron un método simple para añadir un *branching* óptico⁴².

a) La primera generación de ROADMs basados en bloqueadores de longitudes de onda (WB).

Un ROADM WB, se basa en elementos de cristal líquido que proporcionan la capacidad de atenuar las longitudes de onda. Los WBs pueden generar niveles variables de atenuación y son usados para bloquear una longitud de onda en un camino óptico.

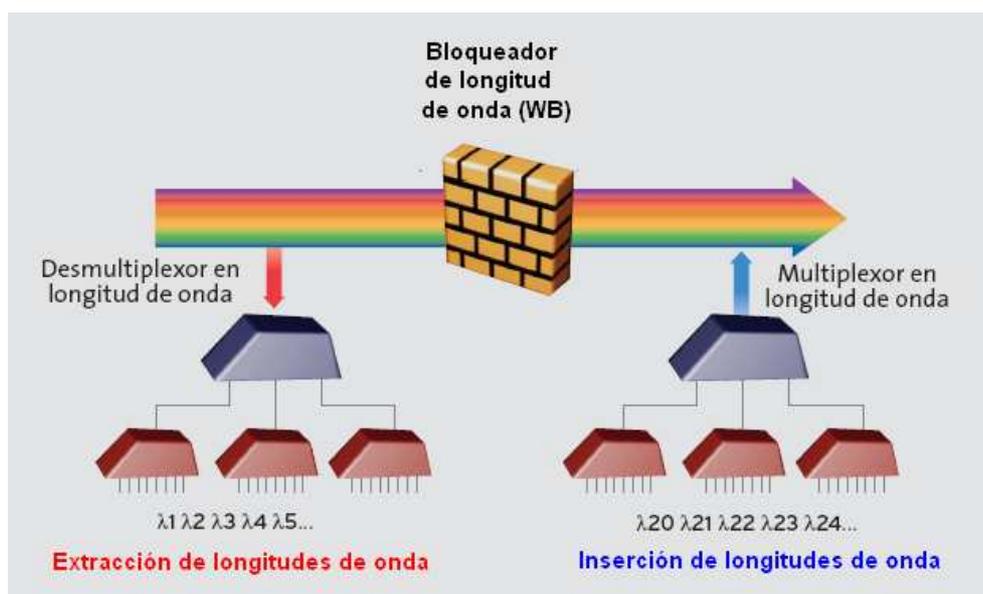


Fig. 1.48 Arquitectura de un ROADM basado en Bloqueadores de longitudes de onda.

[Fuente: http://195.235.92.45/documentos/revista_comunicaciones_i%2Bd/numero38.pdf]

En la figura 1.48 se presenta una configuración típica de un ROADM basado en WB. Mediante el uso de un demultiplexor se separa las longitudes de onda de la

⁴¹ El WSS proporciona la conmutación de cualquier longitud de onda a cualquier puerto de salida.

⁴² El *branching* óptico añade un nuevo camino óptico en el puerto, en otras palabras pueden rutear una señal de un puerto de entrada a cualquier puerto de salida independientemente de que haya otras señales en longitudes de onda distintas en los mismos puertos. Por lo tanto las señales enrutadas al mismo puerto de salida deben estar en distintas longitudes de onda.

señal compuesta DWDM, las longitudes de onda son extraídas a través de filtros sintonizables. El BW bloquea todas las longitudes de onda del canal “*drop*” mientras permite el paso de las longitudes de onda “*through*”. De forma similar, por medio de un acoplador se puede añadir portadoras, que luego mediante un multiplexor se combinan formando la señal compuesta DWDM.

La arquitectura basada en WB provee muchas ventajas tal como configuración remota, 100% de capacidad para extraer/insertar (acceso a todas las longitudes de onda) y buen *performance* óptico. A su vez, puede soportar un gran número de canales (128/64) con espaciados reducidos (50/100 GHz) y de alta velocidad (10 y 40 Gbps).

Sin embargo, añadir un *branching óptico* es costoso y una tarea compleja, los proveedores de servicio necesitan reingeniería del sitio y en algunos casos interrumpir el servicio. Estas limitaciones se traducen en una reducción significativa en la flexibilidad de la red y como resultado reduce dramáticamente la habilidad de manejar dinámicamente la demanda de tráfico y la expansión de los servicios a nuevos territorios. Además los ROADMs WB requieren el uso de un amplio conjunto de componentes (filtros, splitters, acopladores, etc) incrementando la complejidad del cableado del sitio y la reducción de su confiabilidad.

Si bien los WB no resultan tan flexibles, representan una opción interesante en el ámbito de las redes de larga distancia debido a su menor costo.

b) La segunda generación de ROADMs basados en circuitos de guía de onda planar (PLC)

ROADM basado en tecnología PLC (*Planar Lightwave Circuit*), Fig. 1.49, poseen bajas pérdidas de inserción y anchos de banda grandes, posibilitando su uso a 40Gbps con espaciados entre canales de 100 GHz.

El diseño único de su plataforma PLC hace posible un alto nivel de integración de las funciones ROADM, incluyendo filtrado, conmutación, balance de potencia, entre otras en un único chip de silicio utilizando tecnología de guía de onda planar. Normalmente utilizan AWGs para multiplexar/demultiplexar, conmutadores

de microsegundos, y atenuadores ópticos variables (VOAs⁴³) para controlar el nivel de potencia de transmisión de los canales. Pero a pesar de las ventajas de integración de la tecnología PLC y su bajo costo en comparación con los ROADMs basados en WB; se encuentra limitada por el espacio entre canales de 100 GHz, haciéndolo menos atractivos que los ROADMs basados en WB.

Además, en un ROADM PLC cada puerto tiene un canal específico, esto significa que una longitud de onda no puede ser añadida o extraída en cualquier puerto, por lo cual fue desarrollada una nueva arquitectura denominada WSS (*Wavelength Selective Switch*) para proporcionar flexibilidad en los puertos.

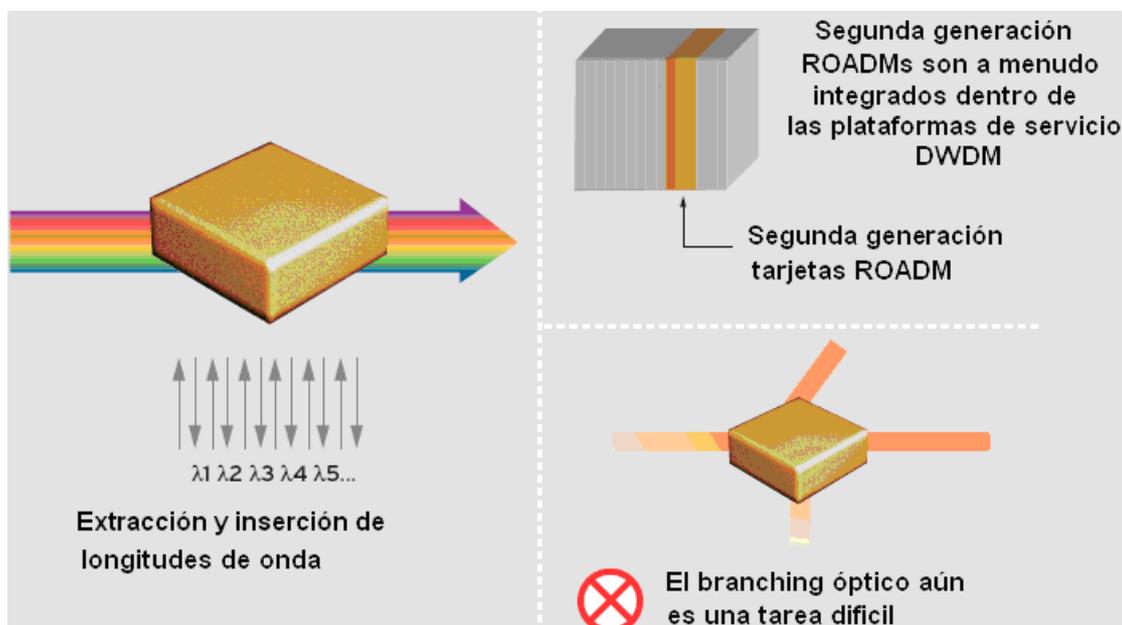


Fig. 1.49 ROADM basado en PLC segunda generación.

[Fuente: <http://www.nortel.com/solutions/optical/collateral/nn115940.pdf>]

1.4.3.5.3 Arquitectura ROADM mejorada (eROADM).

Recientemente se ha desarrollado un Multiplexor ROADM mejorado (eROADM) con conmutadores de longitud de onda selectivos (WSS) para sumar más flexibilidad a la red, pues cualquier longitud de onda puede ser añadida o extraída en cualquiera de los puertos, (ver Fig. 1.50).

⁴³ *Variable Optical Attenuator* (VOA).- Una herramienta óptica que reduce la intensidad de un rayo de luz que pasa por ella para realizar ajustes de potencia. Estos atenuadores permiten controlar los niveles ópticos de potencia.

La tecnología eROADM, cubre la limitación del *branching* óptico de las anteriores arquitecturas, mediante el uso de la tecnología de sistemas micro-electromecánicos (MEMS⁴⁴). Estos dispositivos permiten extraer/insertar sin restricciones y conmutar cualquier longitud de onda a cualquier puerto, de esta manera los proveedores tienen la capacidad de responder “*on the fly*” o al instante cualquier pedido, en otras palabras permite la inserción, extracción, conmutación a cualquier sitio, o incluso añadir un *branching* óptico, sin rediseñar la red ni interrumpir los servicios existentes. Además, los puertos eROADM no están asignados a una longitud de onda en particular (es decir, no tienen color), y por otro lado brindan “enrutamiento por longitud de onda”⁴⁵ para aportar verdadera agilidad a la red.

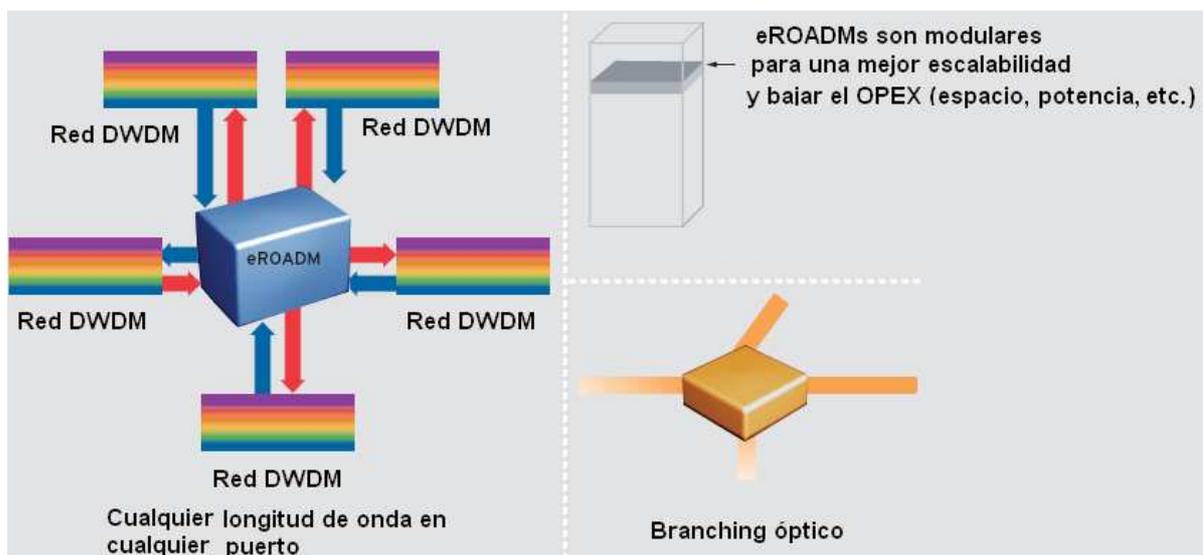


Fig. 1.50 Arquitectura del eROADM

[Fuente: <http://www.nortel.com/solutions/optical/collateral/nn115940.pdf>]

⁴⁴ Tecnología MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) se detalla en el Anexo D.

⁴⁵ Enrutamiento por longitud de onda.- El enrutamiento y la conmutación se realizan a nivel de longitudes de onda.

Las redes de enrutamiento por longitud de onda están compuestas por enrutadores de longitud de onda y por fibras que los interconectan. Cada uno de estos enrutadores tiene puertos de salida y entrada, los que se conectan a nodos terminales o bien a otros enrutadores. Cada enrutador toma su decisión de acuerdo al puerto y la longitud de onda de la señal de entrada. Si dos canales cualesquiera no comparten el mismo enlace de fibra en la red, éstos pueden utilizar la misma longitud de onda.

1.4.3.6 Conmutador cruzado óptico (OXC, *Optical Cross-Connect*)

Los conmutadores ópticos permiten interconectar subredes ópticas, internamente el OXC puede ser totalmente óptico o híbrido óptico/eléctrico. Un conmutador óptico de la red de transporte debe ser capaz de interconectar varias fibras de entrada con otras varias de salida, es decir, debe ser capaz de reencaminar cada una de las longitudes de onda de cualquier fibra de entrada a cualquier fibra de salida.

Los OXC son dispositivos que proporcionan a las redes ópticas las capacidades de protección frente a fallos, conmutación y enrutamiento de lambdas.

“Aunque existen varias tecnologías para la fabricación de conmutadores ópticos (conmutadores mecánicos, conmutadores termo-ópticos y conmutadores electro-ópticos), el principal inconveniente es conseguir conmutadores con un mayor número de entradas y salidas, pues con estas tecnologías se han conseguido conmutadores 2x2 (dos entradas y dos salidas) y conmutadores 4x4, pero a costa de encarecer mucho el dispositivo.”⁴⁶ La tecnología MEMS ha solventado este problema y actualmente ya existen productos comerciales de matrices de 256x256, 1024x1024 y se estima que conmutadores ópticos de matrices 8192x8192 estarán disponibles antes del 2010.

1.4.3.7 Control de la dispersión (DM, *Dispersion Management*)

Para minimizar los efectos perjudiciales de la dispersión cromática de la fibra y hacer posible la transmisión de enormes cantidades de información, es necesario controlar la dispersión de la fibra mediante mapas de dispersión.

1.4.3.7.1 Mapas de dispersión en enlaces ópticos

Una herramienta esencial presente en muchos de los enlaces ópticos es el diseño del mapa de dispersión más adecuado para las características del enlace. El

⁴⁶ Comunicaciones ópticas

http://www.dinel.us.es/util/bajar.php?file=fotonica_comunicaciones.pdf&x=21&y=12&r=0; Febrero del 2002.

mapa de dispersión es el cambio de las propiedades dispersivas de la fibra a lo largo del enlace, es decir, enlaces de miles de kilómetros que alternan secciones de fibra óptica con dispersión normal y anómala, de forma que la dispersión total sea cero o muy pequeña.

1.4.3.7.2 Compensación de dispersión cromática

Existen dos técnicas para la compensación de la dispersión cromática, que pueden utilizarse conjuntamente.

a) Compensación mediante Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF)

La forma más directa de realizar las compensaciones, consiste en emplear pequeños tramos de fibras que tengan una dispersión cromática elevada y de signo contrario a la que ha introducido la fibra principal. Estas nuevas fibras se denominan fibras compensadoras de dispersión o DCF (*Dispersion Compensating Fiber*). El valor de la dispersión cromática de signo contrario al de la fibra principal, debe ser tal que en un corto intervalo de tiempo compense lo que se haya acumulado hasta ese momento. Con ello, de tramo en tramo, se espera que la dispersión cromática total sea prácticamente nula aunque la obtenida en cada punto particular del sistema no lo sea.

En la figura 1.51 se ilustra esquemáticamente la estructura de un mapa de dispersión típico. El mapa consiste en tramos de fibra con dispersión anómala D_1 y longitud L_1 , y tramos de fibra con dispersión normal D_2 y longitud L_2 intercalados de tal forma que:

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (1.26)$$

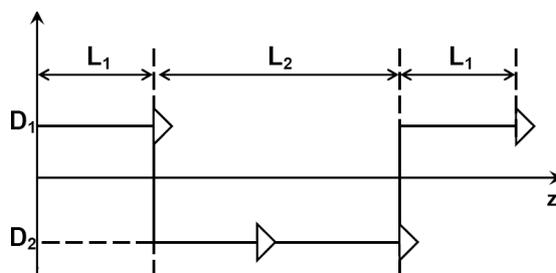


Fig. 1.51 Esquema general de un mapa de control de dispersión cromática

[Fuente: <http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>]

Las formas de ubicar los nuevos tramos de fibra DCF son las siguientes:

Pre-compensación.- La compensación se efectúa al principio de cada uno de los tramos, (Fig. 1.52.a).

Post-compensación.- La ubicación de la DCF es ahora previa al amplificador y posterior a la fibra convencional, (Fig. 1.52.b).

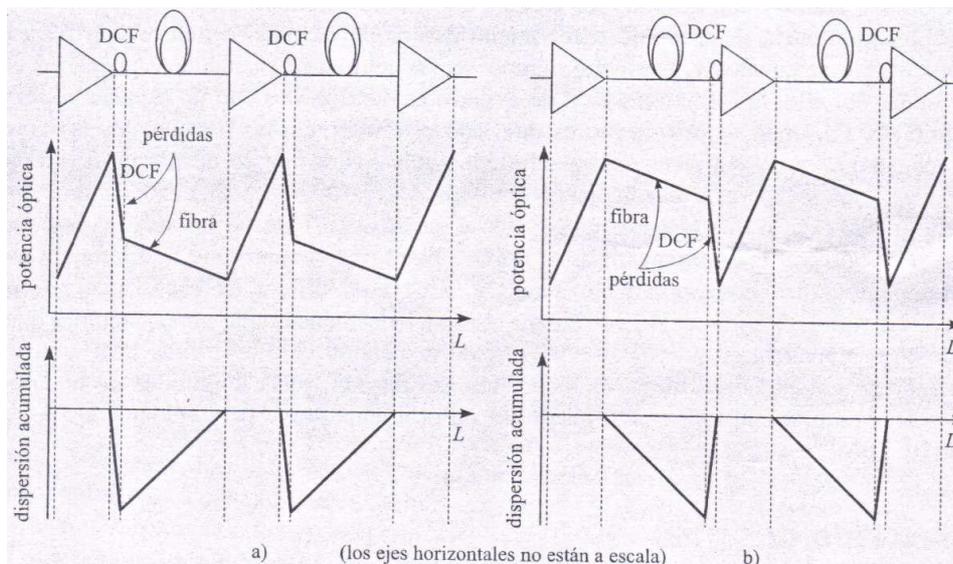


Fig. 1.52 Técnicas de compensación de la dispersión mediante fibras compensadoras de dispersión.

[Fuente: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones pg. 437]

Esta solución no es por completo satisfactoria para cualquier situación. La razón se encuentra en que cada tramo poseerá unas características diferentes y con ello el segmento de DCF habrá de ser también diferente; es preciso así un ajuste tramo a tramo.

Finalmente cuando la velocidad se aproxima a los 40 Gbps, mínimas variaciones de la dispersión pueden afectar al comportamiento del sistema. Por ello se prefiere soluciones dinámicas que puedan ser ajustadas en cada momento. La mayor parte de las soluciones de este tipo se basa en estructuras de redes de difracción de Bragg.

b) Compensación mediante redes de difracción de Bragg (FBG)

Mediante la utilización de las FBG convenientemente diseñadas, es posible compensar la dispersión introducida por la fibra óptica. Se dice una solución

dinámica, porque la dispersión de la FBG puede ajustarse mediante cambios en el periodo de la red⁴⁷ Λ .

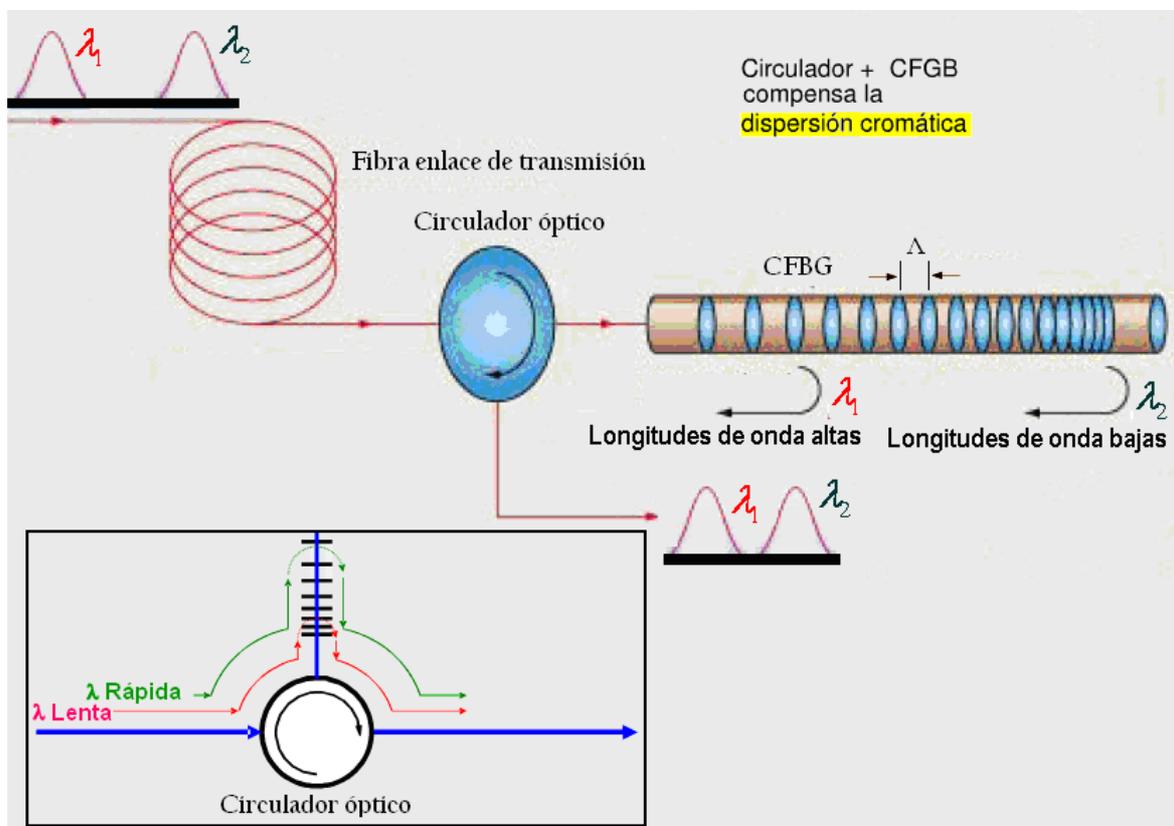


Fig. 1.53 Compensación de la dispersión de segundo orden por un CFGB.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Se diferencian tres tipos básicos de FBG: Redes de difracción uniforme⁴⁸, Redes de difracción con ventana de suavizado⁴⁹, Redes de difracción con variación de fase (CFBG)⁵⁰. Para compensar la dispersión cromática son empleadas las redes de difracción con variación de fase (CFBG, *Chirped Fiber Bragg Grating*).

⁴⁷ El periodo de la red.- En las redes de difracción de Bragg este término es usado para indicar la el periodo de la variación del índice de refracción.

⁴⁸ Los FBG uniformes son los más simple de los tres. En él la periodicidad de la variación del índice de refracción es constante a lo largo de la guía y presentan una fase constante.

⁴⁹ Los FBG con ventana de suavizado a diferencia del anterior, la variación del índice de refracción se suaviza o es menor en los extremos del FBG.

⁵⁰ Los FBG con variación de fase.- En este caso la frecuencia de variación del índice de refracción cambia linealmente con la distancia. Como la longitud de onda reflejada es proporcional al periodo

Un CFBG es capaz de compensar la dispersión cromática haciendo que las componentes espectrales que presentan menor velocidad de fase cumplan la condición de Bragg⁵¹ en un punto más profundo del FBG, mientras que las componentes con menor velocidad de fase lo hacen al principio del mismo. Como diferentes longitudes de onda son reflejadas en distintos puntos de la fibra, éstas recorren un camino diferente y por tanto adquieren distintos retardos. Esto es aprovechado para compensar la dispersión cromática (como se muestra en la figura 1.53) y ciertas no linealidades que aparecen en la transmisión.

El uso de circuladores ópticos evita que el pulso reflejado vuelva de nuevo a la fibra óptica de la que proviene.

1.4.3.7.3 Compensaciones de PMD

El fenómeno dispersivo que más limita a los sistemas es la dispersión por modo de polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), ya que es totalmente incontrolable, puede variar de un día a otro e, incluso de una hora del día a otra. Se han invertido muchos esfuerzos de investigación en obtener mecanismos para su compensación.

Hay varias técnicas que pueden ser utilizadas para compensar los efectos del PMD. Estas técnicas son las siguientes:

- Los dispositivos mecánicos que presionan una porción de la fibra para de realinear los pulsos de polarización del bit óptico. La desventaja primaria de este método es que los dispositivos mecánicos son más propensos a fallar durante largos transcurros de tiempo.
- Los dispositivos eléctricos, que trabajan después del decodificador del receptor, se realiza totalmente en el interior del receptor mediante el empleo de filtros transversales que dividen la señal eléctrica en un cierto número de ramas introduciendo en cada una de ella un retardo y un peso diferentes. El

de variación del índice de refracción, así se logra que distintas longitudes de onda sean reflejadas en distintos puntos de la guía.

⁵¹ La condición de Bragg es explicada en el Apéndice B.2

resultado se mezcla a la salida y, de acuerdo con lo obtenido, se reajustan pesos y retardos hasta alcanzar el comportamiento deseado. La desventaja de éste método es la dificultad de corregir un problema óptico en la capa electrónica, ya que sólo se encarga de que los errores de bit no aumenten.

- La tecnología óptica de compensadores de PMD (PMDC) es, conceptualmente la más sencilla ya que consiste en introducir retrasos ópticos controlados por un algoritmo inteligente, que compensen los adelantos desarrollado por una polarización con respecto a la otra.

1.4.4 VENTAJAS DE DWDM

- ✓ Incremento del número de longitudes de onda dentro de una fibra y, con ello, el número de canales transportados por la misma. Los sistemas DWDM de larga distancia actuales son capaces de transportar sobre una única fibra monodomo más de 320⁵² canales en el entorno de la tercera ventana (banda C y L), cada una de estas longitudes de onda separadas por 0.4nm o 50GHz.
- ✓ Aumento de la velocidad de transmisión soportada por cada una de las longitudes de onda, llegando a 40 Gbps en productos comerciales. Las mejoras en la capacidad de transmisión de los sistemas dependen, en buena parte, de los progresos de la electrónica y optoelectrónica.
- ✓ DWDM trae consigo una reducción de costes en la instalación de fibra óptica. Al ser mayor su capacidad, será necesario desplegar un número menor de fibras, o aprovechar la ya instalada, de manera que DWDM permite a los propietarios de infraestructuras dotar a la fibra ya instalada de más capacidad, casi de manera inmediata, para atender una demanda de tráfico creciente.
- ✓ Modularidad, la cual permite crear una infraestructura conocida como “*grow as you go*”, que se basa en añadir nuevos canales ópticos de forma flexible en función de las demandas de los usuarios. Para ello, basta con ir activando longitudes de onda conforme se vayan necesitando.

⁵² <http://eveliux.com/mx/index.php?option=content&task=view&id=176>

- ✓ Transparencia, pues en cada una de las longitudes de onda puede transportar una señal de cualquier formato (SONET/SDH, ESCON, Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM/IP, etc.) a diferentes velocidades. Es decir, que DWDM permite transmitir información de diversas naturalezas y procedente de aplicaciones distintas dentro de una misma fibra.
- ✓ Eficiencia del sistema de gestión, porque la mayoría de las tareas se pueden realizar en el dominio óptico sin necesidad de realizar ninguna conversión optoelectrónica, que lo único que produce es un mayor consumo de recursos e introduce más complejidad en las redes.
- ✓ En DWDM, la distancia máxima que se puede cubrir en la actualidad es de hasta 5000 Km sin regeneración eléctrica, por lo tanto puede ser aplicada en *Long Haul* (<700Km), *Extended Long Haul* (<1500Km) y *Ultra Long Haul* (hasta los 4000Km).

2. CAPÍTULO II

INFORMACIÓN BÁSICA DE LA NUEVA CABEZA DE CABLE SUBMARINO

2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA SALIDA INTERNACIONAL DEL ECUADOR

El costo de acceso a Internet en Ecuador es el más caro de la Comunidad Andina, el CONATEL ha identificado tres causas fundamentales para que las tarifas al usuario final se mantengan elevadas: los altos costos de las salidas internacionales a Internet, los costos de tráfico a nivel interno o local, y los cobros del Ministerio de Obras Públicas por permitir que las empresas coloquen el cable a lo largo de las carreteras.

En el Ecuador el costo promedio de Internet es de 25 centavos de dólar por Kbps, en Colombia cuesta sólo 12 centavos, en Perú apenas 10 centavos y Estados Unidos cuesta 72 veces menos, además la penetración de Internet en el país es la menor respecto a los países andinos, tanto en banda angosta como en banda ancha. Al comparar con los otros países de Sudamérica, Ecuador ocupa el puesto 12 entre 14 países por sus altos costos, sin embargo las condiciones son peores en Paraguay y Bolivia.

La capacidad de salida internacional a través del Cable Submarino "Panamericano"⁵³ que aterriza en la costa ecuatoriana está saturada y su crecimiento es bastante dificultoso, lo que obliga a pagar el peaje por la conexión internacional a través de países vecinos. Se estima que el 92% de la fibra óptica que utiliza el Ecuador para conectarse con el mundo a través de Internet, llamadas al exterior, etc. es provisto por países vecinos, lo que encarece en un 40% el precio del servicio.

⁵³ Cable Submarino Panamericano, se abordará con mayor detalle en la sección 2.1.1.

Debido a que, los costos de conectividad internacional son sumamente elevados, el CONATEL adoptó iniciativas para estimular el ingreso de una nueva cabeza de cable submarino, que contribuiría a la disminución de costos del acceso a Internet, al evitar el uso de grandes redes de Backhaul desde Ecuador hacia los países fronterizos, donde aterrizan diferentes cabezas de cables submarinos.

En noviembre del 2007 al iniciar la operación del cable submarino de la empresa Telefónica *International Wholesale Services* Ecuador S.A. (TIWS⁵⁴), se generaron muchas expectativas en el país, la principal estaba relacionada con los costos de Internet, porque esperaban una rebaja del 40% para el usuario final, además estaba previsto que la conexión a la red sería más rápida, entre otras ventajas. “Sin embargo, según Hugo Carrión, master en comunicaciones y tecnologías, estos beneficios no se han dado. Hasta la fecha ninguna empresa que brinda el servicio de Internet ha bajado sus costos, excepto Andinatel.”⁵⁵

El director ejecutivo de la Asociación de Empresas Proveedoras de Servicio de Internet, valor agregado, portadores y Tecnología de la información (AEPROVI), manifiesta que el costo final del Internet depende de algunos factores. Los proveedores de Internet pagan un costo total dividido en: un tercio por acceso internacional, un tercio por acceso local y el otro tercio corresponde a la parte operativa (nómina, equipos y otros gastos administrativos). Por este motivo, si el acceso internacional baja su costo, solo se disminuye en un tercio el costo para el usuario final. El director de AEPROVI indica “que en el Ecuador todavía existen algunas barreras para el desarrollo de esta tecnología, y éstas encarecen los costos de las telecomunicaciones. Las leyes ecuatorianas municipales y estatales aún no contemplan el desarrollo de esta tecnología como una prioridad nacional. Por ello ponen muchas trabas, entre ellas la colocación de cables.”⁵⁶

⁵⁴ El cable submarino de la empresa TIWS (*Telefonica International Wholesale Services*) tiene una longitud de 797 km, va desde Punta Carnero hasta el lugar de enlace con el sistema SAM-1 (*Emergia*) el cual pasa frente a las costas del Ecuador. Para mayor detalle revisar la sección 2.2.5.

⁵⁵ La instalación del cable en el país no incidió en la rebaja de precios

<http://www.ciudadcolorada.com/noticc/wm/index.php?action=show&type=news&id=2752>

⁵⁶ La instalación del cable en el país no incidió en la rebaja de precios

<http://www.ciudadcolorada.com/noticc/wm/index.php?action=show&type=news&id=2752>

2.2 CONECTIVIDAD INTERNACIONAL DE ECUADOR - RUTAS ACTUALES.

Es importante que Ecuador disponga de rutas oportunas y eficientes para la conexión con el resto del mundo, sobre todo a precios razonables.

Con la finalidad que todos tengan acceso a la información, surge la necesidad de:

- Tener conexión al *backbone* internacional de Internet.
- Tener rutas para el tráfico de voz internacional entrante y saliente.
- Tener enlaces internacionales de datos para estar conectados con los países de mayor intercambio económico con Ecuador, llamados "*International Private Line*"- IPL.

En la actualidad Ecuador cuenta con varias opciones para tener conectividad internacional, las cuales son mencionadas a continuación:

- Cable submarino Panamericano.
- Norte: Salida por Colombia conectándose a los cables Maya o Arcos.
- Sur: Salida por Perú conectándose a los cables submarinos *Emergia* y *Global Crossing*.
- Cable submarino *Telefónica International Wholesale Services (TIWS)*.
- Enlaces satelitales.

El hecho de tener estas cinco alternativas no implica necesariamente que sean las mejores opciones, cada una de ellas tiene sus características que inducen a la elevación de los costos.

A continuación se da una visión general de cada una de ellas.

2.2.1 CABLE SUBMARINO PANAMERICANO

Por medio del Banco del Pacífico y su filial Ecuanel en el periodo de los 80s el Ecuador iniciaba su proceso de conexión con el mundo a través de Internet. El proceso de integración con las redes internacionales duró hasta el año 1995, de ahí en adelante Ecuador perdió la iniciativa de mejorar sus comunicaciones, teniendo que pagar las consecuencias con los altos costos para el acceso internacional.

El proyecto de Cable Submarino Panamericano comenzó en el año 1994 con el acuerdo entre 15 empresas operadoras de servicios de telecomunicaciones internacionales en las que se incluyeron a ENTEL S.A. de Bolivia, TELECOM de Colombia, EMETEL de Ecuador, TELEFÓNICA de Perú y CANTV de Venezuela todos estos miembros de ASETA⁵⁷ en ese entonces. El cable submarino Panamericano inició su operación en noviembre de 1998.

Inicialmente se planificaba tender un cable de fibra óptica por el Océano Pacífico con estaciones terminales en Sudamérica, Centroamérica y Estados Unidos, pero debido a problemas de costos y utilización de capacidad éste debió ser modificado. Se utilizó tecnología SDH con sistemas de 2.5Gbps, con una vida útil de 25 años, la longitud del cable panamericano es de aproximadamente 7500 Km.

Los sitios en los que existen estaciones terminales de cable submarino Panamericano son: Chile (Arica), Perú (Lurin), Ecuador (Punta Carnero), Panamá (Ciudad de Panamá), Colombia (Barranquilla), Venezuela (Punto Fijo), Aruba (*Baby Beach*) y Estados Unidos (*Saint Croix*), (ver Fig. 2.1).

La mayor capacidad en este cable en Ecuador es propiedad de Ex_Andinatel y Ex_Pacifictel, quienes la heredaron del antiguo EMETEL. En total maneja 10 STM-1 lo que equivale a 1,55 Gbps, desde y hacia Ecuador, por lo que esta salida se encuentra saturada, dado el tipo de tecnología que utiliza.

Para llegar al sitio en donde está ubicada la cabeza de cable submarino se utiliza el backbone del Ex_Pacifictel y Telconet.

⁵⁷ ASETA, Asociación de Empresas de Telecomunicaciones de la Comunidad Andina.



Fig. 2.1 Ruta de cable submarino Panamericano

[Fuente: [http://www.uteq.edu.ec/facultades/empresariales/informatica/tutoriales/temasactuales2007/carrier'seisp\(ecu\).ppt](http://www.uteq.edu.ec/facultades/empresariales/informatica/tutoriales/temasactuales2007/carrier'seisp(ecu).ppt)]

2.2.2 SALIDA POR EL NORTE

Para poder conectarse con las cabezas de cable submarino que aterrizan en Colombia, el Ecuador utiliza las siguientes redes de Backhaul:

Desde Quito a Tulcán:

- Red de Transnexa
- Red de Ex_Andinatel

Desde Guayaquil a Quito:

- Red de Transelectric
- Red de Ex_Andinatel
- Red de Porta

Desde Cuenca a Quito:

- Red de Ex_Andinatel

Una vez en Colombia la información es transportada por un anillo óptico del operador Internexa hasta las costas del caribe Colombiano, en donde se conecta a las cabezas de cables submarinos Maya y Arcos.

Existe otra alternativa que podría proveer una red de backhaul que es Telecom Colombia, pero debido a la falta de una red de fibra óptica que interconecte las fronteras colombo-ecuatorianas, no es posible utilizarla como autopista de la información. Únicamente se lo ha hecho a nivel de microondas, pero no es lo bastante eficiente para proveer un gran ancho de banda.

2.2.2.1 Cable Submarino ARCOS (*Americas Region Caribbean Optical-ring System*).

La red del cable submarino Arcos está formada por un anillo redundante de 8400Km usando tecnología SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) sobre el sistema de última generación DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). El sistema tiene una capacidad total de 960 Gbps, actualmente está operando aproximadamente a 5 % de su capacidad total. El sistema redundante que maneja es sumamente confiable porque se transmite en ambos anillos, es decir tanto en *working* como en *protection* siendo el receptor quien elige el mejor nivel de señal. Su instalación culminó en el año 2001.

El cable submarino Arcos-1 pasa por los siguientes puntos:

Las Bahamas, Aruba, Belice, Colombia, Costa Rica, Estados Unidos, Honduras, México, Nicaragua, Puerto Rico, República Dominicana, Turcos & Caicos, Venezuela, y Panamá, (ver Fig. 2.2).

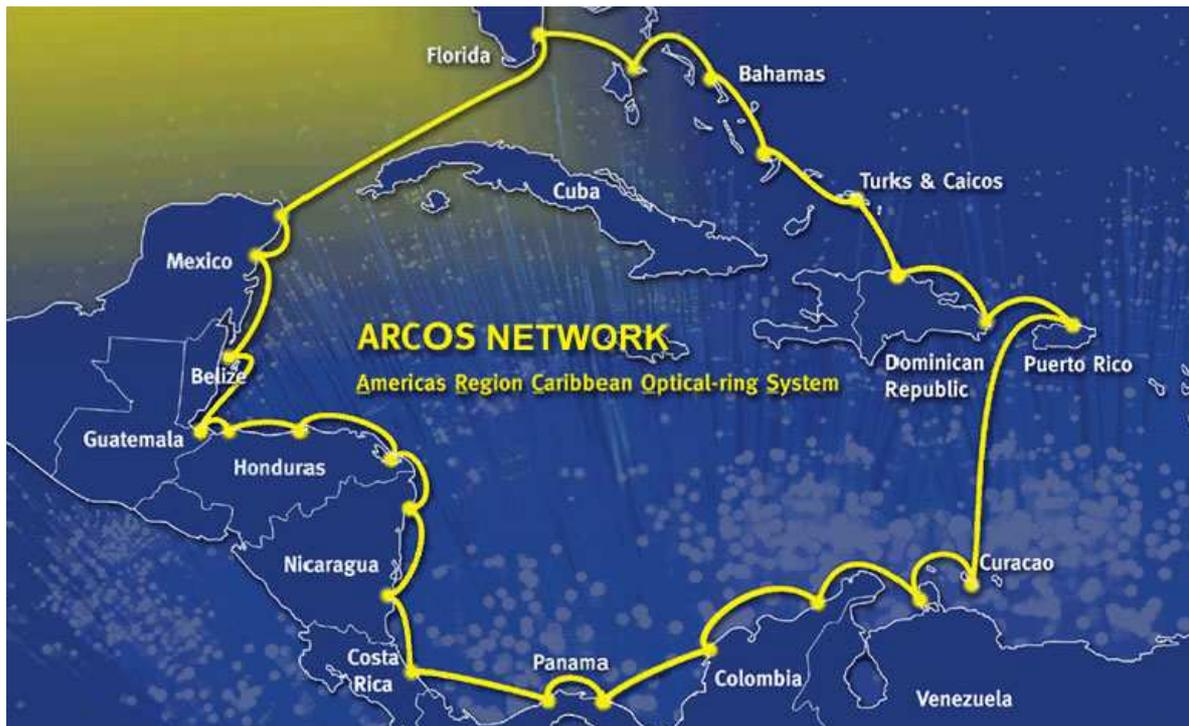


Fig. 2.2 Ruta de cable submarino Arcos.

[Fuente: <http://davidmhe.com/index.php/archives/category/permanente/page/2>]

2.2.2.2 El cable submarino MAYA-1

El cable submarino MAYA-1 con una longitud de 4.524 Km es una anillo autoprotegido de cuatro pares de fibra óptica, tiene menos capacidad que el cable Arcos, pues apenas tiene una capacidad de 20 Gbps equivalente a 242.920 canales digitales de 64Kbps actualizado en el año 2007, sin embargo fue instalado con la mejor tecnología de la época. Tiene interconexiones con otros cables submarinos, incluyendo el Americas I, Columbus II, Panamericano, Américas II y Columbus III. El cable submarino Maya-1 emplea la técnica de DWDM.

El cable submarino Maya-1 pasa por los siguientes puntos:

La Cuenca Marítima Occidental de Estados Unidos (Florida) , México (Cancún), Honduras (Puerto Cortés), Isla Caimán (Gran Caimán), Costa Rica (Puerto Limón), Panamá (Colón) y Colombia (Tolú), (ver Fig. 2.3).



Fig. 2.3 Ruta de cable submarino MAYA-1.

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

2.2.3 SALIDA POR EL SUR

Para poder conectarse con las cabezas de cable submarino que aterrizan en Perú bien sea el cable submarino *Global Crossing* o *Energia*, el Ecuador utiliza las siguientes alternativas de redes de *Backhaul*:

Desde Quito a Guayaquil:

- Red de Ex_Andinatel
- Red de Transelectric
- Red de Porta

Desde Cuenca a Guayaquil:

- Red de Transelectric.

Desde Guayaquil a la frontera con Perú:

- Red de Telconet.
- Red de Transelectric.

2.2.3.1 El cable submarino *Global Crossing*⁵⁸

Global Crossing es un proveedor líder global de soluciones de protocolo Internet (IP). Este sistema está formado por diferentes subsistemas constituidos por segmentos submarinos y algunos segmentos terrestres, los cuales interconectan los principales centros de negocios mundiales con tecnología DWDM la cual permite expandir la capacidad de tráfico y facilita las futuras ampliaciones.

El sistema inició con el segmento que interconecta Norteamérica con Europa, conocido como *Atlantic Crossing*, AC, y se ha extendido hasta alcanzar los principales centros tele-informáticos a escala mundial.

Global Crossing brinda soluciones de telecomunicaciones a través de la primera red global integrada de IP en el mundo, que Su red principal conecta más de 390 ciudades en más de 30 países, suministrando servicios a aproximadamente 690 ciudades en 60 países.

South American Crossing (SAC) es el segmento que conecta las principales ciudades de América del Sur, está formado por un anillo de 20.000 Km de longitud y proporcionaba una capacidad inicial de 40 Gbps.

La empresa *TeleGeography Research* estimó que en América Latina habrá un 87 por ciento de crecimiento en el tráfico internacional de Internet durante el 2007, impulsado por una mayor penetración de banda ancha y la disponibilidad de aplicaciones que demandan gran banda ancha. El ritmo de crecimiento de América Latina seguirá siendo acelerado en los próximos años.

Como América Latina está entre las regiones de más rápido crecimiento del mundo en cuanto a tráfico de Internet internacional, en marzo de 2008 *Global Crossing* agregó 100 Gbps de capacidad de transporte al sistema de cable submarino SAC (*South American Crossing*) y agregó nuevo equipo terminal. La nueva capacidad permitirá puertos IP de 10 Gbps, así como el modo de transferencia sincrónico (STM), a velocidades de hasta 10 Gbps (STM-64).

⁵⁸ Global Crossing Expande la Red Latinoamericana para Satisfacer la Creciente Demanda
http://www.globalcrossing.com/docs/news/03_10_08_sp.pdf

Esta expansión se efectuó para satisfacer la demanda de rápido crecimiento de tráfico IP (*Internet Protocol*), transporte Ethernet, servicios de banda ancha, incluyendo servicios emergentes como IPTV (televisión sobre IP) y banda ancha móvil en América Central y en América del Sur. Se vieron en la necesidad de hacer esta mejora en particular debido al aumento en la demanda en general y a la adquisición de Impsat por parte de *Global Crossing* en el año 2007.

El sistema SAC según muestra la figura 2.4 tiene estaciones de aterrizaje en Santa Cruz (St. Croix), Islas Vírgenes de los Estados Unidos; Fortaleza, Brasil; Río de Janeiro, Brasil; Santos, Brasil; Las Toninas, Argentina; Valparaíso, Chile; Lurín, Perú; Buenaventura, Colombia, Fort Amador, Panamá, y Puerto Viejo, Venezuela. Fort Amador y Puerto Viejo están compartidos por los sistemas submarinos *Pan American Crossing* (PAC) de *Global Crossing* y *Crossing de Cook*.



Fig. 2.4 Ruta de cable *Global Crossing* en América del Sur.

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

2.2.3.2 El cable submarino *Energia* ⁵⁹.

El sistema de cable submarino de última generación SAM –1 (Sud America – 1) ha sido la respuesta del Grupo Telefónica a través de *Energia*, a la creciente

⁵⁹ <http://www.coit.es/publicac/publbit/bit131/especial6.htm>

demanda de comunicaciones internacionales, principalmente Internet en América Latina.

Su construcción se inició en Julio de 1999 y el primer tráfico comercial entre Buenos Aires y Sao Paulo fue establecido en el mes de septiembre del año 2000.

Energia, subsidiaria de Telefonica S.A., tiene una longitud total de 25.000 Km. de los cuales 22.000 Km son de cable submarino y el resto para cruces terrestres de Chile, Argentina, Guatemala, y redes de back-haul. Tiene una capacidad máxima de 1.92 Tbps usando DWDM de 48 longitudes de onda por cada par de fibras. La disponibilidad mensual del sistema es mayor a 99.95%.

El Anillo conecta 12 estaciones de amarre ubicadas en 7 países: Argentina, Brasil, Puerto Rico, Estados Unidos, Guatemala, Perú y Chile, (ver Fig. 2.5).



Fig. 2.5 Ruta de cable Global Crossing en América del Sur.

[Fuente: <http://www.santateresita.com.ar/infotonina.htm>]

2.2.4 CABLE SUBMARINO DE TELEFÓNICA *INTERNACIONAL WHOLESALE SERVICES* (TIWS)⁶⁰

Telefónica *International Wholesale Services* es la organización del Grupo Telefónica que provee servicios mayoristas de telecomunicaciones a nivel global, ofreciendo conectividad entre Latinoamérica, los Estados Unidos y Europa a través de la red de fibra óptica.

La conexión del país al sistema de cable submarino Sudamérica 1 (SAM-1) se efectuó gracias al otorgamiento del permiso a TIWS, por parte del Consejo Nacional de Telecomunicaciones, mediante Resolución No. 347-17-CONATEL-2007⁶¹, por un periodo de 20 años. Para montar la infraestructura, inició su construcción en agosto del 2006 e implicó una inversión de 35 millones de dólares.

Telefónica *International Wholesale Services* culminó el 16 de agosto del 2007 las labores de amarre del cable submarino SAM-1 en aguas poco profundas de Punta Carnero para enterrar el cable en el lecho marino a 1.200 metros de profundidad.

Como se muestra en la figura 2.6, se trata de un cable de fibra óptica submarino de 797 kilómetros de longitud que enlazará al país con el sistema Sudamérica-1 (SAM-1), red que rodea a Sudamérica, llega a Florida (Estados Unidos) y brinda servicios de conectividad.

La estación de amarre está localizada en la Parroquia José Luis Tamayo, vía a Punta Carnero. Una vez que entre en plena operación el cable submarino tendrá una capacidad operativa de 10 Gbps.

Mediante el convenio entre la SENATEL y la empresa TIWS ECUADOR S.A., se obligó a entregar al Estado una capacidad de 200 Mbps equivalente a 1.4 STM-1, con acceso al Internet, desde el inicio de sus operaciones el 15 de noviembre del 2007. Esta capacidad será utilizada en proyectos de desarrollo social y educativo.

⁶⁰ <http://www.e-mergia.com/espanol/notasprensa/notas/01-08-07.html?pais=www.telefonica.es>

⁶¹ Para mayor detalle del Reglamento para la provisión de capacidad de cable submarino revisar el Anexo E.



Fig. 2.6 La conexión de Punta Carnero – Ecuador al SAM-1

[Fuente: <http://onceavocisunl.wordpress.com/2007/11/16/conectado-al-cable-submarino/>]

El cable submarino de *Telefónica Internacional Wholesale Services*, que enlaza al país con el Sistema Sudamérica-1 (SAM-1), permitirá contar con una salida directa y no depender de conexiones terrestres internacionales, y así se espera que los costos de acceso a Internet disminuyan rápidamente, sin embargo hasta la fecha estos beneficios no se han dado.

2.2.5 ENLACES SATELITALES⁶²

La alternativa satelital cada vez pierde actualidad, debido a los altos costos y a los grandes retardos que introduce el salto satelital; sin embargo es todavía, aunque

⁶² ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

en menor medida, una alternativa para conectarse al *backbone* internacional de Internet para sitios en los que no llega la fibra óptica.

2.3 ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL⁶³

“Ecuador se caracteriza por mantener un modelo regulatorio para el sector de telecomunicaciones, basado en regulación por servicios, soportado en la Ley Especial de Telecomunicaciones, expedida en 1992 y reformada en 1995, 1996, 1997 y 2000, en el Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada y en los Reglamentos específicos para cada servicio.

La regulación del Sector de Telecomunicaciones la realiza el Estado a través del Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) y la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL).” (ASETA, 2006).

La creciente demanda de capacidad de salidas internaciones, utilizadas para los servicios de telefonía, Internet y datos en el Ecuador, exige que el país cuente con conexiones de gran capacidad y si las infraestructuras de cable submarino se encontrarán en costas ecuatorianas, el costo sería menor que el demandado por utilizar extensas redes terrestres para acceder a las infraestructuras de otros países. Por esta razón se vio la necesidad de, regular la Provisión de capacidad de cable submarino para acceso internacional para garantizar la libre y leal competencia, el acceso abierto y sin restricciones de las telecomunicaciones en general.

Mediante Resolución 347-17-CONATEL-2007 del 14 de junio de 2007, el Consejo Nacional de Telecomunicaciones expidió el Reglamento para la Provisión de Capacidad de Cable Submarino, que tiene por objeto regular y establecer los requisitos y procedimientos a través de los cuales el Estado otorgará el Permiso para la provisión de capacidad de cable submarino para acceso Internacional.

⁶³ ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

Las principales características del reglamento para la Provisión de Capacidad de Cable Submarino, se resume a continuación:

- Título habilitante para la instalación de infraestructura y explotación de sistemas de sistemas de cable submarino otorgado por la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, su alcance y limitaciones.
- Requisitos legales, financieros y económicos para solicitar un permiso para la provisión de capacidad de cable submarino.
- El permisionario garantizará y responderá ante sus clientes por la calidad de provisión, de acuerdo con los parámetros internacionales aceptados, que serán controlados por la Superintendencia de Telecomunicaciones.
- El permiso tendrá una duración de 20 años, para la renovación del permiso el CONATEL tomará como referencia los informes de la SUPTEL y la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, en relación al cumplimiento de los parámetros técnicos de calidad.
- Obligaciones del permisionario, quien iniciará sus operaciones una vez comunicada a la SUPTEL e incluyendo las pruebas de calidad.
- Información que el proveedor de capacidad de cable submarino debe entregar semestralmente a la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones y la SUPTEL.
- Trato igualitario a los operadores de servicio de telecomunicaciones nacionales.
- Pago por el permiso correspondiente al 0.5% anual sobre los ingresos brutos facturados por el proveedor, además debe presentar una propuesta para entregar una capacidad internacional con acceso a Internet para uso de desarrollo social y educativo, que será administrada por el FODETEL. El CONATEL seleccionará entre la forma de pago y la propuesta de acceso, se escogerá una de las dos modalidades.

- Sanciones por incumplimiento por parte del proveedor de capacidad de cable submarino a la normativa vigente en telecomunicaciones.
- Causas de terminación del permiso por parte del CONATEL
- El permisionario podrá fijar libremente sus tarifas, sin embargo El CONATEL podrá ajustar las tarifas para evitar actos contrarios a la libre competencia.

El interés del CONATEL ya se hizo notar mediante la expedición de este reglamento que tiene varias ventajas para el país y que posibilitará el ingreso de una nueva cabeza de cable submarino.

El proveedor interesado en implementar una cabeza de cable submarino en Ecuador tiene una base legal que le permitirá su operación, para lo cual deberá cumplir con todos los requisitos legales, técnicos y económicos establecidos en la resolución 347-17-CONATEL-2007, y así obtener el permiso necesario.

En base a este análisis se puede afirmar que la operación de una nueva cabeza de cable submarino en Esmeraldas es una opción viable legalmente. Un caso claro que puede ser citado para asegurar esta afirmación es el del cable submarino de Telefónica *International Wholesale Services* Ecuador S.A. que prevé a los requisitos y procedimientos que exige la regulación, el 27 de julio del 2007 el Estado otorgó el permiso para su operación por un periodo de 20 años.

2.4 FACTIBILIDAD DE SITUAR UNA UNIDAD DE RAMIFICACIÓN EN COSTAS ECUATORIANAS⁶⁴

Los dos cables submarinos que pasan frente a las costas ecuatorianas son: *Energia* y *Global Crossing*, únicas opciones para disponer a corto plazo, de una nueva cabeza de cable submarino en Ecuador.

⁶⁴ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

2.4.1 UBICACIÓN DE LOS POSIBLES PUNTOS DE RAMIFICACIÓN DE LOS CABLES SUBMARINOS QUE PASAN FRENTE A LAS COSTAS ECUATORIANAS

El interés del CONATEL ya se evidenció, solicitando información y teniendo contactos preliminares con los dos proveedores *Energia* y *Global Crossing*, quienes analizaron la factibilidad de instalar uno o dos cables submarinos en costas ecuatorianas obteniendo los siguientes resultados:

- En el caso específico del cable ***Energia***, la unidad de ramificación o *Branching Unit* (BU) más cercana se encuentra frente a las Islas Galápagos. Esta unidad ramifica la trayectoria principal del cable en dos ramales adicionales, uno con destino a Guatemala y otro con destino al Perú. *Energia*, para poder situar una nueva cabeza de playa en las costas ecuatorianas tendría que instalar una nueva unidad de ramificación o BU que le permita simultáneamente derivar dos secciones del cable, una con destino a las costas ecuatorianas y otra hacia las costas colombianas, (ver Fig. 2.7).



Fig. 2.7 Unidad de ramificación del cable *Energia*

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

Emergia mostró interés para intervenir en el aterrizaje de la cabeza de cable submarino, pues podría ser factible situar una nueva BU, que permita que el cable submarino aterrice en Ecuador, y que a su vez les habilite una llegada a Buenaventura – Colombia.

- *Global Crossing*, respecto a la alternativa de un punto de ramificación, ofreció la posibilidad de un punto de ramificación desde Buenaventura – Colombia, (ver Fig. 2.8).



Fig. 2.8 Punto de ramificación del cable *Global Crossing*

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

Es claro que la llegada de la cabeza de playa tiene una dependencia directa de las características técnicas de la red del operador, por lo que para situar una nueva unidad de ramificación es necesario considerar la atenuación, la dispersión cromática y la dispersión debido al modo de polarización (PMD) que se introducen a lo largo de la fibra, porque mientras más larga la distancia mayores serán los parámetros dispersivos y la atenuación que hay que compensar para garantizar la calidad de la señal.

2.5 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PUNTO DE ATERRIZAJE

“El análisis de la ubicación geográfica de una nueva cabeza de Cable Submarino en Ecuador toma en cuenta fundamentalmente dos aspectos: la ubicación de los puntos de ramificación de los cables submarinos en servicio, que pasan frente a las costas ecuatorianas, y la existencia de redes de *Backhaul* desde los posibles puntos de aterrizaje.”⁶⁵

En el informe realizado por la Asociación de Empresas de Telecomunicaciones de la Comunidad Andina, ASETA, por encargo del CONATEL, sobre el tema: “Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de Cable Submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.”, el 12 de junio de 2006, detalla las tres posibles alternativas de puntos de aterrizaje para la ubicación geográfica de la cabeza de playa en las costas ecuatorianas que son:

- Cabeza de playa en Punta Carnero
- Cabeza de playa en Manta
- Cabeza de playa en Esmeraldas

Estas opciones se han tomando en cuenta por:

- Que en Punta Carnero aterriza el Cable Submarino "Panamericano".
- La importancia del puerto de Manta.
- La existencia de cable de fibra óptica del OCP entre Esmeraldas y Lago Agrio.

Sea cual fuere el punto de aterrizaje seleccionado para la llegada de los cables *Energía y/o Global Crossing* a costas ecuatorianas, para este proyecto de titulación el punto de aterrizaje a analizar es Esmeraldas y la red de *Backhaul* presente en este sitio, por ese motivo no se analizarán con detalle las otras dos alternativas existentes.

⁶⁵ El Ecuador y la Fibra óptica submarina, <http://pruizocampo.blogspot.com/>

2.5.1 CABEZA DE PLAYA EN PUNTA CARNERO

En Punta Carnero aterriza el cable Panamericano por ende ya cuenta con una estación de amarre, con infraestructura que podría ser compartida mediante acuerdo con los actuales propietarios (Ex_Andinatel, Ex_Pacifictel). En cuanto a las redes de *Backhaul* existentes desde Guayaquil llegan dos redes de fibra óptica: una de Ex_Pacifictel y otra de Telconet. Adicionalmente una red de microondas de Ex_Andinatel.

La red de microondas queda descartada como *Backhaul* en razón a las grandes capacidades que hay que transportar. La red de fibra de Ex_Pacifictel solo llega hasta Guayaquil, por esa razón se debería usar adicionalmente otras redes entre Guayaquil y Quito, como las de Ex_Andinatel, Porta y Transelectric.

Desde Punta Carnero a Quito y Cuenca se tendrían que utilizar las redes de fibra de por lo menos dos operadores, como se indica en la figura 2.9.

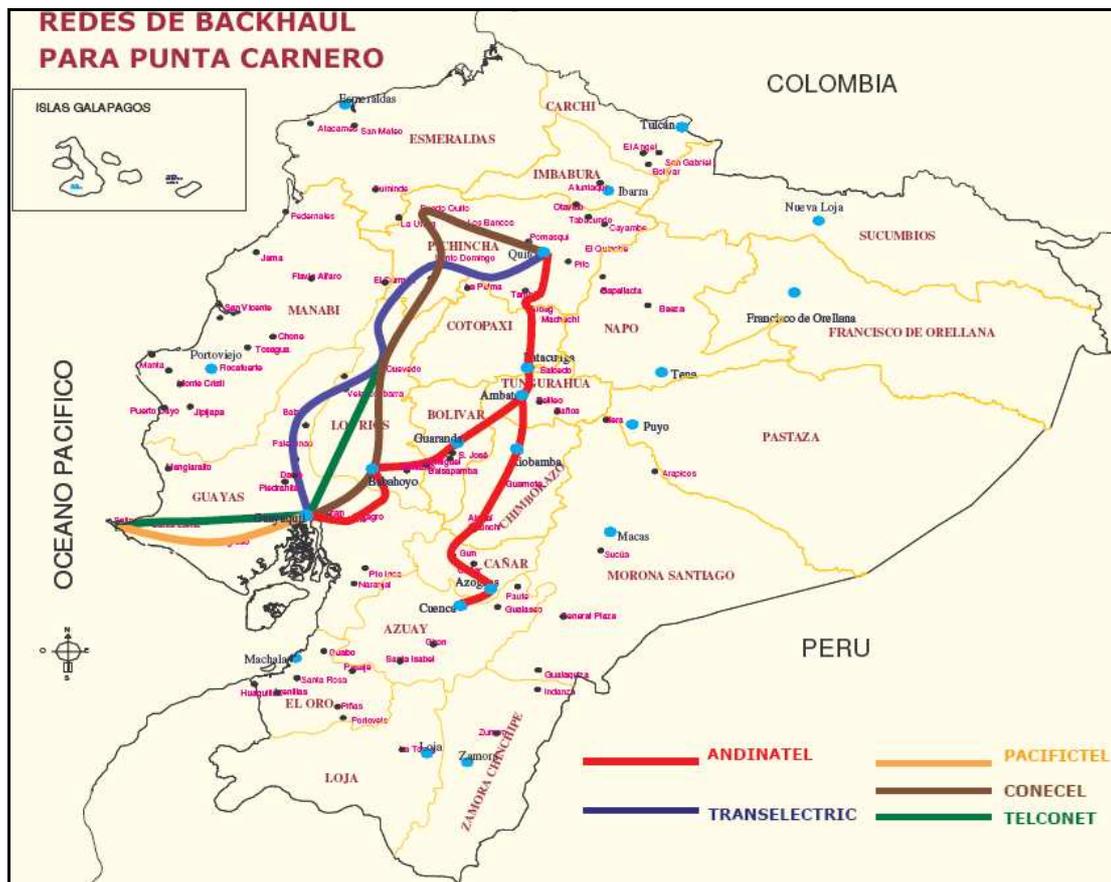


Fig. 2.9 Redes de *Backhaul* para Punta Carnero

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

Un punto que debe considerarse es que en caso de iluminar los hilos de fibra con la técnica DWDM, ninguna de las redes mencionadas tiene implementada esta técnica. Además habrá múltiples actores vinculados en la cadena de valor, con diferentes intereses en sus actividades comerciales y se tendrá alto grado de dependencia de terceros para el operador del cable submarino, en su actividad de comercialización de la capacidad internacional.

2.5.2 CABEZA DE PLAYA EN MANTA

En el caso de que por características de la topología de red de los cables *Emergia* o *Global Crossing*, haya que ubicar la cabeza de playa en un lugar intermedio entre Punta Carnero y Esmeraldas, el sitio más probable sería el puerto de Manta, favorable por la importancia del puerto. Como *Backhaul* se utilizaría la red de Transelectric que unirá a Manta con Quito y Guayaquil, (ver Fig. 2.10).



Fig. 2.10 Redes de *Backhaul* para Manta

[Fuente: http://www.transelectric.com.ec/transelectric_portal/images/section/mapa.pdf]

2.5.3 CABEZA DE PLAYA A UBICAR EN ESMERALDAS

Esta alternativa toma en cuenta la cercanía geográfica de Esmeraldas con el puerto de Buenaventura, lugar en que aterrizan los cable *Global Crossing* y *Energía*, así como la disponibilidad de cuatro hilos en el cable de fibra óptica del Oleoducto de Crudos Pesados – OCP – que interconecta a Esmeraldas con Lago Agrio; y, que en virtud de las obligaciones contraídas por el OCP suscritas el 15 de febrero de 2001 con el Estado ecuatoriano, a través del Ministerio de Energía y Minas, en el Contrato de Autorización para la construcción y operación del oleoducto de crudos pesados y prestación del servicio público de transporte de hidrocarburos, deberá permitir al Estado su futura utilización comercial.

El cable de fibra del OCP tiene una extensión aproximada de 500 Km. desde Esmeraldas hasta Lago Agrio, pasando por la localidad de Pomasqui a 20 Km. de la ciudad de Quito como puede observarse en la figura 2.11.



Fig. 2.11 Red de *Backhaul* para Esmeraldas

[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

Si los cables submarinos aterrizan en Esmeraldas, dispondrían de inmediato de una red de fibra óptica entre Esmeraldas y Pomasqui, a la cual solo habría que agregarle un tramo corto de fibra hasta Quito. Sin embargo existe una alternativa que podría evaluar el operador del *Backhaul* que es la utilización del trayecto de fibra óptica de Transelectric instalado entre Pomasqui y Quito, como se puede apreciar en la figura 2.10, para así completar la red de *Backhaul*. Por lo tanto sería necesario alquilar el tramo Pomasqui-Quito a Transelectric, pero en caso de no llegar a concretarse algún acuerdo, implicaría forzosamente realizar un tendido de fibra óptica para cubrir el tramo Pomasqui – Quito.

Las diferencias principales de esta alternativa con las anteriores están en la cercanía geográfica de Esmeraldas con Buenaventura y el hecho especial de que la red de *Backhaul* no sería de propiedad de ningún operador en particular. Su factibilidad estará en directa relación con las alternativas para la explotación comercial de cuatro hilos de fibras que entregó el OCP al CONATEL, y las condiciones para su operación y mantenimiento se suscribieron en el convenio de traspaso. Acto que se realizó el 26 de septiembre del 2006.

Según el convenio de traspaso el Estado Ecuatoriano puede hacer uso comercial del cable de fibra óptica de propiedad del OCP, sin afectar la aplicación primaria para el control de la operación del oleoducto. Como estos hilos recorren poblaciones con poco o ningún acceso a las telecomunicaciones, podrían ser utilizados para conectar a regiones económicamente deprimidas y rurales del país a servicios de telefonía, Internet, vídeo y transmisión de datos.

Queda ahora en el CONATEL, ente de administración y regulación de las telecomunicaciones en el Ecuador que actúa en representación del Estado Ecuatoriano en lo relacionado con la utilización comercial del cable de fibra óptica del OCP, seleccionar una operadora de telecomunicaciones con capacidad técnica y económica para la explotación comercial de los cuatro hilos de fibra óptica.

Como se dijo antes, para el desarrollo de este proyecto Esmeraldas es elegido como el punto de aterrizaje más adecuado, aunque queda en libertad de las

empresas extranjeras, el considerar el sitio óptimo para el aterrizaje del cable submarino en las costas ecuatorianas.

3. CAPÍTULO III

DISEÑO PROPUESTO PARA LA RED DE BACKHAUL

3.1 INTRODUCCIÓN

Debido al creciente requerimiento de acceder a la información que demanda la sociedad Ecuatoriana con la finalidad de estar conectados con el mundo, surge la necesidad de incrementar la capacidad internacional, por tal motivo se plantea la posibilidad de que una nueva cabeza de cable submarino aterrice preferentemente en la ciudad de Esmeraldas, de esta forma se utilizaría los cuatro hilos de fibra óptica del Oleoducto de Crudos Pesados pertenecientes al estado Ecuatoriano, y que interconecta a Esmeraldas con Lago Agrio pasando por Pomasqui en la ciudad de Quito.

Este diseño tiene como objetivo proveer una respuesta completa a los requerimientos del país en caso de utilizar el cable del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) como *Backhaul* para una nueva salida de cable submarino y así atender la capacidad de conectividad de los diferentes servicios de voz, datos e Internet hacia el *backbone* internacional.

Con el uso de los cuatro hilos de fibra óptica que dispone el estado Ecuatoriano e implementando sobre éstos la técnica DWDM, se tendría la solución idónea para satisfacer los requerimientos de conectividad, de forma que se pueda atender la creciente demanda de tráfico, y escalar en el futuro sin la instalación de nuevos terminales, amplificadores, etc.

El estudio de tráfico constituye el punto de partida obligatorio para dimensionar el ancho de banda internacional que se tomará en cuenta en el diseño de la red de *Backhaul*. Este análisis se apoya en estadísticas oficiales, las cuales son emitidas por la Superintendencia de Telecomunicaciones del Ecuador (SUPTTEL), sobre la base de la información suministrada por los operadores. Esta información será utilizada para realizar proyecciones del crecimiento del ancho de banda de la

conectividad internacional para el periodo 2008-2013, se recomienda realizar las proyecciones a un periodo no mayor de cinco años porque cuanto más largo es el plazo total de la proyección, menor es su certeza.

En el diseño se considera iluminar la fibra del *Backhaul* Esmeraldas – Quito con tecnología DWDM en razón de que Quito concentra la mayor parte del tráfico. Se ha tomado referencias técnicas de varios fabricantes con sus respectivos equipos, seleccionando, como justificará más adelante, a Ericsson con el equipo Marconi MHL3000 *Core*, que a más de ser una marca reconocida, el MHL3000 es una avanzada y flexible plataforma de transporte que puede ser configurada para proveer una solución óptima en aplicaciones *Long Haul* (<700 Km) y provee la capacidad de escalar entre 40 a 80 canales de 10Gbps.

3.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DE LAS TELECOMUNICACIONES EN ECUADOR

El sector de las telecomunicaciones se ha desarrollado de manera asimétrica en los últimos años, evidenciándose un permanente crecimiento en la oferta y demanda de los servicios de telefonía móvil y un estancamiento en la oferta de la telefonía fija como puede verse en la figura 3.1.

“**La telefonía fija** se caracterizó durante muchos años por ser la que mayor número de suscriptores representaba, frente a los demás servicios de telecomunicaciones. Esta situación se mantuvo en Ecuador hasta el año 2002, cuando la cantidad de suscriptores de telefonía móvil superó a la de telefonía fija.”⁶⁶

De acuerdo a las estadísticas de la SUPTEL, los resultados a diciembre del 2008 muestran que la telefonía fija es manejada mayoritariamente por el Estado a través de las operadoras Ex_ANDINATEL S.A., Ex_PACIFICTEL S.A. y ETAPA (Fig. 3.2), mientras que para la telefonía móvil se presenta un esquema inverso,

⁶⁶ ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

los operadores privados tienen una amplia participación frente a una mínima del Estado, (Fig. 3.3).

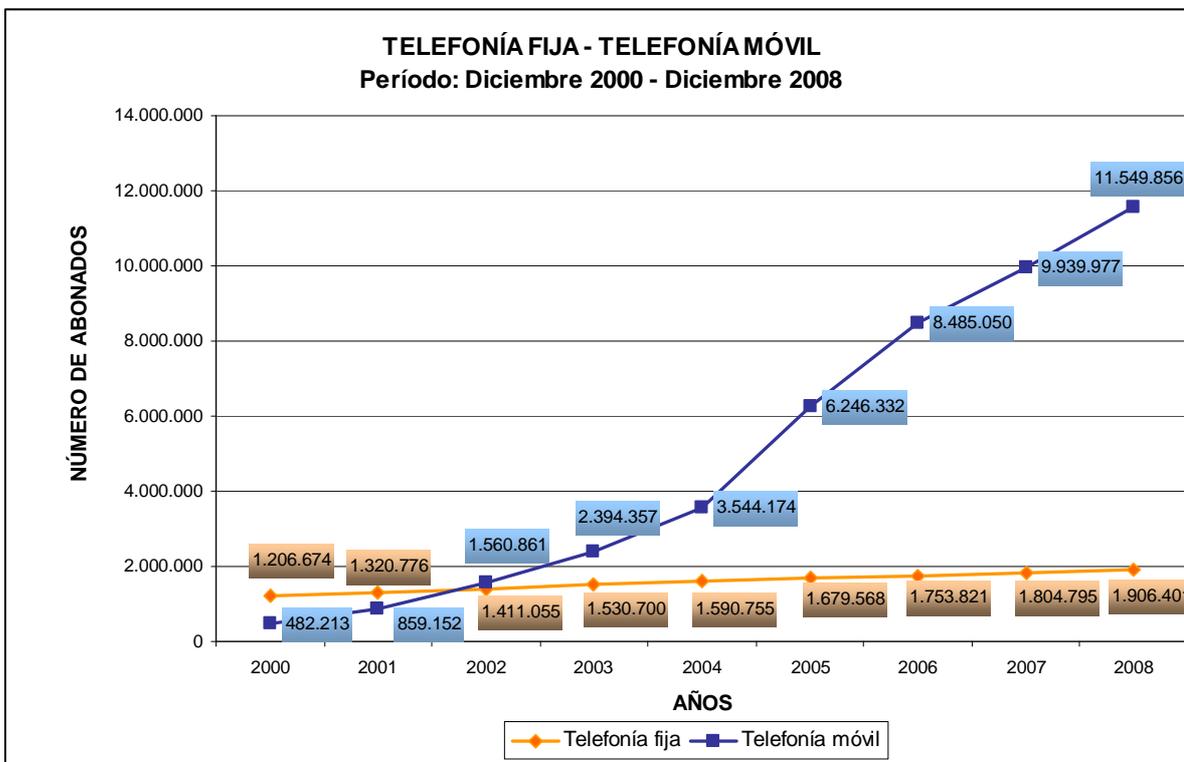


Fig. 3.1 Número de abonados de telefonía fija y telefonía móvil desde el año 2000 hasta diciembre del 2008 remitidos por los operadores a la SENATEL [Fuente: SUPTEL]

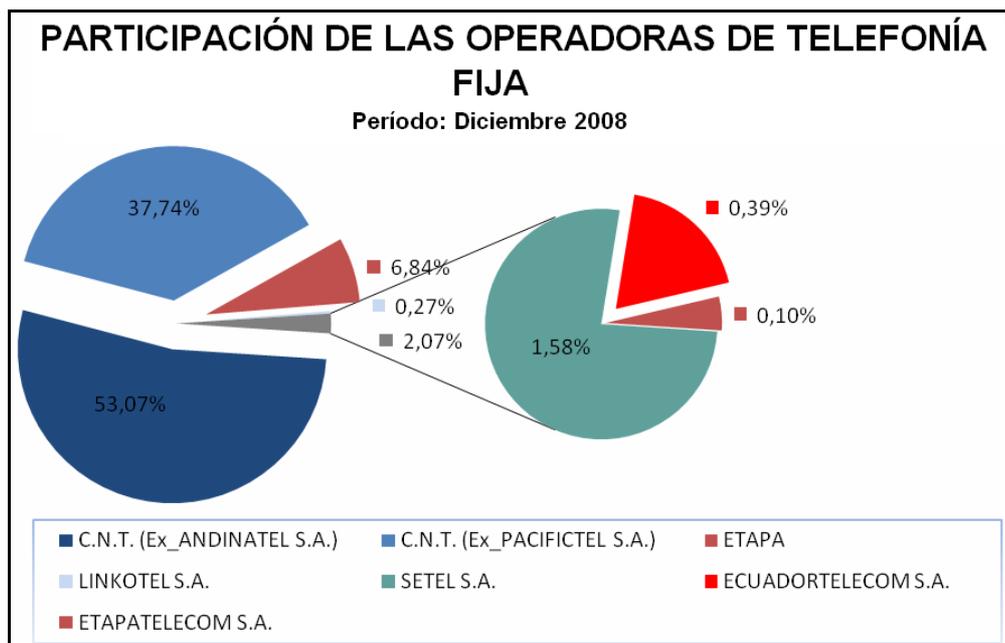


Fig. 3.2 Participación en el mercado de los operadores de telefonía fija a diciembre del 2008 [Fuente: SUPTEL]

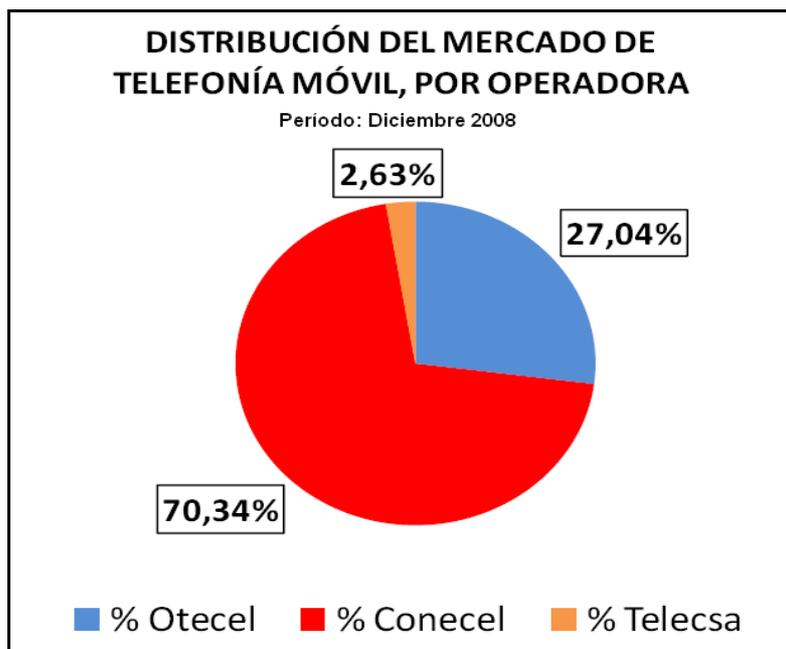


Fig. 3.3 La participación en el mercado de los operadores de telefonía móvil
[Fuente: SUPTEL]

La telefonía móvil en el año 2008 presentó un crecimiento del 16,20% y su densidad por cada 100 habitantes pasó a ser del 83,66%. Se considera que la dinámica del mercado de los móviles se mantendrá a ritmos de crecimiento menor, en razón al acercamiento de la saturación del mercado.

Sin embargo en ambos casos se han satisfecho básicamente las necesidades de telefonía de los principales centros poblados, atendiendo en menor medida a otros sectores menos favorecidos que se encuentran ubicados en las áreas urbanas, urbano marginales y rurales, que hasta la fecha, en pleno siglo XXI, siglo de la información, mantienen un servicio de baja calidad, y en muchos casos, aún no existe cobertura.

“La tendencia mundial del mercado demuestra que la telefonía fija aún puede seguir desarrollándose, principalmente con la aplicación de nuevas tecnologías, y ofreciendo nuevos servicios como banda ancha, televisión prepagada, entre otros, siendo de vital importancia su proyección y desarrollo orientados a la convergencia de servicios.”⁶⁷

⁶⁷ PLAN NACIONAL DE DESARROLLO DE LAS TELECOMUNICACIONES 2007 – 2012, Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL).

En el mercado de la **telefonía de larga distancia internacional** permanecen como líderes Ex_Andinatel y Ex_Pacifictel, seguidos, con una gran diferencia, por Etapa y los operadores celulares, quienes están autorizados para cursar tráfico telefónico internacional a sus abonados.

El **servicio de transmisión de datos** que se distingue por el uso de enlaces de alta velocidad para conexiones dedicadas a usuarios corporativos o grandes clientes, ha dejado de ser el principal consumidor de la capacidad de transporte nacional e internacional, porque ha sido desplazado por la masificación de los accesos de banda ancha, debido a que tanto los hogares como las PYMES (pequeñas y medianas empresas) usan conexiones de igual o mayor velocidad a la de muchos usuarios corporativos.

3.2.1 ACCESO A INTERNET

En el Ecuador la conectividad y acceso a Internet está determinado por la cantidad de contratos que existen para este servicio.

Es importante mencionar que en el año 2008 los suscriptores aumentaron un 15,85%, alcanzando un total de 320.572 suscripciones. Realizando el análisis respectivo entre los suscriptores de Internet dedicados y conmutados, teniendo en cuenta que las características de estos dos tipos de acceso son diferentes, es de resaltar que los suscriptores dedicados aumentaron durante el 2008 en un 75,96%, mientras que los conmutados disminuyeron en un 12,53%, (Tabla 3.1).

Medio de acceso	Dic-07	Dic-08	Crecimiento del mercado en base al último año
Número de Dedicados	88.733	156.139	75,96%
Número de Conmutados	187.981	164.433	-12,53%
Total de suscriptores	276.714	320.572	15,85%
Nota: Considerando cuentas dedicadas a todas aquellas cuentas que utilizan otros medios que no sea Dial-up para acceder a Internet como puede ser ADSL, Cable Modem, Radio, etc.			

Tabla 3.1 Distribución de suscriptores de Internet en el Ecuador 2007 – 2008

[Fuente: SUPTEL]



Fig. 3.4 Distribución de subscriptores de Internet en el Ecuador a diciembre 2008

[Fuente: SUPTEL]

En la figura 3.4 se observa que aún existe preferencia de los usuarios por las cuentas conmutadas a pesar de ser una conexión de acceso al Internet lenta. Esto se debe específicamente a sus bajos costos.

Sin embargo se está acogiendo rápidamente otras tecnologías como conexiones de acceso dedicado vía xDSL (ADSL o SDSL), Cable MODEM o fibra óptica, que permiten utilizar un número mayor de aplicaciones y obtener mejores desempeños, pero el costo de estas conexiones dedicadas, sigue siendo el limitante de su crecimiento, a pesar de que en los últimos dos años los costos se han reducido considerablemente (Fig.3.5). Sin embargo, se espera que a corto plazo la relación se invierta y las conexiones ADSL superen a las dial-up.

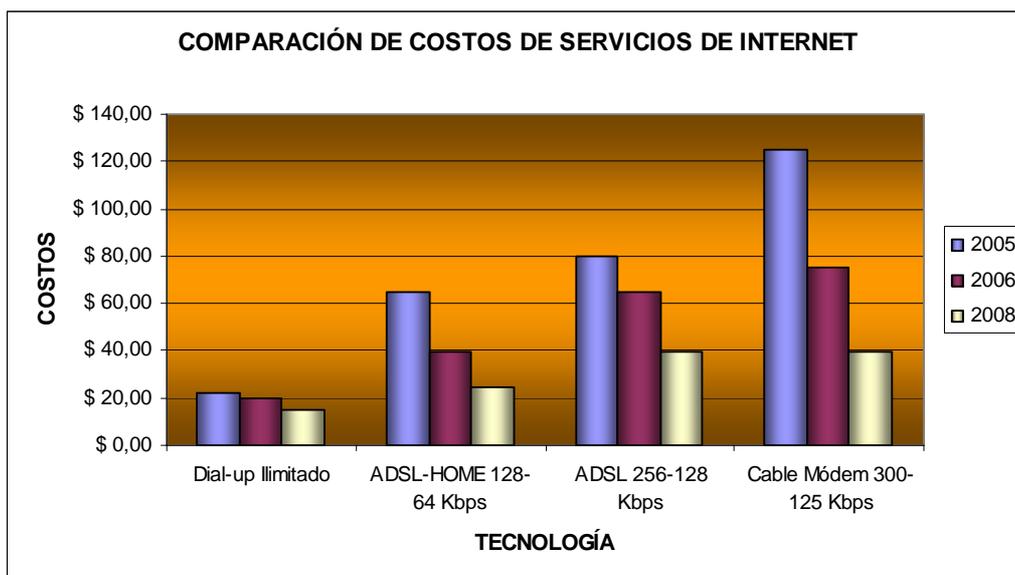


Fig. 3.5 Comparación de costos de acceso a Internet entre los años 2005-2006-2008

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

3.2.2 EVOLUCIÓN DE ACCESO A INTERNET EN ECUADOR

A fin de analizar la evolución que ha tenido el acceso a Internet en Ecuador se incluye la tabla 3.2, la cual muestra el número de suscriptores a Internet dedicado y conmutado en año calendario y en períodos de diciembre del año anterior a diciembre del año siguiente, para así también realizar un análisis de la tasa de crecimiento de la demanda de conexiones a Internet.

CONEXIONES A INTERNET (Diciembre 2001 – Diciembre 2007)								
Medio de acceso	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Número de dedicados	2.623	6.499	4.563	11.599	26.786	65.463	88.733	156.139
Número de conmutados	83.007	94.164	102.787	108.169	110.540	141.814	187.981	164.433
Tasa de crecimiento de suscriptores de Internet en base al último año								
Medio de acceso	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Dedicados		147,77%	-29,79%	154,20%	130,93%	144,39%	35,55%	75,96%
Conmutados		13,44%	9,16%	5,24%	2,19%	28,29%	32,55%	-12,53%
Promedio de la tasa de crecimiento para Internet dedicado: 94,15%								
Promedio de la tasa de crecimiento para Internet conmutado: 11,19%								

Tabla 3.2 Distribución y las tasas de crecimiento de suscriptores de Internet en el Ecuador en el periodo comprendido entre Diciembre 2001 – Diciembre 2008

[Fuente: CONATEL]

Un dato a resaltar es el promedio de las tasas de crecimiento de suscriptores de Internet dedicado, que alcanzó un 94,15% en el periodo 2002 – 2008, lo cual evidencia el uso creciente de las tecnologías de los servicios dedicados que se caracterizan por sus mayores velocidades de transmisión.

La figura 3.6 muestra el crecimiento de la demanda de servicios de Internet (conexiones conmutadas y dedicadas) en el periodo de diciembre del 2001 a diciembre del 2008 y se puede afirmar que el Internet se encuentra en la fase de despegue, con buenas expectativas en el desarrollo de los accesos de Banda Ancha.

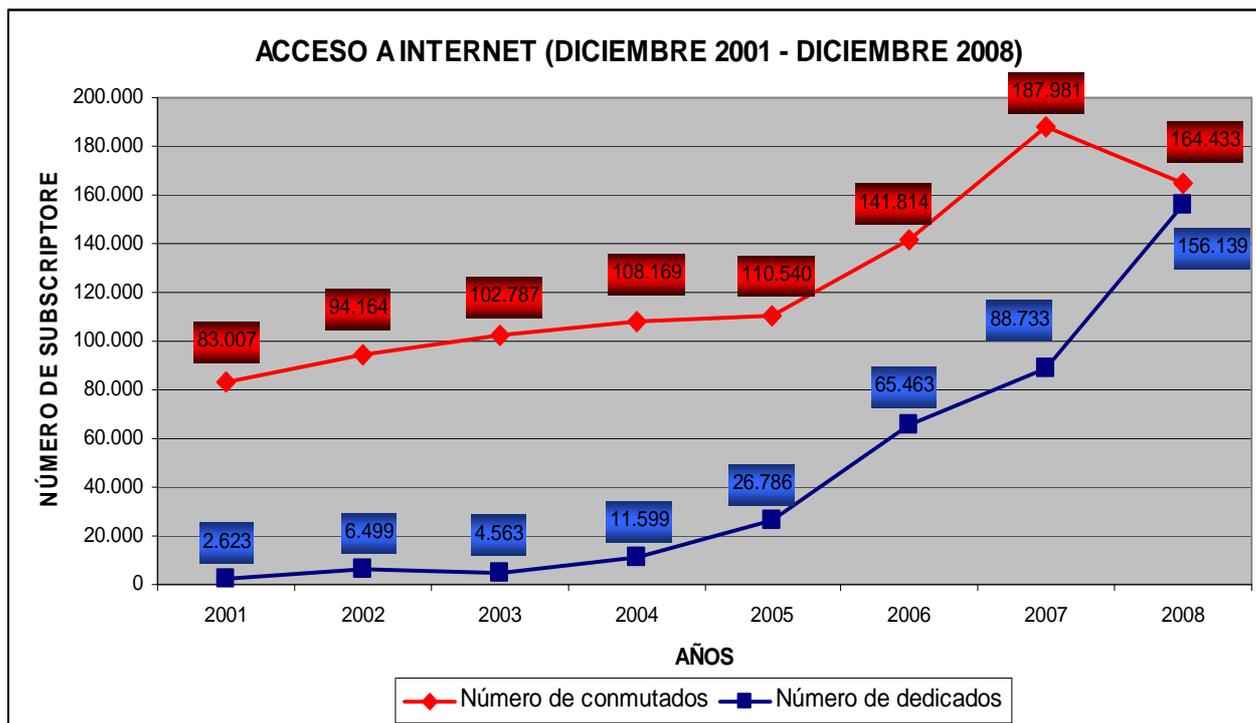


Fig. 3.6 Evolución de los subscriptores de Internet a nivel nacional desde el año 2001 hasta diciembre del 2008.

[Fuente: CONATEL]

3.2.3 PARTICIPACIÓN DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIO DE INTERNET (ISP) EN EL MERCADO

El mercado de los servicios de datos y acceso a Internet es grande en proveedores, en enero del 2009 se contabilizaron 171 proveedores del servicio de valor agregado de Internet (ISP).

Según el número total de subscriptores de Internet que resulta de la suma entre las cuentas dedicadas y las cuentas conmutadas, los Proveedores de Servicio Internet (ISP) mas representativos por la cantidad de suscriptores que poseen, son: Ex_Andinatel, Suratel, Telecsa (Alegro), Etapa Telecom, Easynet, Punto Net, Lutrol, Ex_Pacifictel, Megadatos, Panchonet, Ecuador Telecom, Telconet, Conecel y Satnet, (ver Fig. 3.7).

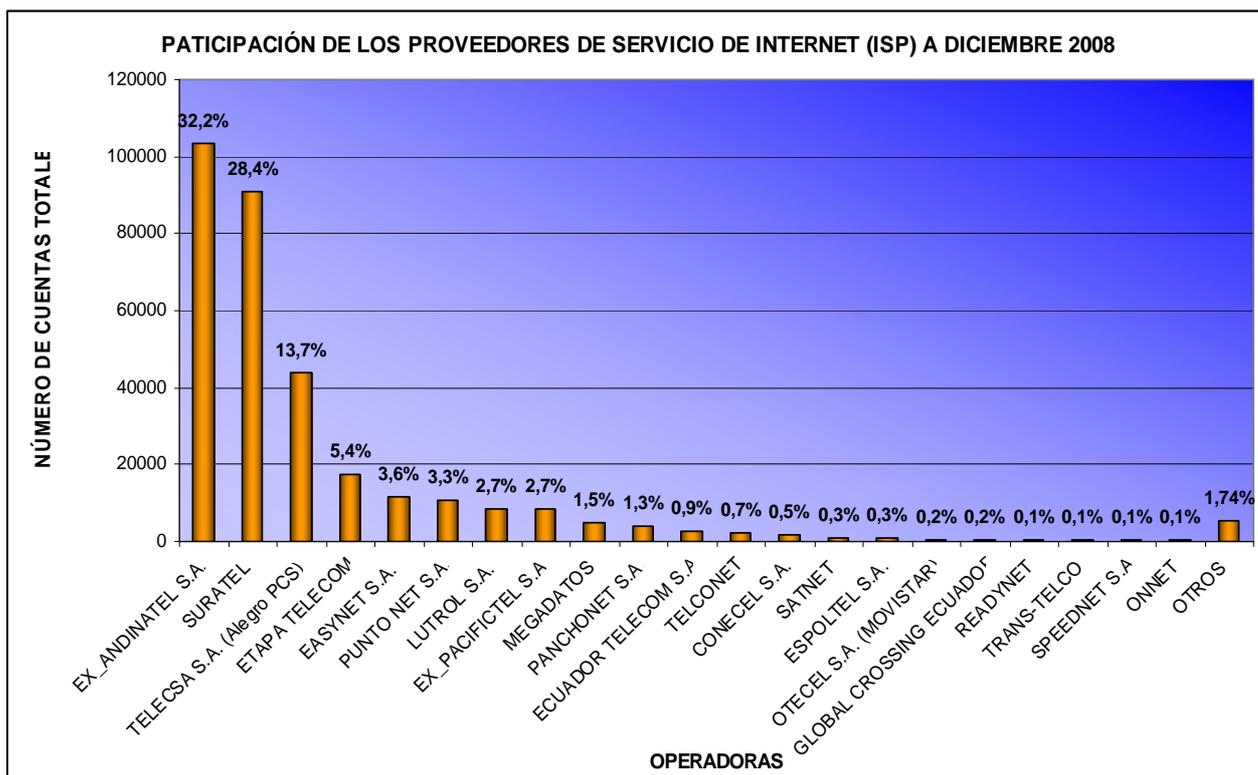


Fig. 3.7 Participación de los proveedores según el número total de suscriptores de Internet conmutado y dedicado a diciembre del 2008

[Fuente: SUPTEL]

Como se muestra en la figura 3.8 los servicios de banda ancha, se concentran mayoritariamente en dos operadores: Suratel una empresa del grupo TV Cable con su acceso de cable módem y Ex_Andinatel con su acceso ADSL y SDSL. Estos dos operadores concentran el 72,43% del mercado de banda ancha, pero Suratel⁶⁸ lidera esta franja con un 58,28% en razón a la introducción temprana del servicio⁶⁹.

Con los datos anteriores se puede afirmar que para los servicios dedicados las tecnologías de cable módem y xDSL son las más difundidas a nivel nacional; una situación diferente sucede con la fibra óptica, porque por lo general ésta es usada para el transporte de datos a nivel de *backbone* o para clientes que demandan gran consumo de ancho de banda.

⁶⁸ Suratel ofrecen a sus clientes servicio de telefonía, Internet y televisión por cable.

⁶⁹ <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/546/7/T10469CAP2.pdf>

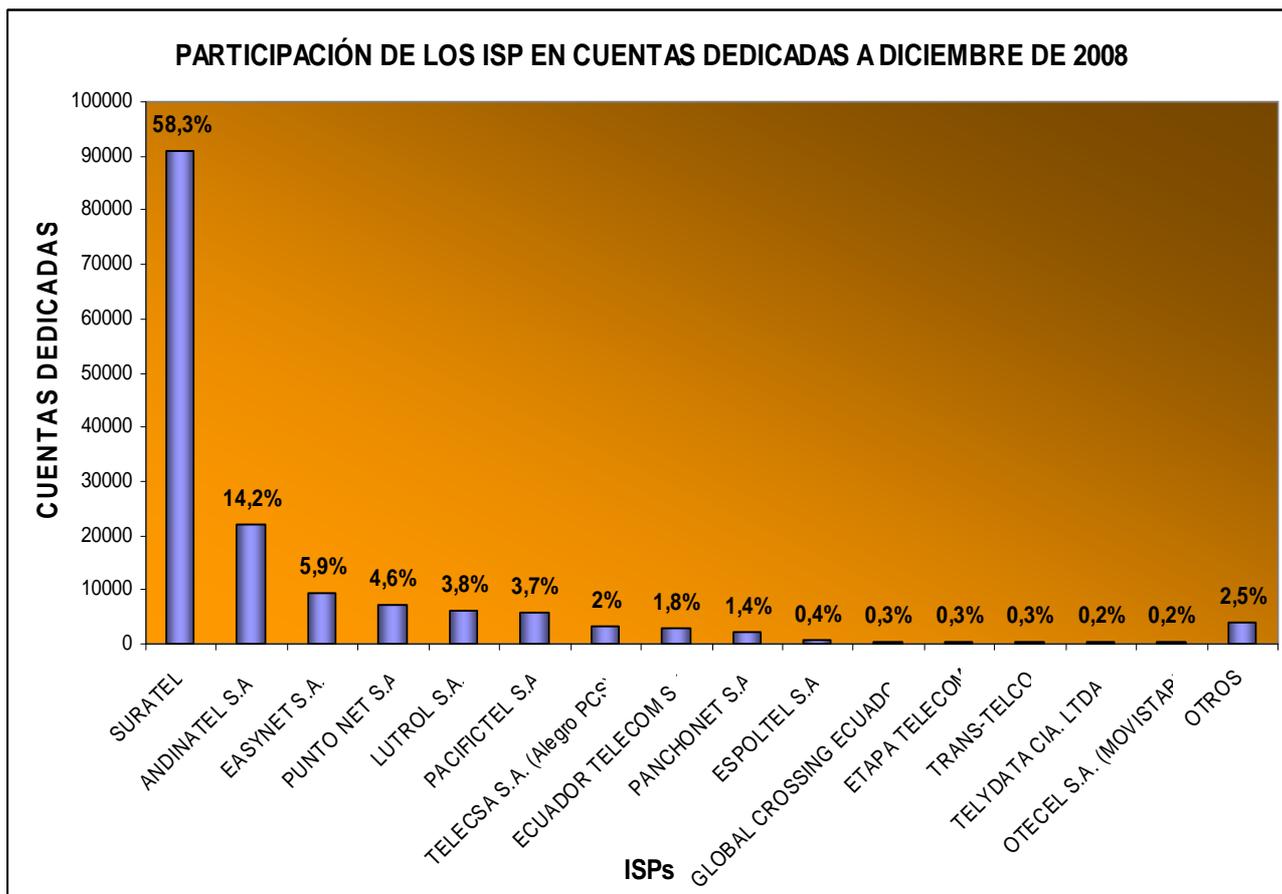


Fig. 3.8 Participación de los proveedores de acuerdo al número de cuentas dedicadas para acceso a Internet a diciembre del 2008

[Fuente: SUPTTEL]

3.3 CAPACIDAD DE CONEXIÓN AL *BACKBONE* INTERNACIONAL ACTUAL Y FUTURA DEL ECUADOR (2008- 2013)

De acuerdo con la información suministrada por los operadores en Ecuador a ASETA, la capacidad usada por ellos para conectarse al *backbone* internacional de Internet, en el año 2005 fue de 12 STM-1s⁷⁰; es decir de 1.86 Gbps. Sin embargo esta capacidad internacional incluye Internet, voz y datos, por esta razón se inicia con un análisis de la capacidad actual en cada uno de estos servicios y en base a estos resultados se realizan las proyecciones.

⁷⁰ Un STM-1 se define como el formato de transmisión básico para SDH y tiene una capacidad de 155 Mbps.

Es necesario indicar que para realizar las proyecciones de la capacidad de conexión al *backbone* internacional del país hasta el año 2013, se tomaron cifras de la información recopilada en el trabajo titulado “Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.,” realizado por la Asociación de Empresas de Telecomunicaciones de la Comunidad Andina (ASETA), solicitado por el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), además de datos oficiales publicados por la SUPTEL y el CONATEL.

3.3.1 ANCHO DE BANDA PARA EL ACCESO A INTERNET ⁷¹

Para determinar la capacidad total para el acceso a Internet en el Ecuador, es necesario considerar todos los servicios de acceso a Internet, como: los servicios de acceso conmutado, los servicios de acceso dedicado e Internet con fines sociales.

Además es importante establecer como influye la existencia del NAP⁷², a través del cual el tráfico de Internet que tiene origen y destino en el país, utiliza solamente canales locales o nacionales; sin embargo por el bajo desarrollo de su contenido local, en algunos casos el tráfico que se considera local aún sigue saliendo por otra rutas, por ejemplo a Estados Unidos y luego regresa, por lo tanto se paga extra por un tráfico que no debería salir del país.

3.3.1.1 Acceso conmutado y dedicado

Mediante la tabla 3.2, en donde se puede apreciar un histórico del número de suscriptores conmutados y dedicados en el Ecuador desde diciembre del 2001 a

⁷¹ ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

⁷² Un NAP es un punto de interconexión nacional de los proveedores de Acceso a Internet (ISP) a través de un enlace nacional de alta velocidad, donde éstos se conectan para aprovechar el tráfico local.

diciembre del 2008, se podrá calcular las proyecciones del crecimiento de suscriptores hasta el año 2013.

Para realizar las proyecciones se utiliza el método de regresión a través de la herramienta *Microsoft Excel*, en el cual se selecciona la ecuación que mejor se ajustan a la curva real de crecimiento de los suscriptores a Internet a través del tiempo (desde diciembre del 2001 a diciembre del 2008), tanto para cuentas dedicadas como para cuentas conmutadas.

Para el crecimiento de suscriptores de cuentas dedicadas, una regresión polinomial de tercer grado es la que mejor se ajusta a la curva generada, como se muestra en la figura 3.9.

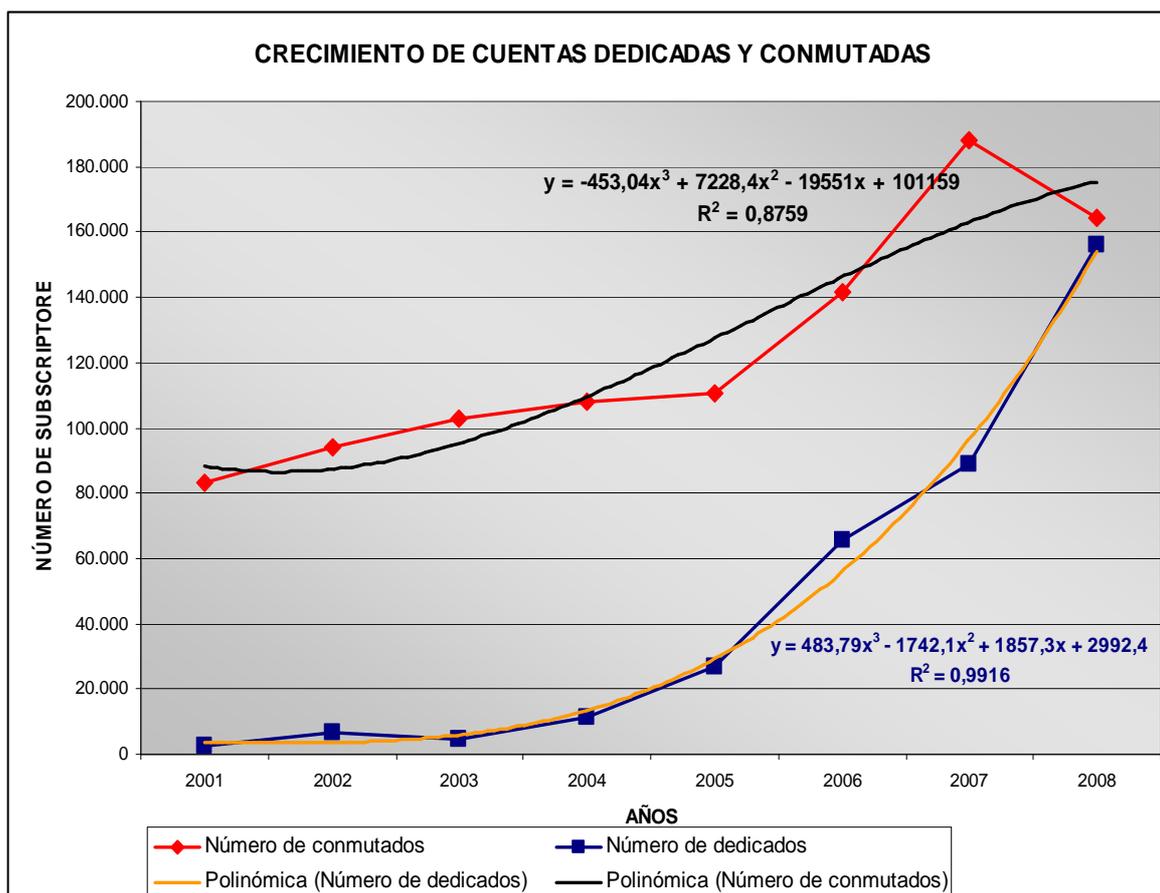


Fig. 3.9 Curvas que se ajustan al crecimiento de cuentas dedicadas y conmutadas

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

La ecuación polinomial que se obtiene para las cuentas dedicadas es igual a $y = 483,79x^3 - 1742,1x^2 + 1857,3x + 2992,4$, donde x representa los años y y el

número de subscriptores, con un coeficiente de determinación⁷³ (R^2) igual a 0.9916, que indica una correlación casi perfecta entre la curva original y las aproximaciones polinomiales.

De igual forma, se realiza el mismo procedimiento para el crecimiento de subscriptores de las cuentas conmutadas, en este caso la curva que mejor se ajusta es una regresión polinomial de tercer orden siendo $y = -453,04x^3 + 7228,4x^2 - 19551x + 101159$ y obteniéndose un coeficiente de R^2 igual a 0,8759, como puede verse en la figura 3.9.

Para proyectar el crecimiento de las conexiones a Internet hasta el año 2013 se utiliza las ecuaciones obtenidas al aplicar el método de regresiones polinomiales y se reemplazan los valores en x desde 9 (que representa el año 2009) hasta 13 (que representa el año 2013), para así obtener el número más probable de subscriptores entre los años 2009 – 2013. Los resultados de las proyecciones de las cuentas conmutadas y dedicadas se detallan en la tabla 3.3.

Crecimiento de las conexiones a Internet hasta el año 2013					
	2009	2010	2011	2012	2013
Número Cuentas conmutadas	180.375	175.390	157.679	124.524	73.208
Número Cuentas dedicadas	231.281	331.145	456.553	610.407	795.609

Tabla 3.3 Proyección de crecimiento de los subscriptores de Internet en el Ecuador

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Pero para una mejor apreciación se puede observar la figura 3.10, en donde se muestra la evolución que tendrían las conexiones de banda ancha y dial-up en los próximos cinco años.

⁷³ El coeficiente de determinación (R^2) es un parámetro que indica la calidad del ajuste de la curva a los datos reales. El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación, cuyo valor varía entre 0 y 1, siendo cero el valor que indica la no existencia de ninguna correlación y 1 significa que existe una correlación perfecta entre la curva original y las aproximaciones polinomiales.

El coeficiente de correlación es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

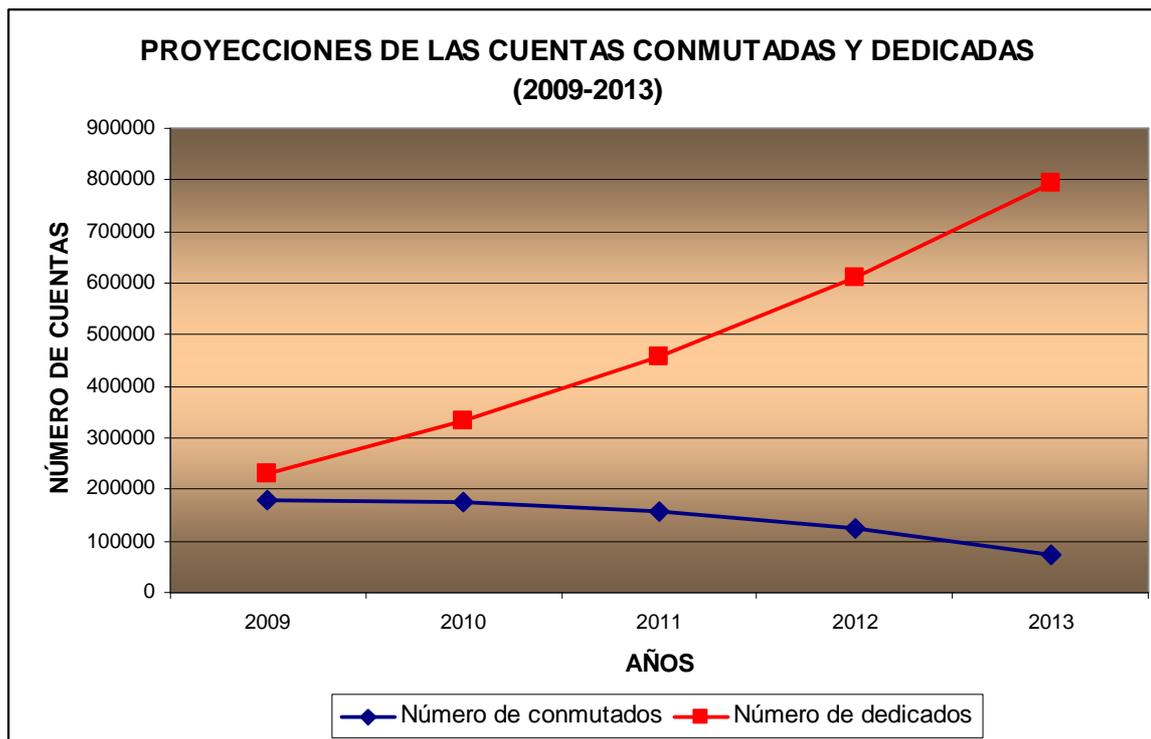


Fig. 3.10 Curvas que se ajustan al crecimiento de las conexiones dedicadas y conmutadas en el periodo comprendido entre Diciembre 2009 – Diciembre 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Con las proyecciones del crecimiento que tendría la banda ancha y las conexiones dial-up en los próximos cinco años, se calcula la tasa de crecimiento anual, (Tabla 3.4).

Tasa de crecimiento de las conexiones a Internet hasta el año 2013					
	2009	2010	2011	2012	2013
Cuentas conmutadas	9,70%	-2,76%	-10,10%	-21,03%	-41,21%
Cuentas dedicadas	48,13%	43,18%	37,87%	33,70%	30,34%

Tabla 3.4 Tasa de crecimiento de las conexiones de Internet en el Ecuador en el periodo comprendido entre Diciembre 2009 – Diciembre 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.3.1.2 Internet Social

Desde la Agenda Nacional de Conectividad se han planteado proyectos a corto y mediano plazo que involucran claramente el tema del desarrollo de Internet con el apoyo del Estado. Dentro de estos proyectos se destacan:

Estrategia de Gobierno Electrónico: Contiene los lineamientos principales para desarrollar una plataforma de Gobierno en Línea mediante la implementación de un prototipo funcional de Portal Único de Trámites del Estado. Contempla proyectos piloto como son: Sistema de compras públicas del Estado, registro civil e Identificación de ciudadanos y programa laboral.

Proyecto Piloto de Telesalud: El objetivo fundamental es integrar a la infraestructura nacional para la comunicación y la información a las instituciones administrativas de salud, a la red pública del Ministerio de Salud Pública que incluye puestos de salud, centros y subcentros de salud, hospitales de primer, segundo y tercer nivel, de tal forma que conformen una plataforma tecnológica que permita mejorar la calidad en la atención de la salud.

Teleducación: Proyecto para que el CONATEL a través del FODETEL subsidie el acceso a Internet de varias escuelas del país a fin de contribuir con la educación. En este último ítem se encuentran los proyectos PROMEC⁷⁴, Internet para centros educativos y VoIP⁷⁵.

Considerando que varios de los proyectos sociales que tienen como finalidad otorgar el acceso de Internet a varias escuelas del país, a través del FODETEL, se vienen desarrollando desde el año 2006 y algunos de ellos iniciaron su operación en el año 2007 como el proyecto “Quito Educenet” del Municipio de Quito y “Edufuturo” del Consejo Provincial de Pichincha, es posible asegurar que el acceso de Internet social inicia desde el año 2007, sin embargo cabe mencionar que para el año 2010 el Estado tiene planificado poner en marcha el proyecto denominado “Internet para todos”, el cual contempla la instalación de 5000 Telecentros⁷⁶ en todo el territorio nacional, además con el Plan Nacional de Conectividad 2008-2010, se tiene por objetivo proveer de Internet al 100% de

⁷⁴ PROMEC, Proyecto de Modernización de los Sectores, Eléctrico, Telecomunicaciones y Servicios Rurales

⁷⁵ VoIP, Voz sobre el protocolo Internet también denominado telefonía IP, es el enrutamiento de conversaciones de voz a través de Internet o cualquier otra red basada en IP.

⁷⁶ Telecentro: Es el centro de telecomunicaciones en comunidades rurales y urbano marginales para la prestación de los siguientes servicios y facilidades: voz, datos, video, multimedia y acceso a Internet. Además puede contar con instalaciones para teleducación, telemedicina y otras afines.

centros educativos urbanos y al 55% de establecimientos rurales. Adicionalmente se conectarán todos los hospitales, centros de salud y dispensarios médicos.

Mediante la información de los proyectos desarrollado a través del FODETEL, ASETA hace un estimado del desarrollo de estos proyectos sociales hasta el año 2010 y se tiene la siguiente distribución de instalación de puntos:

Internet para Teleducación					
	2006	2007	2008	2009	2010
Telecentros	0	1010	700	700	600
Internet para centros educativos	0	90	100	100	50
Internet VoIP	0	176	290	175	148
Beneficiarios del Internet Social por año	0	1276	1090	975	798
Total de beneficiarios	0	1276	2366	3341	4139
Tasa de crecimiento en base al último año	-----	-----	85,42%	41,21%	23,89%

Tabla 3.5 Desarrollo de proyectos sociales estimado por ASETA.

[Fuente: ASETA]

Cabe resaltar que los beneficiarios del Internet Social representan a los centros educativos, centros de salud, los telecentros o locutorios que utilizan voz IP es decir a cualquier establecimiento dotado de Internet.

Para las proyecciones de los tres años restantes 2011, 2012 y 2013 se utiliza la herramienta de Excel, en donde se obtiene un crecimiento lineal representado por la recta $y = 956,4x + 389,5$ con un coeficiente de determinación de 0,9953, como se puede observar en la figura 3.11.

Para proyectar el crecimiento del Internet social hasta el año 2013 se utiliza la ecuación lineal y se reemplazan los valores en x desde 5 (que representa el año 2011) hasta 7 (que representa el año 2013), para así obtener el número más probable de beneficiarios de Internet social entre los años 2011 – 2013, como se detalla en la tabla 3.6.

Internet para Teleducación en los años 2011, 2012 y 2013			
	2011	2012	2013
Número total de beneficiarios	5172	6128	7084
Tasa de crecimiento en base al último año	24,95%	18,49%	15,61%

Tabla 3.6 Proyecciones del número de beneficiarios del Internet Social

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

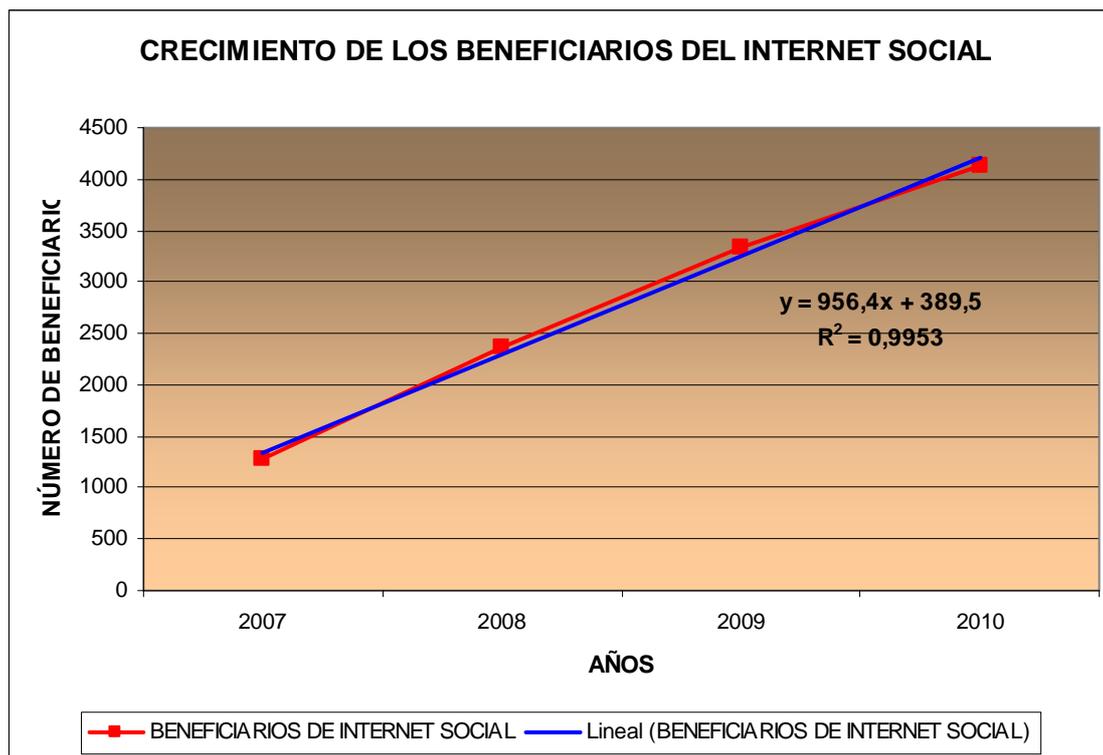


Fig. 3.11 Crecimiento del Internet Social en el periodo 2007 - 2010

[Fuente: ASETA]

3.3.1.3 NAP

Los NAPs (*Network Access Point*) son grandes centros de acceso y distribución de tráfico de Internet (tráfico de data, voz, imágenes, video etc. y todas las formas de telecomunicaciones digitales) que operan como si fueran "*hubs*" de grandes aeropuertos internacionales, en los cuales en lugar de líneas aéreas o empresas de transporte, participan empresas y aplicaciones de Telecomunicaciones, y en general proveedores de acceso Internet y grandes usuarios. La función básica de un NAP es el intercambio de tráfico de Internet, proceso conocido como "*peering*"⁷⁷ y es el servicio básico ofrecido por todos los NAP.

Ecuador cuenta con un NAP.EC para intercambiar localmente información de tráfico de Internet originado y terminado en el Ecuador, que es administrado por la Asociación Ecuatoriana de Proveedores de Valor Agregado e Internet (AEPROVI).

⁷⁷ Peering es la práctica voluntaria de interconectar redes distintas en Internet con el propósito de intercambiar tráfico entre los clientes de estas redes.

Los proveedores de servicio de Internet conectados, aceptan todo el tráfico proveniente del NAP.EC y originado en los demás participantes.

Dentro de las facilidades del NAP del Ecuador, en agosto del 2007 se puso en funcionamiento una copia del servidor raíz F⁷⁸, el cual es administrado por ISC⁷⁹ (*Internet Systems Consortium*), quien junto a LACNIC⁸⁰ (Registro de Direcciones IP para América Latina y el Caribe) dentro del marco del proyecto denominado “+Raices” promueven la instalación de copias de este servidor en América Latina y el Caribe. Esta implementación permitirá una notable mejora en el acceso directo a la red por parte de los usuarios y proveedores de servicios de Internet ecuatorianos.

Actualmente existen dos nodos, uno ubicado en Quito y otro ubicado en Guayaquil, a los cuales se encuentran conectados los principales proveedores de acceso a Internet. No obstante, dado el bajo desarrollo de contenido local, el tráfico que se cursa a través de esta plataforma es aún incipiente. Para una mejor

⁷⁸ Un servidor raíz es un servidor de nombres de dominio (DNS) y son los que poseen la información que da inicio a las consultas. Una limitante técnica no permite que estos servidores sean más de 13, porque un paquete IP no será fragmentado hasta los 576 bytes (en IPv4), si bien es posible instalar 15 entradas en un paquete de este tamaño, el 13 se seleccionó como un límite confiable. Los 13 servidores son identificados por letras desde la A hasta la M, de estos 13 servidores de raíz originales, diez estaban ubicados en Estados Unidos, dos en Europa y uno en Japón, lo cual generaba bastante preocupación respecto del pequeño número de servidores y de su concentración geográfica. Para resolver este problema, se empezó a usar una técnica llamada anycast, que permite crear clones de estos servidores raíz (llamados espejos), los cuales una vez en operación son indistinguibles de los originales. Es a través de esta tecnología anycast que se realizan las instalaciones de servidores raíz del proyecto +Raices.

⁷⁹ ISC, Internet Systems Consortium es una organización pública sin fines de lucro, con una larga trayectoria en el desarrollo y producción de software de uso abierto.

⁸⁰ LACNIC, Registro de Direcciones de Internet para América Latina y el Caribe es un organismo internacional sin fines de lucro, que administra y asigna en forma responsable las Direcciones IP y recursos relacionados (Números Autónomos y Resolución Inversa) para América Latina y el Caribe.

apreciación, el tráfico local corresponde al 5% del tráfico total desde Ecuador y el 95% al internacional.

Para el cálculo del tráfico es importante, considerar el desarrollo que tendrá el tráfico de “*peering*” impulsado por el crecimiento de los servicios de Hosting⁸¹, así como el desarrollo de contenido local que permitiría la utilización de conexiones locales para el intercambio de tráfico entre servidores y direcciones IP locales.

El crecimiento de ancho de banda para el tráfico de *peering* estimado por ASETA en el período 2005-2007 se muestra en la tabla 3.7.

Crecimiento del tráfico <i>peering</i> (STM-1s) para el período 2005-2007			
	2005	2006	2007
Ancho de banda	0,4	0,44	0,51
Crecimiento		10%	15%

Tabla 3.7 Crecimiento del tráfico *peering* en STM-1 hasta el año 2007.

[Fuente: ASETA]

En base a los datos anteriores, y mediante la herramienta de *Microsoft Excel* se obtiene una ecuación polinomial de segundo grado, que se adapta perfectamente al crecimiento del tráfico *peering* como se muestra en la gráfica 3.12.

Con la ecuación polinomial, se calculan las proyecciones del ancho de banda para el tráfico *peering* hasta el año 2013, así como la correspondiente tasa de crecimiento anual obteniendo los siguientes resultados:

Tráfico de <i>peering</i> (STM-1s) para el período 2008-2013						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ancho de banda	0,61	0,74	0,9	1,09	1,31	1,56
Crecimiento	20,55%	21,31%	21,62%	21,11%	20,18%	19,08%

Tabla 3.8 Proyección del crecimiento del tráfico de *peering* en STM-1 del periodo 2008-2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

⁸¹ El servicio de Hosting implica el alquiler de un espacio en el disco rígido de un servidor conectado directamente a la red de Internet para alojar su sitio Web.

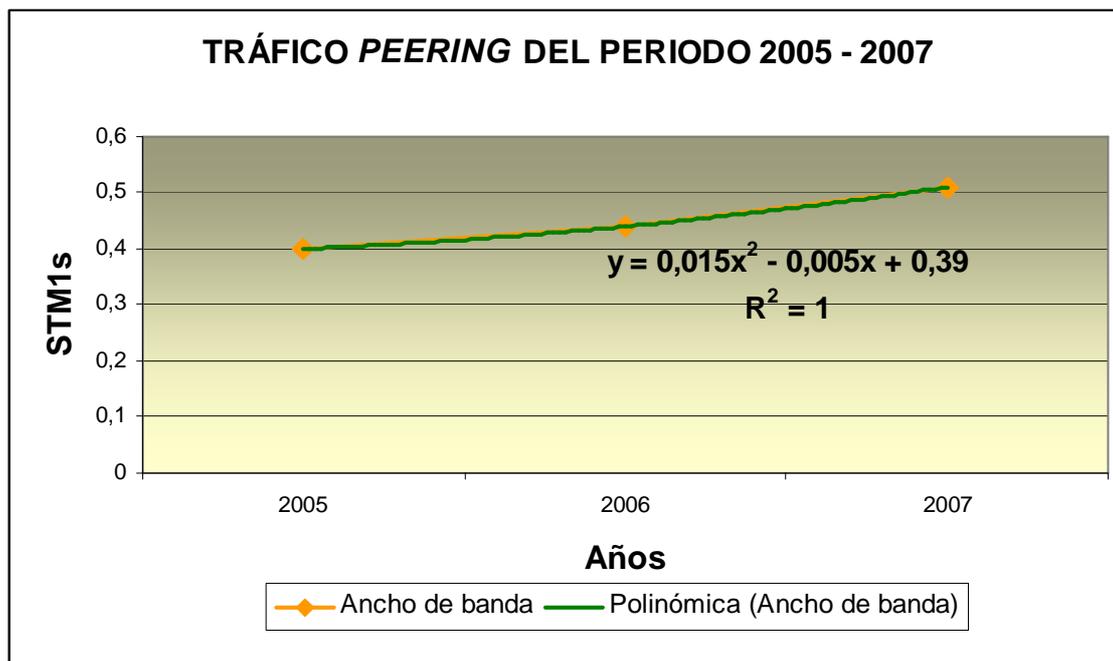


Fig. 3.12 Curva que se ajusta al crecimiento del tráfico de *peering* en STM-1 entre los años 2005-2007

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Para apreciación el crecimiento del tráfico *peering* se representa sus proyecciones en la figura 3.13.

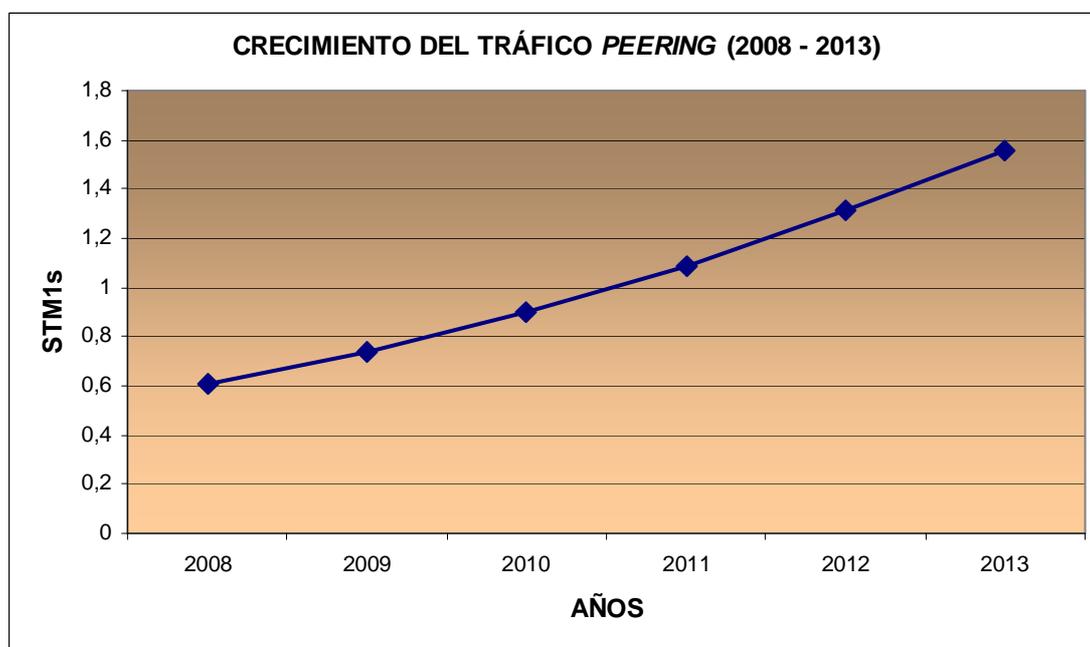


Fig. 3.13 Proyección del crecimiento del tráfico de *peering* en STM-1 desde el año 2008 hasta el año 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Para estimar el crecimiento del ancho de banda internacional de acceso a Internet, es necesario considerar el reuso del ancho de banda tanto en accesos conmutados como en dedicados. El factor del reuso depende de cuántos usuarios utilizan una cuenta de Internet; y generalmente para su cálculo se hacen estimaciones ya sea por el operador o por la Superintendencia.

La Superintendencia estima que para los accesos conmutados existe un reuso de 4:1, es decir cuatro usuarios por cada acceso conmutado, con una velocidad de acceso de 56Kbps, el cual no tendrá modificaciones a futuro dado que los desarrollos tecnológicos se enfocan más a las conexiones dedicadas DSL y Cable MODEM.

En Ecuador es costumbre que los proveedores de servicio de Internet ofrezcan los accesos de banda ancha con diferentes tipos de reuso. Es decir, que el proveedor de Internet comparta el ancho de banda con varios usuarios, desde 2:1 hasta 10:1; esto implica que la velocidad de transferencia de datos se degrade dependiendo del número de abonados que utilizan el sistema simultáneamente. Por esta razón para las conexiones dedicadas, se estima un factor de reuso promedio de 5:1, sin embargo la velocidad de acceso estará en crecimiento constante con base en la reducción de la tarifa y las mayores necesidades de capacidad de acceso soportadas por los equipos y la requerida por nuevas aplicaciones y usos de la información como son los juegos en red, video conferencias, VoIP, etc. sobre las conexiones establecidas.

Para el desarrollo de Internet social se estima una tasa de reuso de 8:1 que cambia con respecto a la anterior por la alta concentración de la población que utiliza estos servicios.

En el estudio de Banda Ancha en la Región Andina realizado por ASETA en el año 2005, contempla una evolución favorable de las conexiones dedicadas, porque los suscriptores de Internet dedicados aumentan cada año, lo cual evidencia la aceptación de las tecnologías de banda ancha por los ecuatorianos. Con esta base ASETA asume un escenario conservador de que para el año 2010 el acceso dedicado llegará a una velocidad promedio de 512 Kbps, como lo indica la tabla 3.9.

Ancho de banda promedio y factor de reuso (2006 – 2010)						
	2.005	2.006	2.007	2.008	2.009	2.010
Conmutado						
Factor de reuso	4	4	4	4	4	4
Ancho de banda (Kbps)	56	56	56	56	56	56
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dedicado						
Factor de reuso	5	5	5	5	5	5
Ancho de banda promedio (Kbps)	177	212	265	331	414	518
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual		20%	25%	25%	25%	25%
Internet Social						
Factor de reuso	0	0	8	8	8	8
Ancho de banda promedio (Kbps)	0	0	128	192	250	324
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual				50%	30%	30%

Tabla 3.9 Proyecciones de crecimiento a nivel mundial y estimaciones propias de ASETA.

[Fuente: ASETA]

Para los años 2011, 2012 y 2013 se asumen las mismas tasas de crecimiento que ASETA y se obtiene:

Ancho de banda promedio y factor de reuso para los años 2011 - 2013			
	2011	2012	2013
Conmutados			
Factor de reuso	4	4	4
Ancho de banda (Kbps)	56	56	56
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual	0%	0%	0%
Dedicados			
Factor de reuso	5	5	5
Ancho de banda promedio (Kbps)	648	809	1012
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual	25%	25%	25%
Internet Social			
Factor de reuso	8	8	8
Ancho de banda promedio (Kbps)	421	547	712
Crecimiento BW (<i>Band Width</i>) anual	30%	30%	30%

Tabla 3.10 Proyecciones de crecimiento del ancho de banda promedio para los años 2011 - 2013.

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Con estos datos el resultado de multiplicar el ancho de banda promedio (considerando el factor de reuso) de la tabla 3.9 y 3.10, con el número total de subscriptores de cada servicio de acceso a Internet se obtiene el ancho de banda necesario para el acceso a Internet en el periodo 2008-2013, como se indica a continuación:

Capacidad de Acceso a Internet requerida (STM1s) para el año 2008-2013						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Conmutado (+)	14,85	16,29	15,84	14,24	11,25	6,61
Dedicado (+)	66,69	123,55	221,33	381,44	637,48	1038,62
Internet Social (+)	0,37	0,67	1,08	1,76	2,71	4,07
Tráfico NAP (Peering) (-)	0,61	0,74	0,9	1,09	1,31	1,56
Total (STM1s)	81,29	139,77	237,36	396,35	650,12	1047,74
Total (Gbps)	12,60	21,67	36,79	61,43	100,77	162,40
Crecimiento		71,94%	69,81%	66,99%	64,03%	61,16%
El signo (+) indica que son capacidades a sumarse						
El signo (-) indica que son capacidades a restarse						

Tabla 3.11 Crecimiento de la capacidad internacional para el acceso a Internet del periodo 2008 - 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

En la figura 3.15 se puede apreciar mejor el crecimiento del ancho de banda para el acceso a Internet en el periodo 2008 – 2013.

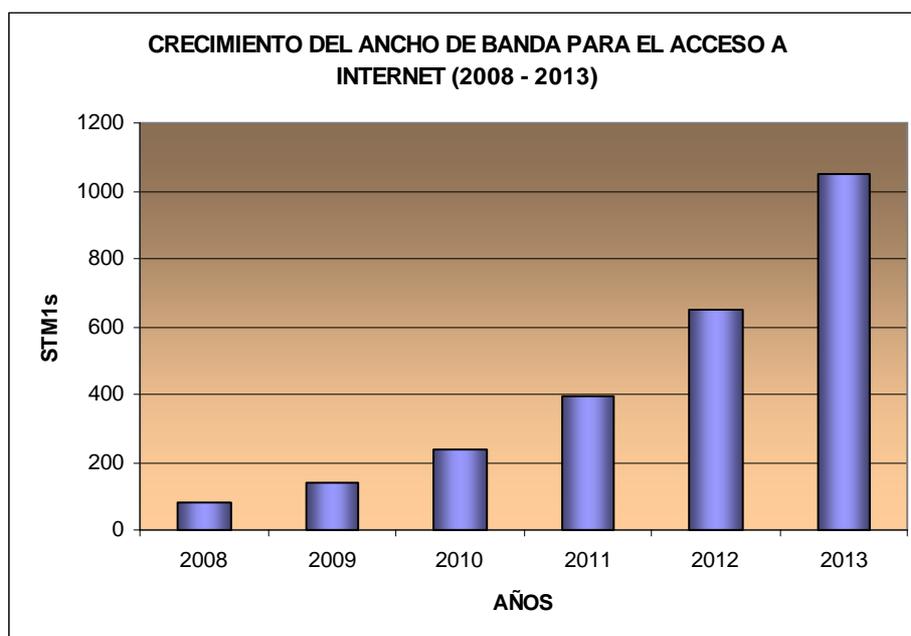


Fig. 3.14 Crecimiento de acceso a Internet desde el año 2008 hasta el año 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.3.2 CAPACIDAD PARA DATOS INTERNACIONALES ⁸²

El servicio de datos internacionales, es reconocido por la importancia que le dan los clientes corporativos en mantener enlaces con sus casas matrices ubicadas en países diferentes a Ecuador.

La utilización de capacidad internacional para este tipo de servicios es baja, respecto al Internet y la telefonía. Adicionalmente, las empresas prefieren utilizar otro tipo de servicios que permiten optimizar su infraestructura, como por ejemplo la configuración de VPNs sobre Internet.

Con base en lo anterior, se estima que el crecimiento, tanto en ancho de banda, como en la cantidad de conexiones de datos internacionales, para los siguientes cinco años, tendrá unas tasas muy bajas de crecimiento y por tanto las necesidades de capacidad internacional para este tipo de servicios será muy limitada en comparación con las necesidades de capacidad para acceso a Internet.

La tabla 3.12 muestra el crecimiento de ancho de banda promedio por conexión de datos internacional dados por ASETA para los años 2005 - 2007, que basó su cálculo en la información suministrada por los operadores, en donde el ancho de banda promedio en el año 2005 fue de 384 Kbps con una tasa de crecimiento constante del 5%.

Crecimiento del ancho de banda promedio para conexiones de datos internacionales (2005-2007)			
	2005	2006	2007
Ancho de banda promedio (Kbps)	384	403,20	423,36
Crecimiento		5%	5%

Tabla 3.12 Crecimiento del ancho de banda de conexiones de datos internacionales del periodo 2005 - 2007

[Fuente: ASETA]

⁸² ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

Los datos proporcionados por ASETA presentan un crecimiento lineal, por lo tanto se mantiene la misma tasa de crecimiento constante del 5% para las proyecciones del ancho de banda de las conexiones de datos internacionales del periodo 2008 – 2013 y se obtiene los siguientes resultados:

Proyecciones del ancho de banda promedio para conexiones de datos internacionales (2008-2013)						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ancho de banda promedio (Kbps)	444,53	466,75	490,09	514,60	540,33	567,34
Crecimiento		5%	5%	5%	5%	5%

Tabla 3.13 Proyecciones del crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de Titulación]

Para estimar la cantidad de enlaces dedicados de conexión internacional, ASETA parte del número de enlaces dedicados al cierre del año 2005 con una tasa de crecimiento constante del 5%, obteniendo así lo representado en la tabla 3.14.

Enlaces de datos internacionales dedicados (2005-2007)			
	2005	2006	2007
Número de enlaces dedicados	640	672	705,6
Crecimiento		5%	5%

Tabla 3.14 Número de enlaces de datos dedicados en el periodo 2005-2007
[Fuente: ASETA]

De forma similar partiendo del crecimiento lineal del número de enlaces dedicados internacionales determinados por ASETA, se realiza las proyecciones para el periodo 2008 – 2013 que se muestra en la tabla 3.15.

Enlaces de datos internacionales dedicados (2008-2013)						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Número de enlaces dedicados	740,88	777,92	816,82	857,66	900,54	945,57
Crecimiento	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Tabla 3.15 Proyecciones del número de enlaces de datos dedicados
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de Titulación]

Como resultado de la multiplicación del ancho de banda promedio y el número de enlaces dedicados, se obtiene el de ancho de banda total requerido para enlaces dedicados de datos, como se indica en la tabla 3.16.

Ancho de banda requerido para conexiones de datos (STM1s)						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ancho de banda en STM1s	2,12	2,34	2,58	2,85	3,14	3,46
Ancho de banda en Gbps	0,33	0,36	0,40	0,44	0,49	0,54
Crecimiento		10,25%	10,25%	10,25%	10,25%	10,25%

Tabla 3.16 Proyecciones del ancho de banda requerido para conexiones de datos internacionales
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de Titulación]

En la figura 3.15 se puede apreciar mejor el crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos en el periodo 2008 – 2013.

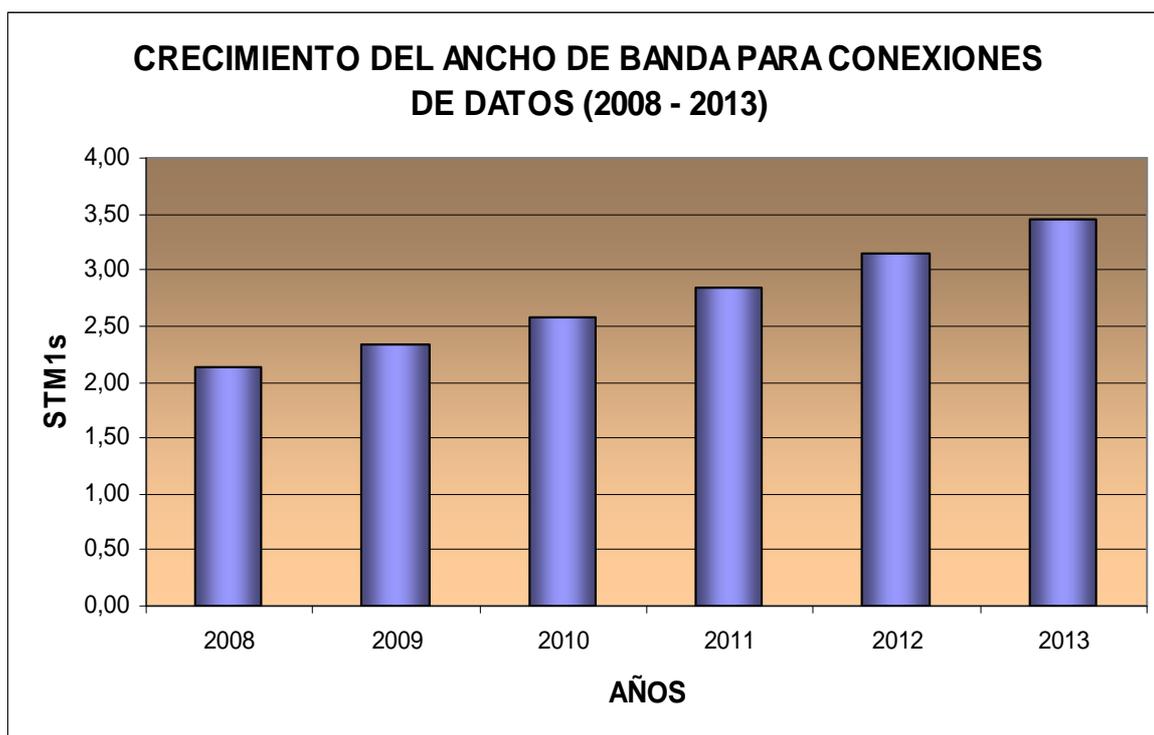


Fig. 3.15 Crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos entre los años 2008 - 2013
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.3.3 CAPACIDAD PARA LOS SERVICIOS DE VOZ ⁸³

El tráfico de voz internacional basado en la conmutación de circuitos que cursa tráfico de voz tradicional TDM⁸⁴, de los operadores incumbentes⁸⁵ o dominantes está cayendo a una tasa anual del 5%, según lo demuestran los analistas internacionales y se ratifica al comparar el total cursado por Ecuador en el año 2005, frente al cursado en el 2004 (1.216 millones de minutos en el 2005 y 1.258 millones en el 2004).

La masificación del acceso a banda ancha abrió las posibilidades para que los servicios de las tradicionales centrales telefónicas basadas en TDM sean poco a poco reemplazadas por VoIP, esta tendencia es irreversible y obedece al hecho de que la tecnología de la telefonía IP es cada vez más madura e irrumpe con sus bajos precios, en especial en la modalidad de tráfico clandestino⁸⁶, además a pesar del alto crecimiento de la telefonía IP, esta tecnología no requiere de grandes capacidades de transporte, en razón a la compresión que utiliza, lo cual es uno de los grandes atributos que la hace atractiva. Los operadores dominantes deben migrar a la tecnología VoIP como lo está haciendo la industria en el mundo, para contrarrestar el tráfico clandestino y evitar así la pérdida de ingresos por este concepto. En la medida que los operadores dominantes acojan la tecnología y los países clarifiquen la normatividad alrededor de la telefonía IP, ésta ganará cada vez más posición de mercado.

Como las soluciones de voz sobre IP (VoIP) están reemplazando el tráfico telefónico internacional tradicional TDM, la telefonía IP sufre de manera inversa al tráfico TDM un incremento anual del 5%, como lo indican los datos proporcionados por ASETA en la tabla 3.17, en donde también se muestra la

⁸³ ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

⁸⁴ TDM, *Time Division Multiplexing*.- En esta técnica el ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante una fracción del tiempo.

⁸⁵ Operadores tradicionales incumbentes o dominantes, son aquellos que tienen mayor presencia en el mercado.

⁸⁶ Se considera clandestino a cualquier servicio no autorizado por las normas vigentes.

capacidad en STM-1s requerida para transportar eficientemente el tráfico telefónico en la modalidad de VoIP, donde se ha supuesto el uso de la codificación G.729⁸⁷ y la detección de silencios⁸⁸.

Crecimiento del tráfico de telefonía IP		
	2006	2007
STM1s de VoIP	0,14	0,17
Crecimiento		25%

Tabla 3.17 Crecimiento de la telefonía internacional con la tecnología VoIP
[Fuente: ASETA]

Tomando como referencia lo descrito anteriormente, el crecimiento de la telefonía IP (VoIP) aumenta en un 5% con respecto a la capacidad en STM1s del año anterior, lo cual permite calcular las proyecciones del periodo 2008 – 2013 como lo muestra la tabla 3.18.

Proyecciones del tráfico de voz internacional con la tecnología VoIP (2008 – 2013)						
Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013
STM1s de VoIP	0,23	0,31	0,43	0,62	0,94	0,94
Crecimiento	30%	35%	40%	45%	50%	50%

Tabla 3.18 Proyecciones de la telefonía internacional con la tecnología VoIP
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

⁸⁷ Codificación G.729.- Para poder transmitir la voz a través de una red de datos, es necesario realizar previamente un proceso de digitalización. En telefonía clásica, este proceso se realiza de acuerdo a la recomendación G.711 de la ITU-T obteniendo una señal digital de 64 kbps. Sin embargo, para minimizar el ancho de banda requerido por las señales de voz, se han desarrollado varias recomendaciones, que reducen la velocidad de transmisión requerida, a expensas de degradar la calidad de la voz. La G.729 se usa mayoritariamente en aplicaciones de Voz sobre IP por sus bajos requerimientos en ancho de banda, este estándar opera a una tasa de bits de 8 kbps, pero existen extensiones, las cuales suministran también tasas de 6.4 kbps y de 11.8 kps para peor o mejor calidad en la conversación respectivamente.

⁸⁸ Detección de silencios.- La conversación es por naturaleza entrecortada. Estos intervalos corresponden a pausas naturales entre: frases y palabras (perceptibles a los oyentes); Intervalos entre sílabas (en general, no perceptibles). La detección de silencio identifica estos intervalos y se transmite solamente los periodos de información.

Esta modalidad de tráfico hace referencia al tráfico terminado en operadores debidamente autorizados, porque hay otro tipo de tráfico que no termina en aparatos telefónicos de la red PSTN sino en la terminal o PC del usuario y cuya capacidad está intrínsecamente contabilizada dentro de la capacidad de Internet.

En cuanto al tráfico telefónico en la modalidad TDM, sufren como ya se dijo una caída del 5% año a año como lo muestra los datos de ASETA en la tabla 3.19.

Decrecimiento de la telefonía tradicional TDM		
	2006	2007
STM-1s de VoTDM	6	5,70
Crecimiento		-5%

Tabla 3.19 Proyecciones del ancho de banda para tráfico de voz internacional TDM

[Fuente: ASETA]

Para las proyecciones se asume un decrecimiento lineal de 5% y se obtiene los siguientes resultados:

Proyecciones del tráfico tradicional TDM (2008 – 2013)						
Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013
STM1s de VoTDM	5,42	5,14	4,89	4,64	4,41	4,19
Crecimiento	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%

Tabla 3.20 Proyecciones de la telefonía internacional en la modalidad TDM

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Sumando las dos modalidades de tráfico, se obtienen los requerimientos de capacidad internacional para transportar el tráfico de voz a nivel internacional hasta el 2013, (Tabla 3.21):

Proyecciones de ancho de banda para el tráfico de voz (2008 – 2013)						
Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Tráfico de voz en STM1s	5,64	5,45	5,32	5,27	5,35	5,59
Tráfico de voz en Gbps	0,87	0,84	0,82	0,82	0,83	0,87
Crecimiento	-3,96%	-3,39%	-2,46%	-0,96%	1,51%	4,62%

Tabla 3.21 Proyecciones de ancho de banda para el tráfico de voz internacional

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

En la figura 3.16 se puede apreciar mejor las proyecciones del ancho de banda para el tráfico de voz internacional en el periodo 2008 – 2013.

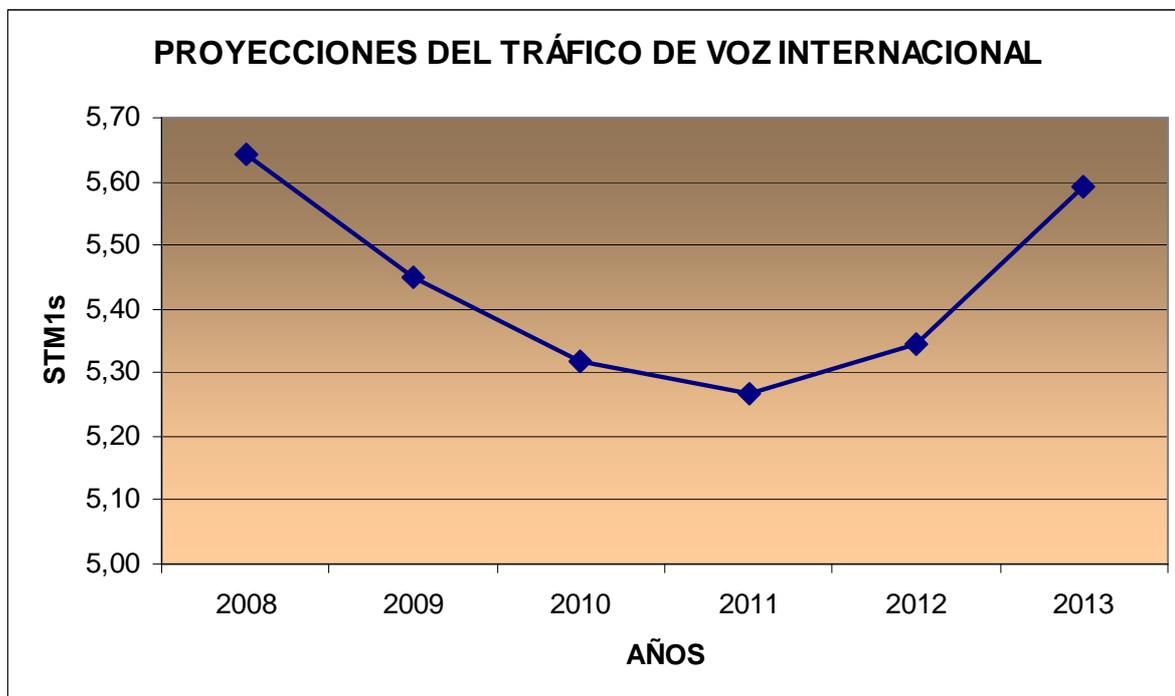


Fig. 3.16 Crecimiento del ancho de banda para conexiones de datos entre los años 2008 - 2013

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.3.4 PROYECCIÓN DE LA CAPACIDAD INTERNACIONAL ⁸⁹

Con base en las consideraciones anteriores, la proyección total del requerimiento de ancho de banda internacional, se detalla en la tabla 3.22.

Proyecciones de ancho de banda para el tráfico internacional (2008 - 2013)						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Internet	81,29	139,77	237,36	396,35	650,12	1047,74
Datos	2,12	2,34	2,58	2,85	3,14	3,46
Voz	5,64	5,45	5,32	5,27	5,35	5,59
Total (STM-1)	89,06	147,57	245,26	404,47	658,61	1056,80

⁸⁹ ASETA, *Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A.*, Junio 12 de 2006.

Proyecciones de ancho de banda para el tráfico internacional (2008 - 2013)						
Capacidad de ancho de banda para el tráfico internacional (Gbps)						
Gbps	13,80	22,87	38,01	62,69	102,08	163,80
Tasa de Crecimiento de ancho de banda para acceso a Internet						
Crecimiento	-----	65,69%	66,20%	64,92%	62,83%	60,46%

Tabla 3.22 Crecimiento de ancho de banda para tráfico internacional
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

La proyección anterior permite determinar las necesidades de ancho de banda internacional que demandarán los servicios de Internet, voz y datos en los próximos cinco años.

En la figura 3.18 se puede apreciar mejor las proyecciones del ancho de banda internacional en el periodo 2008 – 2013.

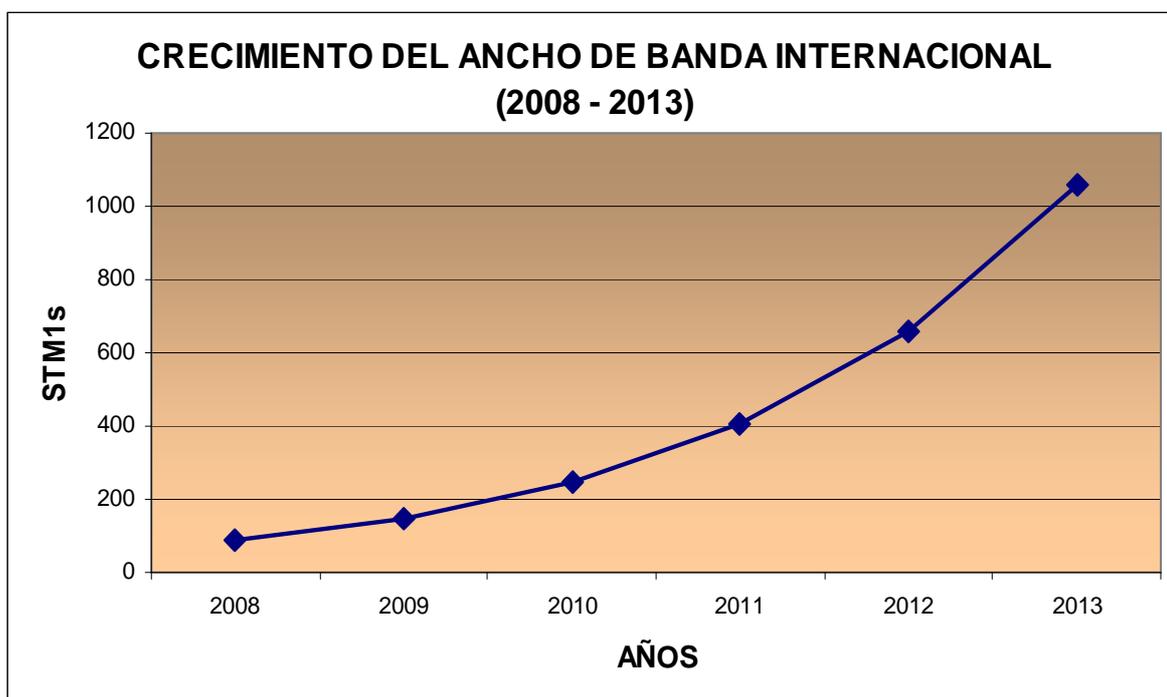


Fig. 3.17 Crecimiento del ancho de banda internacional para el periodo 2008 - 2013
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.4 ANTECEDENTES DEL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS⁹⁰

El OCP (Oleoducto de Crudos Pesados) es el segundo oleoducto que existe en el Ecuador y es el único dedicado al transporte exclusivo de crudo pesado desde Lago Agrio hasta Esmeraldas, inició su operación el 14 de noviembre del 2003.

El OCP es propiedad de OCP Ecuador S.A., empresa privada que realizó la inversión bajo su cuenta y riesgo, el Estado ecuatoriano solo dio la autorización para su construcción.

El oleoducto tiene un recorrido total de 500 Km, el 99% del tubo se encuentra bajo tierra incluyendo cruce de ríos. El tubo corre a lo largo de toda la ruta junto a un bitubo de polietileno de alta densidad para llevar los hilos de fibra óptica, que transportarán información del Sistema de Control y Adquisición de Datos (SCADA) para monitorear permanentemente la operación del oleoducto.

Para el control de la operaciones del oleoducto cuenta con sistema de sensores que miden el flujo del crudo, la temperatura y presión. Estos datos son recogidos en cada estación y enviados a través de la fibra óptica con respaldo satelital al centro de SCADA en la ciudad de Quito.

3.4.1 TERMINALES Y ESTACIONES⁹¹

Para una mejor apreciación, la figura 3.18 muestra el trayecto del oleoducto con sus respectivos terminales y estaciones.

En el Terminal Amazonas el petróleo llega desde los distintos campos de producción de los usuarios por oleoductos secundarios al Terminal, ubicado en Nueva Loja (Sucumbíos), el que cuenta con un sistema de almacenamiento inicial. Allí se almacena un volumen máximo de 1.200.000 barriles.

⁹⁰ http://www.ocpecuador.com/home_content.html

⁹¹ http://www.ocpecuador.com/home_content.html

Los crudos pesados inician el viaje hacia el mar con el impulso y el calentamiento que reciben en esta estación. Para remontar las montañas del Oriente, el sistema es reforzado con la presión que genera la estación Cayagama. Así llega a la estación Sardinias (Napo), en las cercanías de la población de Borja, donde también se recibe crudo que llega por otros oleoductos secundarios.

La siguiente estación es Páramo, ésta da el impulso para ascender al punto más alto: 4.062 metros sobre el nivel del mar. A partir de allí, el crudo fluye por gravedad. La topografía irregular del Ecuador exige una alta calidad de material y diferentes espesores, que se determinan por las presiones que debe soportar la tubería.

Al bajar la cordillera se requieren dos estaciones, Chiquilpe y Puerto Quito que reducen la presión del crudo para que llegue al Terminal Marítimo de OCP en Esmeraldas.

En el Terminal Marítimo existen cinco tanques de almacenamiento de 750.000 barriles cada uno, para embarcar el crudo utilizando un sistema de carga de buques.

3.4.1.1 Terminal y Estación de Bombeo Amazonas (PS1)



Fig. 3.19 Imágenes del Terminal Amazonas

[Fuente: http://www.ocpecuador.com/home_content.html]

Ubicación: Cantón Lago Agrio / Sucumbíos, a 5 Km de la ciudad de Nueva Loja

Coordenadas: 76°54' 56" W, 00° 05' 59" S

Altura: 330 msnm

El Terminal Amazonas, en Nueva Loja (Lago Agrio), será el punto de recepción de la mayoría de los crudos del sistema de tuberías y luego transferidos a la Estación de Bombeo. El Terminal Amazonas y la Estación de Bombeo están juntas, ciertas instalaciones, principalmente servicios, son compartidos, (Fig. 3.19).

3.4.1.2 Estación Cayagama (Estación de bombeo intermedia - PS2)

Ubicación: Cantón Gonzalo Pizarro/ Sucumbíos. Km 65.74

Coordenadas: 77°26' 10" W, 00°01' 13" S

Altura: 1033 msnm

El crudo enviado desde la estación Amazonas llega a Cayagama, aquí se recupera la caída de presión del crudo que se produce por el ascenso, así éste puede continuar su recorrido hacia la Costa.

3.4.1.3 Estación Sardinas (Estación de bombeo intermedia – PS3)



Fig. 3.20 Estación Sardinas

[Fuente: http://www.ocpecuador.com/home_content.html]

Ubicación: Valle de Quijos, provincia de Napo vecindad de Baeza. Km 146

Coordenadas: 77°51' 23" W, 00°26' 00" S

Altura: 1802 msnm

El crudo continúa su ascenso hasta llegar a la tercera estación: Sardinias. En esa estación también se puede recibir crudo pesado que puede ser enviado por medio de la estación colindante de AGIP, de esta forma la capacidad del OCP aumenta a un promedio sostenido de 450.000 barriles diarios. El crudo también puede ser calentado e impulsado desde aquí gracias a los hornos y bombas con los que cuenta, (Fig. 3.20).

3.4.1.4 Estación Páramo (Estación de bombeo intermedias – PS4)

Ubicación: Papallacta/Napo. Km 188.57

Coordenadas: 78°06' 24" W, 00°22' 05" S

Altura: 2.862 msnm

La estación Páramo tiene como objetivo dar el último impulso al crudo pesado para poder superar su punto más alto: 4.200 metros en el sector de La virgen. Ésta es la última infraestructura de bombeo del sistema OCP, (Fig. 3.21).



Fig. 3.21 Estación Sardinias

[Fuente: http://www.ocpecuador.com/home_content.html]

3.4.1.5 Chiquilpe (estación de reducción de presión PRS-1) y Puerto Quito (estación de reducción de presión PRS-2)

Ubicación: Nono/Pichincha Km 276.82 y Puerto Quito/Noroccidente de Pichincha. Km 316.76

Coordenadas de Chiquilpe: 78°36' 49.66" W, 00°02' 48.50" S

Coordenadas de Puerto Quito: 78°57' 57" W, 00°04' 52" N

Luego de superar Papallacta, el crudo inicia su descenso por lo que es necesario contar con un proceso de reducción de presión, que se logra en estas estaciones, (Fig.3.22).



Fig. 3.22 Estación Chiquilpe

[Fuente: http://www.ocpecuador.com/home_content.html]

3.4.1.6 Terminal Marítimo OCP

Ubicación: Punta Gorda / Esmeraldas. Km 497 Km

Coordenadas: 79°43' 18" W, 00°56' 23" N

Altura: 205 msnm Dos áreas: Terrestre y Marítima.

Al llegar a Esmeraldas el crudo finaliza su viaje. El Terminal Marítimo de OCP, ubicado en Punta Gorda, a 15 kilómetros de la ciudad de Esmeraldas tiene la capacidad de recibir el crudo y almacenarlo, (Fig. 3.23).



Fig. 3.23 Terminal Marítimo

[Fuente: http://www.ocpecuador.com/home_content.html]

3.4.2 INFRAESTRUCTURA ACTUAL DE LA RED SDH DEL OCP

El sistema de telecomunicación implementado entre las estaciones del OCP se basa en la tecnología SDH con equipos Marconi, utilizando las fibras ópticas instaladas en forma paralela al oleoducto. La red consta de 29 nodos desde Lago Agrio hasta Esmeraldas, en la Tabla 3.23 se especifican todos los enlaces de fibra óptica con sus respectivas ubicaciones.

Ubicaciones de los enlaces de Fibra Óptica (12 hilos)		
No.	NODO	UBICACIÓN
Nodo 1:	Amazonas, Estación de bombeo	76°54' 56" O , 00°05' 59" S
Nodo 2:	Sevilla, Válvula de bloqueo	77°07' 27" O , 00°05' 37" S
Nodo 3:	Río Aguarico, Válvula de línea	77°18' 44" O , 00°03' 43" S
Nodo 4:	Cayagama, Estación de bombeo intermedia	77°26' 10" O , 00°01' 13" S
Nodo 5:	Río Malo, Válvula de línea	77°38' 16" O , 00°08' 59" S
Nodo 6:	Río Salado, Válvula de línea	77°41' 46" O , 00°11' 47" S
Nodo 7:	Río Oyacachi, Válvula de línea	77°48' 17" O , 00°19' 11" S
Nodo 8:	Sardinas, Estación de bombeo intermedia	77°51' 23" O , 00°26' 00" S
Nodo 9:	Río Quijos 2, Válvula de línea	77°58' 24" O , 00°26' 03" S
Nodo 10:	Páramo, Estación de bombeo intermedia	78°06' 24" O , 00°22' 05" S
Nodo 11:	Cerca de Cuchauco, Válvula de línea	78°15' 10" O , 00°16' 06" S

Ubicaciones de los enlaces de Fibra Óptica (12 hilos)		
No.	NODO	UBICACIÓN
Nodo 12:	Sur de Yaruqui, Válvula de línea	78°18' 17" O, 00°10' 27" S
Nodo 13:	Norte de Yaruqui, Válvula de línea	78°19' 47" O, 00°08' 42" S
Nodo 14:	Río Guayllabamba, Válvula de línea	78°22' 09" O, 00°04' 10" S
Nodo 15:	Este de Pomasqui, Válvula de línea	78°26' 26" O, 00°02' 18" S
Nodo 16:	MPCC, Av. Naciones Unidas y Amazonas, Edif. La Previsora torre a piso 3	78°29' 08,52" O, 00°10' 29,48" S
Nodo 17:	ECC, Calle De los Grupos entre Eloy Alfaro y 10 de Agosto	78°28' 45" O, 00°06' 58" S
Nodo 18:	Chiquilpe, Estación de reducción de presión	78°36' 49,66" O, 00°02' 48,5" S
Nodo 19:	Río Alambi, Válvula de línea	78°38' 6,46" O, 00°0 2' 41,35" S
Nodo 20:	Pueblo Nuevo, Válvula de línea	78°47' 45" O, 00°0 0' 05" N
Nodo 21:	Puerto Quito, Estación de reducción de presión	78°57' 57" O, 00°04' 52" N
Nodo 22:	Pedro V. Maldonado, Válvula de línea	79°03' 33" O, 00°06' 05" N
Nodo 23:	Río Silanche, Válvula de línea	79°13' 16" O, 00°0 9' 45" N
Nodo 24:	Río Blanco, Válvula de línea	79°20' 06" O, 00°13' 20" N
Nodo 25:	Río Quinindé, Válvula de línea	79°28' 30" O, 00°1 8' 58" N
Nodo 26:	Estación de Bloqueo, Estación de bloqueo automática	79°31' 21" O, 00°24' 20" N
Nodo 27:	Río Viche, Válvula de línea	79°32' 42" O, 00°39' 31" N
Nodo 28:	Río Teaone, Válvula de línea	79°41' 30" O, 00°54' 07" N
Nodo 29:	Terminal Marítimo OCP, Estación de bombeo	79°43' 1 8" O, 00°56' 23" N

Tabla 3.23 Ubicaciones de los nodos conectadas por fibra óptica

[Fuente:http://www.conatel.gov.ec/site_conatel/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=630&Itemid=]

Los 29 nodos están interconectados entre sí formando una topología en anillo, cada sitio cuenta con un ADM (*Add-Drop Multiplexer*) permitiendo la extracción e inserción de canales para proveer los servicios requeridos en cada nodo de la red.

El sistema de comunicación del OCP juega un papel importante, ya que a través de éste se transmiten los datos de control y monitoreo al sistema SCADA e incluye la comunicación de voz y datos entre sus estaciones. El servicio de voz está soportado por centrales telefónicas PBX.

“El sistema SCADA (Sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Información) tiene un Centro de Control Principal del Oleoducto Troncal (MPCC - *Main Pipeline Control System*) para minimizar el personal operativo. El sistema también cuenta con un Centro de Control de Emergencias (ECC - *Emergency Control Center*). El centro de SCADA está localizado en Quito para monitorear el oleoducto. Seis (6) sistemas de control local están situados en estaciones de bombeo y reductoras de presión.”⁹²

Para llegar desde el nodo Pomasqui al MPCC ubicado en las oficinas de OCP Ecuador S.A. en la Av. Amazonas y Naciones Unidas Edificio Banco La Previsora, arriendan un enlace de cuatro hilos de fibra área, de igual forma para el enlace entre el MPCC al ECC.

Lamentablemente, no ha sido posible conseguir más información de la red SDH OCP debido al contrato de confidencialidad firmado entre la OCP S.A. y el FODETEL (representante del estado).

3.4.3 SITUACIÓN DE LOS CUATRO HILOS DE FIBRA PERTENECIENTES AL ESTADO ECUATORIANO

Los cuatro hilos de fibra del Estado están conectados al ODF⁹³ junto con los restantes hilos pertenecientes al OCP en cada sitio sin ser utilizados. Basta con utilizar un *patch cord* de fibra óptica entre el ODF *west* y el ODF *east* para dar continuidad al enlace, (ver Fig. 3.24).

Los conectores ópticos son del tipo SC (*Straight Connection*) como se muestra en la figura 3.25, los cuales ofrecen bajas pérdidas de inserción⁹⁴ y altas pérdidas de retorno⁹⁵.

⁹²http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/Sec%202/Sec2_final_maa_2%20Rev.%204_fin.pdf

⁹³ Repartidor óptico (ODF, *Optical Distribution Frame*)

⁹⁴ Pérdida de inserción - Pérdida total de energía causada por la inserción de un elemento óptico, como un conector, empalme, o acoplador, en una vía previamente continua.

⁹⁵ Pérdida óptica de retorno - La cantidad de luz reflejada de fibras ópticas y componentes ópticos. La reflexión puede ser causada por o la fibra misma, o conectores, o empalmes en un sistema óptico.

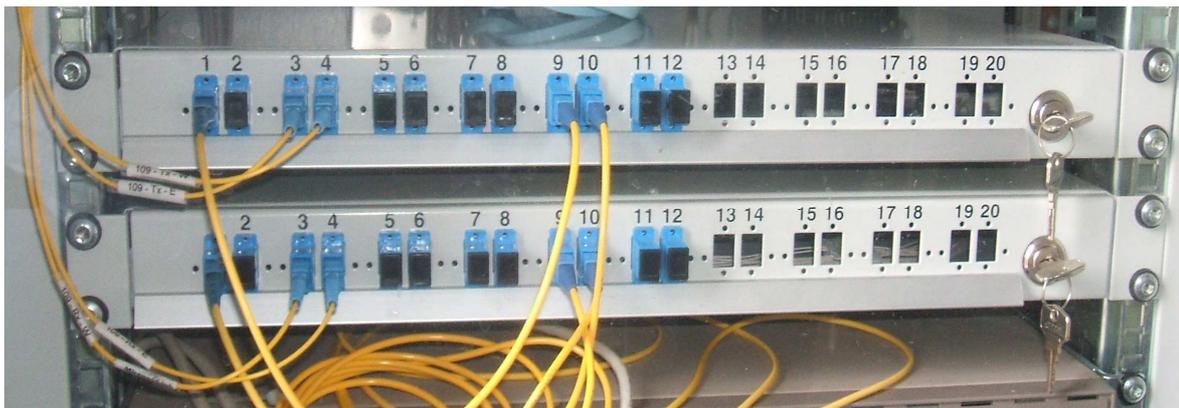


Fig. 3.24 Las conexiones en el ODF

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]



Fig. 3.25 Conector SC

[Fuente: http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/hojas_producto/COP/03_SC-APC%20Rev%2012-03.pdf]

El SC es un conector de Fibra óptica Monomodo y Multimodo con uso habitual en monomodo, como es el caso de la fibra óptica del OCP. Las características principales de los conectores SC de fibra óptica monomodo se presentan en la tabla 3.24.

Características de los conectores SC	
Tipo de conector	SC
Tipo de fibra	Fibra monomodo
Longitud de onda	Típico: 1310 nm 1550 nm
* Pérdidas de inserción	Valor típico 0.2 dB Valor máximo ≤ 0.5 dB
** Pérdida de retorno	Valor típico 65 dB Valor mínimo > 60 dB

Tabla 3.24 Las características de los conectores SC de fibra óptica monomodo

[Fuente: <http://eav.upb.edu.co/banco/files/Tesisfibraopticometro.pdf>]

3.5 PROPUESTA DE LA RED DE *BACKBONE*

Desde el punto de vista de la alta capacidad internacional requerida para transportar voz, datos e Internet, está claro que es deseable trabajar con la técnica DWDM en torno a la tercera ventana de $\lambda = 1550$ nm, pues según el estudio de tráfico, para cubrir la demanda de ancho de banda hasta el año 2013 se requiere una capacidad de 160 Gbps, esto implica que la red será capaz de transportar 16 canales a 10 Gbps sobre un par de hilos de fibra (transmisión y recepción en hilos de fibra separados).

Como el Estado sólo dispone de cuatro hilos de fibra no es aconsejable usarlas todas al mismo tiempo, pues en operación normal una fibra puede sufrir algún corte o degradación lo que obligará a transferir el tráfico temporalmente a una fibra disponible, mientras se supera el problema, por lo tanto el otro par de fibras será utilizado como *backup*.

Inicialmente en la red DWDM se habilitarán dos canales a 10 Gbps, que serán suficiente para cubrir las necesidades de ancho de banda hasta el año 2009, además no tiene sentido iluminar dieciséis longitudes de onda que aún no son requeridas, sin embargo se tendrá la capacidad de escalar con solo activar una longitud de onda dependiendo de la demanda de los servicios de telecomunicaciones.

Todo el tráfico cliente ingresará a través de Muxponders TDM de 4x2.5Gbps, donde cada puerto estará configurado para usar *transceiver* ópticos SFPs⁹⁶ de 2.5Gbps.

Mediante el uso de los SFPs se ofrece al cliente la facilidad de conectarse al muxponder a diferentes velocidades, por medio de una variedad de módulos SFPs que trabajan a 2.5Gbps, 10Gbps, entre otros, esto a la vez permite una

⁹⁶ SFP, *Small Form-factor Pluggable* (Módulo óptico), es un *transceiver* óptico, ya que puede transferir y recibir al mismo tiempo y es usado en comunicaciones ópticas, el SFP permite un alto grado de flexibilidad en términos de manejo de tráfico y enlaces de fibra óptica de gran distancia, es decir, dependiendo del tipo de SFP se puede alcanzar diferentes distancias y transmitir a diferente velocidades de transmisión por ejemplo 155 Mbps, 622 Mbps, 2.5 Gbps y 10 Gbps.

amplia combinación de servicios, incluyendo STM-1 (155 Mbps), STM-4 (622 Mbps), STM-16 (2,5 Gbps), STM-64 (10 Gbps), Gigabit Ethernet o Fiber Channel. En la figura 3.26 se puede observar un módulo SFP de 2.5 Gbps.



Fig. 3.26 Ejemplo de un *Multirate* – Módulo SFP

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

El Muxponder TDM NRZ 10G permite multiplexar hasta cuatro señales STM16 y trabaja con el estándar G.709 de la UIT-T, con el uso del FEC se obtiene una ganancia de codificación típica de 5.5dB.

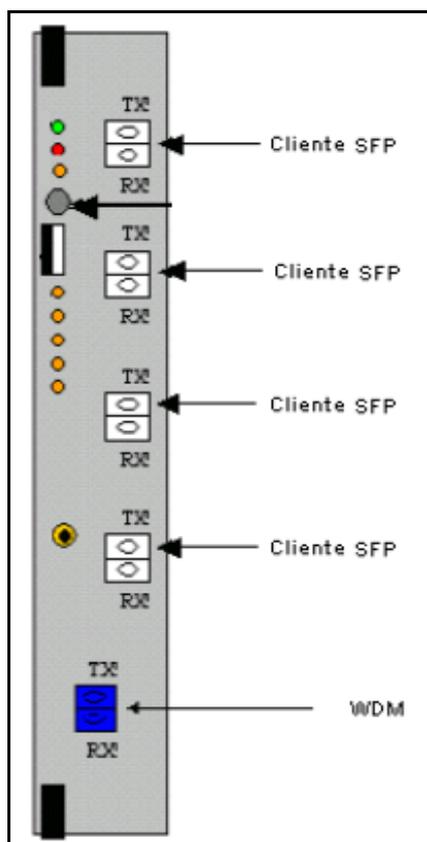


Fig. 3.27 Panel frontal del Muxponder NRZ 10G.

[Fuente: Manual del MHL3000 – Marconi]

Esta tarjeta tiene cuatro puertos como se muestra en la figura 3.27, donde puede insertarse *transceivers* ópticos (4 módulos SFPs de 2.5 Gbps) que soporten señales STM-16 con diferentes alcances ópticos. En este *release* el módulo SFP sólo soporta la interfaz física S-16.1 (15Km), cuyas características se detallan en la tabla 3.25.

Interfaz óptica STM-16 (2.5 Gbps)		
	Unit	S-16.1
Distancia	Km	15
Tasa de transmisión	Kbps	2.488.320
Rango de longitud de onda	nm	1270 a 1360
Codificación		Codificación Binaria sin Retorno a Cero (NRZ)
Lado de transmisión		
Tipo de láser		Diodo láser DFB
Potencia de salida	dBm	-5 a 0
Lado de recepción		
Diodo de recepción		PIN versión estándar
Nivel de recepción para un BER $\leq 10^{-10}$	dBm	-18 a 0
Tipo de fibra (De acuerdo a la G.652)		Fibra Monomodo

Tabla 3.25 Características de la interfaz óptica STM-16 (S-16.1)
[Fuente: Descripción técnica del SURPASS hiT 7070 3.0 – Siemens]

Para apreciar de mejor manera el desarrollo y las consideraciones tomadas para el diseño de la red de *backhaul*, se divide el análisis en las siguientes etapas:

- Enlace Principal
- Factores de diseño para la red DWDM
- Redundancia
- Equipos *Hot Spare*⁹⁷ para el Enlace Principal

3.5.1 ENLACE PRINCIPAL

El trayecto del enlace principal⁹⁸ va desde Las Palmas – Esmeraldas hasta el Nodo Pomasqui Ex_Andinatel – Pichincha, debido a que Quito concentra el tráfico

⁹⁷ *Hot Spare*.- Son componentes de respaldo (ejemplo, discos, controladores, etc.) que están en línea y disponibles.

de la mayoría de las redes de transporte como Ex_Andinatel, Transnexa, Transelectric, Telconet, Porta y Otecel.

Para la llegada de la cabeza de cable submarino independientemente del proveedor (*Emergia o Global Crossing*), la Estación de Amarre estará localizada en la playa de Las Palmas cerca a la refinería de Petroecuador con las coordenadas 79°40'36.74"O, 0°58'48.08"N. Debido a que no existe ninguna fibra instalada para completar el tramo entre el Estación de Amarre y el nodo Terminal Marítimo OCP, será necesario realizar el tendido de fibra óptica con las mismas características a la fibra del OCP, las cuales serán analizadas en la sección 3.5.2.1 y cubrirá una distancia de aproximadamente 12 Km, (ver Fig. 3.28).



Fig. 3.28 Ruta Terminal Marítimo OCP – Punto de Amarre
[Fuente: Google Earth]

⁹⁸ El trayecto Estación de Amarre a la Central Pomaqui Andinatel se detalla en el Anexo F.

En el otro extremo el punto de conexión que concentrará todo el tráfico entrante y saliente de Quito estará ubicado en la central Pomasqui de Ex_Andinatel, en la Av. Manuel Córdova Galarza junto al Banco del Pichincha, en las coordenadas 78°27'23.57"O, 0° 3'6.49"S. Debido a que no existe ninguna fibra instalada para completar el tramo entre el nodo Pomasqui OCP y la central Pomasqui Ex_Andinatel, será necesario realizar el tendido de fibra óptica con las mismas características técnicas de la fibra óptica del OCP, cubriendo una distancia de aproximadamente 5 Km, (ver Fig. 3.29).

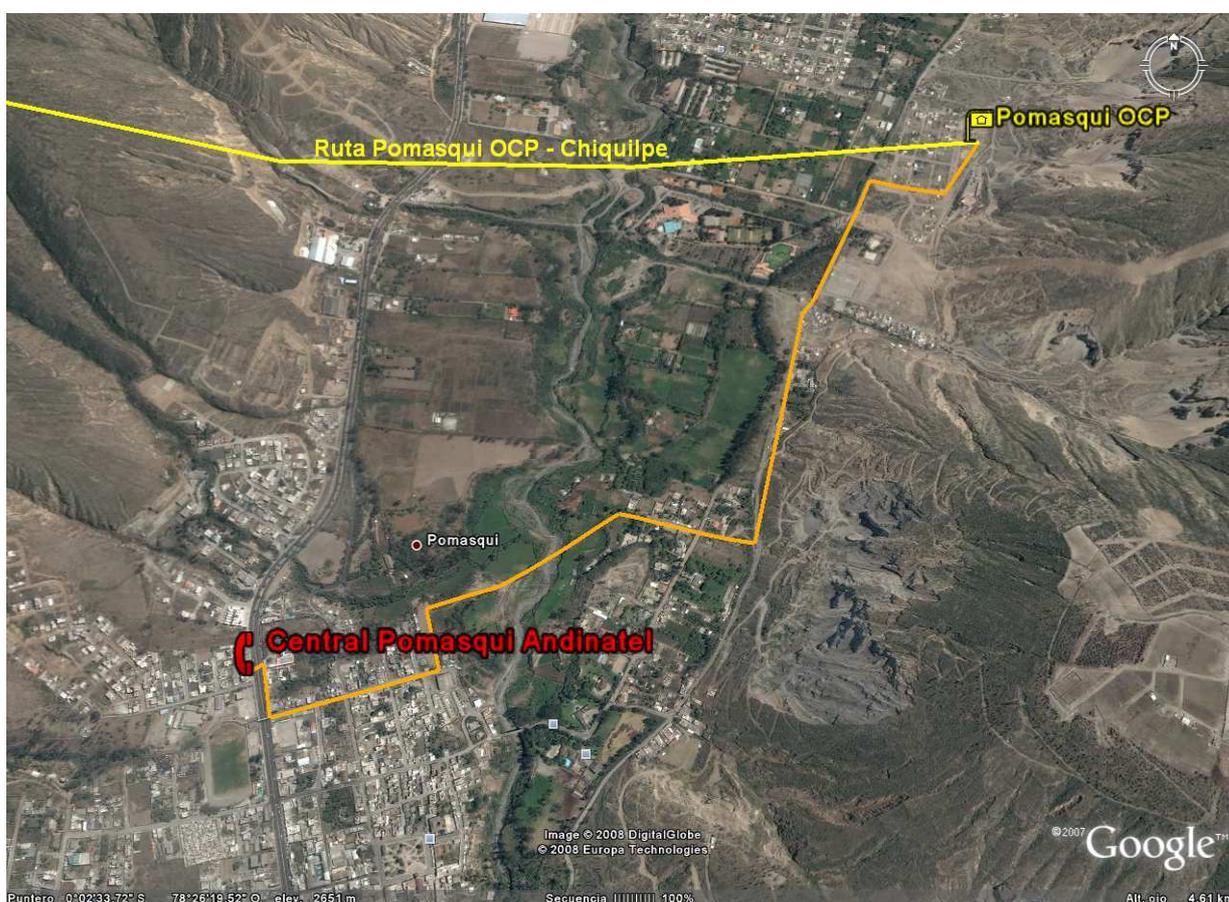


Fig. 3.29 Ruta Central Pomasqui Ex_Andinatel – Nodo Pomasqui OCP.

[Fuente: Google Earth]

La Fig. 3.30 ilustra el trayecto Las Palmas - Nodo Pomasqui Ex_Andinatel, con las respectivas distancias nodo a nodo, incluyendo los tramos de fibra faltante, cuyas longitudes suman un recorrido total de 274,9 Km.

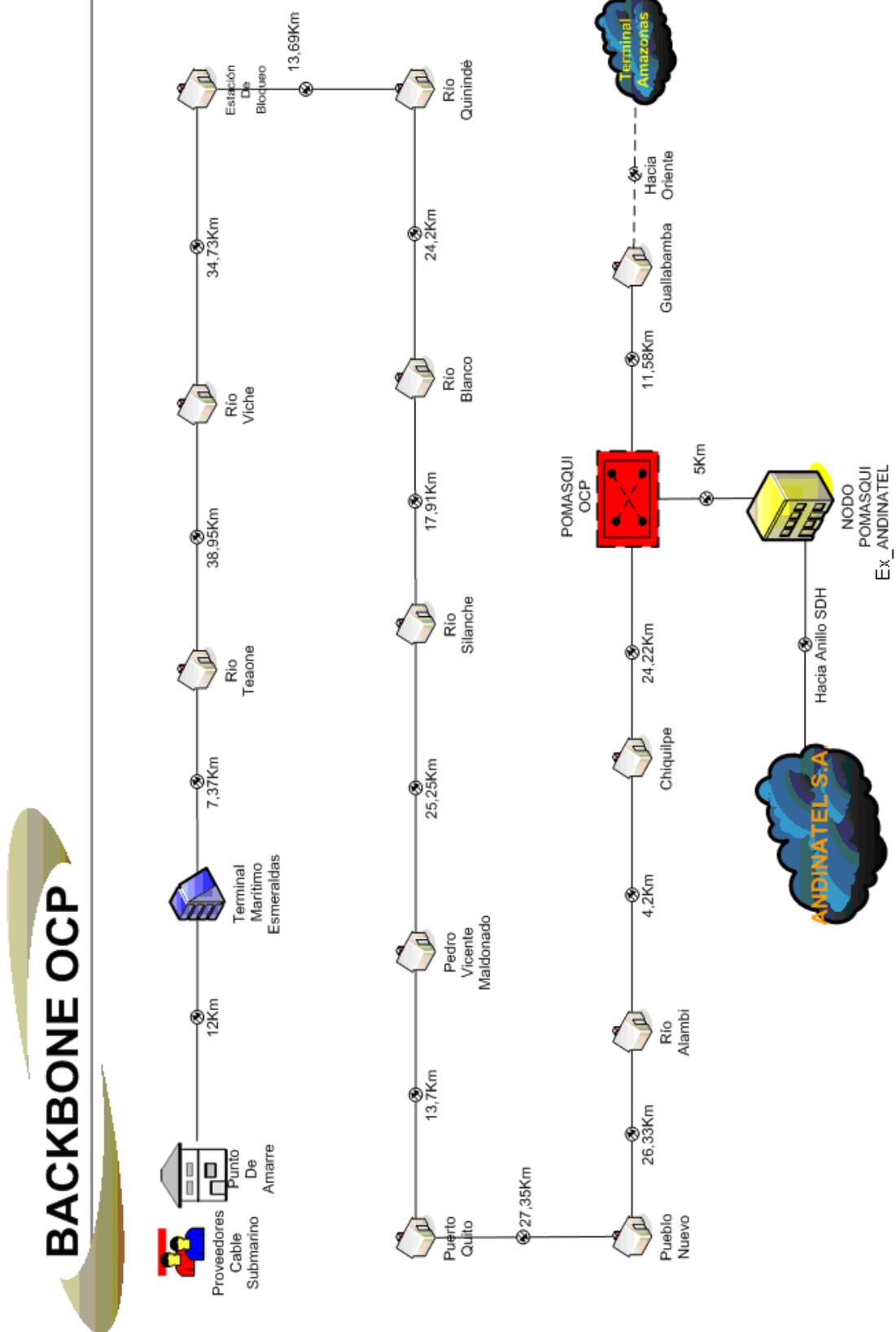


Fig. 3.30 Ruta Estación de Amarre - Nodo Pomasqui Ex_Andinateel
 [Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.5.2 FACTORES DE DISEÑO PARA LA RED DWDM

3.5.2.1 Descripción de las características de la fibra óptica del OCP

Se analiza las principales características técnicas y aspectos operativos de las fibras ópticas del OCP, para establecer su aplicabilidad en la red de *Backhaul* para una nueva cabeza de cable submarino entre Esmeraldas y Pomasqui, con la técnica DWDM.

Las características principales de la fibra se especifican en la tabla 3.26:

Parámetros Característicos	
Longitud del trayecto Terminal Marítimo OCP – Pomasqui OCP.	258 Km
Tipo de construcción	Un bitubo de polietileno de alta densidad enterrado entre 0,5 m y 1 m de profundidad paralelo al oleoducto, el cual lleva los hilos de fibra
Hilos de fibra óptica	Cable primario de doce (12) fibras ópticas, de los cuales cuatro (4) están disponibles para la red de <i>Backhaul</i>
Tipo de fibra	Single Mode UIT-T G.652.C
Tecnología	<i>Loose Buffer Tube</i> ⁹⁹
Chaqueta externa (<i>External Jacket o Sheath</i>)	Polietileno de Media/Alta densidad
Material bloqueador de agua (<i>Water Blocking Material</i>)	Gel
Atenuación	1310 nm ≤ 0.35 dB/km 1550 nm ≤ 0.25 dB/km 1625 nm ≤ 0.27 dB/Km

⁹⁹ El *buffer tube* es la primera capa de material plástico colocada alrededor de una fibra, que la protege y el *loose tube* está diseñado para que el diámetro interno del tubo plástico sea sensiblemente mayor que el que se necesitaría para las fibras, de forma que éstas puedan moverse con holgura en su interior. Además las fibras tiene una sobre longitud, con respecto al tubo, que varía entre el 0,05 % y el 0,10 %. En este tipo de cables las fibras van embebidas en el interior de un tubo relleno de *gel*.

Parámetros Característicos	
Longitud de onda de dispersión nula	1310 ± 10 nm
Dispersión cromática	≤ 3,5 ps/nm/Km (1.285 - 1.330 nm) ≤ 18 ps/nm/Km (1525 - 1575 nm)
Longitud de onda de corte (<i>Cut-off Wavelength</i>)	< 1260 nm
PMD (<i>Polarization Mode Dispersion</i>)	< 0.5 ps/(Km) ^{1/2}
Error de concentricidad del campo modal (<i>Mode field concentrecity error</i>)	< 1µm
No circularidad del revestimiento (<i>Cladding non circularity</i>)	< 2%
Derechos de vía	Urbanos y Rurales

Tabla 3.26 Principales características de la fibra óptica del OCP
[Fuente: Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA]

Para el diseño hay que considerar que la red de *backbone* debe permitir transportar eficientemente grandes capacidades, esto puede resolverse mediante la técnica conocida como DWDM que permitiría cubrir estas capacidades y satisfacer el crecimiento en volumen y complejidad que presentan los servicios de telecomunicaciones.

Si es imperativo iluminar las fibras con DWDM, la pregunta que surge es: pueden las características de la fibra soportar eficientemente el transporte de longitudes de onda con grandes capacidades de hasta 10 Gbps?.

Existen millones de kilómetros de fibra óptica G.652 instaladas en redes ópticas de todo el mundo, que se benefician de sus bajas pérdidas a 1550nm y de la utilización de los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio (EDFA).

La fibra óptica monomodo estándar (SSMF, *Standard Single-Mode Fiber*) está normalizada en la recomendación UIT G.652 y tradicionalmente ha tenido dos ventanas de transmisión en 1310 y 1550nm, separadas por un pico de atenuación en la banda de 1400nm, conocido como pico de absorción del agua producido por la contaminación residual de iones OH⁻, estas fibras corresponden a las

categorías G.652.A y G.652.B. Sin embargo debido a la mejora en los procesos de fabricación este pico ha desaparecido, estas fibras se denominan *Low-Water-Peak Fiber* categorías G.652.C y G.652.D (Fig. 3.31), este tipo de fibras extienden la ventana de transmisión desde 1260nm hasta 1625nm, por lo que disponen de un mayor ancho espectral para la transmisión en sistemas multicanal (CWDM o DWDM con compensadores de dispersión).

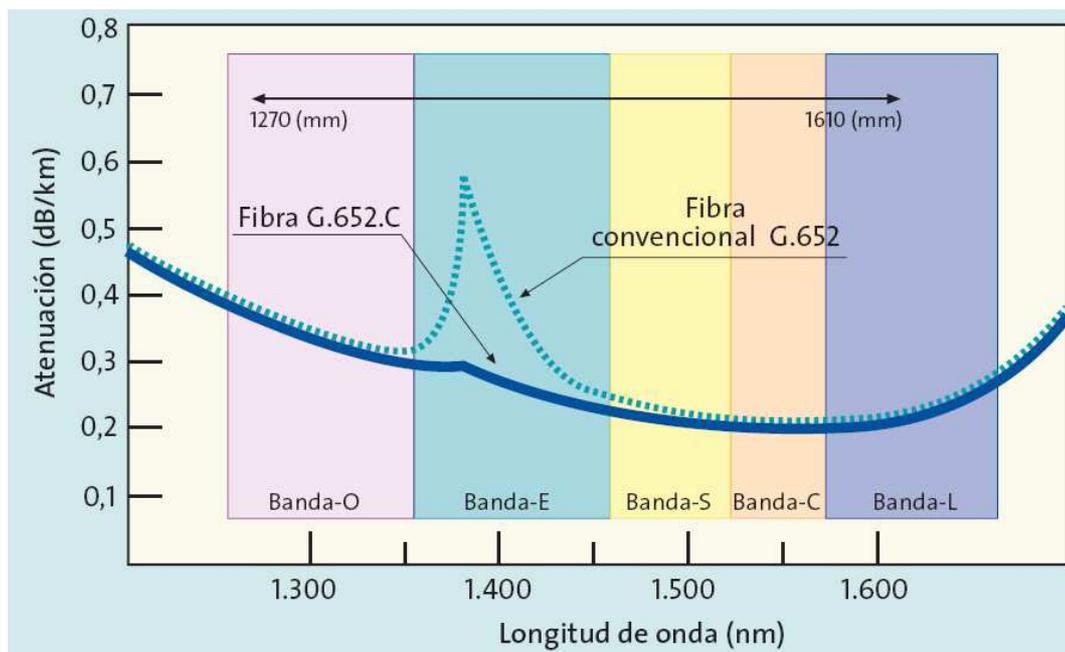


Fig. 3.31 Atenuación espectral de las fibras ópticas G.652 y G.652.C

[Fuente: http://195.235.92.45/documentos/revista_comunicaciones_i%2Bd/numero38.pdf]

Como la fibra óptica de la OCP cumple con la recomendación G.652.C, se puede garantizar que este tipo de fibra puede ser utilizada para trabajar con DWDM en la región de 1550nm con compensadores de dispersión.

3.5.2.2 Fibras comerciales actuales

Como se mencionó en la sección 3.5.1, es necesario realizar el tendido de fibra óptica de dos tramos para completar la Red de *Backhaul*. La fibra óptica adicional será instalada dentro de ductos en forma subterránea, desde la Estación de Amarre hasta el Terminal Marítimo de la OCP cubriendo una distancia de 12 Km y desde el Nodo Pomasqui OCP a la Central Pomasqui de Ex_Andinatel, cubriendo una distancia de 5 Km, lo que representa un tendido de fibra óptica de 17 Km.

Para seleccionar el tipo fibra óptica que será instalada en los tramos restantes, se detallará en la tabla 3.27 las características principales de las fibras comerciales más conocidas en el mercado.

Proveedores de fibra óptica		
Fabricante	Fibra óptica	Características
Lucent Technologies	Allwave™	<p>Fibra monomodo totalmente compatibles con los estándares UIT-T G.652 y además exceden los requerimientos del estándar UIT-T G.652.D para fibra monomodo de bajo pico de agua.</p> <p>Elimina el pico de agua permitiendo usar el espectro completo, desde 1260nm hasta 1625nm.</p> <p>Ofrece bajas pérdidas, a los 1550nm el coeficiente de atenuación típica es de 0,19dB/Km.</p> <p>PMD máximo en la fibra: $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.</p> <p>Error de concentricidad del campo modal-revestimiento: $\leq 0.2 \mu\text{m}$ típico.</p> <p>Diámetro del campo modal en la ventana de 1550nm: $10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$.</p>
Corning	SMF-28e	<p>Creada con una baja atenuación en el pico de agua.</p> <p>La SMF-28e es una fibra ITU G.652.C y cumple con todas las normas de la industria correspondientes.</p> <p>Atenuación máxima $\leq 0.20 \text{ dB/Km}$ en la ventana de 1550nm.</p> <p>Dispersión Cromática a los 1550nm $\leq 18 \text{ ps/nm.km}$</p> <p>PMD máximo en la fibra: $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.</p> <p>Error de concentricidad del campo modal-revestimiento: $\leq 0.3 \mu\text{m}$.</p> <p>Diámetro del campo modal en la ventana de 1550nm: $10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$.</p>
Furukawa	Fibra Monomodo Pico de Agua Cero (ITU-T G.652.C/D)	<p>Atenuación Óptica Típica en 1550nm: 0.19dBm/Km.</p> <p>Atenuación Óptica Máxima en 1550nm: 0.21dBm/Km.</p> <p>Dispersión Cromática en 1550nm: $\leq 17 \text{ ps/nm.km}$</p> <p>PMD máximo en la fibra: $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.</p> <p>Error de concentricidad del campo modal-revestimiento: $\leq 0.5 \mu\text{m}$.</p> <p>Diámetro del campo modal en la ventana de 1550nm: $10.3 \pm 0.5 \mu\text{m}$.</p>

Proveedores de fibra óptica		
Fabricante	Fibra óptica	Características
Lucent	TrueWave (ITU-T G.655)	Atenuación Óptica Típica en 1550nm: 0.20dBm/Km. Atenuación Óptica Máxima en 1550nm: 0.22dBm/Km. Dispersión Cromática en la Banda C (1530-1565nm): 4 a 8.9 ps/nm.km. PMD máximo en la fibra: $0.1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Error de concentricidad del campo modal-revestimiento: $\leq 0.5 \mu\text{m}$. Diámetro del campo modal en la ventana de 1550nm: $8.4 \pm 0.6 \mu\text{m}$.
Alcatel	TeraLightTM	Cumple con la recomendación UIT-T G.655 (NZDSF). Fibra óptima para trabajar con sistemas DWDM. Atenuación Óptica Típica en 1550nm: 0.22dBm/Km. Dispersión cromática (1530 – 1565nm): 5.5 a 10 ps/nm.Km Opera a 10 y 40 Gbps, Soporta la transmisión de 10 Gbps sin compensadores de dispersión para distancias alrededor de los 200 Km. Es compatible con la banda S. Diámetro del campo modal en la ventana de 1550nm: $9.2 \pm 0.5 \mu\text{m}$.
Algunos ejemplos de fibras que cumplen con la recomendación UIT G.655 son: LEAF (<i>Corning</i>), <i>True-Wave</i> (<i>Lucent</i>) y <i>Teralight</i> (<i>Alcatel</i>), cuyas características se detallan en el Anexo I.		

Tabla 3.27 Proveedores de fibra ópticas

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

En primera instancia se podría pensar que lo ideal sería instalar fibras con mejores características técnicas, como la fibra G.655 apropiada para trabajar con sistemas DWDM, sin embargo debe considerarse que al unir o empalmar dos fibras diferentes (Fibra G.652 y Fibra G.655) que poseen distintos diámetros del núcleo de la fibra y aunque la fusión hubiera sido realizada idealmente sin pérdidas, aparecerían unas adicionales debido a las diferencias geométricas. Para evitar estos inconvenientes, es aconsejable colocar el mismo tipo de fibra óptica utilizada por la OCP, es decir fibras que cumplan con la recomendación G.652.C.

3.5.2.3 Equipos DWDM comerciales.

En la tabla 3.28 se presentan algunos de los proveedores comerciales más conocidos, que trabajan con sistemas DWDM de larga distancia.

Proveedores de Equipos DWDM		
Fabricante	Equipos	Características
Ciena	CoreStream	Capacidad: 3,2 Tbps en Banda C para aplicaciones ULH. Formato: 2.5Gbps, 10Gbps SONET/SDH/OTN y 40Gbps SONET/SDH/OTN. Multiplexación: 4x2.5Gbps SONET/SDH, 4x10Gbps SONET/SDH/OTN. BER<10 ⁻¹⁵
Alcatel - Lucent	1625 LambdaXtreme Transport	Capacidad: <ul style="list-style-type: none"> • 1.28 Tbps (128λs x 10Gbps) hasta 4000 Km • 2.56Tbps (64λs x 40Gbps) hasta 1000 Km Banda L extendida (1553 a 1608nm) Interfaz cliente: STM-16, STM-64, STM-256 BER<10 ⁻¹⁶ Fibra compatible: <ul style="list-style-type: none"> • ITU-T G.655: FITEL TrueWave® (all vintages), Corning LEAF™ • ITU-T G.652 (SSMF)
Nortel Networks	Optera Long Haul 1600	Capacidad: 0.80 Tbps Soporta servicios de hasta: 80λs x 10Gbps; 320λs x 2.5Gbps; 640λs x 1.25Gbps. BER<10 ⁻¹⁵
Ericsson	Marconi MHL 3000 Core	Capacidad: 6.40 Tbps (80 λs x 40 Gbps) Operación en Banda C Tipo de fibras: G.652, G.653, G.654 y G.655 BER<10 ⁻¹⁵ Servicios SDH/SONET/CBR: STM1/OC-3/CBR-155Mbps; STM-4/OC-12/CBR-622Mbp; STM-16/OC-48/CBR-2.5Gbps;STM-64/OC-192/CBR-10Gbps;STM-256/OC-768/CBR-40Gbps; Ethernet, Gigabit Ethernet, etc.

Tabla 3.28 Proveedores de equipos DWDM para largas distancias
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

De entre los proveedores señalados, se seleccionó a Ericsson con su equipo Marconi MHL 3000 *Core Release 4.2.2* porque se adapta sin problemas a la fibra G.652.C del OCP, y su diseño modular permite escalar fácilmente a capacidades superiores partiendo de módulos de 8 canales, hasta 40 u 80 canales a 10 Gbps.

Para conocer con mayor detalle las características técnicas de cada uno de los equipos mencionados se puede revisar la sección de Anexo J.

3.5.2.4 Cálculos del presupuesto de potencia (*Power Budget*)¹⁰⁰

El estudio del balance de potencia en un sistema de comunicaciones ópticas no es, en esencia, muy diferente del que podría realizarse para cualquier otro sistema convencional de comunicaciones, realizado a través de cualquier otro medio. La única diferencia que puede presentarse es la derivada de los componentes que se utilizan.

El primer punto de partida son los elementos básicos en los que se puede perder parte de la energía transmitida, estos son esencialmente: la fibra óptica, los conectores y los empalmes que se hayan realizado. Además de lo anterior es preciso considerar un margen de seguridad.

Considerando todos los anteriores factores, la expresión general que habrá de calcularse será de la forma:

$$P_{TX} = P_{RX \text{ limite}} + \text{Pérdidas} + M_s \text{ (dB)} \quad (3.1)$$

Donde P_{TX} es la potencia de salida del transmisor, $P_{RX \text{ limite}}$ la sensibilidad del receptor¹⁰¹ y M_s el margen de seguridad.

El *power budger* (ΔP) se suele calcular como la diferencia entre la potencia de salida del transmisor (P_{TX}) y la sensibilidad del receptor ($P_{RX \text{ limite}}$), que representa el máximo valor de pérdidas que puede tolerar el sistema para asegurar una recepción óptima de nivel de potencia.

¹⁰⁰ Person Technologies, *Fiber Optic System Design*, 1995, Section 4.

¹⁰¹ La sensibilidad del receptor está representada por la potencia de la señal que al menos debe ser detectada en el receptor para alcanzar una cierta tasa de bits errados (BER).

$$\Delta P = P_{TX} - P_{RX \text{ limite}} \text{ (dB)} \quad (3.2)$$

Para calcular el *Power Budget* se necesita los parámetros de transmisión y sensibilidad del equipo, dados por el fabricante que se detallan en la tabla 3.29.

Características técnicas del Multihaul 3000	
Parámetros	Rangos permitidos
Potencia en recepción (Sensibilidad)	-32 dBm
Potencia de transmisión	20.5 dBm

Tabla 3.29 Rangos permitidos por el Multihaul MHL 3000

[Fuente: Manual del MHL3000 – Marconi]

Con la fórmula 3.2 se puede determinar el *Power Budget* como sigue:

$$P_{TX} = P_{RX \text{ limite}} + \Delta P$$

$$20.5 \text{ dBm} = -32 \text{ dBm} + \Delta P$$

$$\Delta P = 52.5 \text{ dB}$$

3.5.2.5 Pérdidas

Cuando se transmite una señal a través de la red, la señal sufre atenuaciones antes de llegar al receptor inmediato, lo que indica pérdida de potencia. Para el cálculo de las pérdidas totales (P_T) como se mencionó antes, incluye las pérdidas en la fibra, las pérdidas de los conectores en los ODFs y las pérdidas de los empalmes¹⁰², además se considera márgenes de reserva debido a que los componentes empleados en cualquier sistema poseen una cierta posibilidad de envejecimiento y con ello degradaciones del equipo.

3.5.2.5.1 Pérdidas en la fibra

Su valor está dado en forma habitual por el producto de sus pérdidas, α en dB/Km, por la longitud de la fibra empleada.

¹⁰² La operación de empalme consiste en conectar de manera permanente dos tramos de fibra óptica, a fin de dar continuidad al enlace, de manera que la pérdida de potencia de la señal (pérdida del empalme) en el punto de conexión sea mínima.

3.5.2.5.2 *Pérdidas en conectores*

Las pérdidas debidas a los conectores, se calcula de manera convencional, multiplicando el número de los conectores empleados, por las pérdidas de cada uno de ellos.

Para obtener la pérdida por conector en el ODF se acude a las características típicas del conector SC especificadas en la tabla 3.24 y se toma un valor promedio de 0.3 dB.

Para calcular el número de conectores se considera que en cada sitio existe dos ODFs, los cuales deben interconectarse con un *patch cord* de fibra para continuar con el trayecto, como se sabe existen 15 sitios entre Esmeraldas – Pomasqui y por cada sitio existen cuatro conectores, por lo tanto se tiene en total 60 conectores. Cabe mencionar que en algunos sitios se podría realizar empalmes de fibra mediante la técnica de fusión, con lo que las pérdidas disminuirán aún más, pero como el diseño considera las peores condiciones se asume el uso de *patch cords*.

3.5.2.5.3 *Pérdidas en los empalmes*

Algo análogo a lo visto en el caso anterior, para obtener el valor de las pérdidas por empalmes se multiplica el número de empalmes por las pérdidas en cada uno de ellos.

En el trayecto Esmeraldas – Pomasqui, es evidente que a lo largo de 274,9 Km se han realizado varios empalmes para unir tramos de fibra (típicamente cada 4 Km porque usualmente es la longitud del carrete de fibra), además es necesario mencionar que cuando se instaló la fibra óptica del OCP se utilizó el tipo de empalme por fusión¹⁰³, que proporciona la conexión de pérdidas más bajas.

¹⁰³ Para realizarse el empalme por fusión, se utiliza la técnica de calentamiento de las fibras con una descarga eléctrica hasta el punto de fusión.

En la figura 3.32 se indica las pérdidas provocadas por los empalmes. Para los empalmes de fibra óptica las pérdidas de inserción máximas no deben superar los 0,3 dB de acuerdo a las especificaciones ANSI/EIA/TIA-455 y una pérdida de retorno mínima de 26 dB para fibras monomodo.

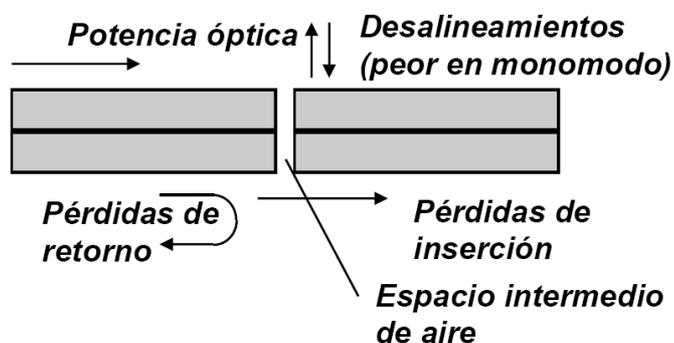


Fig. 3.32 Empalmes

[Fuente: http://diec.unizar.es/asignaturas/defaultWebs/11958/5_1%20-%20planta.pdf]

En las fibras monomodo los empalmes mediante la técnica de fusión tienen pérdidas de inserción, típicas de 0.15dB y máximas de 0.3 dB. Para el cálculo de las pérdidas se toma la peor condición que corresponde a los 0.3 dB.

Parámetros de atenuación de la fibra	
Atenuación intrínseca de la fibra óptica a 1550 nm	0.25 dB/Km
Longitud del trayecto (Estación de Amarre – Nodo Pomasqui Ex_Andinatel)	274.9 Km
Pérdida por empalme	0.2 dB
Número de empalmes	82
Pérdida por conector en el ODF	0.3 dB
Número de conectores	60
* Margen de reserva del equipo	3 dB
** Margen de reserva de la fibra	2 dB
* Margen de reserva del equipo (Me = 3 dB), que considera las degradaciones del equipo debido a los componentes, por fluctuaciones de temperatura, envejecimiento u otras.	
** Margen de reserva de la fibra (Mc = 2 dB), por roturas, reparaciones, nuevos trayectos, etc.	

Tabla 3.30 Parámetros para el cálculo de las pérdidas.

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Para calcular el número de empalmes se considera que los carretes de fibra óptica típicamente son de 4 Km, por lo tanto el resultado de dividir la distancia total del trayecto Esmeraldas – Pomasqui para 4 Km determina el número de empalmes, que por seguridad se le suma un margen de reserva del 20%, obteniendo así 82 empalmes por fusión.

Para iniciar con el análisis de pérdidas (o presupuesto de pérdidas), se consideran los parámetros especificados en la tabla 3.30 y se asume un margen de reserva razonable.

Con los parámetros de la tabla 3.30 se procede al cálculo de las pérdidas totales del enlace, las cuales se presentan en la tabla 3.31.

Pérdidas del enlace	
Pérdidas de atenuación	68.73 dB
Pérdidas por empalmes	16.4 dB
Pérdidas por conectores	18 dB
Margen de reserva del equipo	3 dB
Margen de reserva de la fibra	2 dB
Pérdidas del enlace	108.13 dB

Tabla 3.31 Pérdidas del enlace.

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

En la sección 3.5.2.4 se determinó que el sistema tolera máximo 52.5 dB de pérdidas, de acuerdo al *Power Budget* calculado. Sin embargo las pérdidas totales del enlace alcanzan un valor de 108.13 dB, esto significa que debido a las grandes pérdidas será necesario colocar un amplificador de línea en la mitad del trayecto, específicamente en el nodo Río Silanche para compensar las pérdidas sufridas por la señal en los tramos Estación de Amarre – Río Silanche y Central Pomasqui Ex_Andinatel – Río Silanche.

Por lo tanto, se ha dividido el trayecto en dos tramos, en los cuales se aplicará el mismo criterio de cálculo de pérdidas utilizado en el trayecto general. Para el tramo Estación de Amarre – Río Silanche con una distancia de 136.85Km, se realiza el cálculo de pérdidas que se especifica en la tabla 3.32.

Pérdidas del tramo Estación de Amarre – Río Silanche	
Pérdidas de atenuación	34.21 dB
Pérdidas por empalmes	8.2 dB
Pérdidas por conectores	9 dB
Margen de reserva del equipo	3 dB
Margen de reserva de la fibra	2 dB
Atenuación del enlace	56.41 dB

Tabla 3.32 Pérdidas del tramo Estación de Amarre a Río Silanche.

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

De igual manera se obtienen las pérdidas del tramo Río Silanche a la Central Pomasqui Ex_Andinatel con una distancia de 138.05 Km, las cuales se especifican en la tabla 3.33.

Pérdidas del tramo Río Silanche – Central Pomasqui Ex_Andinatel	
Perdidas de atenuación	34.51 dB
Atenuación por empalmes	8.2 dB
Atenuación por conectores	9 dB
Penalizaciones por dispersión	2.7 dB
Margen de reserva del equipo	3 dB
Margen de reserva de la fibra	2 dB
Atenuación del enlace	56.71 dB

Tabla 3.33 Pérdidas del tramo Río Silanche a la Central Pomasqui Ex_Andinatel.

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Para continuar con el diseño de la red de *Backhaul* se especificará la terminología utilizada para distinguir entre un equipo Terminal y un amplificador de línea.

El equipo **Terminal** comprende todos los elementos de transmisión y recepción que permite la entrada y salida de información desde y hacia otro equipo de características similares. Por lo general el equipo Terminal está compuesto de transpondedores, amplificadores, multiplexores/demultiplexores y compensadores de dispersión cromática (DCM¹⁰⁴) en caso de ser necesario.

¹⁰⁴ Los Módulos Compensadores de Dispersión (DCMs) están compuestos de fibras ópticas DCFs (*Dispersion Compensating Fiber*) introducidas en un módulo.

En este diseño se colocará dos terminales uno ubicado en la Estación de Amarre y otro en la Central Pomasqui Ex_Andinatel.

El **Amplificador de Línea** se encarga de amplificar la señal compuesta DWDM para su transporte a larga distancia, este amplificador consiste de dos trayectos que van desde *West* a *East* y desde *East* a *West*. Dependiendo del tipo de fibra y el número de intervalos pueden necesitarse elementos de compensación y componentes niveladores de potencia. Por lo que el Amplificador de Línea puede estar conformado de amplificadores ópticos, compensadores de dispersión cromática (DCM) y de cualquier otro componente que permita el buen funcionamiento del sistema.

Ahora bien, de lo que se trata es de manejar hábilmente las elevadas pérdidas a lo largo de todo el sistema y como se pudo apreciar en el análisis de pérdidas anterior, en los dos tramos Estación de Amarre – Río Silanche y Río Silanche – Central Pomasqui Ex_Andinatel, se tiene aproximadamente pérdidas de 57 dB, que son relativamente altas, además debe considerarse en el interior del Equipo Terminal las pérdidas de inserción de los multiplexores/demultiplexores que están típicamente alrededor de los 10dB, y las pérdidas de las fibras compensadoras de dispersión (DCF), que en la ventana de 1550nm están alrededor de 0,5 dB/Km, lo cual será analizado en la sección 3.5.2.6.1.

3.5.2.6 Componentes internos de los equipos terminales y del amplificador de línea que serán utilizados en este diseño.

En la línea de transmisión de los Terminales, será necesario utilizar un amplificador de potencia (*Booster*) después del multiplexor, para superar las pérdidas de inserción del multiplexor y las pérdidas del DCM.

En la recepción del Amplificador de línea situado en el Río Silanche, con la finalidad de superar las pérdidas del trayecto que sufrió la señal al recorrer la fibra óptica desde el extremo transmisor (Estación de Amarre), se empleará una etapa pre-amplificador de alta ganancia. Mientras que para la transmisión desde el Amplificador de línea hacia el Terminal de recepción (Central Pomasqui

Ex_Andinatel), la señal pasará por un amplificador *booster* para compensar las pérdidas de los DCMs.

En la línea de recepción de los Terminales, la señal DWDM se demultiplexada para alimentar al *transpondedor* correspondiente, sin embargo por las pérdidas de los DCMs, es necesaria una etapa pre-amplificadora antes del demultiplexor para mejorar la sensibilidad del receptor óptico.

Todos los amplificadores mencionados hasta aquí están basados en tecnología EDFA y garantizan una potencia de salida máxima de hasta 20,5 dBm en la banda C, como se indica en la tabla 3.34, los cuales pueden cubrir pérdidas del enlace de hasta 34 dB, además los amplificadores EDFA *Multi-Reach* incorporan una circuitería de control avanzado donde se usa la programación por hardware se usa para garantizar un control rápido y preciso de la ganancia del amplificador.

Amplificadores EDFA <i>Multi-Reach</i>			
Amplificador	Código	Ganancia (dB)	Potencia de Salida
Amplificador de una etapa (SSA)	SSA22/18	17-27 dB	18 dBm
Amplificador de doble etapa (DSA ¹⁰⁵)	DSA22/18	17-27 dB	18 dBm
Amplificador de una etapa (SSA)	SSA22/20	17-27 dB	20,5 dBm
Amplificador de doble etapa (DSA)	DSA22/20	17-27 dB	20,5 dBm
Amplificador de doble etapa (DSA)	DSA29/20	24-34 dB	20,5 dBm

Tabla 3.34 Tipo de amplificadores EDFA
[Fuente: Manual del Multihaul 3000 - Marconi]

Estos amplificadores responden automáticamente a los cambios en el número de canales sin la necesidad de intervención manual o reajuste y cuentan con atenuadores ópticos que permiten a las unidades amplificadoras la compensación automática de variaciones en la atenuación del segmento, debido al envejecimiento y empalmes de la fibra.

Actualmente, estos sistemas pueden ir asociados a unidades de monitoreo de potencia (PMU¹⁰⁶), que permite calcular en tiempo real la potencia y la relación

¹⁰⁵ DSA, *Dual Stage Amplifier*

¹⁰⁶ PMU, *Power Monitor Unit*.- Esta unidad monitorea el nivel de potencia de cada canal.

señal a ruido de cada uno de los canales ópticos, optimizando en todo momento y de forma automática el funcionamiento del sistema.

Se debe indicar que el valor obtenido del *Power Budget* para el trayecto total será el mismo para los tramos parciales, porque las características técnicas de los equipos en los tres nodos no varían. Por lo tanto se puede concluir que el máximo valor de pérdidas que puede tolerar el sistema para cada tramo es de 52.5 dB, pero de acuerdo a la tabla 3.32 y 3.33 el valor de pérdidas en cada tramo está alrededor de los 57 dB, por esta razón en la recepción de los dos tramos Estación de Amarre – Nodo Río Silanche y Nodo Río Silanche – Nodo Pomasqui Ex_Andinatel, es necesario colocar un amplificador Raman con bombeo contra-direccional antes del pre-amplificador EDFA, así podría sumarse la ganancia del amplificador Raman (G_R) que está alrededor de los 10 dB¹⁰⁷ y cumplir con el *Power Budget*.

Cabe aclarar que el conjunto de elementos que componen los terminales y el amplificador de línea cubren las pérdidas interna del los equipos y proporcionan el nivel de señal que cumple con la tabla 3.29, cuyos datos fueron utilizados para calcular el Power Budget.

Con el amplificador Raman el enlace a más de enfrentar las altas pérdidas del trayecto, mejora la relación señal a ruido y por lo tanto mejora la calidad del enlace, la distancia de transmisión y el ancho de banda de amplificación.

Con lo mencionado anteriormente se puede calcular el margen de seguridad (MS) para los dos tramos mediante la siguiente expresión:

$$M_s = \Delta P + G_R - P_T \quad (3.3)$$

$$M_s = 52.5 \text{ dB} + 10 \text{ dB} - 57 \text{ dB} = 5.5 \text{ dB}.$$

¹⁰⁷ Manual Multihaul 3000 de Marconi

3.5.2.7 Estudio de los parámetros de dispersión

3.5.2.7.1 Dispersión cromática

Se utiliza la técnica DWDM en torno a la tercera ventana de $\lambda = 1550$ nm, donde la atenuación de la fibra óptica es baja y alcanza el valor de $\alpha = 0.25$ dB/Km. Sin embargo, la fibra UIT-T G.652.C presenta típicamente un coeficiente de dispersión cromática (D) menor a 18 ps/nm.Km, relativamente alto para esta región, debido a esta limitación se podrá transportar información a una tasa máxima de 10 Gbps.

La dispersión cromática limita la distancia máxima, a la cual una señal se puede transmitir sin regenerar la señal original, que para una fibra monomodo estándar (SMF) el límite de la distancia de dispersión cromática en Km, está dado por:

$$L_D < \frac{104000 (Gb)^2 ps / nm}{B^2 \times D} \quad (3.4)$$

Donde B es la velocidad de transmisión

Al aplicar la fórmula 3.4, la longitud límite de la dispersión cromática en sistemas a 10 Gbps es de 61km¹⁰⁸.

Para apreciar de mejor manera el ensanchamiento del pulso, se aplica la fórmula 1.16 para calcular la dispersión cromática acumulada del tramo Estación de Amarre – Río Silanche.

Total de dispersión = 18ps/nm.km x (136,85Km) x (0.3nm¹⁰⁹)

Total de dispersión = 738,99 ps

¹⁰⁸ Dispersión máxima sin el uso de compensadores para una fibra G.652 a 10Gbps.

http://books.google.com.ec/books?id=D1NFxgvNCCkC&pg=PA167&lpg=PA167&dq=limit+Chromatic+Dispersion&source=bl&ots=ixd43WxstE&sig=OJRxN6Ltim_8OkRcDexzF8WB_S8&hl=es&ei=2RbJSdvWC4zMmQf-3dX3Ag&sa=X&oi=book_result&resnum=1&ct=result#PPA168,M1

¹⁰⁹ Es el ancho espectral típico del láser DFB directamente modulado, utilizado en este diseño.

http://www.furukawa.co.jp/fitel/eng/active/pdf/Cooled/ODC-3S003C_FOL15DDR_CWDM.pdf

Se obtiene un ensanchamiento de 739 ps a través de 136,85 Km, de este modo el pulso ocupará 7 o 8 *bit slots* al final del tramo.

Mediante este análisis, se determina la necesidad de emplear módulos compensadores de dispersión (DCM), los cuales permiten cancelar el efecto de la dispersión cromática acumulada.

Para el cálculo de los módulos compensadores de dispersión en cada tramo se acude a la fórmula 1.26 y a la tabla 3.35.

Tramo Estación de Amarre – Nodo Río Silanche

$$D_1 L_1 + D_{DCM} L_{DCM} = 0$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -D_1 L_1$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -(18 \text{ ps} / \text{ nm.km})(136,85 \text{ km})$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -2463,3 \text{ ps} / \text{ nm}$$

En el mercado existen DCMs que compensan la dispersión cromática acumulada hasta una longitud máxima de 100 Km es decir -1673 ps/nm en la ventana de 1550nm, como puede verse en la tabla 3.35, pero como la dispersión cromática calculada es de 2463,3 ps/nm, no será suficiente un DCM de 100Km y deberá utilizarse dos compensadores.

Por esta razón, se equipará a los equipos terminales en la línea de transmisión un DCM para 80Km (DCM SMF-80Km banda C) y en la recepción del Amplificador de Línea con un DCM para 60Km (DCM SMF-60Km banda C), de acuerdo a la figura 3.33.

Tramo Nodo Silanche – Central Pomasqui Ex_Andinatel

$$D_2 L_2 + D_{DCM} L_{DCM} = 0$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -D_2 L_2$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -(18 \text{ ps} / \text{ nm.km})(138,05 \text{ km})$$

$$D_{DCM} L_{DCM} = -2484,9 \text{ ps} / \text{ nm}$$

De igual manera, con la dispersión cromática calculada no será suficiente un DCM de 100Km y deberá utilizarse dos compensadores.

Por lo tanto, se proveerá a la transmisión del Amplificador de Línea un DCM para 80Km y en la recepción de los equipos Terminales un DCM para 40Km (DCM SMF-40Km banda C).

DCM para fibra SMF estándares			
Longitud (Km)	Dispersión (ps/nm)		
	1530nm	1550nm	1569nm
3	-47 ± 1	-50 ± 1	-53 ± 1
10	-156 ± 4	-167 ± 4	-178 ± 4
20	-312 ± 8	-335 ± 8	-356 ± 8
30	-467 ± 12	-502 ± 12	-535 ± 12
40	-623 ± 16	-669 ± 16	-713 ± 16
60	-935 ± 24	-1004 ± 24	-1069 ± 24
80	-1246 ± 32	-1339 ± 32	-1426 ± 32
100	-1558 ± 40	-1673 ± 40	-1782 ± 40

Tabla 3.35 Módulos compensadores de dispersión cromática estándares

[Fuente:

http://www.draka.com/draka/DrakaComteq/Drakafibre/Languages/English/Navigation/Markets&Products/Technical_Support/Datasheets/DCOF_G652_DCM_C%2B-band_SM.pdf]

Obviamente debido a las pérdidas que producen los DCMs, éstos estarán acompañados de una etapa amplificadora, como se mencionó en la sección 3.5.2.6.

Para calcular las pérdidas de la fibra DCF, se considera que esta fibra se caracteriza por tener un coeficiente de dispersión cromática (D) negativo alrededor de los -60 ps/nm.Km y con una atenuación típica de 0,5 dB/Km. Pues bien, utilizando los datos de la tabla 3.35 se calcula la longitud de la fibra DCF y posteriormente las pérdidas, como se muestra a continuación.

Tramo Estación de Amarre – Nodo Río Silanche

Para el DCM SMF-80 Km queda:

$$-60\text{ps/nm.Km} \times L_{\text{DCF1}} = -1339 \text{ ps/nm}$$

$$L_{\text{DCF1}} = 22,32 \text{ Km.}$$

Donde L_{DCF1} es la longitud de la fibra DCF dentro un DCM SMF-80Km.

$$P_{DCF1} = 0,5 \text{ dB/Km} \times L_{DCF1}$$

$$P_{DCF1} = 0,5 \times 22,32 = 11,16 \text{ dB}$$

Donde P_{DCF1} son las pérdidas de la fibra DCF dentro un DCM SMF-80Km.

Para el DCM SMF-60 Km queda:

$$-60 \text{ ps/nm.Km} \times L_{DCF2} = -1004$$

$$L_{DCF2} = 16,73 \text{ Km.}$$

Donde L_{DCF2} es la longitud de la fibra DCF dentro un DCM SMF-60Km.

$$P_{DCF2} = 0,5 \text{ dB/Km} \times L_{DCF2}$$

$$P_{DCF2} = 0,5 \times 16,73 = 8.34 \text{ dB}$$

Donde P_{DCF2} son las pérdidas de la fibra DCF dentro un DCM SMF-60Km.

Tramo Nodo Río Silanche – Central Pomasqui Ex_Andinatel

Para el DCM SMF-40 Km queda:

$$-60 \text{ ps/nm.Km} \times L_{DCF3} = -623$$

$$L_{DCF3} = 10,38 \text{ Km.}$$

Donde L_{DCF3} es la longitud de la fibra DCF dentro un DCM SMF-40Km.

$$P_{DCF3} = 0,5 \text{ dB/Km} \times L_{DCF2}$$

$$P_{DCF3} = 0,5 \times 10,8 = 5,19 \text{ dB}$$

Donde P_{DCF3} son las pérdidas de la fibra DCF dentro un DCM SMF-40Km.

Para que las pérdidas de los compensadores DCM no afecten el margen de seguridad es necesario utilizar amplificadores de doble etapa (DSA).

El amplificador DSA consiste de dos etapas separadas una como pre-amplificadora y otra como *booster*, ambas en un mismo bloque y son adecuadas para compensar pérdidas de hasta 12,4dB¹¹⁰ debido a los DCMs, los cuales se

¹¹⁰ Descripción técnica del equipo Marconi MHL 3000, Multihaul WDM – Release 4.2.2.

colocarán entre la etapa preamplificadora y *booster*, como se muestra en la gráfica 3. 34.

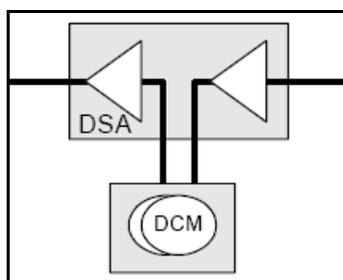


Fig. 3.33 Amplificador de doble etapa (DSA) con DCM en la etapa intermedia.

[Fuente: Manual del Multihaul 3000 - Marconi]

Se puede concluir que las pérdidas producidas por los DCMs que alcanzan un valor máximo de 11,16 dB de acuerdo a los valores calculados anteriormente, serán contrarrestados por los amplificadores de doble etapa que compensan pérdidas producidas por los DCM de hasta 12,4 dB.

Se presenta en la gráfica 3.33 un resumen de los componentes del equipo terminal y del amplificador de línea. En la línea de recepción se observarse un amplificador Raman de banda C (RPU-C¹¹¹) antes de los pre-amplificadores EDFAs y en la transmisión se hará uso de amplificadores *boosters* EDFAs. Los amplificadores Raman emplearán un bombeo Raman contra-direccional.

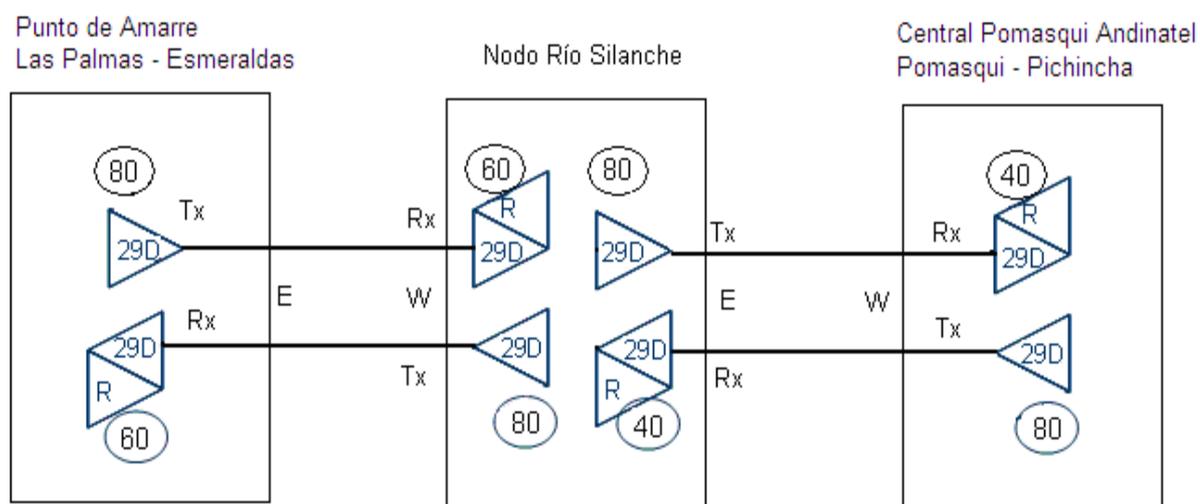


Fig. 3.34 Diseño de Amplificadores para el enlace principal.

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

¹¹¹ RPU-C, C Band Raman Pump Unit.

Nomenclatura

	Amplificador EDFA de doble etapa representado por el código DSA29/20 con una ganancia de 24-34dB ¹¹² .
	Amplificador Raman con bombeo contra-direccional.
	Fibra óptica.
	Módulo compensador de la dispersión cromática para 80 Km de fibra monomodo estándar SMF.
	Módulo compensador de la dispersión cromática para 60 Km de fibra monomodo estándar SMF.
	Módulo compensador de la dispersión cromática para 40 Km de fibra monomodo estándar SMF.
W	Lado <i>West</i>
E	Lado <i>East</i>

3.5.2.7.2 *Dispersión por modo de polarización PMD*

Otra característica a considerar es la dispersión por modo de polarización PMD que es un limitante en altas velocidades de transmisión, pues debido a PMD y a la dispersión cromática, el porcentaje del ensanchamiento de los pulsos en relación a la duración de un bit, se hace más considerable.

La dispersión por modo de polarización no cuenta con tecnologías maduras de compensadores de la PMD, por esta razón es importante estudiar su comportamiento. Dado el carácter aleatorio de este efecto, la UIT-T recomienda que el DGD¹¹³ promedio ($\sigma_{PMD \max}$) entre los dos modos de polarización sea menor a la duración de un bit ($T_B=1/B$, donde B es la velocidad de transmisión). En otras palabras, el $\sigma_{PMD \max}$ permitido sería:

$$\sigma_{PMD \max} < \frac{1}{10} T_B \quad (3.5)$$

¹¹² Según la tabla 3.34

¹¹³ DGD, Retardo Diferencial de Grupo.

Con este criterio se puede construir la tabla 3.36 en la que se especifica el $\sigma_{PMD \max}$ en función de la distancia para tasas de transmisión típicas.

$\sigma_{PMD \max}$ según la norma UIT-T Doc. G.663		
Velocidad de transmisión (Gbps)	T_B (ps)	$\sigma_{PMD \max}$ (ps)
2,5	400	40
10	100	10
40	25	2,5

Tabla 3.36 La velocidad de transmisión con sus respectivos T_B y su $\Delta\tau_{\max}$

[Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>]

Como el coeficiente de la PMD de la fibra óptica del OCP alcanza valores menor a 0.5 ps/Km^{1/2}, es aconsejable usar el valor máximo, porque generalmente el coeficiente de la PMD tiende a crecer debido a tensiones, cambios de temperatura, esfuerzos, curvaturas, el paso del tiempo y el medio en que se encuentran las fibras ópticas durante su vida útil. Con estos datos se aplica la fórmula 1.21 y se obtiene la longitud máxima permitida, en la cual el efecto de la PMD no es apreciable, (Tabla 3.37).

Longitud máxima del tendido		
Velocidad de transmisión (Gbps)	$\sigma_{PMD \max}$ (ps)	L_{\max} (Km)
2,5	40	6400
10	10	400
40	2,5	25

Tabla 3.37 Longitud máxima del tendido con PMD = 0.5 ps/Km^{1/2}

[Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>]

Como se puede apreciar, para la velocidad de 10 Gb/s, la distancia en la que el efecto de la PMD a de tenerse en cuenta es a partir de los 400 Km. Esto muestra que el tramo Estación de Amarre – Central de Ex_Andinatel Pomasqui con una longitud de 274.9 Km está dentro de los 400 Km y por lo tanto el efecto de la PMD no será considerado.

3.5.2.8 Densidad de canales

Los sistemas DWDM actuales permiten la posibilidad de tener 40 canales espaciados de 100 GHz u 80 canales espaciados a 50 GHz (0.4nm) en tercera ventana, y tienen que estar dentro del ancho de banda de los EDFA, que van de 1530 a 1625 nm.

Las limitaciones para disponer los canales muy próximos unos con otros no están dadas por el ancho del haz del emisor como se podría pensar en primera instancia. Como es conocido la frecuencia de la señal portadora determinará la región dentro del espectro en la que se sitúa la emisión donde la señal de información que lleva consigo determinará el ancho espectral que ocupa. Entonces el ancho de banda está dado por la señal portadora más las bandas laterales. Debido a este hecho la UIT-T, ha realizado una estandarización de las frecuencias a usar, configurando una plantilla centrada en torno a la frecuencia de 193.1^{114} THz, que corresponde a 1552,52 nm aproximadamente (el centro de la tercera ventana). Como puede verse en la figura 3.35, la UIT-T en la recomendación G.692 ha determinado una separación entre canales de 100GHz o 50 GHz. Una densidad de canales de esta naturaleza implica unos sistemas con dispositivos de propiedades muy precisas, como filtros ópticos con respuestas de amplitud y fase bien definidas para un filtrado muy estrecho.

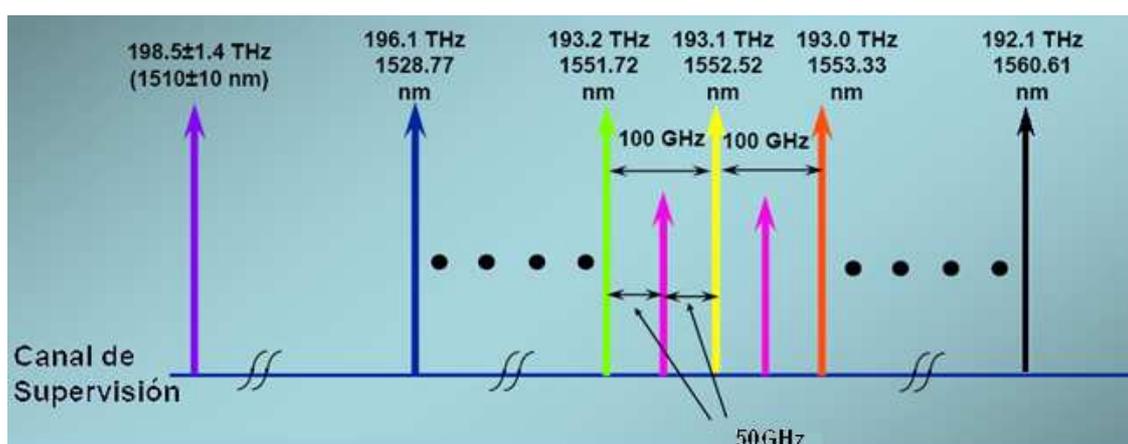


Fig. 3.35 Estándar UIT-T G.692

[Fuente: http://www.dinel.us.es/util/bajar.php?file=redes_opticas.pdf&x=506&y=12&r=0]

¹¹⁴ <http://www.ieee.org.ar/downloads/2008-simoni-fibras.pdf>

Hay que señalar que la normativa UIT-T no indica que sólo se puedan usar esas frecuencias. De hecho, algunos sistemas adoptan una separación entre canales de 25 GHz, por otra parte, también se están empleando otras bandas aparte de la convencional, la comprendida entre 1530 nm y 1565 nm que se denomina banda C y también se está tomando en cuenta la banda L, que abarca de 1565 nm a 1625 nm.

El MHL300 cumple con la normativa UIT-T G.692 por lo que el espaciamiento entre canales, para las 80 longitudes de onda es de 50 GHz en la banda C, como se especifica en la tabla 3.38 y para completar los 160 canales se aplica el mismo concepto incluyendo la banda L.

3.5.2.9 Tabla de frecuencias normalizadas

En la tabla 3.38 se muestra las longitudes de onda normalizadas para sistemas DWDM en la banda C, los canales ópticos están divididos en dos grupos, el grupo C1 y C2 que comprenden los canales del 1-40 y 41-80 respectivamente. Cada uno de los canales es numerado de acuerdo al incremento de frecuencia del canal.

ESQUEMA DE LONGITUDES DE ONDA - BANDA C					
GRUPO C1			GRUPO C2		
No. Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	No. Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)
1	192.1	1560.61	41	192.05	1561.01
2	192.2	1559.79	42	192.15	1560.20
3	192.3	1558.98	43	192.25	1559.39
4	192.4	1558.17	44	192.35	1558.58
5	192.5	1557.36	45	192.45	1557.77
6	192.6	1556.55	46	192.55	1556.96
7	192.7	1555.75	47	192.65	1556.15
8	192.8	1554.94	48	192.75	1555.34
9	192.9	1554.13	49	192.85	1554.54
10	193.0	1553.33	50	192.95	1553.73
11	193.1	1552.52	51	193.05	1552.93
12	193.2	1551.72	52	193.15	1552.12

ESQUEMA DE LONGITUDES DE ONDA - BANDA C					
GRUPO C1			GRUPO C2		
No. Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	No. Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)
13	193.3	1550.92	53	193.25	1551.32
14	193.4	1550.12	54	193.35	1550.52
15	193.5	1549.32	55	193.45	1549.72
16	193.6	1548.51	56	193.55	1548.91
17	193.7	1547.72	57	193.65	1548.11
18	193.8	1546.92	58	193.75	1547.32
19	193.9	1546.12	59	193.85	1546.52
20	194.0	1545.32	60	193.95	1545.72
21	194.1	1544.53	61	194.05	1544.92
22	194.2	1543.73	62	194.15	1544.13
23	194.3	1542.94	63	194.25	1543.33
24	194.4	1542.14	64	194.35	1542.54
25	194.5	1541.35	65	194.45	1541.75
26	194.6	1540.56	66	194.55	1540.95
27	194.7	1539.77	67	194.65	1540.16
28	194.8	1538.98	68	194.75	1539.37
29	194.9	1538.19	69	194.85	1538.58
30	195.0	1537.40	70	194.95	1537.79
31	195.1	1536.61	71	195.05	1537.00
32	195.2	1535.82	72	195.15	1536.22
33	195.3	2535.04	73	195.25	1535.43
34	195.4	1534.25	74	195.35	1534.64
35	195.5	1533.47	75	195.45	1533.86
36	195.6	1532.68	76	195.55	1533.07
37	195.7	1531.90	77	195.65	1532.29
38	195.8	1531.12	78	195.75	1531.51
39	195.9	1530.33	79	195.85	1530.72
40	196.0	1529.55	80	195.95	1529.94

Tabla 3.38 Esquema de frecuencias en sistemas DWDM para la banda C

[Fuente: Manual Multihaul 3000]

Este sistema soporta 80 canales en banda C y las longitudes de onda anteriormente mencionadas pueden ser usadas para cualquier tipo de fibra.

3.5.2.10 Asignación de las longitudes de onda para el enlace principal

El plan de asignación de las longitudes de onda para el enlace principal considera las 16 longitudes de ondas necesarias para cubrir la demanda de ancho de banda proyectado hasta el año 2013, por lo que requiere de 32 longitudes de onda que incluyen 16 longitudes de onda operativas y 16 longitudes de onda para protección de las operativas, lo cual será explicado con mayor detalle en la sección 3.5.3. El espaciamiento entre canales es de 100 GHz, logrando así un bloque de 40 canales. Sin embargo la red inicialmente trabajará con cuatro canales, que incluyen las dos longitudes de onda operativas (*working*) y las dos longitudes de onda para protección (*protection*).

Para cubrir este requerimiento será suficiente utilizar una tarjeta mux/demux GMU-8¹¹⁵ que permite multiplexar ocho canales en un sola señal DWDM espaciados por 100 GHz y en la recepción el demultiplexor está encargado de realizar la operación inversa.

Sin embargo como este proyecto tiene la finalidad de ofrecer escalabilidad, se establecerá también la forma de escalar de una GMU-8 a una GMU-40, en módulos de ocho canales (GMU-8), hasta llegar a los 40 canales.

Para conformar los 40 canales en la banda C hay cinco variantes de GMU-8 que se denominan: Master, Red 1, Blue 1, Red 2 y Blue 2. La unidad Master GMU-8 es la encargada de combinar y separar las cuatro unidades de extensión (red1&red2 y blue1&blue2) para formar una GMU-40.

Todas las unidades GMU-8 se caracterizan por estar compuestas de ocho canales que obviamente no pueden repetirse y, por esta razón mediante el esquema de frecuencia para sistemas DWDM se les asigna a cada unidad GMU-8 un grupo de ocho canales predeterminados, como se muestran en la gráfica 3.36.

¹¹⁵ GMU-8, 8-Channel Group Mux Units.- Unidad de multiplexación de un grupo de 8 canales

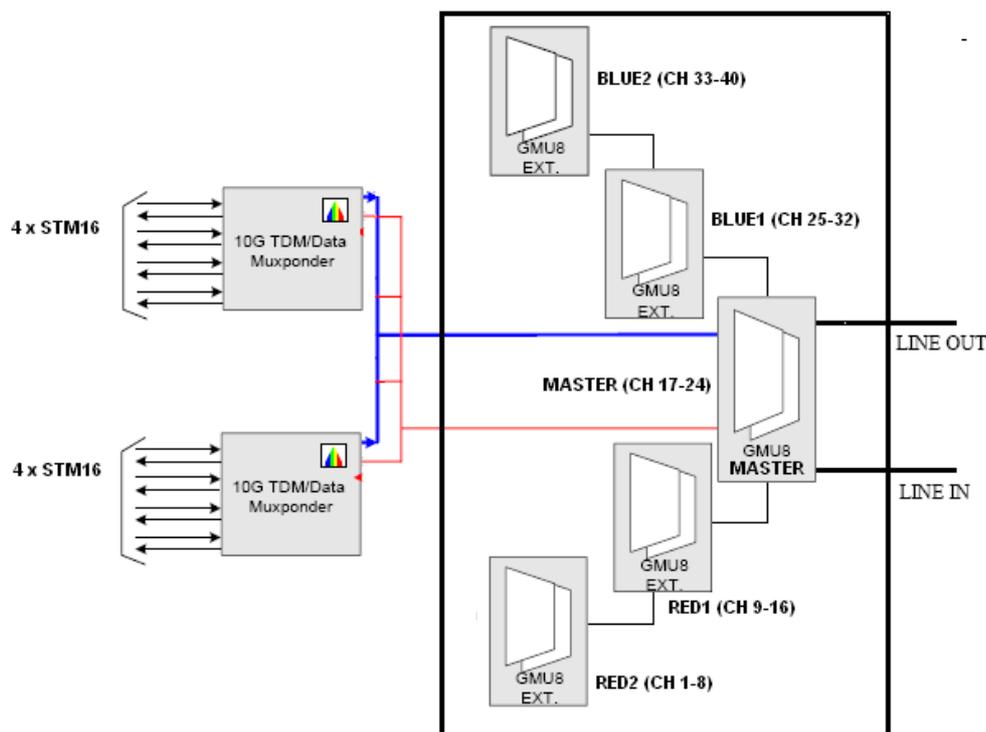


Fig. 3.36 Unidad de multiplexación de un grupo de 40 canales formado por cinco GMU-8

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Con esta explicación se determina el plan de asignación de longitudes de onda como se presenta en la tabla 3.39.

Plan de asignación de longitudes de onda					
	Número del Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	Estación de Amarre (T)	Pomasqui (T)
RED-1 GMU- 8	9	192.90	1554.13	Canal # 5 - 10G en funcionamiento	
	10	193.00	1553.33	Canal # 6 - 10G en funcionamiento	
	11	193.10	1552.52	Canal # 7 - 10G en funcionamiento	
	12	193.20	1551.72	Canal # 8 - 10G en funcionamiento	
	13	193.30	1550.92	Canal # 5 - 10G de protección	
	14	193.40	1550.12	Canal # 6 - 10G de protección	
	15	193.50	1549.32	Canal # 7 - 10G de protección	
	16	193.60	1548.51	Canal # 8 - 10G de protección	
Master GMU- 8	17	193.70	1547.72	Canal # 1 - 10G en funcionamiento	
	18	193.80	1546.92	Canal # 2 - 10G en funcionamiento	
	19	193.90	1546.12	Canal # 3 - 10G en funcionamiento	
	20	194.00	1545.32	Canal # 4 - 10G en funcionamiento	
	21	194.10	1544.53	Canal # 1 - 10G de protección	

Plan de asignación de longitudes de onda					
	Número del Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	Estación de Amarre (T)	Pomasqui (T)
Master GMU- 8	22	194.20	1543.73	Canal # 2 - 10G de protección	
	23	194.30	1542.94	Canal # 3 - 10G de protección	
	24	194.40	1542.14	Canal # 4 - 10G de protección	
BLUE-1 GMU- 8	25	194.50	1541.35	Canal # 9 - 10G en funcionamiento	
	26	194.60	1540.56	Canal # 10 - 10G en funcionamiento	
	27	194.70	1539.77	Canal # 11 - 10G en funcionamiento	
	28	194.80	1538.98	Canal # 12 - 10G en funcionamiento	
	29	194.90	1538.19	Canal # 9 - 10G de protección	
	30	195.00	1537.40	Canal # 10 - 10G de protección	
	31	195.10	1536.61	Canal # 11 - 10G de protección	
	32	195.20	1535.82	Canal # 12 - 10G de protección	
RED-2 GMU- 8	1	192.10	1560.61	Canal # 13 - 10G en funcionamiento	
	2	192.20	1559.79	Canal # 14 - 10G en funcionamiento	
	3	192.30	1558.98	Canal # 15 - 10G en funcionamiento	
	4	192.40	1558.17	Canal # 16 - 10G en funcionamiento	
	5	192.50	1557.36	Canal # 13 - 10G de protección	
	6	192.60	1556.55	Canal # 14 - 10G de protección	
	7	192.70	1555.75	Canal # 15 - 10G de protección	
	8	192.80	1554.94	Canal # 16 - 10G de protección	

Tabla 3.39 Esquema de frecuencias para la banda C

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Se utiliza una frecuencia adicional como canal de supervisión óptico (OSC, *Optical Supervisory Channel*) para sistemas con amplificadores de línea. La Figura 3.37 muestra un OSC situado a 1510 nm; es decir, fuera de la banda de frecuencias de los canales empleados para transportar tráfico. El OSC puede cursar una señal que permite transmitir amplia información de gestión; por ejemplo, estado de la sección óptica, control de potencia de la salida del láser, canales de comunicaciones de datos y circuitos de servicio de ingeniería. Se debe evitar la ubicación del canal OSC en bandas de bombeo Raman.

La ITU-T ha estandarizado la longitud de onda para el OSC en 1510 nm (ubicada en banda S, pudiendo interferir con el bombeo Raman para la banda L).

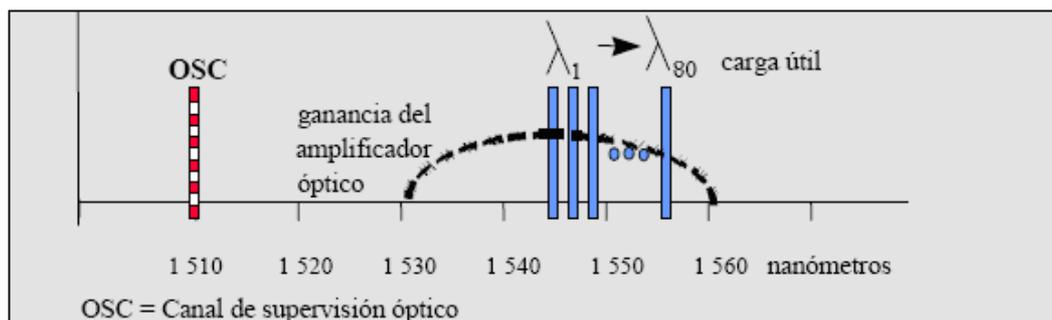


Fig. 3.37 Estándar UIT-T G.692

[Fuente: <http://www.itu.int/itudoc/itu-d/question/studygr2/q16-2-1-es.pdf>]

3.5.2.11 Configuración específica de los nodos del enlace principal

3.5.2.11.1 Nodo Estación de Amarre

El sitio de la Estación de amarre estará configurado como un elemento Terminal de red como se muestra figura 3.38.

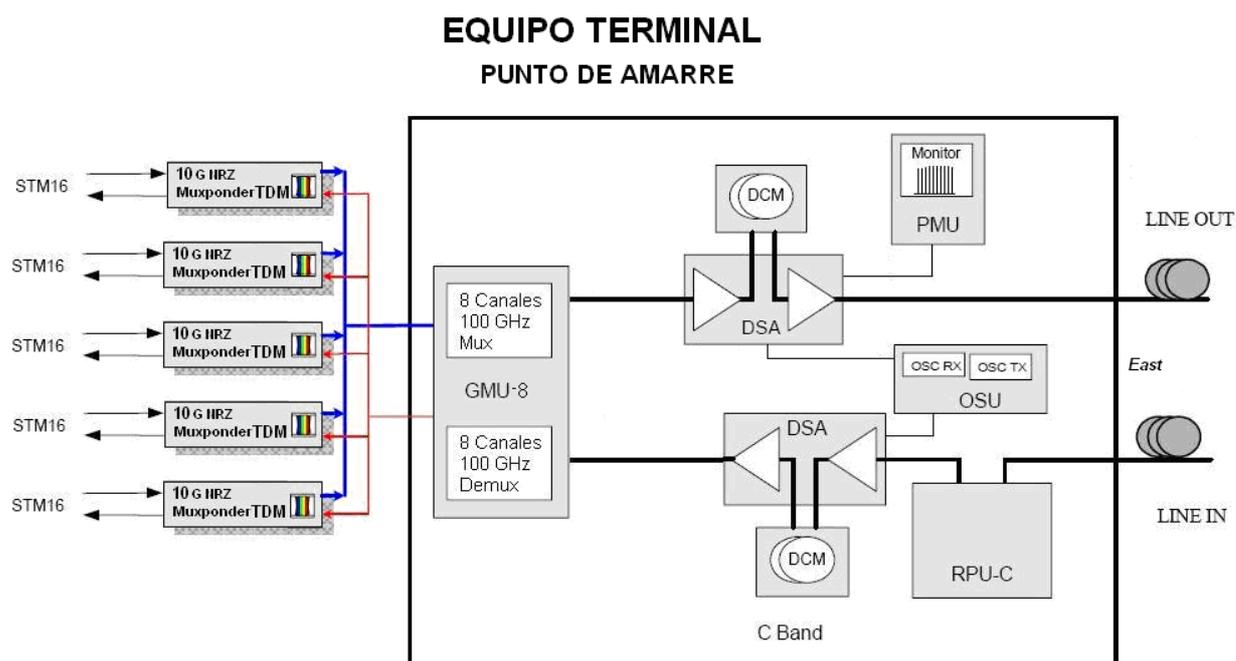


Fig. 3.38 Esquema del equipo Terminal para la Estación de Amarre

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

A continuación se da una descripción breve de las funciones de cada una de las unidades que constituyen el Equipo Terminal:

Muxponder TDM.- Es una unidad que permite multiplexar en el tiempo hasta cuatro señales cliente STM-16. Una tarjeta muxponder tiene cuatro puertos, en donde se pueden insertar los *transceivers* ópticos (Módulos SFPs), que soportan señales STM-16. El muxponder también es el encargado de convertir la señal cliente a una longitud de onda adecuada, la cual ingresa conjuntamente con siete longitudes de onda de muxponder diferentes a una GMU-8 (Multiplexor de 8 canales), las cuales son multiplexadas dentro de una sola señal óptica DWDM y se obtiene una señal compuesta de ocho canales ópticos separados 100 GHz.

GMU (Group Muxponder Unit) Master.- Es la encargada de combinar los canales ópticos individuales en una señal compuesta DWDM. Los canales ópticos están espaciados entre 50 GHz o 100 GHz. La sección demultiplexora ejecuta la operación inversa, separando los canales ópticos individuales de la señal compuesta DWDM. Estas unidades pueden manejar 8 canales, 40 canales y 80 canales, de ahí el nombre de GMU-8, GMU-40, GMU-80; sin embargo en este diseño se usará una tarjeta GMU-8 porque únicamente se requiere transmitir cuatro longitudes de onda a 10Gbps cada una en la banda C.

DCM (Dispersion Compensation Module).- Permite cancelar el efecto de la dispersión cromática. Estos DCM generalmente están compuestos de fibras ópticas compensadoras de dispersión (DCF).

DSA (Dual Stage Amplifier).- Es un amplificador de doble etapa, que actúa como pre-amplificador y booster. Entre las dos etapas se pueden ubicar los compensadores de dispersión.

SSA.- (Single Stage Amplifier).- Es un amplificador EDFA de una etapa.

RPU (Raman Pump Unit).- Es un amplificador Raman, el que amplifica la señal entrante mediante un bombeo de alta potencia.

PMU (Power Monitor Unit).- Esta unidad monitorea los niveles de potencia de cada uno de los canales que componen la señal DWDM. El dato de potencia de cada canal puede ser comparado con un perfil de potencia y si se presenta algún nivel no deseado los datos pasan a otro sistema que permite controlar o nivelar la

potencia, como los transpondedores y en algunos casos se utiliza el *Optical Levelling Unit* (OLU) que también permite controlar los niveles de potencia de cada cliente.

D-OSU (Dual Optical Supervisory Unit).- La unidad de supervisión óptica procesa la información del canal de Supervisión Óptico (OSC), el cual provee la telemetría dentro del sistema.

Una vez definidos los componentes del Equipo Terminal, se podrá entender claramente las funciones de las tarjetas que componen el equipo, las cuales serán insertadas en rack. En la figura 3.39 se muestra el orden en que las tarjetas deben ser ubicadas dentro del Rack, hay que tomar en cuenta que se realiza un bombeo Raman contra-direccional en la línea de recepción *East* proveniente del Nodo Río Silanche.

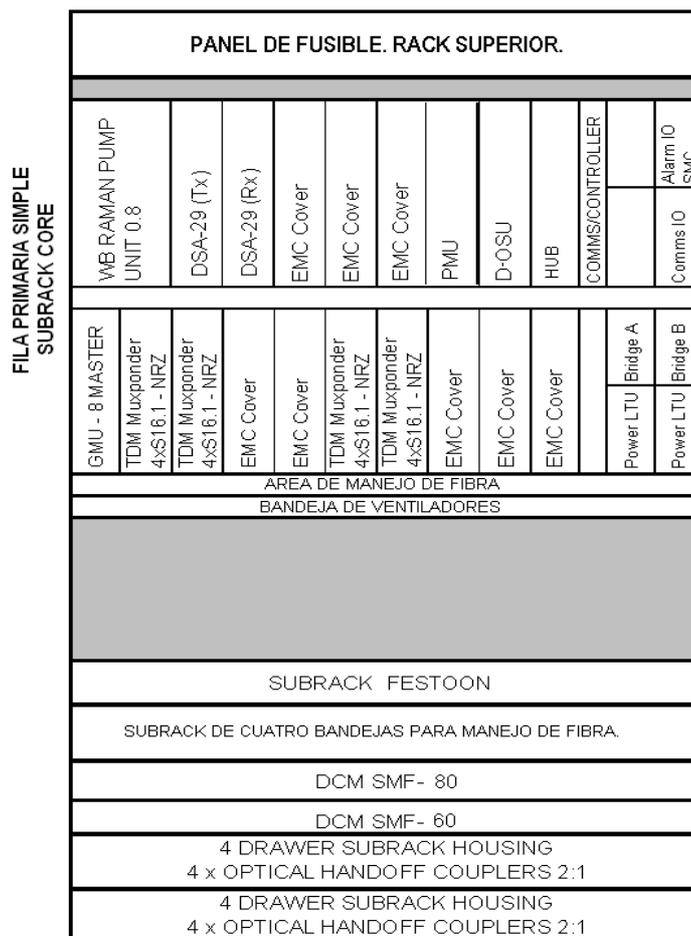


Fig.3.39 Parte frontal del Rack de la Estación de Amarre

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Dentro del Rack es necesario que los dispositivos se comuniquen entre si, de ahí surge la necesidad de nuevos elementos que se detallan a continuación:

HUB.- La unidad Hub provee la interfaz entre el bus interno y las tarjetas de un subrack.

COMMS/Controller (*Controller and Communication Unit*).- Estas tarjetas están localizadas tanto en el *sub-rack core*, como en el *sub-rack* de extensión y, realizan las siguientes funciones: Administración de la configuración de los equipos, gestión de auto-diagnóstico y procesamiento de alarmas, además almacena el *firmware*.

EMC Cover.- Es una cubierta metálica para los espacios vacíos.

Bridge.- La unidad *bridge* provee comunicación entre *subracks*. Cuando el bridge examina la dirección de destino y determina que la información es para otro *subrack* diferente entonces, lo transmite al destinatario.

3.5.2.11.2 *Nodo Río Silanche*

El sitio Río Silanche estará configurado como un Amplificador de línea, el cual se muestra en la figura 3.40.

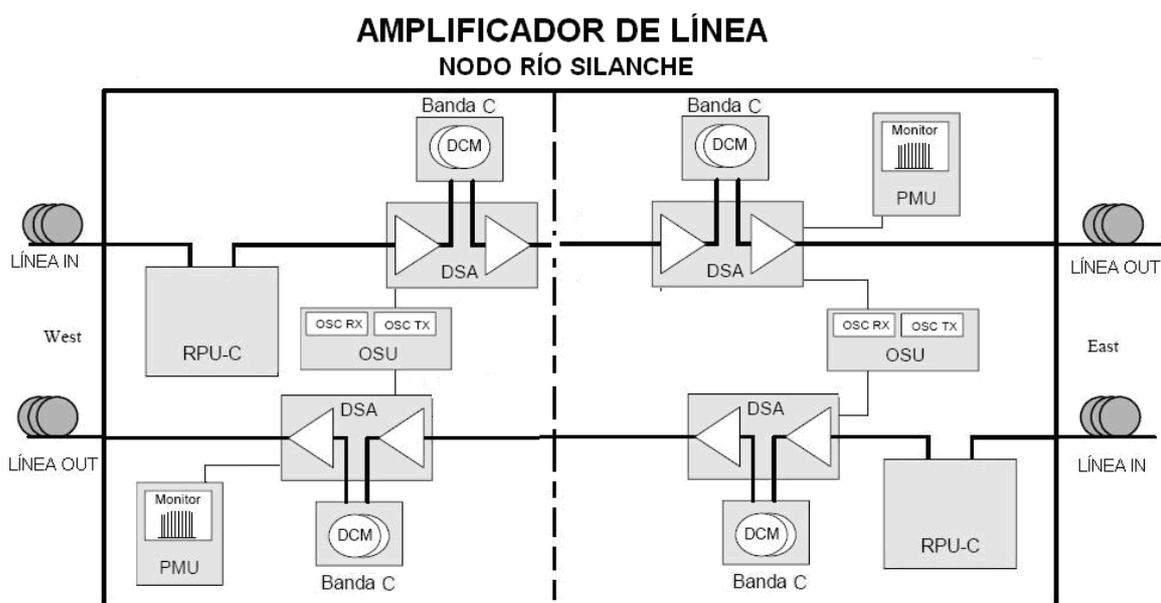


Fig. 3.40 Esquema del Amplificador de Línea en el Nodo Río Silanche
[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Como puede observarse los elementos que conforman el amplificador de línea son iguales a los utilizados en el Equipo Terminal, pero debe tenerse en cuenta que en este caso, se requiere de un bombeo Raman contra-direccional en la línea de recepción *East* proveniente de la Central Pomasqui Ex_Andinatel y también en la línea de recepción *West* proveniente del Estación de Amarre, en la figura 3.41 se muestran las tarjetas colocadas apropiadamente en el *Rack*.

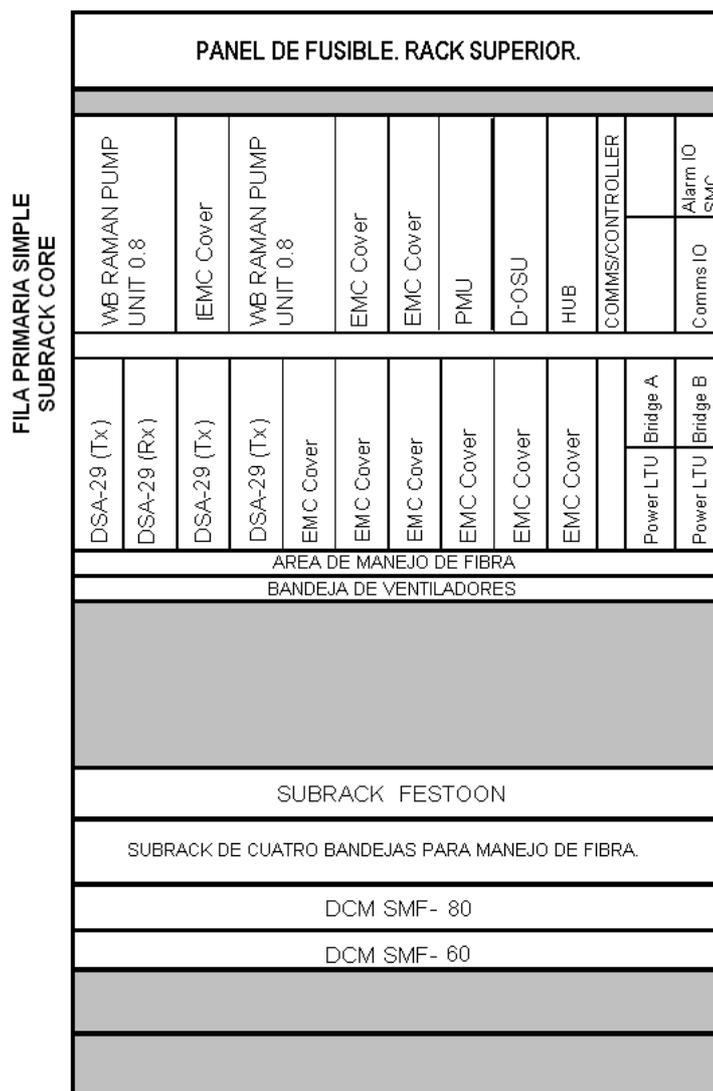


Fig. 3.41 Parte frontal del *Rack* del Nodo Río Silanche

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

3.5.2.11.3 Central Pomasqui Ex_Andinatel

El sitio Central Pomasqui Ex_Andinatel estará configurado como un elemento Terminal de red, el cual se muestra figura 3.42.

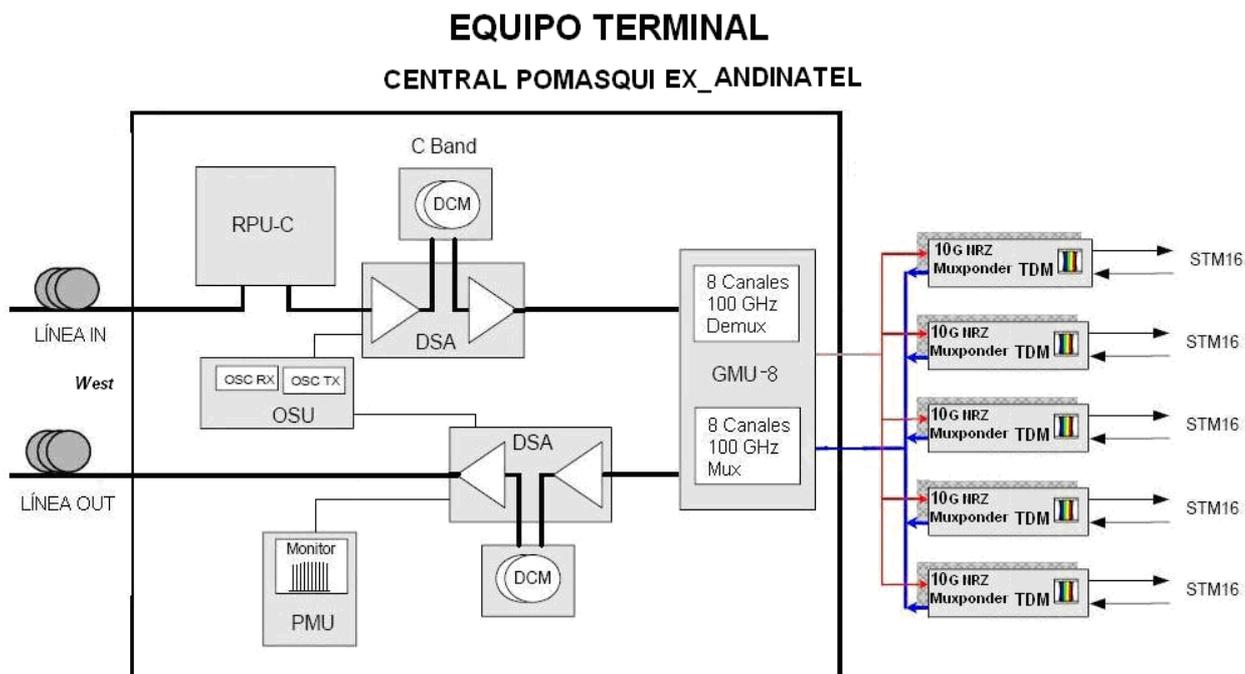


Fig. 3.42 Esquema del equipo Terminal para la Central de Pomasqui Ex_Andinatel

[Fuente: Generado por los autores del presente Proyecto de Titulación]

Como también se puede apreciar los elementos que conforman el Equipo Terminal de la Central Pomasqui Ex_Andinatel son similares a los utilizados en el Equipo Terminal de la Estación de Amarre, pero debe tenerse en cuenta que se requiere de un bombeo Raman contra-direccional en la línea de recepción West proveniente del Nodo Río Silanche, en la figura 3.43 se muestran las tarjetas colocadas apropiadamente en el Rack.

La lista de materiales para cada sitio está detallada en el Anexo G.

Además de los equipos expuestos en esta sección, cada sitio tendrá un rack adicional equipado con un set de *hot spares*¹¹⁶.

¹¹⁶ Hot Spare.- Son componentes de respaldo (ejemplo, discos, controladores, etc.) que están en línea y disponibles.

FILA PRIMARIA SIMPLE SUBRACK CORE		PANEL DE FUSIBLE. RACK SUPERIOR.	
GMU - 8 MASTER	WB RAMAN PUMP UNIT 0.8		
TDM Muxponder 4xS16.1 - NRZ	DSA-29 (Tx)		
TDM Muxponder 4xS16.1 - NRZ	DSA-29 (Rx)		
EMC Cover	EMC Cover		
EMC Cover	EMC Cover		
TDM Muxponder 4xS16.1 - NRZ	EMC Cover		
TDM Muxponder 4xS16.1 - NRZ	EMC Cover		
EMC Cover	PMU		
EMC Cover	D-OSU		
EMC Cover	HUB		
	COMMS/CONTROLLER		
Power LTU Bridge A	Comms IO		Alarm IO SMC
Power LTU Bridge B			
AREA DE MANEJO DE FIBRA			
BANDEJA DE VENTILADORES			
SUBRACK FESTOON			
SUBRACK DE CUATRO BANDEJAS PARA MANEJO DE FIBRA.			
DCM SMF- 80			
DCM SMF- 60			
4 DRAWER SUBRACK HOUSING 4 x OPTICAL HANDOFF COUPLERS 2:1			
4 DRAWER SUBRACK HOUSING 4 x OPTICAL HANDOFF COUPLERS 2:1			

Fig. 3.43 Parte frontal del *Rack* de la Central Pomasqui de Ex_Andinatel
[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

3.5.2.12 Dimensiones Físicas del Enlace Principal

La tabla 3.40 muestra el número de *racks* requeridos para cumplir los requisitos del diseño propuesto en cada sitio de la red.

Cada *rack* tiene las siguientes dimensiones estandarizadas:

Altura: 2200mm

Profundidad: 300mm

Ancho: 600mm

Dimensiones físicas de los Racks del enlace principal					
Nombre del Sitio	Working	Hot Spare	ODF	Total de Racks	Dimensiones
Estación de Amarre	1	1	1	3	2200mmx300mmx1800mm
Río Silanche	1	1	1	3	2200mmx300mmx1800mm
Central Pomasqui Ex_Andinatel	1	1	1	3	2200mmx300mmx1800mm

Tabla 3.40 Dimensiones físicas de los Racks para el enlace principal

[Fuente: Manual Marconi MHL 3000]

Será necesario realizar una inspección para confirmar la posición del *Rack*.

3.5.2.13 Reparto óptico ODF

El ODF (*Optical Distribution Frame*) es el lugar físico para las conexiones y estará ubicado en dos sitios: La Estación de Amarre y la Central Pomasqui Ex_Andinatel.

La lista de materiales para los ODFs está detallada en el Anexo G.

3.5.3 REDUNDANCIA

El sistema soporta el mecanismo de protección denominado Protección de conexión entre subredes ópticas 1+1 (OSNCP¹¹⁷) para la protección de tarjetas *transponders/muxponders* y la protección del puerto cliente, el diagrama de bloques de la figura 3.45 muestra la forma de trabajo.

La señal cliente se divide en dos señales idénticas por medio de un splitter/acoplador 2:1 (ver fig. 3.44), cada señal será enviada a dos *Muxponders* (*Muxponder* operativo y *Muxponder* de protección) de 10Gbps que tendrán frecuencias DWDM diferentes, pero conectados a la misma fibra, por lo tanto el tráfico es transportado dos veces a lo largo de la fibra. En la recepción los *bytes* son procesados en ambos *muxponders* pero solo uno (*Muxponder Working*) tendrá la línea cliente activa hacia el tributario.

¹¹⁷ OSNCP, *Optical Sub-Network Connection Protection*

Basado en criterios de fallas de *muxponder* o errores del operador, en la recepción el subsistema de protección determina cuál de las dos salidas cliente es habilitada.

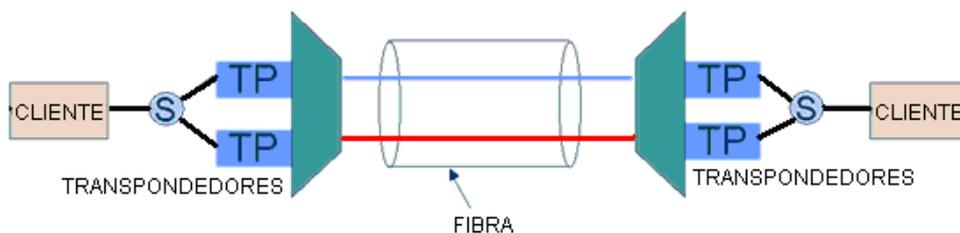


Fig. 3.44 Splitter/acoplador óptico 2:1

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

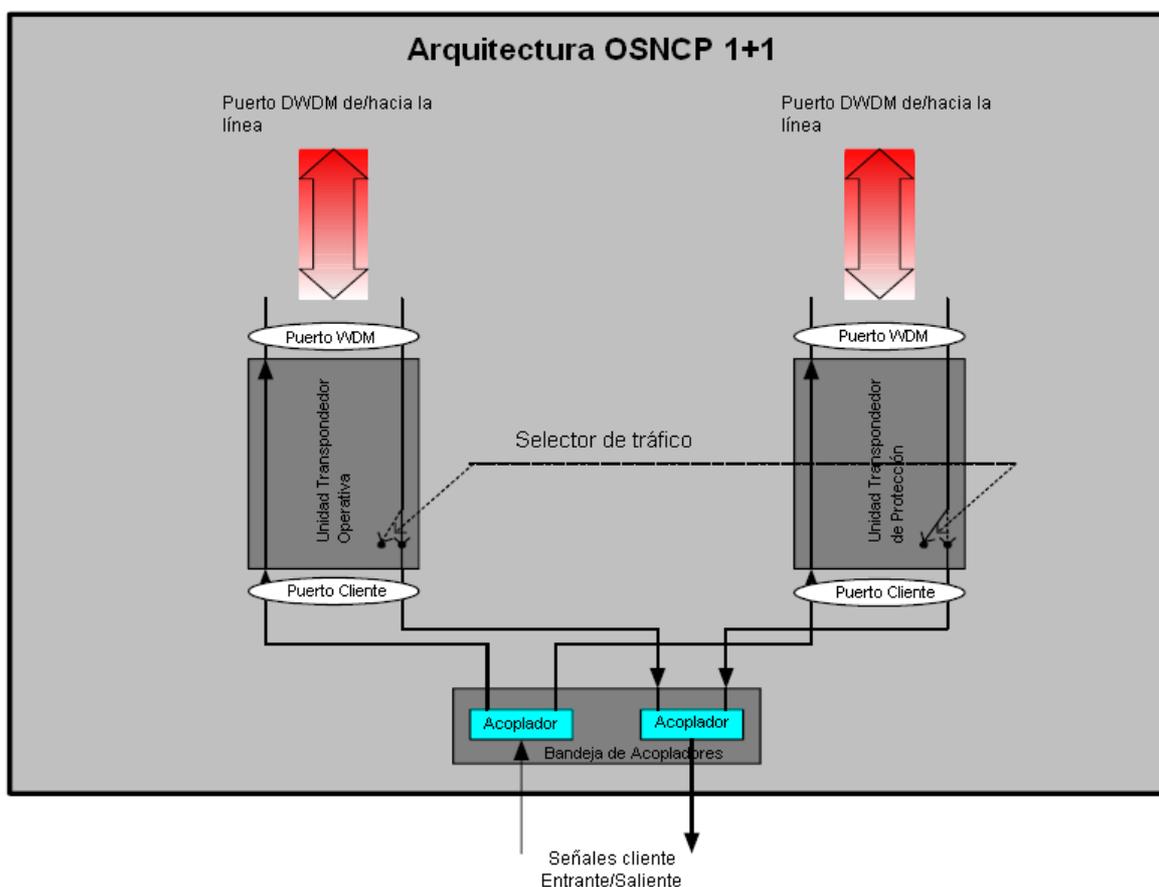


Fig. 3.45 Protección OSNCP 1+1

[Fuente: Manual Marconi MHL 3000]

3.5.3.1 Protección Óptica del Sistema

En caso de que ocurra un corte de fibra, para evitar la exposición del rayo de luz (el mismo que es perjudicial para el operador de la red) el equipo usa un

procedimiento denominado Apagado automático del Láser (ALS¹¹⁸) que cumple con la recomendación G.958 de la UIT-T.

3.5.3.1.1 Apagado Automático del Láser (ALS)

ALS se implementa para la protección del ser humano de forma tal que la radiación láser no afecte o dañe a las personas cuando existe un corte de fibra, en tal suceso se activa un mecanismo que hace que se apague el láser.

Cuando ocurre un corte en la fibra óptica, cualquier elemento que está transmitiendo potencia hacia el punto de ruptura apaga su salida. Con el fin de localizar la falla y mejorar el tiempo de respuesta en restablecer la operación, sólo los equipos entorno a la ruptura son apagados, los límites a esta interrupción son descritos como la sección ALS.

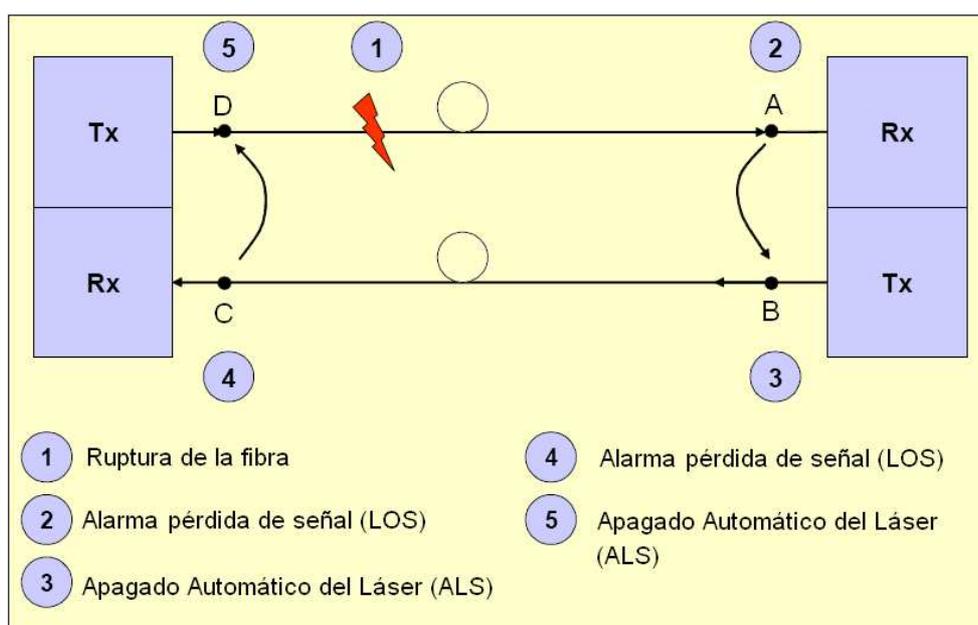


Fig. 3.46 Mecanismo ALS

[Fuente: Manual de equipos *Nokia Siemens Networks*]

Si se tiene una sección ALS entre dos amplificadores como se ilustra en la figura 3.46, el amplificador *booster* en el punto D (Tx) y el pre-amplificador en el punto A (Rx), para determinar si existe una ruptura basan su funcionamiento en la detección de pérdida de señal (LOS) en el trayecto D-A. Si en cualquier momento

¹¹⁸ ALS, *Automatic Laser Shutdown* para amplificadores xSA

en el punto A se detecta que el nivel de potencia se ha reducido por debajo del umbral establecido, de inmediato el pre-amplificador del punto A deja de transmitir la señal NOT_LOS al amplificador B. El amplificador *booster* del punto B desconecta su salida, por ende el pre-amplificador en el punto C detecta pérdida de señal (LOS) y de igual forma interrumpe la señal NOT_LOS al *booster* en el punto D, el cual apaga su señal de salida, protegiendo así la ruptura.

Al momento de reconectar la fibra, el extremo distante sensa la potencia y restablece la operación normal de los amplificadores.

3.5.4 EQUIPOS *HOT SPARE* PARA EL ENLACE PRINCIPAL

El *backbone* de salida internacional es una red en donde la disponibilidad es crítica las 24 horas del día. Por esa razón a más de tener las protecciones mencionadas anteriormente, el sistema soportará el uso de *hot spare*, componentes de repuesto que se mantienen en funcionamiento (alimentado). *Hot spare* puede traducirse como reposición en caliente, es decir que los componentes de reserva posibilitan al sistema seguir trabajando.

La lista de materiales para los *hot spare* DWDM se detallan en el Anexo G.

3.5.5 ADMINISTRACIÓN DE LA RED

Se recomienda que el sistema de administración de la red esté basado en el Sistema de administración *Service ON Optical (SOO)* de Ericsson (MV38) y el administrador de los elementos *Service ON Optica (MV36)*. El EMS¹¹⁹ y NMS¹²⁰ estarán instaladas en la misma plataforma de hardware, esta plataforma estará en la Central Pomasqui de Ex_Andinatel. Este sistema será configurado en *warm*

¹¹⁹ EMS (*Element Management System*).- El sistema de administración de elementos administra uno o más elementos de red (NE¹¹⁹), típicamente el EMS administra las funciones y capacidades internas de cada NE pero no el tráfico entre los diferentes NEs de una red. Para soportar la administración del tráfico entre NEs, el EMS se comunica con el sistema de administración de redes (NMS).

¹²⁰ Se define a NMS ("*Network Management System*") como una estación que ejecuta aplicaciones de gestión de red que monitorizan y controlan todos los elementos de red (NE).

standby para mantener una copia de la base de datos primaria (activa) en un servidor secundario. En caso de que falle la plataforma principal de administración habrá una transferencia de la gestión a la red del servidor secundario o *standby*.

La administración puede ser gestionada por el sistema de administración de la red (NMS), el Terminal de acceso local (LCT¹²¹) o por un Terminal de acceso local remoto.

Los elementos de red (NE) poseen hacia el exterior las interfaces F y Q, una interfaz Q permite la conexión a un elemento de administración (gestión remota). Además dispone de la interfaz F o la interfaz Ethernet para la conexión de un Terminal local (Estación de trabajo PC con cualquier sistema operativo DOS, OS o UNIX) a cualquier elemento de la red mediante un programa de emulación de terminales, para la configuración del mismo. La comunicación entre los elementos de red se realiza mediante un canal de comunicación de datos (DCC¹²²), además la comunicación de datos entre elementos de la red puede ser configurada para utilizar un enlace de comunicaciones como una red de área local (LAN), como se muestra en la figura 3.47.

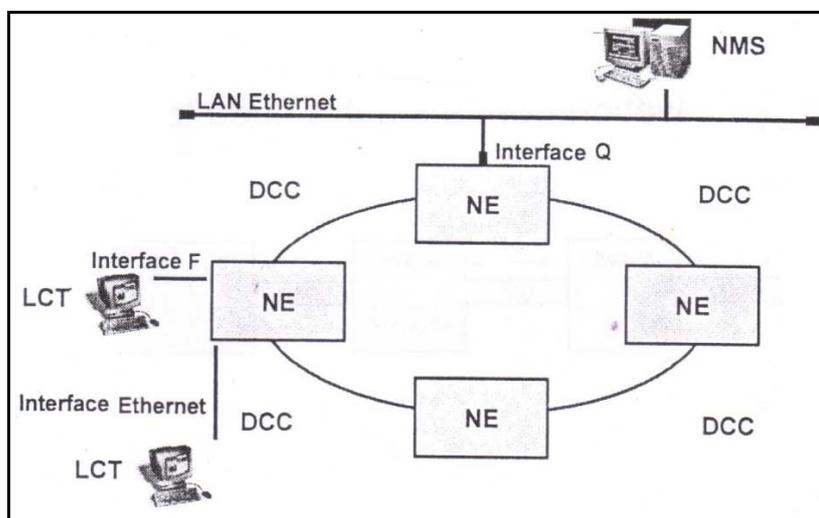


Fig. 3.47 Administración de la red
[Fuente: Manual del Multihaul 3000 de Marconi]

¹²¹ LCT, *Local Craft Terminal*

¹²² DCC, *Data Communications Channel*

4. CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

4.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación financiera se realizará con criterios técnicos para determinar el presupuesto de inversión que se requiere para implementar una Red de Backhaul en las fibras ópticas del OCP que están a disposición del Estado Ecuatoriano mediante la técnica DWDM.

En este capítulo se establecerá la inversión necesaria para diseñar, instalar, operar y mantener la red DWDM, cuyo monto total se denomina preinversión. Para establecer el monto de la preinversión se dividirá en dos secciones: el presupuesto de inversión, en donde se determinan las inversiones fijas, las inversiones diferidas y el capital de trabajo, en la segunda sección se establecerán los costos de operación y mantenimiento. Queda claro que esta inversión se establece antes de que inicie la operación del proyecto, por lo tanto este presupuesto referencial puede cambiar en la etapa de ejecución y no es parte de este proyecto de titulación analizarlo.

Para tener los conceptos claros de los términos utilizados en el proyecto se iniciará con un marco teórico donde el tema principal es la preinversión.

4.2 DEFINICIONES PREVIAS¹²³

4.2.1 PROYECTO

Es el conjunto coherente de operaciones y acciones que orientadas por objetivos determinados, permiten modificar una situación inicial conocida, y lograr un

¹²³ Miranda, Juan José, *Gestión de Proyectos: Identificación, Formulación, Evaluación Financiera, Social, Ambiental*, 2004, Bogotá, MM Editorial.

objetivo caracterizado por un conjunto de factores de distinto orden, que permite mejorar las condiciones iniciales.

4.2.2 EL CICLO DEL PROYECTO

El término "ciclo del proyecto" se usa para señalar las diferentes etapas que recorre el proyecto desde que se concibe la idea hasta que se materializa en una obra o acción concreta, estas etapas se ilustran en la Figura 4.1 y son: la preinversión, la inversión o ejecución y la etapa de funcionamiento u operación, y finalmente la evaluación ex-post.



Fig. 4.1 El ciclo del proyecto

[Fuente: http://www.dnp.gov.co/archivos/documentos/DIFP_Bpin/CAP%208.pdf]

4.2.2.1 Preinversión

“La fase de "preinversión", corresponde a todos los estudios que se precisa adelantar antes de tomar la decisión de canalizar recursos hacia algún objetivo particular; esta fase incluye los procesos de identificación, selección, formulación y evaluación del proyecto.” (Miranda, 2004,5).

4.2.2.2 Identificación de Proyectos

“La identificación del proyecto se fundamenta en la explicación de los aspectos principales del problema o necesidad y el planteamiento de las posibles

alternativas de solución, o la forma como se puede aprovechar una oportunidad.” (Miranda, 2004,7).

4.2.2.2.1 Selección de Proyectos

El proceso de selección de proyectos para el empresario privado suele, en la mayoría de los casos, ser bien simple pues está orientado a seleccionar el o los proyectos que maximicen su beneficio, teniendo en cuenta las restricciones de capital y, desde luego, la magnitud del riesgo. Sin embargo en las empresas estatales, que no tienen el objetivo de generar utilidades, prefieren un adecuado funcionamiento del proyecto y su sostenibilidad.

4.2.2.2.2 La Formulación del Proyectos

La formulación de un proyecto, que en ocasiones se suele conocer más comúnmente como "estudio de preinversión" cubre varias etapas, que constituyen acciones de aproximación sucesivas, hacia la toma de la decisión de movilizar recursos hacia un objetivo determinado.

La etapa de formulación permite clarificar los objetivos del proyecto y analizar en detalle las partes que lo componen. Dependiendo de sus objetivos se examina la viabilidad técnica, económica, financiera, institucional y ambiental y la conveniencia social de la propuesta de inversión.

Como este capítulo está orientado a un estudio financiero, se debe que tomar las siguientes consideraciones de orden financiero:

- Inversiones necesarias y sus valores aproximados.
- Presupuesto de costos de funcionamiento.
- Presupuesto de ingresos previstos para cada uno de los períodos del horizonte del proyecto¹²⁴.
- Fuentes posibles de financiaciones privadas o públicas, tanto para el período de instalación como para el de la operación.

¹²⁴ El horizonte del proyecto se refiere a la etapa de ejecución, operación y liquidación.

4.2.2.2.3 La Evaluación Ex - ante

La evaluación se hace para garantizar una asignación óptima de los recursos disponibles, y para el logro de los objetivos propuestos; por la tanto la etapa de evaluación consiste en determinar mediante la aplicación de técnicas cuantitativas y/o cualitativas la conveniencia o no, de asignar unos recursos hacia un uso determinado.

4.2.2.3 Ejecución

Una vez que el proyecto ha sido suficientemente estudiado y se ha determinado su conveniencia, y aprobada su inversión, y se dispone además de todas las circunstancias de orden económico, financiero y político, se procede a su ejecución, que no es otra cosa que la disposición de los recursos humanos, técnicos, financieros y administrativos para llevar a cabo la obra necesaria para la producción de un bien o de prestación de un servicio. (Miranda, 2004, 50).

4.2.2.4 Operación

La etapa de "operación" corresponde a una actividad permanente y rutinaria encaminada a la producción de un bien o a la prestación de un servicio; que constituye el objeto social de la empresa.

4.2.3 INVERSIÓN

Para determinar las inversiones del proyecto, se identifica la magnitud de los activos que requiere la empresa para la transformación de insumos o prestación de servicios y la determinación del monto de capital de trabajo necesario para el funcionamiento normal del proyecto después del período de instalación.

El horizonte del proyecto tiene tres etapas perfectamente delineadas (ver gráfica 4.2); en primer lugar la etapa de instalación o ejecución en la cual se precisa dimensionar las necesidades de inversiones tanto fijas, como diferidas y desde luego, capital de trabajo, que suponen salida de dinero; la etapa de operación o de funcionamiento en donde se logra el objetivo social del proyecto mediante la

producción de bienes o la prestación de servicios, se generan costos derivados del pago a los factores utilizados y al mismo tiempo aparecen ingresos provenientes de la venta de los productos o servicios y la tercera etapa en la cual el proyecto deja de cumplir con los objetivos financieros, económicos o sociales, se precisa su liquidación (desinversión), que supone la venta de los activos que tienen algún valor comercial y se generan algunos ingresos.

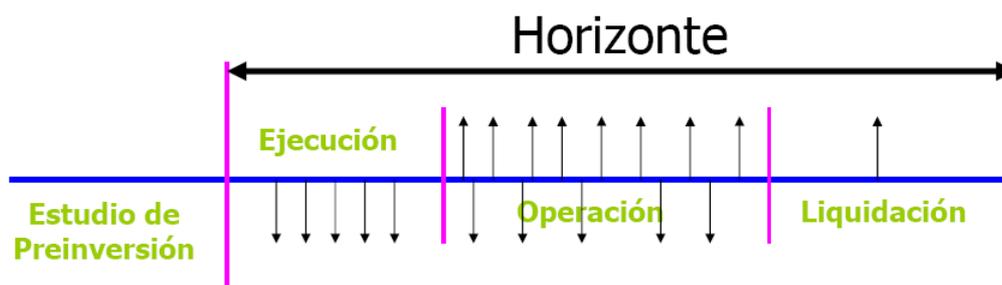


Fig. 4.2 Horizonte del proyecto

[Fuente: http://www.dnp.gov.co/archivos/documentos/DIFP_Bpin/CAP%208.pdf]

La mayor parte de las inversiones se hacen antes de la puesta en marcha del proyecto, sin embargo, algunas inversiones se pueden realizar en el período de funcionamiento, ya sea porque es preciso renovar algún activo desgastado o por que se hace necesario incrementar la producción ante expectativas en el crecimiento de la demanda.

Los costos para las inversiones que se hacen principalmente en el período de instalación se pueden clasificar en tres grupos: las inversiones fijas, las inversiones diferidas y el capital de trabajo.

4.2.3.1 Inversiones Fijas

Las inversiones fijas son aquellas que se realizan en bienes tangibles¹²⁵, se utilizan para garantizar la operación del proyecto y no son objeto de comercialización por parte de la empresa y se adquieren para utilizarse durante su vida útil; son entre otros:

¹²⁵ Los bienes tangibles son aquellos materiales que pueden apreciarse por los sentidos como una mesa, un terreno, una casa.

- Los terrenos para la construcción de instalaciones, o explotaciones agrícolas, o ganaderas o mineras
- Las construcciones y obras civiles; que incluyen la preparación y adaptación del terreno para la construcción, las edificaciones donde funcionará la planta de producción o sede principal, obras auxiliares como zonas de parqueo, laboratorios, bodegas y talleres. También se deben incluir los caminos y vías de acceso, vías internas y peatonales, cerramientos y las acometidas para servicios. También hacen parte de estas inversiones, los honorarios destinados al pago de contratistas, ingenieros y arquitectos, incluyendo los pagos de licencias de construcción, jornales de operarios con sus respectivas prestaciones y aportes al seguro social.
- Maquinarias y equipos; comprende las inversiones necesarias para la producción o prestación del servicio, así como los equipos que se utilizan en instalaciones auxiliares como: laboratorios, talleres y oficinas, también se carga a este rubro los gastos de transporte, tarifas aduaneras, etc.
- Las vías de acceso internas, bodegas, parqueaderos, cerramientos, maquinaria, equipo y herramientas
- Vehículos, corresponde a todos los equipos de movilización interna y externa, tanto de pasajeros como de carga, ya sea para el transporte de insumos o de los productos destinados a los consumidores.
- Muebles; Se trata de la dotación de las oficinas y bodegas previstas en la estructura administrativa.

4.2.3.2 Inversiones Diferidas

Las inversiones diferidas son aquellas que se realizan sobre la compra de servicios o derechos que son necesarios para la puesta en marcha del proyecto; tales como:

- Los estudios técnicos y jurídicos.
- Los estudios económicos y ambientales.
- Los gastos de organización, deben incluir aquí: acuerdo de voluntades; constitución y registro de la sociedad; matrícula mercantil; solicitud y tramitación de créditos; gestión de importación de equipos y vehículos; etc.

- Los gastos de montaje; la instalación del equipo.
- Instalación, Pruebas y Puesta en Marcha; salarios de operarios, costo de materia prima y materiales, honorarios de ingenieros y supervisores, con el fin de probar y auditar la calidad del producto, y garantizar el óptimo funcionamiento del equipo; además del acoplamiento entre los diferentes departamentos.
- Uso de patentes y licencias; patentes, marcas, registros o derechos similares.
- Los gastos por capacitación y entrenamiento del personal.

Cuando existe cierta incertidumbre en la estimación de estos montos es aconsejable incluir una partida para imprevistos por un porcentaje entre el 5% y el 10% del total de los diferidos.

4.2.3.3 Capital de Trabajo

“El capital de trabajo, es entonces, la parte de la inversión orientada a financiar los desfases o anacronismos entre el momento en que se producen los egresos correspondientes a la adquisición de insumos y los ingresos generados por la venta de bienes o servicios, que constituyen la razón de ser del proyecto.” (Miranda, 2004, 209).

Queda claro que la magnitud del capital de trabajo depende en buena medida de los recursos necesarios para atender las erogaciones rutinarias de muy corto plazo (arriendos, salarios, pago de servicios, etc.) en la empresa, de la duración del proceso técnico de transformación y del valor de los inventarios y de la política de crédito que asuma la empresa.

La estimación del “capital de trabajo” reviste un elevado grado de dificultad, pues depende en gran medida de las circunstancias propias de cada proyecto y su entorno, entendido este, como el conjunto de hechos que puedan alterar el comportamiento de usuarios, competidores, proveedores, intermediarios, autoridades, etc.

Cabe anotar que para efectos de la formulación de proyectos, el capital de trabajo es una parte muy significativa de la inversión a largo plazo, pues forma parte del monto permanente de los activos corrientes¹²⁶ necesarios para asegurar la operación del proyecto.

La inversión en capital de trabajo está constituida por el dinero disponible inmediatamente en:

- Efectivo y bancos; el monto de esta asignación se calcula con base en los pagos de sueldos, salarios, costos administrativos, servicios, etc.;
- El monto de los inventarios necesarios en materia prima y materiales
- Productos en proceso; hacer una estimación de los costos de los productos en las etapas de producción.
- Inventarios de Productos Terminados; Dado que los costos de control, manipuleo, conservación y lucro cesante pueden ser en determinados casos muy altos, es aconsejable adelantar estudios que permitan identificar niveles mínimos necesarios de inventarios, que armonicen los programas de producción con las políticas de distribución.
- La magnitud de la cartera¹²⁷, que depende principalmente de las políticas de crédito adoptadas por la empresa
- Con efecto compensatorio las cuentas por pagar; como resultado de los créditos a corto plazo, recibidos de los proveedores.

4.2.4 COSTOS

“Durante el período de operación se pueden identificar cuatro clases de costos: los costos de fabricación que son los costos ligados directamente a la producción del bien o a la prestación del servicio, en segundo lugar los costos administrativos propios de la organización de la empresa; por otro lado los costos causados por

¹²⁶ Son considerados activos corrientes, el efectivo, depósitos bancarios y otros activos que pueden convertirse en efectivo (en un plazo de un año o menos), como por ejemplo, letras, cuentas a cobrar, acciones, etc.

¹²⁷ La cartera también es conocida como cuentas por cobrar.

efecto del impulso de las ventas; y finalmente los costos financieros generados por el uso del capital ajeno.” (Miranda, 2004, 215)

4.2.4.1 Costos de Fabricación

Son aquellos que se vinculan directamente con la elaboración del producto o la prestación del servicio. Se suelen clasificar en: costo directo, gastos de fabricación y otros gastos.

4.2.4.1.1 Costo directo

Los costos directos incluyen:

- La materia prima; que es el insumo que sufrirá precisamente el proceso de transformación.
- Los materiales directos; aquellos que participan directa en el proceso de transformación,
- Mano de obra directa; Son los operarios que participan directamente en el proceso de transformación, como: obreros, operarios de máquinas, alimentadores de equipos, cargadores, etc.
- Prestaciones; cuando se asuma un costo laboral se tendrá que hacer una previsión para el pago de prestaciones legales y extralegales, tales como: cesantías¹²⁸, fondos de reserva, vacaciones, intereses a la cesantía, aportes a la Seguridad Social, etc.,
- Otros materiales directos.

4.2.4.1.2 Gastos de Fabricación

Estos gastos se caracterizan por la dificultad de identificar su presencia en cada unidad de producción o de servicio y están constituidos en:

- Materiales Indirectos; se trata principalmente de: lubricantes, combustibles, papelería y formatos propios de los procedimientos, útiles de aseo, materiales y equipos de seguridad industrial.

¹²⁸ Las cesantías se deben liquidar al final de año o al terminar el contrato de trabajo

- Mano de Obra Indirecta; corresponde a los honorarios del gerente técnico, jefes de departamentos técnicos, supervisores, personal de laboratorio, personal de servicios auxiliares (almacén, control de calidad, seguridad, enfermería, etc.), con sus respectivas prestaciones.
- Prestaciones
- Otros Gastos Indirectos:
 - Depreciación de Fábrica; se trata de incorporar el valor anual de la depreciación de edificaciones, equipos, muebles, vehículos y otras instalaciones ligadas directamente al proceso de producción.
 - Servicios; agua, energía, gas, teléfono.
 - Mantenimiento; constituye todas las erogaciones por concepto de pagos de protección, conservación y reparación de las instalaciones, equipos, muebles, y vehículos. Incluye los pagos de mano de obra directa e indirecta (maestros y auxiliares), depreciaciones, arriendos de talleres y herramientas, lo mismo que repuestos.
 - Seguros Fábrica; comprende el pago anual de pólizas de protección de las instalaciones y equipos contra incendios, hurto, calamidad, etc.
 - Impuestos de Fábrica; impuesto predial
 - Amortización de Diferidos¹²⁹
 - Otros; arriendos, comunicaciones, eliminación de desechos, etc.

4.2.4.1.3 Gastos de Administración:

- Sueldos; comprende los sueldos de personal ejecutivo, personal auxiliar de compras, de contabilidad, de auditoría, archivo, cobranzas, secretaría, servicios generales, etc.
- Prestaciones
- Depreciaciones Administrativas; se trata de la depreciación de activos fijos que tienen su origen en el área administrativa, tales como: muebles, equipos de cómputo y equipos de oficina.

¹²⁹ Amortización de diferidos, las inversiones diferidas realizadas durante el período de instalación ya han sido canceladas, sin embargo, la legislación permite que en los cinco primeros años se vayan amortizando, obteniendo una reducción en el monto de los impuestos.

- Amortización de Diferidos; corresponde a la amortización de diferidos que tienen origen en el área administrativa.
- Seguros; se trata del costo de las pólizas de seguros de incendio, robo, hurto, etc. que cubre las instalaciones administrativas, muebles y equipos.
- Impuestos; se hace referencia a otros impuestos que no fueron incluidos anteriormente.
- Otros; papelería y útiles de oficina, gastos de representación, comunicaciones (teléfono, cables, fax); transporte (movilidad local, viajes y viáticos); relaciones públicas, investigación y desarrollo.

4.2.4.1.4 Gastos de Ventas:

- Gastos de Comercialización; sueldos y salarios (ejecutivos y supervisores de ventas, investigadores de mercado); comisiones de vendedores; gastos de representación, viajes, viáticos, gastos de publicidad (diarios, revistas, radio, televisión, muestras gratis, exposiciones, vallas, puntos de ventas, etc.); asistencia técnica a clientes; papelería y útiles de oficina; comunicaciones, etc.
- Gastos de Distribución; sueldos y salarios de supervisores, secretarias, impulsadoras, conductores de vehículos de reparto y auxiliares; fletes, empaques y envases además de la operación de los puntos de venta y almacenes.

4.2.5 INGRESOS

En un proyecto los ingresos están representados por el dinero recibido por concepto de las ventas del producto o la prestación del servicio o por la liquidación de los activos que han superado su vida útil dentro de la empresa. (Miranda, 2004, 221).

La estimación de los ingresos en ocasiones es bien complicada, y depende, en gran parte, de la calidad y rigor de los estudios de mercado, sobre todo en lo que respecta al comportamiento de los precios y la política de crédito. (Miranda, 2004, 222).

4.3 INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.3.1 TAMAÑO

Para dimensionar el tamaño de la red, se toma como referencia el estudio de tráfico desarrollado en el capítulo III, el cual determina que la capacidad de ancho de banda requerida hasta el año 2013 será de 80 Gbps aproximadamente. Sin embargo, para iniciar con la operación de la red bastará utilizar dos longitudes de onda a 10 Gbps, porque son suficientes para manejar el tráfico actual, pero ofrece la posibilidad de escalar fácilmente con solo iluminar otra longitud de onda.

4.3.2 LOCALIZACIÓN

La red de Backhaul comprende el trayecto Esmeraldas – Pomasqui, porque en Quito se concentra la mayor parte del tráfico de voz, datos e Internet posibilitando el transporte de la información a través de la cabeza de cable submarino que aterrizará en Esmeraldas. La estación de amarre estará ubicada en la Playa las Palmas – Esmeraldas porque esta cerca a las costas ecuatorianas y tiene una buena carretera que le permitirá conectarse a la Estación Marítima OCP, una vez instalado un corto tramo de fibra óptica desde la Estación de Amarre a la Estación Martima OCP.

4.3.3 INGENIERÍA

Mediante el estudio técnico propuesto, detallado en el capítulo III es posible realizar una primera aproximación a la magnitud de las inversiones y los costos de operación y mantenimiento, así pues para iniciar con la evaluación del presupuesto de preinversiones se debe recordar las principales consideraciones de la etapa del diseño que son:

- Se requiere de un terreno para la construcción de la estación de amarre ubicado en la Playa Las Palmas – Esmeraldas, como se muestra en la gráfica 4.2. Esta alternativa es seleccionada porque está cerca de las playas costeras

facilitando la conexión del cable submarino y además la zona tiene un buen acceso por carretera.



Fig. 4.3 Ubicación de la estación de amarre.

[Fuente:Google Earth]

- Es necesario realizar el tendido de fibra óptica de dos tramos para completar la Red de Backhaul. La fibra óptica adicional será instalada dentro de ductos en forma subterránea, desde la Estación de Amarre hasta el Terminal Marítimo de la OCP y desde el Nodo Pomasqui OCP a la Central Pomasqui de Ex_Andinatel, correspondiente a una longitud total de 17 Km aproximadamente.
- La fibra óptica adicional también debe cumplir con la recomendación G.652.C, dado que la fibra existente trabaja con esta recomendación.
- Un equipo Terminal, estará ubicado en la Estación de Amarre y tendrá el equipamiento necesario para iluminar inicialmente dos longitudes de onda a 10 Gbps. Todo el tráfico cliente ingresará a través de Muxponders TDM de

4x2.5Gbps, donde cada puerto estará configurado para usar SFPs de 2.5Gbps. El mecanismo de protección 1+1 dará protección contra fallas de muxponders, además contarán con compensadores de dispersión cromática DCM y para la disponibilidad del sistema se incluirán equipos *hot spare*. Los precios de los materiales necesarios para instalar el equipo Terminal en la Estación de Amarre se muestran en el Anexo G.

- Un equipo Terminal, estará ubicado en la Central Pomasqui Ex_Andinatel, tendrá el equipamiento necesario para iluminar inicialmente dos longitudes de onda a 10 Gbps. Todo el tráfico cliente ingresará a través de Muxponders TDM de 4x2.5Gbps, donde cada puerto estará configurado para usar SFPs de 2.5Gbps. El mecanismo de protección 1+1 dará protección contra fallas de muxponders, además contarán con compensadores de dispersión cromática DCM y para la disponibilidad del sistema se incluirán equipos *hot spare*. Los precios de los materiales necesarios para instalar el equipo Terminal en la Central Pomasqui de Ex_Andinatel son similares al de la Estación de Amarre, los cuales se muestran en el Anexo G.
- Para el amplificador de línea, de acuerdo a los cálculos del *power budget* es necesario colocar amplificadores ópticos EDFA conjuntamente con amplificadores Raman en un nodo intermedio llamado Río Silanche para compensar las pérdidas de tramos con distancias alrededor de 140Km. Los amplificadores EDFA considerados tendrán una ganancia de 34dB y los amplificadores Raman emplearán un bombeo Raman contra-direccional, con una ganancia de aproximadamente 10 dB, también contarán con módulos compensadores de dispersión cromática (DCM) y con una unidades de monitoreo de potencia (PMU¹³⁰). Los costos de las tarjetas necesarias para la implementación de este amplificador de línea se detalla en el Anexo G.
- Para el sistema de gestión se recomienda el Sistema de administración *Service ON Optical (SOO)* de Ericsson y el administrador de los elementos *Service ON Optical*. El NMS y EMS estarán instaladas en la misma

¹³⁰ PMU, Power Monitor Unit.- Esta unidad monitorea el nivel de potencia de cada canal.

computadora y ubicadas en la Central Pomasqui de Ex_Andinatel, por lo que es necesario considerar los costos de licencias.

Para confirmar la ubicación de la estación de amarre, el tendido de fibra óptica y los parámetros de atenuación y dispersión cromática utilizados para el diseño, será necesario enviar tres personas expertas en infraestructura, contratación y fibra óptica.

4.3.3.1 Survey de Infraestructura

El especialista de infraestructura estará encargado de visitar el sitio sugerido para evaluar la posibilidad de situar una Estación de Amarre en la Playa Las Palmas – Esmeraldas, considerando la factibilidad de abastecer al sitio de energía eléctrica, disponibilidad de vías de acceso y las facilidades para ubicar el *shelter*, que servirá para albergar los equipos de comunicación.

4.3.3.2 Survey de Contratación

El especialista de contratación estará encargado de encontrar un terreno en arriendo o venta en la zona especificada para construir la estación de amarre, además tendrá que realizar los trámites pertinentes para el contrato de arrendamiento o escritura pública respectivamente. Además será el responsable de sacar los permisos necesarios para la operación de la cabeza de cable submarino, al igual que los permisos de construcción de la fibra óptica subterránea.

4.3.3.3 Survey de Fibra Óptica

El especialista en fibra óptica estará encargado de visitar todos los sitios desde la estación de amarre en la Playa Las Palmas - Esmeraldas hasta la central de Pomasqui - Ex_Andinatel para verificar la factibilidad de instalar la fibra óptica subterránea o dependiendo de la vía posiblemente se requiera colocar algún tramo de fibra aérea. Además será responsable de evaluar el funcionamiento de los cuatro hilos de fibra óptica existente, con un equipo de medición y de definir el

tipo de empalmes a utilizar. Es necesario considerar que el OCP, mediante convenio con el CONATEL, sólo otorga el derecho de uso para explotación comercial de cuatro de las doce fibras del cable primario. Cualquier acción de tipo operativo, extensiones de las fibras, mantenimiento y colocación de equipos en áreas del OCP, seguirá siendo de exclusivo control del OCP.

Para los *survey* se deben considerar los gastos de hospedaje, viáticos, comunicaciones, movilización y servicios prestados.

4.3.3.4 Informe de ingeniería

Es necesario recordar que en este proyecto se analiza la preinversión, pero para la ejecución del mismo es necesario recolectar la información proporcionada por los *survey* y seleccionar las mejores opciones, con el fin de entregar un informe de ingeniería con las cotizaciones de todos los materiales, equipos y herramientas necesarias para implementar el proyecto, que parcialmente están detallados en el Anexo G.

4.4 ESTRUCTURA FINANCIERA DEL PROYECTO

Una vez realizado el análisis técnico y aclarado los conceptos que se involucran la evaluación financiera, a continuación se detallan el monto de la preinversión, que como se dijo anteriormente la conforma el presupuesto de la inversión y los costos de operación y mantenimiento de la red.

4.4.1 PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

4.4.1.1 Inversiones Fijas

- La adquisición de un terreno para la construcción de la estación de amarre. Para estimar el valor del terreno se considera los 130m² del área de la estación de amarre, que es establecido por las dimensiones del *shelter* y considerando el precio en metros cuadrados en la zona, se puede estimar que la compra del terreno implicará una inversión de US \$1.300.

- Para las obras civiles, lo más práctico sería comprar un *shelter* de 4 x 7m para la estación de amarre, pero también se debe incluir el cerramiento, la dotación de un generador eléctrico y la acometida al transformador más cercano, lo cual ya está incluido al momento de adquirir el *shelter* a un costo de US \$11.200¹³¹.
- Para estimar el monto correspondiente al tendido de fibra óptica G.652.C subterránea en los dos tramos adicionales, es necesario considerar el valor típico por kilómetro de la colocación de fibra óptica subterránea que es la más costosa y está alrededor de US \$22.236,10¹³² por kilómetro. Para completar el trayecto de los 17Km, se requiere de una inversión de US \$378.013,76, a esta cantidad hay que sumarle los costos de estudio de la ruta, diseño, dirección del proyecto, fiscalización y demás relacionados, los cuales típicamente equivalen al 15%¹³³ del costo de la obra; es decir US\$ 56.702 para este caso.
- Para adquirir los materiales, equipos y herramientas que se utilizarán para implementar los terminales y el amplificador de línea, se requiere de una inversión de US \$768.174,84¹³⁴, a esta cantidad hay que sumarle los costos de instalación que típicamente corresponden al 15%¹³⁵ del costo total y se especifican en las inversiones diferidas.
- También se debe asumir US \$500 por compra de muebles y enseres para la dotación de las oficinas del departamento de gestión en Pomasqui.

4.4.1.2 Inversiones Diferidas

- Para las inversiones diferidas se consideran los gastos en los estudios técnicos y jurídicos, que en este caso corresponden a los *survey* de

¹³¹ Monto estimado por *Nokia Siemens Networks*.

¹³² Equivalencia en Km del presupuesto realizado en el proyecto Informe final del estudio de la nueva salida de cable submarino ASETA, para mayor detalle revisar el Anexo L.

¹³³ Miranda, Juan José, *Gestión de Proyectos: Identificación, Formulación, Evaluación Financiera, Social, Ambiental*, 2004, Bogotá, MM Editorial

¹³⁴ Para el desglose de los materiales revisar el Anexo G.

¹³⁵ Miranda, Juan José, *Gestión de Proyectos: Identificación, Formulación, Evaluación Financiera, Social, Ambiental*, 2004, Bogotá, MM Editorial

infraestructura, contratación y fibra óptica, en donde se asumen los gastos de hospedaje, viáticos, comunicaciones, movilización y servicios prestados, que alcanzan un valor de US \$6.640.

- También se toma en cuenta los gastos de organización para la escritura pública del terreno, además de la gestión de importación de los equipos que alcanzar un valor referencial de US \$1.000.
- En los gastos de montaje, se hace referencia a la instalación de los equipos que como se dijo anteriormente corresponden al 15% de los materiales es decir a US \$115.643,66.
- Para el sistema de gestión se consideran las licencias de los programas para el MS y EMS, que tienen un valor de US \$2.782,89 anuales.
- Otra consideración de importancia son los derechos de vía o servidumbre, los cuales dependen del tipo de terreno, su precio típico es de US \$1.200 el kilómetro por año, asumiendo un tendido de fibra de 17Km por vía sobre carretera, el precio por año es de UA \$20.400. No se considera todo el trayecto del enlace porque el cable primario de fibra óptica es propiedad en su totalidad del OCP, incluyendo los derechos de vía, biducto, obras civiles, energía y demás elementos involucrados.
- Para los imprevistos es típico considerar el 10% del costo total de las inversiones diferidas.

4.4.1.3 Capital de Trabajo

Para el capital de trabajo se debe considerar el monto que estará designado a garantizar el pago de sueldos de los administradores de la red de *Backhaul*. Asumiendo un sueldo de \$1000 al mes por dos técnicos especializados más los beneficios de ley se debe contar al mes con \$2.472.

Para calcular el monto del presupuesto de inversión, se detalla en la tabla 4.1 cada una de las inversiones analizadas.

PRESUPUESTO DE INVERSIONES PARA 10 AÑOS			
CONCEPTO	MONTO	TIPO DE PAGO	TOTAL
1. INVERSIONES FIJAS			
1.1 NO DEPRECIABLES			
1.1.1 TERRENO	1.300,00	UNA VEZ	1.300,00
1.2 DEPRECIABLES			
1.2.1 CONSTRUCCIONES Y OBRAS CIVILES	11.200,00	UNA VEZ	11.200,00
1.2.2 EQUIPOS	768.174,84	UNA VEZ	768.174,84
1.2.3 MUEBLES Y ENSERES	500,00	UNA VEZ	500,00
1.2.4 TENDIDO DE FIBRA ÓPTICA G.652.C	378.013,76	UNA VEZ	378.013,76
2. INVERSIONES DIFERIDAS			
2.1 ESTUDIOS TÉCNICOS	6.640,00	UNA VEZ	6.640,00
2.2 GASTOS DE ORGANIZACIÓN	1.000,00	UNA VEZ	1.000,00
2.3 GASTOS DE MONTAJE - INSTALACIÓN			
2.3.1 INSTALACIÓN DE EQUIPOS	115.643,66	UNA VEZ	115.643,66
2.3.2 INSTALACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	56.702,00	UNA VEZ	56.702,00
2.4 OTROS			
2.4.1 LICENCIA PARA EL SISTEMA DE GESTIÓN	2.782,89	ANUAL	27.828,90
2.4.2 DERECHOS DE VÍA	20.400,00	ANUAL	204.000,00
2.5 IMPROVISTOS	41.181,46	UNA VEZ	41.181,46
3. CAPITAL DE TRABAJO			
3.1 OTROS - PAGO DE SUELDOS	29.664,00	ANUAL	296.640,00
TOTAL			1.908.824,62

Tabla 4.1 Presupuesto de la inversión para 10 años

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

4.4.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Para la operación de la red será necesario contratar el personal capacitado para mantener en funcionamiento el *backbone*, por lo tanto se debe considerar los costos de capacitación, costos de mantenimiento de la fibra óptica y los equipos. Por lo general, los equipos de comunicaciones tienen una vida útil de 10 años, por lo tanto será el periodo asumido para los costos de operación y mantenimiento.

Dado que las fibras son parte del cable que el OCP utiliza para su actividad, que requiere altas medidas de seguridad, se asume que el mantenimiento de los cuatro hilos de fibra será por cuenta del OCP. Esto es un factor importante, en razón a que el operador solo se encargaría de la operación y mantenimiento de los equipos de iluminación y de las fibras de derivación que llegase a instalar. Es recomendable que una empresa con experiencia en este tipo de mantenimientos se encargue de esta tarea y perciba por sus servicios un valor anual, que normalmente en este tipo de servicios es de US\$ 1.400 el kilómetro por año.

En la tabla 4.2 se señala los gastos de operación y mantenimiento.

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA 10 AÑOS			
CONCEPTO	MONTO	TIPO DE PAGO	TOTAL
1.1 GASTOS INDIRECTOS			
1.1.1 SERVICIOS	600,00	MENSUAL	72.000,00
1.1.2 MANTENIMIENTO	23.800,00	ANUAL	238.000,00
1.1.3 IMPUESTOS	60,00	ANUAL	600,00
		TOTAL	310.600,00

Tabla 4.2 Costo de operación y mantenimiento

[Fuente: Generado por los autores del presente proyecto de titulación]

Para garantizar la fidelidad de los costos mencionados a lo largo del análisis de costos, más conocida como evaluación financiera, en el Anexo L se presentan los documentos que certifican los costos por kilómetro, pero en algunos casos se tomará la precaución de ocultar el nombre de la empresa, de donde se obtuvo la referencia para el cálculo de la preinversión.

5. CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Desde hace mucho es conocido, que la luz en delgadas fibras de vidrio se propaga mediante el principio de reflexión total, sin embargo hasta hace algunos años las pérdidas en las fibras todavía eran tan grandes que solo podían alcanzarse tramos de pocos metros. Debido al desarrollo de fibras extremadamente bajas en atenuaciones es posible transmitir información óptica a través de muchos kilómetros de distancia. Con estas fibras pueden estructurarse sistemas de transmisión muy eficientes, en los cuales diodos láser sirven como emisores ópticos y fotodiodos semiconductores como receptores.
- La dispersión produce ensanchamientos de los pulsos ópticos transmitidos por la fibra, lo que provoca interferencia entre símbolos y, por lo tanto, un aumento de la tasa de bit errados (BER). En una fibra óptica se puede distinguir dos tipos de dispersión: La dispersión modal y la dispersión cromática. La dispersión modal es más notoria en fibras multimodo y la dispersión cromática sólo suele considerarse en las fibras monomodo.
- El medio de transmisión utilizado en DWDM es la fibra óptica, y en concreto la fibra óptica monomodo, que debido a la dispersión cromática provoca el ensanchamiento de los pulsos a medida que se propagan en la fibra óptica. Por esa razón se busca disminuir o eliminar el ensanchamiento, mediante la utilización de módulos compensadores de dispersión (DCM) que en forma más directa consiste en emplear tramos de fibras compensadoras de dispersión (DCF) que tengan una dispersión cromática elevada y de signo contrario a la dispersión introducido por la fibra principal.

- El sistema DWDM está sujeto a diversas limitaciones inherentes de la transmisión por fibra óptica, las cuales pueden degradar el desempeño de la red. Estos efectos incluyen la dispersión cromática, la no-uniformidad de ganancia del amplificador EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y el ruido de emisión espontánea amplificado (ASE) que degrada la relación señal a ruido limitando el rango de longitudes de onda disponibles, también se incluyen los efectos no-lineales tales como la automodulación de fase (*Self Phase Modulation*, SPM), la modulación de fase cruzada (*Cross Phase Modulation*, XPM) y la mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*, FWM), que como resultado de las altas potencias de las señales en la fibra óptica, distorsionarán las señales transmitidas, los cuales deben considerarse en sistemas DWDM con altas tasas de transmisión (40 Gbps por λ).
- La elección de la longitud de onda, o longitudes de onda, centrales de trabajo están estrechamente relacionadas con la atenuación y la dispersión cromática. Las fibras ópticas utilizadas actualmente, especialmente en sistemas de larga distancia, presentan mínimos efectos de atenuación en la banda de frecuencias alrededor de 1550 nm, y se diseñan con un perfil de índice adecuado para controlar la dispersión cromática de la fibra.
- La técnica de Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), toma su nombre a partir de una designación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) que se refiere al espaciamiento requerido entre canales descrito en la recomendación UIT-T G.692, en donde se especifica los espaciados entre canales de 100 GHz o inferiores, dando lugar a una gran densidad de canales, así estos sistemas consiguen la máxima eficiencia en el uso de la fibra, ofreciendo además como ventaja la transparencia, pues en cada una de las longitudes de onda puede transportar una señal de cualquier formato (SONET/SDH, ESCON, Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM/IP, etc.) a diferentes velocidades.
- DWDM no es tan solo una técnica para ampliar la capacidad de una red de fibra óptica, sino más bien, una tecnología robusta de "*backbone*", que permite satisfacer el crecimiento en volumen y complejidad que presentan los

servicios de telecomunicaciones, sin necesidad de hacer nuevos tendidos de fibra. Los sistemas DWDM comerciales, han incrementado la velocidad de canal a 40 Gbps y el número de canales a 256, alcanzando una eficiencia espectral sin precedentes de 1,28 bps/Hz, y utilizando el ancho de banda total de los amplificadores ópticos en banda C y L. Las nuevas mejoras en la capacidad de transmisión de los sistemas dependen, en buena parte, de los progresos de la electrónica y optoelectrónica.

- Una red óptica para transmitir mediante DWDM necesita de cuatro dispositivos principales que son: El Terminal multiplexor óptico (OTM) (*formado por transpondedores de transmisión y transpondedores de recepción, mux/demux y amplificadores ópticos*), el amplificador óptico de línea (OLA), el multiplexor óptico de inserción/extracción (OADM) y la fibra óptica como medio de transmisión. En el OTM, el transpondedor adaptará las longitudes de onda recibidas a una longitud de onda estandarizada y susceptible de ser multiplexada en transmisión y demultiplexada en recepción, mientras que el amplificador regenerará la señal a nivel óptico. El OLA se utiliza entre secciones de fibra y está encargado de amplificar la señal compuesta DWDM en el dominio óptico para su transporte a larga distancia y si se requiere de un OADM, éste tendrá la capacidad de extraer información de un determinado canal óptico, e inserta nueva información reutilizando dicho canal, sin alterar el resto de canales multiplexados.
- En los sistemas de comunicación de larga distancia que hacen uso de la fibra óptica como medio de transmisión, se tiene que las señales experimentan una atenuación considerable al propagarse por la fibra a tales distancias. Lo que obliga a que los sistemas de transmisión utilicen algún mecanismo de amplificación para que las señales mantengan un nivel de potencia detectable por el receptor, para lo cual en la actualidad se hace uso de amplificadores ópticos, como es el caso del amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA), pero en los últimos años también se está utilizando una nueva tecnología basada en el efecto estimulado Raman, conocido como amplificador Raman y en muchos de los casos se emplea la amplificación híbrida Raman-EDFA (R-EDFA).

- Un amplificador Raman usa el principio del *scattering* de Raman estimulado (SRS), se origina cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas en frecuencia por 13.2THz, la onda de menor frecuencia experimenta una ganancia generada a expensas de la onda de mayor frecuencia. Mediante este análisis se puede concluir, que en principio es relativamente fácil la construcción de un amplificador Raman, pues sólo requiere de una fuente de bombeo desplazada a una frecuencia alrededor de 13.2 THz, pero más alta que la de la señal, así el SRS causa la amplificación de la señal que es menor en frecuencia a la señal de bombeo.
- Otro punto de análisis son los ROADM los cuales están encargados de extraer e insertar la información de cualquier longitud de onda sin afectar el tráfico de la red y sin conversión E/O, pero a diferencia de los tradicionales OADM, estos equipos permiten reconfigurar remotamente vía software qué canales extraer, añadir o dejar en paso.
- Este proyecto de titulación surge por la necesidad de incrementar la capacidad internacional utilizada por los servicios de Telefonía, Internet y datos en el Ecuador, como una respuesta a la demanda creciente exigiendo enlaces cada vez más grandes. Por esta razón se plantea la adquisición de otra cabeza de cable submarino, considerando a Esmeraldas como punto de aterrizaje, porque el estado puede hacer uso de los cuatro hilos de fibra óptica del Oleoducto de Crudos Pesados. De aquí nace la necesidad de analizar la factibilidad de los proveedores de cable submarino en situar una unidad de ramificación en costas ecuatorianas. De la investigación realizada las únicas opciones viables a corto plazo para este objetivo, son las ramificaciones desde los cables Emergia y Global Crossing, los cuales tienen el interés y la capacidad de instalar una nueva cabeza de cable submarino en costas ecuatorianas.
- Los resultados obtenidos luego de la evaluación legal, son favorables para la operación de una nueva cabeza de cable submarino, pues el marco regulatorio vigente permite mediante la Resolución 347-17-CONATEL-2007, una vez cumplidos los requisitos y procedimiento necesarios, la SENATEL en

representación del estado otorga el permiso para la provisión de capacidad de cable submarino para acceso Internacional; además en caso de que la inversión sea dada por empresas privadas, este reglamento ofrece la ventaja al país, de entregar sin costo una cierta capacidad internacional con acceso a Internet para el desarrollo social y educativo, que será administrada por el FODETEL.

- Del estudio de tráfico actual y sus proyecciones futuras se concluye que para atender la conectividad internacional de los diferentes servicios de telecomunicaciones, el Ecuador requerirá de una capacidad mínima de 163,80 Gbps, equivalente a 1056,80 STM1s para el año 2013. Además un dato a resaltar es el promedio de las tasas de crecimiento de suscriptores de Internet dedicado que llega al 94.15% en el periodo 2002 – 2007, lo cual evidencia la creciente necesidad de la población por acceder a este servicio.
- Con el fin de satisfacer la demanda de conectividad internacional hasta el año 2013, es necesario iluminar la fibra óptica del OCP con la técnica DWDM en torno a la tercera ventana $\lambda = 1550$ nm para aprovechar las capacidades de los amplificadores EDFA de banda C. Cada longitud de onda podrá transmitir una señal óptica a 10Gbps y todo el tráfico cliente ingresará a través de *Muxponders* TDM de 4x2.5Gbps, donde cada puerto estará configurado para usar módulos ópticos (SFPs) de 2.5Gbps. El diseño planteado inicialmente sustentará la demanda hasta el año 2009, porque no tiene sentido iluminar las longitudes de onda que aún no son requeridas; sin embargo esta infraestructura permitirá añadir nuevos canales únicamente con activar las longitudes de onda según vaya creciendo la demanda del servicio.
- En el desarrollo del diseño se planteó la pregunta de que si la fibra óptica del OCP cumple las recomendaciones G.652.C puede soportar DWDM. Como resultado de la investigación se determinó que este tipo de fibras está en la capacidad de transportar longitudes de ondas de hasta 10Gbps y pueden adaptarse a DWDM con el uso de módulos de compensación de dispersión (DCM) que permiten cancelar el efecto de la dispersión cromática acumulada.

- En el diseño de red de Backhaul los resultados de los cálculos del presupuesto de potencia realizados de acuerdo con las características de la fibra óptica del OCP G.652.C y en la banda de 1550nm, muestran altas pérdidas; como consecuencia de ello, se hará uso de un amplificador de línea con EDFAs conjuntamente con amplificadores Raman.
- Como el *backbone* de salida internacional es una red en donde la disponibilidad es crítica las 24 horas del día. Por esa razón se implementa protección contra fallas de *muxponder* que en caso de presentarse problemas de hardware o software en la tarjeta del *muxponder working*, conmutará automáticamente a la tarjeta *muxponder* de protección, además utiliza el mecanismo de protección “Apagado automático del láser (ALS)” en caso de un corte de fibra y para complementar las protecciones mencionadas, se dará al sistema la redundancia de equipos, es decir se tendrá un rack equipado con un set de *hot spares*.
- En el análisis de costo que para un mejor entendimiento se denomina evaluación financiera, se determinó el presupuesto de inversión que alcanza un monto de US \$1.908.824,62, debido a la dificultad de conseguir los precios, en algunos casos se tomaron costos referenciales de otros proyectos con similares características, que mediante su equivalencia en Km, se calculó las inversiones en el tendido de la fibra óptica, en la adquisición de *shelter* y en los costos de operación y mantenimiento de la red DWDM; además se consideraron las peores condiciones y se incluyó un monto para imprevistos que típicamente es el 10% del total de las inversiones diferidas. Queda claro entonces que el estudio de pre-inversión podrá variar en la etapa de ejecución. Pero se puede asegurar que el presupuesto correspondiente a los equipos, materiales y herramientas necesarias para implementar el diseño viene de referencias confiables.

5.2 RECOMENDACIONES

- Considerando que el Ecuador, a pesar de haber iniciado el programa “Internet para Todos” en el año 2002, aún no se ha logrado los impactos positivos esperados en la masificación de este servicio, pues si bien sólo el 10% de la población ecuatoriana tiene acceso a Internet, es ya una necesidad el generar estrategias y mecanismos que puedan proporcionar a los ecuatorianos el acceso y uso de las tecnologías de Información y Comunicación (TICs). La implementación de este proyecto podría ser una alternativa para dar un servicio de Internet accesible y dar un paso para alcanzar el objetivo del Plan Internet para todos que “es promocionar, facilitar y permitir el acceso de los sectores más vulnerables de la sociedad, que por su condición económica, social, cultural, étnica o localización geográfica tienen escasa posibilidad de acceder a la red de Internet.”¹³⁶
- Mediante la investigación realizada para determinar las alternativas de situar una unidad de ramificación de cables submarinos en costas ecuatoriana, Esmeraldas es una alternativa que ofrece buenas expectativas, porque puede hacer uso de la fibra óptica del OCP para su backhaul y también tiene como ventaja su cercanía geográfica con el puerto de Buenaventura Colombia donde actualmente aterriza el cable de Emergia y también el cable de Global Crossing. Por otra parte, la compañía Global Crossing en marzo del 2008 expandió la capacidad del sistema de cable submarino de fibra óptica *South American Crossing* (SAC), agregando 100 Gbps que beneficiarán a América Central y del Sur.
- A pesar del ingreso del cable submarino de *Telefonica International Wholesale Services Ecuador S.A* (TIWS), que entró en operación en noviembre del 2007, no se vio la reducción de costos como se esperaba y

¹³⁶ Regulación de los Centros de Acceso de Internet y Cyber Cafés

http://www.conatel.gov.ec/site_conatel/index.php/sector-de-las-telecomunicaciones/agenda-nacional-de-conectividad/documentos-relevantes/159-contenidos-estaticos/316-plan-internet-para-todos.

tampoco una conexión de red más rápida. La Asociación de Empresas Proveedoras de Servicio de Internet, valor agregado, portadores y Tecnología de la información (AEPROVI) indica que esta reducción no es apreciable porque en el país aún existen algunas barreras que encarecen los costos de Internet como las leyes municipales y estatales que aún no consideran el desarrollo de esta tecnología como una prioridad nacional. Por esta razón es necesario crear alianzas de todas las entidades estatales que participan de alguna manera en la infraestructura de redes de *backbone* y contribuyan en el fortalecimiento de los sistemas troncales.

- Según las estadísticas recogidas de la SUPTEL todavía hay una preferencia de los usuarios por las cuentas dial-up, sin embargo la tasa de crecimiento de los suscriptores de Internet dedicado permite asegurar que se está acogiendo rápidamente las tecnologías de acceso dedicado vía DSL, cable MODEM o fibra óptica y se espera que a corto plazo la relación se invierta y las conexiones ADSL superen a las dial-up. Por lo que es conveniente facilitar y fomentar el despliegue de de las distintas tecnologías de banda ancha, además se debe orientar el marco regulatorio hacia un nuevo modelo que tenga en cuenta la convergencia de redes y servicios.
- Es recomendable realizar una evaluación financiera más profunda, considerando el presupuesto de inversión y los costos de operación y mantenimiento detallados en este proyecto de titulación y así contar con todos los elementos de juicio para tomar la decisión de ejecutar el proyecto, porque en el desarrollo del diseño ya se demostró la factibilidad técnica de implementar la red de *backhaul* en el tramo Esmeraldas – Pomasqui.

6. BIBLIOGRAFÍA

- HUIBODRO, José Manuel, *Tecnologías Avanzadas de Telecomunicaciones*, España, Thomson Editores Spain, pp. 52 – 58.
- PEREDA, José Martín, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, 2004, Madrid, Prentice Hall, pp. 18 – 87, pp. 153 – 266, pp. 359 – 439.
- RUBIO MARTINEZ, Baltasar, *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, 1994, Buenos Aires, Rama, pp. 38 – 76.
- MIRANDA, Juan José, *Gestión de Proyectos: Identificación Formulación Evaluación Financiera Social Ambiental*, 2004, Bogotá, MM Editorial.
- DUTOON, Harry J.R., *Understanding Optical Communications*, Septiembre 1998, IBM Corporation, pp. 72, 182.
- KAMINOW, Iván P; KOCH, Thomas L. Kaminow, *Optical Fiber Telecommunications III*, 1997.
<http://www.google.com/books?id=A9IDhzd3CiUC&printsec=frontcover&hl=es#PPR7,M1>
- RAMOS, Francisco; PASTOR, Daniel; CAPMANY, José, *Sistemas de comunicaciones ópticas*, 2007,
<http://www.google.com/books?id=zhFu4jZ1h4oC&printsec=frontcover&hl=es>
- Marconi Communications, *MULTIHAUL 3000 Training Manual, Training & Documentation*, Italy.
- LIGHTWAVE Fiber-Optic, *Communications Technology and Applications Worldwide*, Septiembre 2001, PennWell.
- SIEMENS, *Information SURPASS hiT 7070 3.0 Technical Description (TED)*, p.104.
- Person Technologies, *Fiber Optic System Design*, 1995, Section 4.

- (Oficina de Desarrollo de las Telecomunicaciones BDT), (s.f.). *Manual de nuevas tecnologías y nuevos servicios*. Recuperado en Septiembre de 2008, de <http://www.itu.int/itudoc/itu-d/question/studygr2/q16-2-1-es.pdf>
- (SENATEL), PLAN NACIONAL DE DESARROLLO DE LAS TELECOMUNICACIONES 2007 – 2012, Quito.
- ASETA. (Junio 12 de 2006). Estudio con el fin de establecer el valor de oportunidad de la implementación de una nueva salida de cable submarino, utilizando para su conexión nacional los hilos disponibles de fibra óptica del cable primario de OCP Ecuador S.A. Quito.
- CAPÍTULO I Fundamentos y Equipo Óptico. (25 de Noviembre de 2003), Recuperado en Junio de 2008, <http://www.iec.uia.mx/proy/titulacion/proy04/Capitulo%20I.htm>
- Comunicaciones Ópticas, Recuperado en Junio de 2008, Amplificadores Ópticos: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/cocos/transpar/cocos10.pdf>
- CONATEL, Estadísticas - Proyectos FODETEL, Recuperado el Septiembre de 2008, <http://www.conatel.gov.ec>
- Global Crossing, (16 de Marzo de 2008), Global Crossing Expande la Red Latinoamericana para Satisfacer la Creciente Demanda. Recuperado en Agosto de 2008, http://www.globalcrossing.com/docs/news/03_10_08_sp.pdf
- *Sistema ARCOS - ¿Que es?*, <http://davidmhe.com/index.php/archives/category/permanente/page/2>
- *Ecuador Conectado al Cable Submarino*, (16 de Noviembre de 2007). Recuperado en Agosto de 2008, <http://onceavocisunl.wordpress.com/2007/11/16/conectado-al-cable-submarino/>
- *Efectos no Lineales en Sistemas WDM*, Recuperado en Agosto de 2008, <http://www.tel.uva.es/descargar.htm;jsessionid=0E59402A645A5CC88B553CB82E70639F?id=4926>

- Fiber Optic Cable Product Catalog, *Optical Cable Corporation* , 2, 10-25.
- *Fibra Óptica*, Recuperado en Julio de 2008,
http://es.geocities.com/redeslan2003/fibra_optica.htm
- Garcés, I., & Mateo, J. *Comunicaciones Ópticas - Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas*, Recuperado en Febrero de 2008, de Universidad de Zaragoza:
http://diec.unizar.es/asignaturas/defaultWebs/11958/2_6_No_lineales.pdf
- Grosz, D. F. *Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad*,
<http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin51/enPDF/a03.pdf>
- Gualda Manzano, E. J. (2005), Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión, Tesis Doctoral, Escola Tècnica Superior D'enginyeria de Telecomunicació, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC), Barcelona.
- *Guías de Onda*, Recuperado en Agosto de 2008,
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/loranca_r_ya/capitulo3.pdf
- Iglesias, J. M, *El Laser de Diodo*. Recuperado en Julio de 2008,
<http://www.seeic.org/articulo/laser/las-diodo.htm>
- *Informe Fibra Optica Submarina - Las Toninas*, (Mayo de 2001), Recuperado en Agosto de 2008, de Emergia finaliza el primer anillo de alta capacidad que une Latinoamérica y los Estados Unidos:
<http://www.santateresita.com.ar/infotonina.htm>
- *La instalación del cable en el país no incidió en la rebaja de precios*, (2001 de Marzo de 2008), Recuperado en Julio de 2008, de
<http://www.ciudadcolorada.com/noticc/wm/index.php?action=show&type=news&id=2752>

- Leiva, A., Tarifeño, M., & Olivares, R. (2007), Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD). *Ingeniare*, 15 (3), pp. 336-343.
- NORTEL, (2006), *Evolution to enhanced Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers (eROADM)*, Recuperado en Marzo de 2008, de <http://www.nortel.com/solutions/optical/collateral/nn115940.pdf>
- OCP Ecuador S.A. Recuperado en Agosto de 2008, de http://www.ocpecuador.com/home_content.html
- Olivares, R. *Amplificación Óptica*, Recuperado el Agosto de 2008, de Universidad Técnica Federico Santa María: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=21&resId=5&materialId=slides&confId=36>
- *Principios Básicos y Características Generales de la Fibra Óptica*, Recuperado en Agosto de 2008, <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/932/6/T10695CAP1.pdf>
- Quevedo, U. T. (2007), *CARRIERS E ISP EN EL ECUADOR*, Recuperado en Agosto de 2008, [http://www.uteq.edu.ec/facultades/empresariales/informatica/tutoriales/temasactuales2007/carrier'sepisp\(ecu\).ppt](http://www.uteq.edu.ec/facultades/empresariales/informatica/tutoriales/temasactuales2007/carrier'sepisp(ecu).ppt)
- *Redes Ópticas*, Recuperado en Agosto de 2008, de Capítulo 3. Dispositivos y Componentes Avanzados para Redes Ópticas: <http://www.gco.upv.es/es/webdocente/redes/transpar/ro3nuevo.pdf>
- REDES&TELECOM, (Abril de 2006), *DWDM corrige las limitaciones de la fibra*. Recuperado en Febrero de 2008, http://www.ramonmillan.com/documentos/dwdm_redestelecom.pdf
- Ruiz, P. A. (5 de Junio de 2007), *Ecuador y la fibra óptica submarina*. Recuperado en Agosto de 2008, de <http://pruizocampo.blogspot.com/>

- *Descripción del Proyecto de la tubería para crudo pesado*, (Abril de 2001), Recuperado en Septiembre de 2008, http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/Sec%202/Sec2_final_maa_2%20Rev.%204_fin.pdf
- *Presentación del Estudio Ambiental*, Recuperado en Septiembre de 2008, http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/Sec%201/Sec1_0final_maa2%20Rev.%203_fin.pdf
- *Ecuador se integra al sistema submarino de fibra óptica de última generación de Telefónica*, (1 de Agosto de 2007), Recuperado en Agosto de 2008, <http://www.e-mergia.com/espanol/notasprensa/notas/01-08-07.html?pais=www.telefonica.es>
- *Sistemas Electrónicos Avanzados de Comunicaciones*, (21 de Enero de 2005), Recuperado en Agosto de 2008, http://www.dinel.us.es/util/bajar.php?file=redes_opticas.pdf&x=506&y=12&r=0
- Siemens, (1983), *Fundamentos Físicos de las Guías de onda ópticos, Comunicaciones Ópticas*, 6, 9-20.
- SUPTEL, (Abril de 2008), *Telecomunicaciones - Estadísticas*. Recuperado en Agosto de 2008, <http://www.supertel.gov.ec/>
- Telefonica. (Abril 2006), *Situación Actual, Comunicaciones de Telefónica I+D Investigación y Desarrollo* (38).
- *Teoría de Propagación*, Recuperado en Julio de 2008, <http://razatapa.com/images/Fibra%20optica%20monomodo%20unidireccional.doc>
- Transelectric, Recuperado en Septiembre de 2008, http://www.transelectric.com.ec/transelectric_portal/images/section/mapa.pdf
- *Tutorial Redes Ópticas*, Obtenido de *Amplificadores Raman: Características*: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialraman/pagina_2.asp

- *Tutorial de Comunicaciones Ópticas*. (2006), Recuperado en Julio de 2008, http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm
- Una Infraestructura Submarina para soportar el desarrollo de las Telecomunicaciones en América Latina, Obtenido de <http://www.coit.es/publicac/publbit/bit131/especial6.htm>