



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE LA RED DWDM-ASON DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE VENEZUELA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

**REALIZADO POR: Arvelo, Joel
Hernández, Christian**

**PROFESOR GUÍA: Ing. Quintero, José
Ing. Barroso, Luis**

FECHA: Caracas, 24 de Septiembre 2012



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE LA RED DWDM-ASON DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE VENEZUELA

**REALIZADO POR: Arvelo, Joel
Hernández, Christian**

**PROFESOR GUÍA: Ing. Quintero, José
Ing. Barroso, Luis**

FECHA: Caracas, 24 de Septiembre 2012



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE LA RED DWDM-ASON DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE VENEZUELA

Este jurado una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado: _____

JURADO EXAMINADOR

Firma: _____ Firma: _____ Firma: _____
Nombre: _____ Nombre: _____ Nombre: _____

**REALIZADO POR: Arvelo, Joel
Hernández, Christian**

**PROFESOR GUÍA: Ing. Quintero, José
Ing. Barroso, Luis**

FECHA: Caracas, 24 de Septiembre 2012

DISEÑO DE LA RED DWDM-ASON DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE VENEZUELA

Arvelo Salazar, Joel T.
joelarvelo@gmail.com
Hernández Soto, Christian
telecom.chs@gmail.com

Un operador de telecomunicaciones, en su compromiso de prestar el mejor y más rápido servicio de conexión a los usuarios que se encuentra bajo su dominio, desea implementar una red de Fibra Óptica actualizada. En consecuencia, nace este proyecto, el cual consistió en diseñar una red de fibra óptica de la región Centro Occidente de Venezuela con uno de los medios de transmisión más rápidos del mundo, basada en la multiplexación por división de onda densa (DWDM), que presenta una de las técnicas de transmisión de datos más eficaz para la actualidad. Ésta permite ampliar la capacidad de la red así como satisfacer el crecimiento en volumen y aumentar las capacidades de la misma para ofrecer un mejor servicio. Uno de los principales atractivos de este diseño, es que la red realiza la conmutación de forma automatizada, basada en ASON, que representa uno de los más innovadores métodos para enrutar las redes ópticas, sin tener que realizar transformaciones en la señal del campo óptico al eléctrico o vice-versa. Cada canal podrá transmitir información a 40Gb/s o 100Gb/s, según sea el caso, hasta un máximo de 88 canales, estas velocidades se deben principalmente a las nuevas técnicas de detección coherente y modulación PDM-QPSK.

Palabras claves: DWDM, ASON, Fibra Óptica, Detección Coherente.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de fin de carrera a mi madre por ser mi apoyo y mentora a lo largo de mi vida.

A mi papá Miguel por todo su esfuerzo y trabajo, sin ti no hubiera podido lograr todas mis metas.

Joel T. Arvelo

Dedico este proyecto de fin de carrera a mi mamá por su apoyo incondicional en todo momento y consejos tan valiosos siempre llenos de esperanza.

A mi papá por siempre exigirme más en todos los proyectos de mi vida y formar parte del apoyo necesario para sentir que si era posible.

Christian Hernández

Agradecimientos

A mi familia, mis padres, mis hermanos, mis abuelos y Mime, por su amor, enseñanza y apoyo en todos los pasos de mi vida; Especialmente a ustedes les dedico este trabajo, que cierra con broche un capítulo de 5 años de experiencias inolvidables.

A mis compañeros de la UCAB, por haberme ayudado a sobrevivir al yugo de la Ingeniería, sin ustedes no hubiera podido estar aquí. Primordialmente agradezco a mi compañero de Tesis Christian Hernández y su familia, por su paciencia, generosidad y hospitalidad.

A mis amigos del colegio, que más que mis amigos son mis hermanos, gracias a ustedes por estar a mi lado desde mi infancia.

A Dani porque gracias a tu respaldo, cariño, insistencia, y ayuda he logrado culminar este gran paso de mi vida.

Al Ing. José Quintero por su disposición y apoyo en todas las etapas de la investigación y por brindarnos las pautas necesarias para culminar el Trabajo Especial de Grado.

Por último, pero no menos importante, a mi Alma Mater y sus profesores que colaboraron con mi crecimiento personal y profesional. Hago especial énfasis al Prof. Álvaro López por sus consejos y conocimiento, que aportaron valor al proyecto.

Joel T. Arvelo

Agradecimientos

A Dios y a todos mis guías, por iluminarme en el camino correcto para lograr mis metas, dándome la fuerza necesaria para superar todos aquellos obstáculos que se interpusieron.

A toda mi Familia, por estar presente siempre y preocuparse por mi avance en la carrera. Especialmente a mi papá Juan, mi mamá Zulay y mi hermana Elizabeth, por brindarme su apoyo incondicional en cada una de las decisiones tomadas en mi vida y ser el respaldo emocional de cada una de ellas.

A mi amigo, compañero de clases y de tesis Joel Arvelo, por haber aceptado afrontar este reto juntos, al igual que a toda su familia por el apoyo incondicional brindado tanto en la tesis como a lo largo de la carrera

A mis amigos y compañeros de la UCAB, por su constante apoyo en los momentos mas difíciles de la carrera y brindar su mano amiga cuando más lo necesitaba.

A Alba, Jorge y Helios, por brindarme su apoyo incondicional en uno de los proyectos más grandes de mi vida, sin alguno de ellos éste no hubiese sido posible.

Al Ing. José Quintero por su disposición y apoyo en todas las etapas de la investigación y por brindarnos las pautas necesarias para culminar el Trabajo Especial de Grado.

Al Profesor Álvaro López, por su disposición en todo momento y consejos los cuales me sirvieron de guía para tomar el camino correcto en el presente proyecto.

Por último, pero no menos importante, a mi Alma Mater y sus profesores que colaboraron con mi crecimiento personal y profesional

Christian Hernández

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvi
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	1
I.1 Planteamiento del Problema.....	1
I.2 Objetivos	4
I.2.1 General:	4
I.2.2 Específicos:.....	4
I.3 Justificación	5
I.4 Limitaciones y alcances	5
CAPITULO II	6
MARCO TEÓRICO.....	6
II.1 Generalidades de la Fibra Óptica.....	6
II.1.1 Principios básicos de la fibra óptica.....	7
II.1.2 Reflexión y refracción.....	8
II.1.3 Señalización	10
II.1.4 Requisitos para una transmisión fiable	11
II.1.5 Pérdida de inserción de canal.....	12
II.1.6 Dispersión de señal	12

II.1.7 Propiedades físicas de la fibra óptica	12
II.1.7.1 Atenuación.....	13
II.1.7.2.1 <i>Absorción debido a rayos ultravioletas e infrarrojos</i>	15
II.1.7.2.2 <i>Scattering Rayleigh y Mie</i>	16
II.1.7.3 Pérdidas extrínsecas	17
II.1.7.3.1 <i>Absorción debido a impurezas</i>	17
II.1.7.3.2 <i>Pérdidas por curvaturas y microcurvaturas</i>	17
II.1.7.4 Dispersión en las Fibras.....	18
II.1.7.5 Dispersión modal.....	19
II.1.7.6 Dispersión cromática	20
II.1.7.6.1 <i>Dispersión del material</i>	21
II.1.7.6.2 <i>Dispersión de guía de onda</i>	22
II.1.7.7 PMD	24
II.1.7.8 Ancho de banda	25
II.1.8 Clasificación de las fibras	26
II.1.8.1 Según sus modos	26
II.1.8.2 Según sus perfiles de índice	27
II.1.8.2.1 <i>Fibra SI</i>	28
II.1.8.2.2 <i>Fibra GRIN</i>	29
II.1.9 Amplificadores ópticos	31
II.1.9.1 Amplificadores de fibra óptica dopada con erbio.....	33
II.2 Tecnologías de multiplexación de señales en Fibra Óptica	34
II.2.1 WDM.....	34
II.2.1.1 Ventajas técnicas más importantes de WDM.....	35

II.2.1.2 Ventanas de Transmisión para WDM	37
II.2.2 CWDM.....	37
II.2.3 DWDM.....	38
II.2.3.1 Sistemas DWDM de largo alcance.....	39
II.2.3.2 Componentes característicos de un sistema DWDM	39
II.2.3.3 Transponedores.....	40
II.3 Conmutación automática de las redes ópticas	41
II.3.1 Características de ASON.....	42
II.3.2 Interfaces del Plano de Control	43
II.3.3 Enrutamiento y Señalización.....	43
II.3.5 Evolución de IP/MPLS hacia ASON/MPLS	44
II.3.6 MPLS	44
II.4 Detección Coherente.....	45
II.4.1 PDM-BPSK (con detección coherente)	47
II.4.2 PDM-QPSK (con detección coherente)	47
II.5 Herramientas para el desarrollo del proyecto	48
II.5.1 Algoritmo de Dijkstra	48
II.5.2 Lenguaje de programación Java.....	48
II.5.3 MATLAB.....	49
CAPÍTULO III	50
METODOLOGÍA	50
III.1 Tipo de Investigación	50
III.2 Fases Metodológicas	51
III.2.1 Etapa de Investigación	51

III.2.2 Análisis y determinación de la fibra instalada y sus equipos.	51
III.2.3 Simulación de fallas.....	52
III.2.4 Definición final del diseño.....	52
CAPÍTULO IV.....	53
DESARROLLO	53
IV.1 Estudio de la fibra óptica.....	53
IV.1.1 Cableado y anillo nacional de fibra existente en Venezuela	53
IV.1.2 Asignación de nodos a utilizar en el proyecto	54
IV.1.3 Medición de la fibra usando la herramienta MapSource	56
IV.2 Análisis de los requerimientos de la red.....	57
IV.3 Cálculo del presupuesto de potencia (<i>Optical Power Budget</i>).....	61
IV.3.1 Cálculo del presupuesto de potencia mediante la herramienta MATLAB63	
IV.3.2 Estudio de los parámetros de dispersión.....	66
IV.3.2.1 Superación de deficiencias en relación a la dispersión en la fibra para un mejor rendimiento mediante nuevas técnicas de detección y modulación	67
IV.3.3 Cálculos de dispersión mediante la herramienta MATLAB	70
IV.4 Simulación de fallas en la red	71
IV.4.1 Algoritmo de búsqueda del mejor camino para el proyecto	71
IV.4.2 Proceso de simulación de fallas en la red	72
CAPÍTULO V	84
RESULTADOS.....	84
V.1 Investigación exhaustiva referente a redes DWDM-ASON.....	84
V.2 Levantamiento de información de la ubicación de los nodos y distancias.....	84
V.3 Determinación de los requerimientos de tráfico y protección de la red	85

V.4 Determinación de los fenómenos ópticos y factibilidad técnica de los enlaces	87
V.5 Búsqueda de la ruta de trabajo y protección entre dos nodos.....	89
V.6 Definición de equipos y arquitectura definitiva de la red.....	89
CAPÍTULO VI.....	92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
VI.1 Conclusiones y Recomendaciones	92
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	95
APÉNDICES.....	98
APÉNDICE A	98
Abreviaturas y Acrónimos.....	98
APÉNDICE B.....	102
Códigos de programación.....	102
Programación en MATLAB	102
Programación en JAVA (algoritmo de Dijkstra)	103
Programación en JAVA (Búsqueda de nodos)	107
APÉNDICE C.....	108
Data Sheet Equipos	108
APÉNDICE D	109
Estudios	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura básica de una fibra óptica	6
Figura 2 Sección transversal de una fibra óptica	7
Figura 3 Principio de reflexión total	8
Figura 4 Apertura numérica y reflexión total: La luz que entra en la fibra dentro de un ángulo " α " se desplaza por el núcleo	9
Figura 5 Un tren de pulsos típico que representa los datos digitales	10
Figura 6 Análisis de un pulso.....	11
Figura 7 Atenuación total en función de las longitudes de onda	14
Figura 8 Influencia de las microcurvaturas existentes sobre la trayectoria que siguen diferentes rayos.	18
Figura 9 Dispersión cromática para una fibra Monomodo estándar	23
Figura 10 División de un pulso por PMD en una fibra Monomodo	24
Figura 11 Perfiles de índice	28
Figura 12 Índice de fibra escalonada	29
Figura 13 Índice de fibra gradual	30
Figura 14 Ilustración de un sistema de transmisión óptica punto a punto y las funciones de los amplificadores ópticos.	32
Figura 15 Ilustración de un amplificador de fibra dopada por erbio y su funcionamiento.....	34

Figura 16 Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM	35
Figura 17 Evolución de WDM.....	36
Figura 18 Espectro de Absorción de la Fibra Óptica	37
Figura 19 Esquema básico de un sistema DWDM.....	40
Figura 20 Relaciones entre los componentes arquitecturales	42
Figura 21 Comparación de diferentes modulaciones en transmisión coherente de 100G para las nuevas generaciones	47
Figura 22 CANTV en Venezuela y la fibra óptica.....	53
Figura 23 Nodos escogidos por el cliente para el proyecto	54
Figura 24 Representación de los nodos y la fibra de la región Occidental de Venezuela utilizando la herramienta MapSource	56
Figura 25 Ventana de introducción de parámetros para el cálculo del power budget	64
Figura 26 Cálculos en MATLAB del power budget para el enlace Caracas-Valencia	65
Figura 27 Cálculos en MATLAB de la dispersión para el enlace Caracas-Valencia .	71
Figura 28 Ventana principal del programa de simulaciones.....	73
Figura 29 Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas	74
Figura 30 Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas	75
Figura 31 Representación en el mapa del primer corte de fibra (enlace Maracaibo-Barquisimeto).....	76

Figura 32 Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con el primer corte de fibra (Maracaibo-Barquisimeto)	77
Figura 33 Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después del primer corte de fibra (Maracaibo-Barquisimeto)	78
Figura 34 Representación en el mapa del segundo corte de fibra (enlace Maracaibo-Coro)	79
Figura 35 Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con dos cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro).....	79
Figura 36 Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después de dos cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro)	80
Figura 37 Representación en el mapa del tercer corte de fibra (enlace San Cristóbal-Barquisimeto).....	81
Figura 38 Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con tres cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro/ San Cristóbal-Barquisimeto).....	82
Figura 39 Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después de tres cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro/Barquisimeto-San Cristóbal).....	83
Figura 40 Arquitectura definitiva de la red y sus distancias	90
Figura 41 Arquitectura definitiva de la red y amplificadores	91
Figura 42 Población Online de América Latina 2010.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventanas de transmisión DWDM	14
Tabla 2 Principales fenómenos que producen la atenuación en la fibra óptica	15
Tabla 3 Clasificación de la dispersión	Error! Bookmark not defined.
Tabla 4 Atributos de la fibra G.652.D I	Error! Bookmark not defined.
Tabla 5 Atributos de la fibra G.652.D II.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla 6 Coordenadas geográficas de los nodos	57
Tabla 7 Requerimiento de tráfico entre cada una de las ciudades	58
Tabla 8 Resumen de especificaciones técnicas otorgadas por el operador para el cálculo de presupuesto de potencia.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla 9 Distancia entre nodos de la red	Error! Bookmark not defined.
Tabla 10 Requerimiento de tráfico entre cada una de las ciudades	86
Tabla 11 Resumen I de efectos ópticos de los enlaces y especificaciones de los amplificadores.....	87
Tabla 12 Resumen II de efectos ópticos de los enlaces y especificaciones de los amplificadores.....	88
Tabla 13 Data Sheet 1830 PSS ALU	108

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	8
Ecuación 2	13
Ecuación 3	13
Ecuación 4	16
Ecuación 5	19
Ecuación 6	19
Ecuación 7	19
Ecuación 8	20
Ecuación 9	21
Ecuación 10	21
Ecuación 11	22
Ecuación 12	23
Ecuación 13	25
Ecuación 14	61
Ecuación 15	63

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, en los últimos dos años se ha observado un incremento de las conexiones de internet en una tasa de 24% según *ComScore* (ver Figura 42 en APÉNDICE D). La necesidad de estar conectados en todas partes, a cualquier hora, y lo más rápido posible, ha llevado a los operadores de telecomunicaciones a reinventarse. Actualmente, Internet es el medio de comunicación más usado según el estudio *Nothing But Net* de J. P. Morgan (J. P. Morgan, 2010) con un crecimiento constante en el número de usuarios a través del tiempo. Es por ello, que los proveedores de servicio se vieron en la necesidad de encontrar un nuevo medio de transmisión, el cual fuera capaz transportar información de una manera más rápida, sin verse afectada por factores externos o atenuaciones de la señal.

Con el nacimiento de la Fibra Óptica se rompieron todos aquellos esquemas de velocidad de transmisión que existieron en el pasado, lo que generó una nueva visión en la administración de redes, ya que el mundo se encontraba acostumbrado a enviar información mediante pulsos eléctricos y no mediante efectos ópticos (luz).

En un principio se continuó con los esquemas que existían para el envío y conmutación de la información mediante cable de cobre, partiendo del principio que la señal estaba conformada por pulsos eléctricos. Es por ello que se realizó un puente entre el mundo eléctrico y el mundo óptico, ya que los componentes necesarios para migrar al mundo óptico no existían para ese momento. A pesar de que la fusión cumplió con el objetivo, de aumentar las velocidades de transmisión, no se estaba aprovechando en su totalidad la velocidad que ofrecía este nuevo medio de transporte.

Inicialmente, se creó la Multiplexación por División de Onda (WDM *Wavelength Division Multiplexing*), debido a la necesidad de enviar mayor información en menor tiempo, y así, hacer un mejor uso de ancho de banda existente. Se crearon evoluciones de éste primer método de Multiplexación, una de esas evoluciones fue denominada DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), o

Multiplexación por división en longitudes de onda densa) que hoy en día representa la técnica que ofrece mayor velocidad de transmisión mediante Fibra Óptica, entre otros beneficios.

En la actualidad, se logró obtener un método de conmutación para las redes de Fibra Óptica, que permite direccionar la información de una manera más rápida, inteligente y sin necesidad de realizar transformaciones en la señal. De esta manera, se optimizan los recursos de la red y mejoran sus velocidades. Dicho método es denominado ASON (*Automatically Switched Optical Network*), o Red Óptica de conmutación automática.

La siguiente investigación nace de la necesidad de implementar una red DWDM ASON para la zona Centro Occidental de Venezuela, ya que con esta tecnología, los enlaces ópticos soportarán velocidades de 10Gb/s, 40Gb/s o 100 Gb/s. En este trabajo se pueden constatar los pasos necesarios para el diseño de una red DWDM ASON entre un número determinado de ciudades correspondientes a la región Centro Occidente de Venezuela.

Para la elaboración de este proyecto se tomaron en cuenta las necesidades de tráfico existentes entre cada una de las ciudades, para definir el ancho de banda necesario y así lograr la interconexión. También se diseñará una arquitectura que soporte más de tres fallas en las interfaces que la componen. Conjuntamente, se analizarán las características de cada una de las interfaces, para definir cada uno de los equipos que van a formar parte de la red. Finalmente, se definirá la arquitectura definitiva que tendrá la red DWDM ASON para las ciudades involucradas.

El proyecto consta de seis (6) capítulos. El Capítulo I contiene el planteamiento del problema, los objetivos a cumplir en el proyecto, su justificación, y la descripción de los alcances y limitaciones que perfilaron el trabajo; el Capítulo II presenta el estudio y documentación teórica que respalda la investigación; el Capítulo III está conformado por la metodología que se utilizó para llevar a cabo el proyecto; el Capítulo IV contiene el desarrollo e implementación del proyecto; el Capítulo V, contempla los resultados obtenidos en el diseño y simulaciones, dándole validez a los objetivos; para finalizar en el Capítulo VI, se exponen las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron gracias a esta investigación.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En el presente capítulo se describirá de manera detallada lo referente al planteamiento del problema, objetivos (general y específicos), así como limitaciones y alcances que abarca el presente proyecto.

I.1 Planteamiento del Problema

Hoy en día los operadores de telecomunicaciones tienen en muchas de sus redes ópticas, tecnologías SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) y DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Muchos de ellos han reducido su inversión en tecnologías SDH, por lo que han emigrado a soluciones DWDM, ya que esta última ofrece muchas ventajas, tales como:

- 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 Monomodo hasta 88 canales en el entorno de la tercera ventana, 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 100 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*” (crece como lo vayas requiriendo), 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.
- Transparencia, pues en cada una de las longitudes de onda puede transportar una señal de cualquier formato (SONET/SDH, ESCON, *Fiber 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 9000 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). (Sangucho & Morocho, 2009)

La creciente demanda de capacidad de transmisión, debida en gran medida tanto al incremento de usuarios como a los requisitos de transmisión solicitados por éstos, han hecho necesario modificar el modelo de transmisión de tráfico comúnmente usado hasta la actualidad a fin de responder a esta demanda. El modelo de red de transporte ha evolucionado y está evolucionando hacia una futura red óptica inteligente, conocida como Red Óptica de Conmutación Automática. (Muñoz, y otros, 2010)

Entre las ventajas de las redes ASON encontramos:

- Una red basada en tecnología ASON proporciona diversidad de direccionamiento con múltiples rutas de seguridad para un servicio, lo que mejora mucho la fiabilidad de la red.
- Mejora la utilización del ancho de banda de la red mediante la restauración.
- Reduce los gastos operativos de la red mediante una función de detección automática (los recursos, la topología y los servicios de la red).
- Proporciona un plano de control con una mayor interoperabilidad que cumple completamente los estándares necesarios.
- La red de transmisión puede generar más ingresos con tecnologías de red privada virtual óptica y de ancho de banda a demanda. (Díaz Yáñez & Jiménez Jiménez, 2010)

Venezuela es un país que posee una gran demanda en tecnología. Cada día crecen los intereses de los usuarios por navegar a velocidades más altas y visualizar contenidos multimedia, mientras que los proveedores luchan por ofrecer nuevos servicios y beneficios para ganar nuevos clientes. Con la tecnología actual, estas empresas se ven limitadas.

Por todos estos motivos es necesario un salto tecnológico hacia las nuevas generaciones. Aprovechando todas las herramientas que DWDM ASON nos provee, se obtendrá un menor costo con una mayor optimización de recursos, y éstas mismas son las que permitirán trabajar en el plano óptico, sin necesidad de ir al plano eléctrico.

I.2 Objetivos

A continuación se presentan los objetivos a ser alcanzados. Los mismos se encuentran enfocados en todos los estudios necesarios para lograr la culminación del presente proyecto.

I.2.1 General:

Diseñar una red DWDM ASON, de la región Centro Occidente de Venezuela.

I.2.2 Específicos:

- Levantar información de la ubicación de los nodos, fibra instalada y distancias, en la Región Centro Occidental de Venezuela.
- Determinar los requerimientos de tráfico, capacidad y protección de la red DWDM-ASON a ser diseñada.
- Determinar los fenómenos ópticos que serán considerados para los cálculos y factibilidad técnica de los enlaces (*Budget Óptico*).
- Definir los tipos de interfaces y longitudes de ondas (lambdas) a usar para satisfacer las necesidades de capacidad y tráfico.
- Realizar las iteraciones de simulación de fallas, para garantizar la redundancia de la red, considerando tres grados de libertad y tres cortes de fibra.
- Definir los equipos a usar en la red DWDM-ASON.
- Definir la arquitectura de la red DWDM-ASON a ser implementada en la región Centro Occidental de Venezuela.

I.3 Justificación

Este proyecto surgió como la solución a un problema que presentaba un operador de telecomunicaciones, que presta servicio en el País, ya que las velocidades que ofrece actualmente están siendo insuficientes para satisfacer las necesidades de los usuarios. Mediante una nueva tecnología llamada ASON, se pretende emigrar la red existente a una red que se encuentre automatizada y que no requiera transformar la señal del campo óptico al eléctrico o vice-versa, ya que esto permite enviar la información de una forma más rápida y proporciona un menor uso de recursos.

I.4 Limitaciones y alcances

En el siguiente apartado se presentan aquellas actividades contempladas para el estudio y desarrollo del Proyecto, así como todas aquellas limitantes encontradas en el mismo:

Todos los datos e información técnica son proporcionados por el operador de telecomunicaciones que patrocina el proyecto y el tutor industrial; cualquier factor adicional que no haya sido tomado en cuenta en el trabajo de grado, y no previsto en los objetivos, se debe a que el operador no lo ha requerido. El tipo de fibra, como otros componentes del diseño no se tomaron en cuenta, ya que dichos dispositivos estaban instalados y no requerían modificación. El presente trabajo se enfocó únicamente para la región Centro Occidente de Venezuela.

El proyecto solo incluyó la fase de diseño, más no la implementación física del mismo. El diseño incluye: estudio de la fibra instalada y medición de distancias entre nodos usando la herramienta MapSource, determinación de los requerimientos de tráfico, determinación de los fenómenos ópticos usando MATLAB, simulación de fallas mediante el uso de Java y final definición de la arquitectura y equipos de la red.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En este apartado se detallará los conceptos y teorías necesarias para comprender la temática que abarca el diseño de una red DWDM-ASON.

II.1 Generalidades de la Fibra Óptica

La fibra óptica es el componente más importante de los sistemas de comunicaciones de fibra óptica. La estructura básica de una fibra óptica se muestra en la Figura 1 la cual tiene un núcleo central, un revestimiento, y un recubrimiento externo que protege y refuerza la fibra.



Figura 1: Estructura básica de una fibra óptica

Fuente: (Hui & O'Sullivan, 2009)

La guía de luz y la propagación en una fibra óptica está basada en la reflexión interna total entre el núcleo y el revestimiento. Debido a la atenuación extremadamente lenta en el silicio, las señales ópticas pueden transmitirse por largas distancias a lo largo de la fibra sin una pérdida significativa del poder óptico. Para entender el mecanismo de la propagación óptica en la fibra, se deben conocer conceptos fundamentales de reflexión y refracción de los haces de luz en la interfaz óptica. (Hui & O'Sullivan, 2009)

II.1.1 Principios básicos de la fibra óptica

El cable de fibra óptica consta de hilos extremadamente finos de silicio ultra-puro diseñado para transmitir señales luminosas. La Figura 2, muestra la construcción de una fibra de vidrio que es el componente básico en muchos tipos de cable de fibra óptica. El centro del filamento de fibra se denomina el ‘núcleo’. El núcleo guía las señales luminosas que se transmiten. Una capa de vidrio denominada ‘revestimiento’ rodea el núcleo. El revestimiento confina la luz en el núcleo. La región externa de la fibra óptica es el ‘recubrimiento’, normalmente un material plástico, que proporciona protección y preserva la resistencia de la fibra de vidrio.

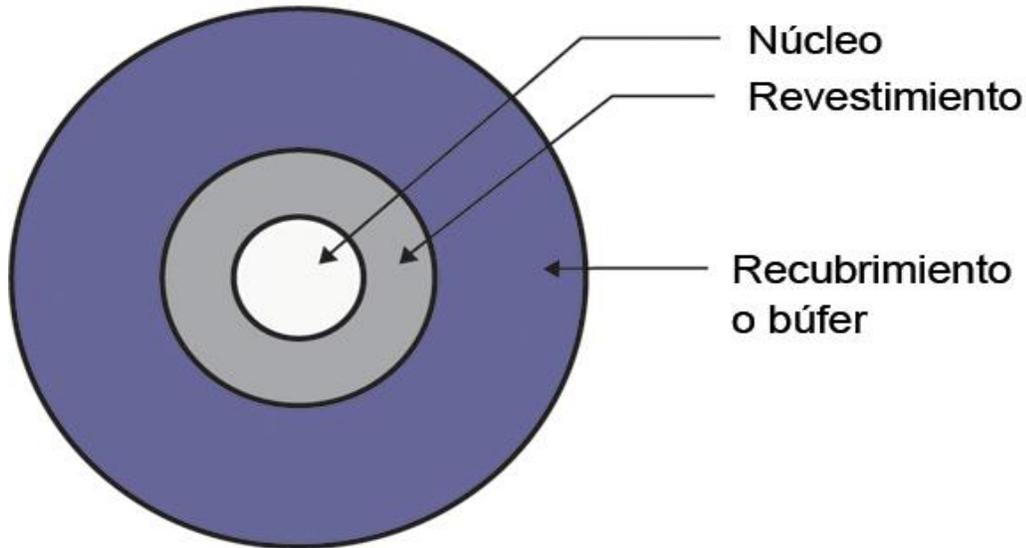


Figura 2: Sección transversal de una fibra óptica

Fuente: (Llorente, 2011)

Un diámetro exterior habitual para el revestimiento es de 125 micras (μm) o 0,125 mm. El diámetro del núcleo para cable de fibra óptica comúnmente utilizado en las infraestructuras locales es 9, 50 ó 62,5 μm . La fibra Monomodo tiene el menor diámetro con un valor nominal de 9 μm ; los diámetros mayores de 50 y 62,5 μm definen tipos de fibra multimodo. (Llorente, 2011)

II.1.2 Reflexión y refracción

La operación de la fibra óptica se basa en el principio de reflexión interna total.

La Figura 3 muestra este principio cuando la luz viaja desde el aire hacia el agua. Cuando la luz llega a la superficie del agua con un ángulo de incidencia θ menor que el ángulo crítico θ_{critical} , se desplaza dentro del agua, pero cambia de dirección en el límite entre el aire y agua (*refracción*). Cuando un haz de luz llega a la superficie del agua con un ángulo mayor que el ángulo crítico, la luz se refleja en la superficie del agua. Cada material se caracteriza por un índice de refracción, representado por el símbolo n . Este índice, también llamado índice refractivo, es la proporción entre la velocidad de luz en el vacío (c) y su velocidad en un medio específico (v).

$$n=c/v$$

Ecuación 1

El índice de refracción en el vacío (espacio exterior) es 1 ($v = c$). El índice de refracción del aire (n_1) es 1,003 o ligeramente superior al del vacío mientras el índice de refracción para el agua es 1,333. Un valor más alto del índice de refracción n de un material indica que la luz viaja más lenta en ese material. La luz viaja más rápido a través del aire que en el agua.

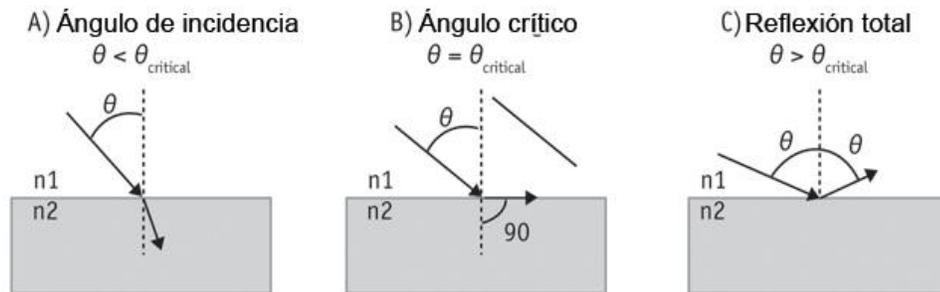
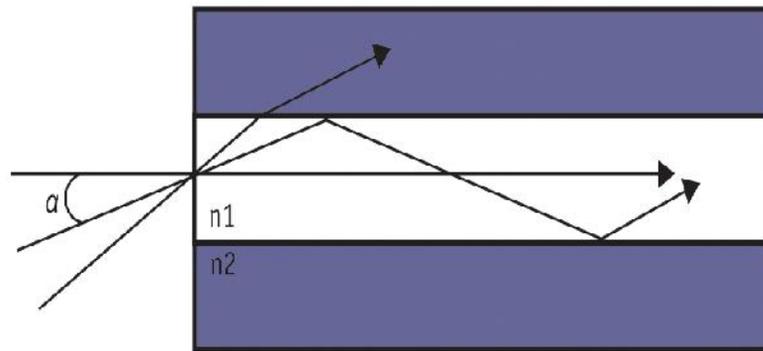


Figura 3: Principio de reflexión total

Fuente: (Llorente, 2011)

El núcleo de una fibra óptica tiene un índice de refracción ligeramente mayor que el revestimiento. La luz que llega al límite entre el núcleo y el revestimiento con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico se refleja y continúa su recorrido dentro del núcleo. Este principio de reflexión total es la base para el funcionamiento de la fibra óptica. El ángulo crítico es una función del índice de refracción de los dos medios, en este caso el vidrio del núcleo y el del revestimiento. El índice de refracción para el núcleo es normalmente alrededor de 1,47 mientras que el índice de refracción para el revestimiento es aproximadamente 1,45.

A causa de este principio, podemos describir un cono imaginario con un ángulo " α " relacionado con el ángulo crítico (véase la Figura 4). Si la luz se introduce en el extremo de fibra desde el interior de este cono, está sujeta a la reflexión total y viaja por el núcleo. La noción de este cono está relacionada con el término apertura numérica, la capacidad de recoger la luz de la fibra. La luz que llegue al extremo de fibra fuera de este cono se refractará en el revestimiento cuando se encuentre con el límite núcleo-revestimiento; y no permanece dentro del núcleo.



Índice de refracción del núcleo $n_1 = 1.47$
Índice de refracción del revestimiento $n_2 = 1.45$

Figura 4: Apertura numérica y reflexión total: La luz que entra en la fibra dentro de un ángulo " α " se desplaza por el núcleo
Fuente: (Llorente, 2011)

II.1.3 Señalización

Las redes de área local como Ethernet y Fiber Channel transmiten pulsos que representan información digital. El *bit* (abreviatura de dígito binario) es la unidad básica de información digital. Esta unidad sólo puede tomar dos valores: 0 ó 1. Los datos numéricos se transforman en un número digital. Otros datos como los caracteres se codifican en una cadena de bits. Un estado ‘*On*’ u ‘*Off*’ representa electrónicamente el valor de un bit. Asimismo, una cadena consecutiva de pulsos de luz representa la información digital que se transmite a través de un enlace de fibra óptica. El estado “*On*” representa un bit con valor 1 y el estado ‘*Off*’ representa un bit con valor 0. La Figura 5 representa una muestra de la información digital tal como se transmite a través de un cable de fibra óptica.

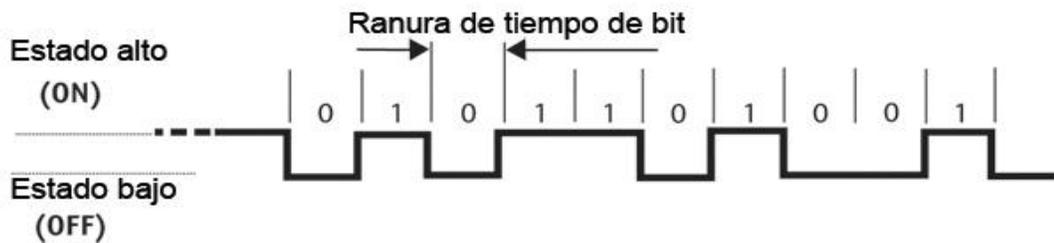


Figura 5: Un tren de pulsos típico que representa los datos digitales

Fuente: (Llorente, 2011)

La representación de los pulsos en la Figura 5 está “idealizada”. En el mundo real, los pulsos tienen tiempos reducidos de subida y bajada. La Figura 6 describe las principales características de un pulso. El tiempo de subida indica la cantidad de tiempo necesaria para cambiar la luz al estado “*On*”; por lo general se corresponde con el tiempo necesario para la transición del 10 % al 90 % de la amplitud. El tiempo de bajada es lo contrario del tiempo de subida y representa la duración de cambiar la luz de ‘*On*’ a ‘*Off*’. Los tiempos de subida y bajada son parámetros críticos; determinan el límite superior de la velocidad a la que el sistema puede generar y transmitir pulsos.

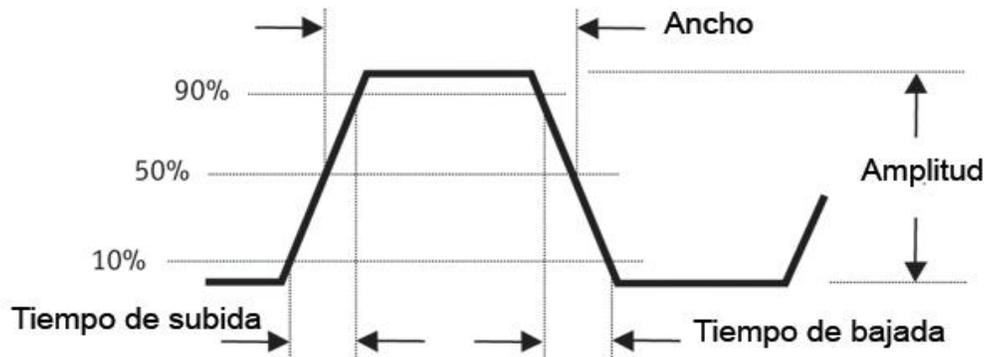


Figura 6: Análisis de un pulso

Fuente: (Llorente, 2011)

Al transmitir mil millones o más bits por segundo (velocidad de datos de 1 Gbps o más), las fuentes de luz LED (por sus siglas en inglés *Light Emitting Diode*, o Diodo emisor de luz) ya no se pueden utilizar debido a los tiempos de subida y bajada de las fuentes LED. Estos sistemas de mayor velocidad sólo utilizan fuentes de luz láser. Una fuente muy común en las redes de los edificios es la VCSEL (por sus siglas en inglés, *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*, o Laser de emisión superficial de cavidad vertical) que transmite luz a la longitud de onda de 850nm.

II.1.4 Requisitos para una transmisión fiable

Cuando la fuente de luz en el dispositivo de transmisión genera un tren de pulsos como el que se muestra en la Figura 6, el enlace de fibra óptica debe transmitir este tren de pulsos con suficiente fidelidad de señal para que el detector en el dispositivo receptor pueda detectar cada pulso con su verdadero valor de ‘On’ u ‘Off’.

Como mínimo son necesarias dos cosas para garantizar la recepción y transmisión fiable:

II.1.5 Pérdida de inserción de canal

La máxima pérdida de señal o atenuación de señal permitida en el medio de transmisión desde el dispositivo transmisor al receptor. El término ‘canal’ define el medio de transmisión extremo a extremo entre transmisor y receptor. La pérdida de señal está compuesta por las pérdidas acumuladas en el cableado de fibra óptica y en cada conexión o empalme.

II.1.6 Dispersión de señal

Los pulsos de luz tienen una tendencia a esparcirse según viajan por el enlace de fibra debido a la dispersión. El esparcimiento debe limitarse para prevenir que los pulsos lleguen juntos o superpuestos al extremo receptor.

Ambos parámetros, pérdida de canal y dispersión de señal, desempeñan un papel crítico en el establecimiento de una transmisión fiable y libre de errores. La dispersión no se puede medir en campo. Los estándares de red definen una longitud de canal máxima para la fibra óptica; la longitud máxima es una función de la velocidad de datos y el índice de ancho de banda de la fibra óptica. El índice de ancho de banda, a su vez, se basa en mediciones de laboratorio para caracterizar la dispersión modal en fibras ópticas multimodo. (Llorente, 2011)

II.1.7 Propiedades físicas de la fibra óptica

Se considera a aquellos efectos físicos relevantes para un sistema 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 PMD (por sus siglas en inglés, *Polarization Mode Dispersion*, o Dispersión por modo de polarización).

II.1.7.1 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.

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

Ecuación 2

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

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

Ecuación 3

El coeficiente de atenuación por unidad de longitud (L), generalmente en km.

Como es de esperar, el coeficiente de atenuación depende de la longitud de onda a la que trabaje la fibra. Figura 7

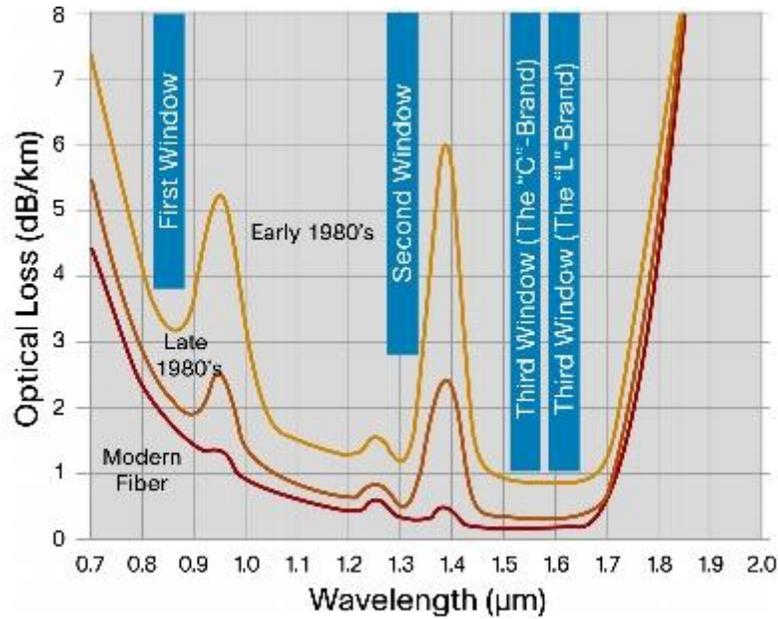


Figura 7: Atenuación total en función de las longitudes de onda
Fuente: (Cisco, 2008)

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 (por sus siglas en inglés, *International Telecommunication Union*, o Unión Internacional de Telecomunicaciones). G.692 ha definido ventanas adicionales llamadas bandas, las cuales son utilizadas en sistemas de transmisión DWDM. Por lo tanto se tiene:

Tabla 1: Ventanas de transmisión DWDM

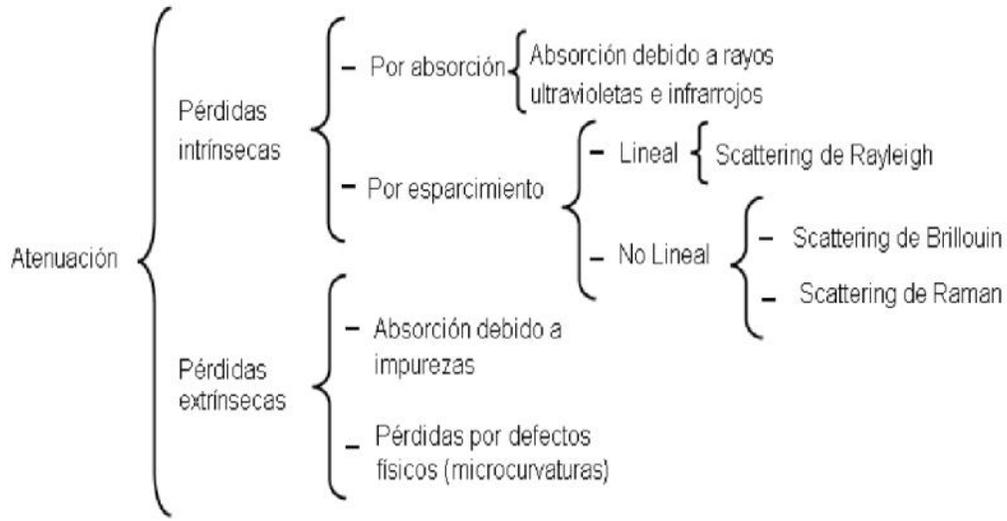
Fuente: (Sangucho & Morocho, 2009)

■ 820-880 nm (1era ventana)	■ Banda S 1460-1530 nm
■ Banda O 1260-1360 nm (2da ventana)	■ Banda C 1530-1565 nm (3ra ventana)
■ Banda E 1360-1460 nm	■ Banda L 1565-1625 nm
	■ Banda U 1625-1675 nm

Las causas de atenuación de las fibras ópticas se agrupan en intrínsecas y extrínsecas como se detalla en la Tabla 2:

Tabla 2: Principales fenómenos que producen la atenuación en la fibra óptica

Fuente: (Sangucho & Morocho, 2009)



II.1.7.2 Pérdidas intrínsecas

II.1.7.2.1 *Absorción debido 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 si 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.

II.1.7.2.2 *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 (PRayleigh). Esta pérdida de energía decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda es decir:

$$P_{RAYLEIGH} = \frac{1}{4}$$

Ecuación 4

Esto lleva consigo el que, sea conveniente trabajar a una longitud de onda lo mayor posible.

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.

II.1.7.3 Pérdidas extrínsecas

II.1.7.3.1 *Absorción debido 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 silicio. 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).

II.1.7.3.2 *Pérdidas por curvaturas 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. Véase Figura 8

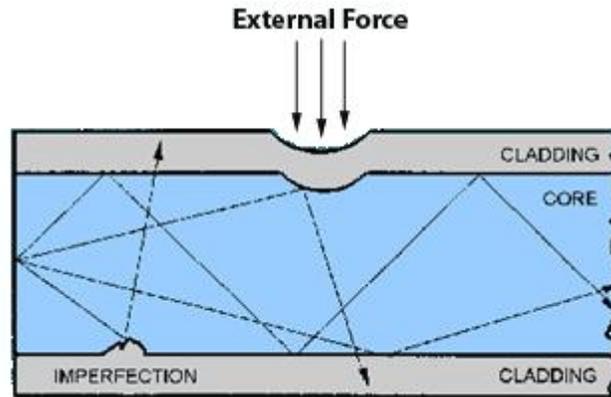


Figura 8: Influencia de las microcurvaturas existentes sobre la trayectoria que siguen diferentes rayos.

Fuente: (EMMT, 2012)

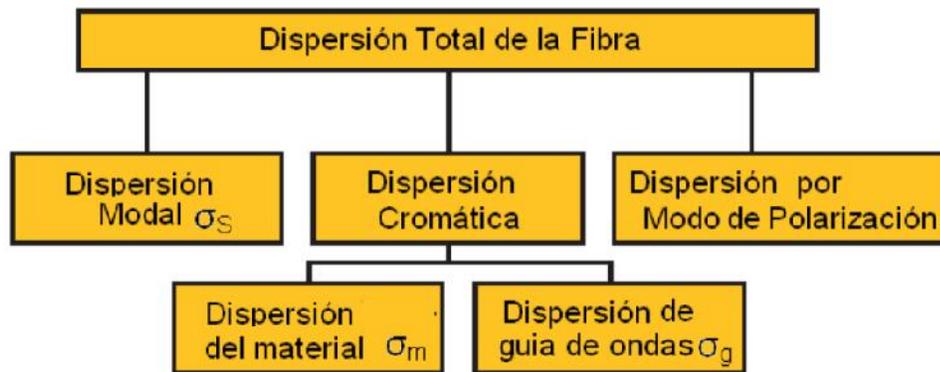
II.1.7.4 Dispersión en las Fibras

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:

Tabla 3: Clasificación de la dispersión

Fuente: (Sangucho & Morocho, 2009)



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:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + (\sigma_m + \sigma_g)^2$$

Ecuación 5

II.1.7.5 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:

$$\sigma_s = \frac{L(AN)^2}{4 \sqrt{3} n_1 c}$$

Ecuación 6

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:

$$\sigma_s = \frac{L n_1^2}{20 \sqrt{3} n_1 c}$$

Ecuación 7

II.1.7.6 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 espectral¹ $\delta\lambda$, distribuido alrededor de esta longitud de onda central, en virtud a este efecto la velocidad de grupo² 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 (δc) está dado por:

$$\sigma_c = DL$$

Ecuación 8

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.

¹ 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.

² 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.

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.

$$D = D_m + D_g$$

Ecuación 9

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

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = \frac{2\pi c d^2 \beta}{2 d\omega^2} \left| \frac{ps}{kmnm} \right|$$

Ecuación 10

A este parámetro β_2 se le denomina parámetro de dispersión de la velocidad de grupo (parámetro GVD, por sus siglas en inglés, *Group Velocity Dispersion*, o Grupo de velocidad de dispersión), el cual es utilizado para definir dos regiones de funcionamiento dependiendo del signo de la dispersión cromática. 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.

II.1.7.6.1 *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 fase³ es

³ Velocidad de fase (Vf).- 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:

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:

$$D_m(\lambda) = \frac{d^2 n_s}{c d \lambda^2} \left| \frac{ps}{kmnm} \right|$$

Ecuación 11

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 1nm.

La dispersión del material aumenta con la longitud de la fibra (ver Ecuación 11), se puede minimizar, usando fuentes de espectro estrecho.

II.1.7.6.2 *Dispersión de guía de onda*

Surge de la existencia de la propia guía de onda⁴, 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

$$V_f = \frac{w}{\beta} = \frac{c}{n}$$

Donde n es el índice de refracción del medio.

⁴ 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.

(aunque n no cambie), lo que se traduce en un camino recorrido diferente para cada componente espectral del modo de propagación.

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

$$D_g(\lambda) = -\frac{1}{4\pi^2 n_1^3 c} \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) \left| \frac{ps}{kmnm} \right|$$

Ecuación 12

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 $1.31\mu\text{m}$. En las DSF (por sus siglas en inglés, *Dispersion Shifted Fibers*, o Fibras de dispersión desplazadas) G.653, se modifica el perfil del índice de refracción para desplazar el punto de dispersión cero a la longitud de 1550nm . En la siguiente Figura 9 se puede observar la dispersión cromática típica para una fibra Monomodo estándar

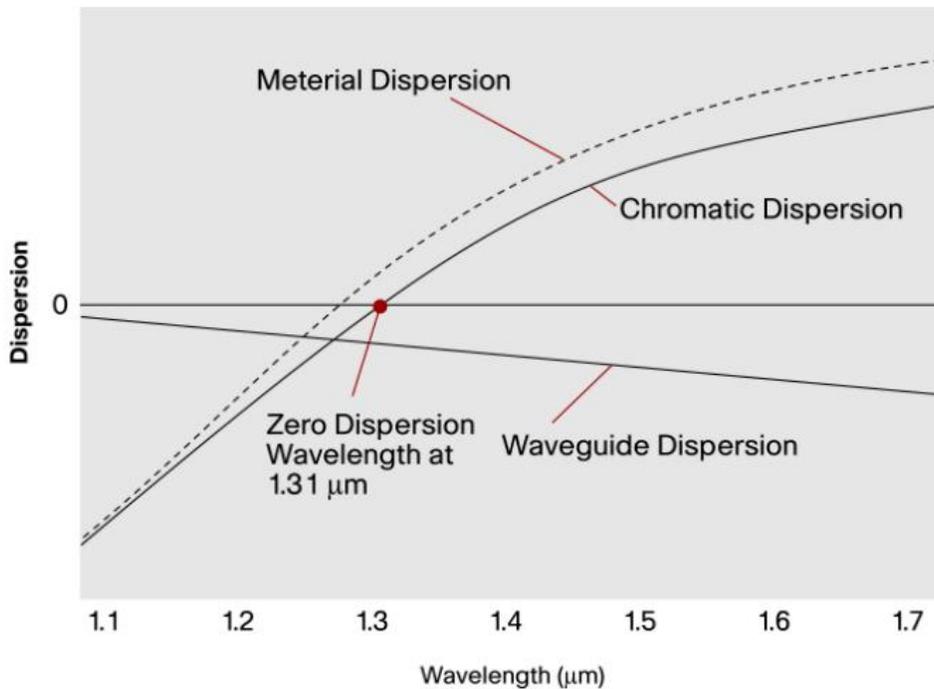


Figura 9: Dispersión cromática para una fibra Monomodo estándar

Fuente: (Cisco, 2008)

II.1.7.7 PMD

La PMD ocurre cuando las componentes ortogonales de polarización, llamadas 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 BER (por sus siglas en inglés, *Bits Error Rate*, o Tasa de bits errados). Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo diferencial de grupo DGD (por sus siglas en inglés, *Differential Group Delay*, o Grupo diferencial de retardo). Véase Figura 10

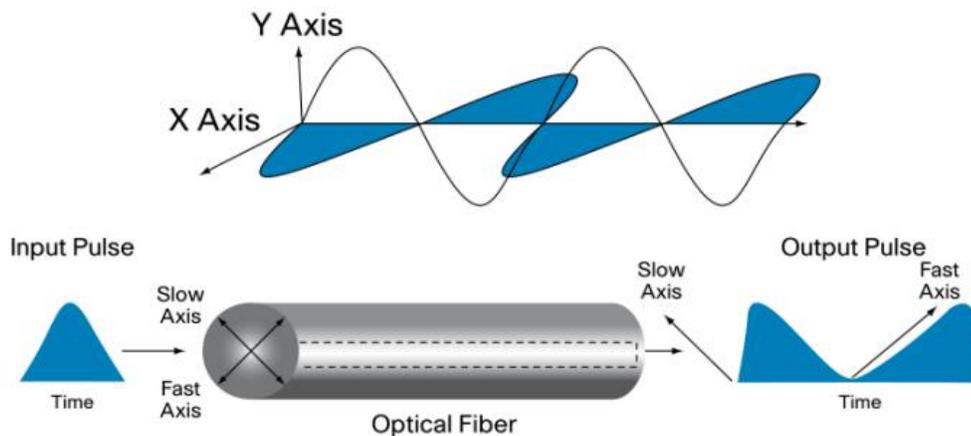


Figura 10: División de un pulso por PMD en una fibra Monomodo
Fuente: (Cisco, 2008)

Esta variación de la velocidad de grupo se produce por la birrefringencia⁵ 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.

⁵ 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.

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 \mathcal{E}_{PMD} cumple con la siguiente relación:

$$\mathcal{E}_{PMD} = D_{PMD} \bar{L}$$

Ecuación 13

(Sangucho & Morocho, 2009)

II.1.7.8 Ancho de banda

Una característica clave de rendimiento de fibra es el ancho de banda, o la capacidad de transportar información de la fibra óptica. En términos digitales, el ancho de banda se expresa en una velocidad de bits a la cual las señales se pueden enviar sobre una distancia dada sin que un bit interfiera con el bit anterior o posterior. El ancho de banda se expresa en el producto MHz•km. La interferencia se produce por el fenómeno de dispersión que se discutió anteriormente.

El ancho de banda puede definirse y medirse de varias formas. Las tres especificaciones normalizadas de ancho de banda y las medidas aplicables son Ancho de Banda en Desbordamiento, Ancho de Banda Modal Restringido y Ancho de Banda de Láser o Ancho de Banda Modal Efectivo. La razón de estos diferentes métodos proviene de las diferencias en las características de las fuentes de luz que se usan para transmitir información.

La fuente de luz tradicional para Ethernet a 10 Mbps y 100 Mbps ha sido el LED, una opción excelente para aplicaciones operando a velocidades de hasta 622 Mbps. Los LEDs producen una luz uniforme de salida que llena por completo el núcleo de la fibra óptica y utiliza todos sus modos de funcionamiento. Para predecir mejor el ancho de banda de las fibras multimodo convencionales cuando se utilizan

con fuentes de luz LED, la industria emplea un método llamado OFL (por sus siglas en inglés, *Overfilled Bandwidth*, o Ancho de Banda en desbordamiento).

Tal como se mencionó anteriormente, los LEDs no se pueden modular lo suficientemente rápido para transmitir los mil millones o más de pulsos por segundo necesarios para velocidades de datos Gbps. Una fuente de luz común para soportar las velocidades de transmisión Gb en aplicaciones de redes ópticas en edificios es la VCSEL a una longitud de onda de 850 μm . A diferencia de un LED, la salida de luz de un VCSEL no es uniforme. Cambia de VCSEL a VCSEL a través del extremo de la fibra óptica. Como resultado, los láseres no utilizan todos los modos en fibra multimodo sino más bien un conjunto restringido de modos. Y lo que puede ser más importante, cada láser rellena un conjunto diferente de modos en la fibra y con diferentes valores de potencia en cada modo.

Un método óptimo para garantizar el ancho de banda en enlaces de fibra óptica para la implementación de las velocidades Gigabit es la medición del DMD (por sus siglas en inglés, *Direfencial Mode Delay*, o Retardo de modo diferencial). Esta técnica de medición es la única especificación de ancho de banda mencionada en las normas para velocidades de datos de 10 Gbps. El ancho de banda de láser o su ancho de banda modal efectivo se deriva matemáticamente de las mediciones de DMD. (Llorente, 2011)

II.1.8 Clasificación de las fibras

II.1.8.1 Según sus modos

Los cables de fibra óptica pueden clasificarse por su modo. Los rayos de luz propagados como una onda electromagnética a lo largo de la fibra. Los dos componentes, el campo eléctrico y el campo magnético forman patrones a través de la fibra. Estos patrones son llamados modos de transmisión. El modo de una fibra se

refiere al número de trayectorias de los rayos dentro del cable. De acuerdo a los modos, la fibra puede clasificarse en dos tipos:

- Monomodo
- Multimodo

La fibra multimodo fue la primera en producirse y comercializarse. El término multimodo simplemente se refiere al hecho que numerosos modos (haces de luz) son llevados simultáneamente a través de la guía de onda. La fibra multimodo tiene un diámetro mucho más largo, comparado con la fibra Monomodo, esto permite gran cantidad de modos.

La fibra Monomodo permite una propagación de los rayos de luz por un solo sendero. Las fibras simples (Monomodo) son mejores para retener la fidelidad de cada pulso de luz sobre distancias largas, además de que no posee dispersión modal.

Por lo tanto, se puede transmitir mucha más información por unidad de tiempo. Esto da a la fibra Monomodo un mayor ancho de banda comparada con la fibra multimodo.

Una desventaja de las monomodos, es que poseen menores diámetros de núcleo, dificultando el acoplamiento de la luz adentro del mismo. Es requerida más precisión para los conectores y empalmes.

II.1.8.2 Según sus perfiles de índice

Otra manera de clasificar los cables de fibras es de acuerdo a los perfiles de índice de refracción de la misma. El índice de perfil es una representación gráfica de los valores de refracción a través del diámetro del núcleo.

Existen dos tipos básicos de perfiles de índice:

- Fibra SI (por sus siglas en inglés *Step Index*, o de Índice escalonado)
- Fibra GRIN (por sus siglas en inglés, *Graded index*, o de Índice gradual)

En la siguiente Figura 11 se pueden observar los tipos de pulso según su perfil de índice.



Figura 11: Perfiles de índice

Fuente: (Bagad, 2009)

II.1.8.2.1 Fibra SI

Las fibras de índice escalonado son aquellas que poseen un núcleo cilíndrico central o núcleo interior con un índice refractivo uniforme de n_1 y el núcleo está rodeado por un recubrimiento exterior con un índice refractivo uniforme n_2 . El índice refractivo del revestimiento (n_2) es menos que el índice refractivo n_1 , pero existe un cambio abrupto en el índice refractivo en la interfaz en el núcleo y el revestimiento. El perfil de índice refractivo del SI está mostrado en la Figura 12. El índice refractivo está trazado en el eje horizontal y la distancia radial desde el núcleo está trazada en el eje vertical.

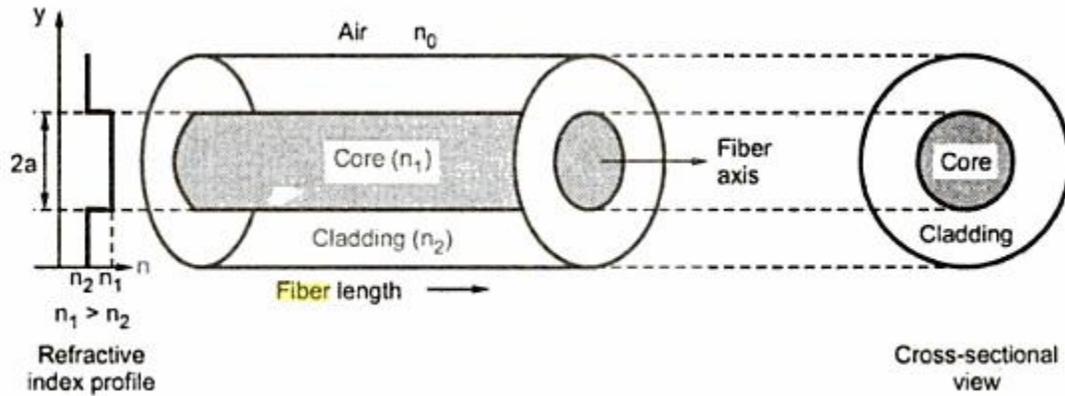


Figura 12: Índice de fibra escalonada

Fuente: (Bagad, 2009)

La propagación de las ondas de luz dentro del SI toma una trayectoria meridional en la cual el rayo sigue un patrón en *zig-zag* de la línea de los segmentos.

El diámetro típico de un núcleo es de 50 a 80 μm y el diámetro del revestimiento de 125 μm .

El perfil de índice refractivo está definido como:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & \text{cuando } r < a \text{ (núcleo)} \\ n_2 & \text{cuando } r \geq a \text{ (revestimiento)} \end{cases}$$

II.1.8.2.2 Fibra GRIN

La fibra de índice gradual posee un núcleo con muchas capas de vidrio. Su índice refractivo no es uniforme adentro del núcleo, es más grande en el centro y decrece suave y continuamente con la distancia hacia el revestimiento, el mismo viaja con una naturaleza parabólica alrededor del núcleo, tal como muestra la Figura 13.

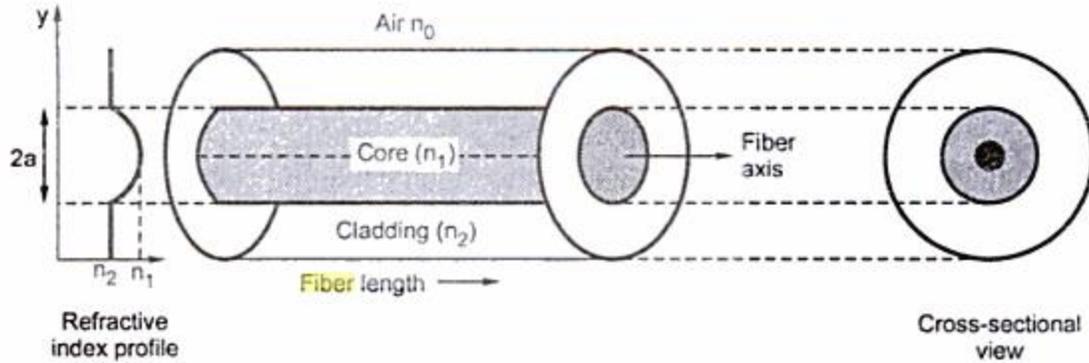


Figura 13: Índice de fibra gradual

Fuente: (Bagad, 2009)

En este tipo de fibra las ondas de luz son dobladas por la refracción hacia el eje del núcleo y ellas siguen el camino de la curva por el largo de la fibra. Esto resulta por el cambio en el índice refractivo de acuerdo a como se aleja desde el centro hasta el núcleo. Las GRIN poseen una eficiencia de acoplamiento más baja y un ancho de banda más grande que las SI. Están disponibles en dos tamaños, 50/125 y 62.5/125. La fibra 50/125 ha sido optimizada para aplicaciones de *long haul* y tiene una NA (por sus siglas en inglés *Numerical Aperture*, o Apertura numérica) más pequeña pero mayor ancho de banda. Mientras que la fibra 62.5/125 está optimizada para aplicaciones LAN (por sus siglas en inglés, *Local Area Network*, o Red de área local) y su costo es 25% más elevado que la fibra 50/125.

La variación de índice de refracción en el núcleo está dada por la siguiente

$$\text{relación: } n(r) = \left\{ \begin{array}{ll} n_1 \left(1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right) & \text{cuando } r < a \text{ (núcleo)} \\ n_1 \left(1 - 2 \right)^{\frac{1}{2}} = n_2 & \text{cuando } r = a \text{ (revestimiento)} \end{array} \right\}$$

donde,

r = Distanciaradialdesdeelcentrodelejedelafibra

a = Radiodelnúcleo

$n_1 = \text{Índice de refracción del núcleo}$

$n_2 = \text{Índice de refracción del revestimiento}$

$\alpha = \text{Figura del índice de perfil}$

El parámetro α determina la característica del perfil de índice de refracción del núcleo de la fibra. (Bagad, 2009)

II.1.9 Amplificadores ópticos

Los amplificadores ópticos lineales son usados regularmente para compensar la atenuación de la fibra, la división de la potencia óptica y otros factores. También pueden ser usados para realizar el procesamiento de la señal óptica no lineal y dar forma a la onda cuando se utilizan en un régimen no lineal.

La Figura 14 muestra un sistema de transmisión óptico punto a punto típico en el cual los amplificadores ópticos son usados para realizar varias funciones. La post-amplificación es usada en el transmisor para estimular e impulsar la potencia óptica. Los post-amplificadores (*post-amp*) son especialmente útiles si la potencia de un transmisor tiene que ser dividida y usada para difundir haces de luz entre varias salidas en una red óptica, por lo tanto, estos compensan la pérdida por división (*splitting loss*). El requerimiento básico de un post-amplificador es suplir de suficiente potencia óptica en la salida de un transmisor.

En el caso de los amplificadores en línea (*in-line optical amplifiers o line-amps*) son usados a lo largo del sistema de transmisión para compensar la atenuación causada por la fibra óptica. En sistemas de transmisión de alta velocidad, los amplificadores en línea a menudo son colocados periódicamente a lo largo del enlace de fibra, uno por cada 80 km de distancia aproximadamente. El requerimiento básico para los line-amps es proveer la suficiente ganancia óptica. Adicionalmente, para soportar los sistemas WDM, estos deben tener un amplio ancho de banda y la

ganancia óptica plana estar dentro del mismo ancho de banda. Las técnicas de de equalización de ganancia son usadas frecuentemente en los line-amps, además la ganancia de estos, debe ser lineal, para prevenir la diafonía (*crosstalk*) entre diferentes canales de longitud de onda.

Por otro lado, los preamplificadores son utilizados inmediatamente después del fotodiodo en el receptor óptico para formar el conocido receptor óptico pre amplificado. Apartando el requerimiento de la alta ganancia óptica, la más importante exigencia de un preamplificador es que el ruido debe ser bajo. La sensibilidad de un receptor óptico pre amplificado está altamente dependiente del ruido característico del preamplificador. Debido a sus diferentes aplicaciones, los diferentes tipos de amplificadores ópticos generalmente deben ser diseñados y optimizados de maneras diferentes para el mejor desempeño. Véase Figura 14

Los amplificadores ópticos más populares usados para las comunicaciones ópticas y sistemas electro-ópticos son los amplificadores ópticos semiconductores (SOA por sus siglas en inglés *semiconductor optical amplifier*) y los amplificadores de fibra óptica dopada con erbio (EDFA por sus siglas en inglés *erbium-doped fiber amplifiers*). (Hui & O'Sullivan, 2009)

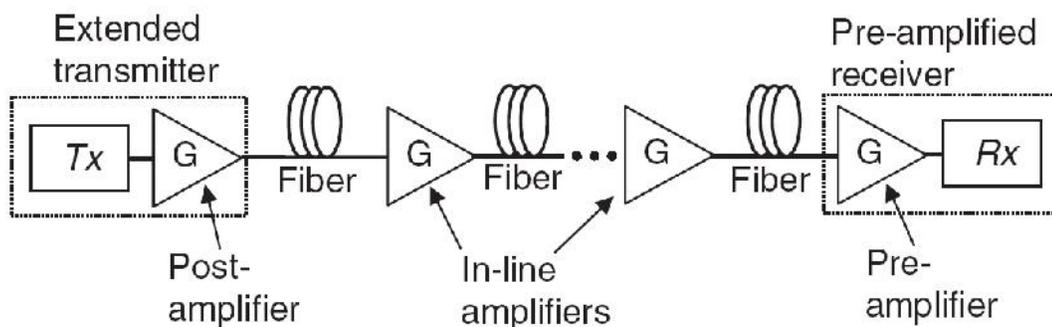


Figura 14: Ilustración de un sistema de transmisión óptica punto a punto y las funciones de los amplificadores ópticos.

Fuente: (Hui & O'Sullivan, 2009)

II.1.9.1 Amplificadores de fibra óptica dopada con erbio

Un amplificador de fibra óptica dopada con erbio (ver Figura 15) se compone de una longitud de fibra de sílice cuyo núcleo está dopado con átomos ionizados (iones) con un elemento muy raro de la Tierra denominado erbio. Esta fibra es propulsada mediante una bomba de señal procedente de un láser, típicamente a una longitud de onda de 980nm o 1480nm. Con el fin de combinar la salida de la bomba de láser con la señal de entrada, la fibra dopada es precedida por un acoplador selectivo de longitud de onda.

En la salida, otro acoplador selectivo de longitud de onda se puede utilizar si es necesario para separar la señal amplificada de cualquier otra potencia de la bomba de la señal restante. Por lo general, se utiliza un aislador en la entrada y/o salida de cualquier amplificador para evitar reflexiones en el amplificador. Las reflexiones puede convertir el amplificador en un láser, por lo que es inservible como un amplificador.

Una combinación de varios factores han hecho que el EDFA sea el amplificador de elección en los actuales sistemas de comunicación ópticos de: (1) la disponibilidad de propulsores de láseres semiconductores compactos y fiables de alta potencia, (2) el hecho de que sea un dispositivo totalmente de fibra óptica, haciendo lo polarización independiente y fácil de acoplar con el haz de luz dentro y fuera de él, (3) la simplicidad del dispositivo, y (4) el hecho de que no introduce ninguna diafonía al amplificar las señales WDM. (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010)

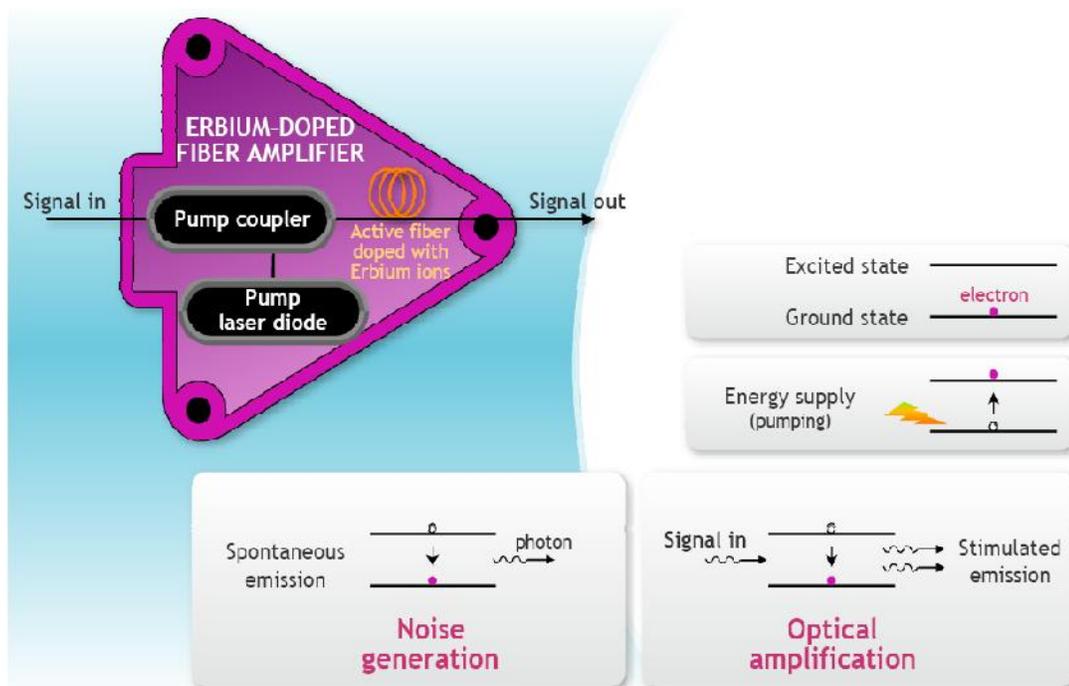


Figura 15: Ilustración de un amplificador de fibra dopada por erbio y su funcionamiento.

Fuente: (Alcatel-Lucent, 2007)

II.2 Tecnologías de multiplexación de señales en Fibra Óptica

II.2.1 WDM

La 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, *Fiber Channel*, *Gigabit Ethernet*, ATM/IP, etc.).

En la Figura 16 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.

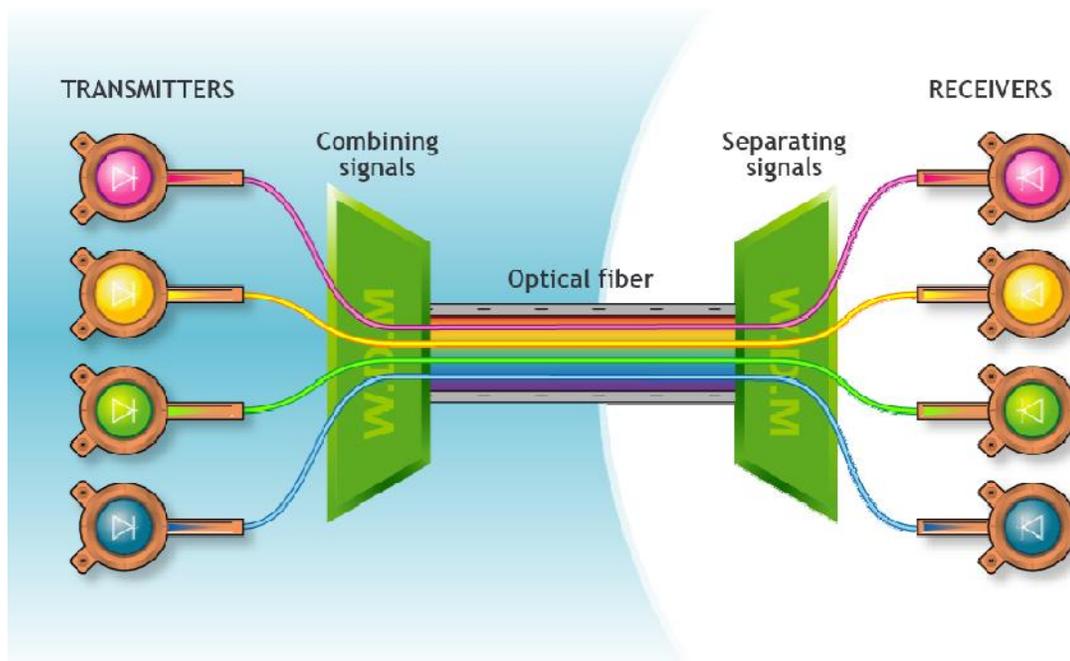


Figura 16: Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM

Fuente: (Alcatel-Lucent, 2007)

II.2.1.1 Ventajas técnicas más importantes de WDM

- **Transparencia:** WDM es una arquitectura de capa física, que puede manejar información TDM (por sus siglas en inglés, *Time División Multiplexing*, o Multiplexación por división de tiempo) y al mismo tiempo es compatible con formatos de datos como ATM (por sus siglas en inglés, *Asynchronous Transfer Mode*, o Modo de transferencia asíncrono), Gigabit Ethernet, ESCON, *Fiber Channel* en la misma capa física.
- **Escalabilidad:** WDM puede tener influencia en la fibra oscura que se encuentran en todas las áreas metropolitanas y con ello dar una respuesta rápida a una mayor demanda de capacidad punto a punto.
- **Provisión dinámica:** otorga una rápida, simple y dinámica provisión de conexiones de red, lo que ayuda al proveedor a obtener la capacidad de ofrecer altos servicios de banda ancha en días en lugar de meses.

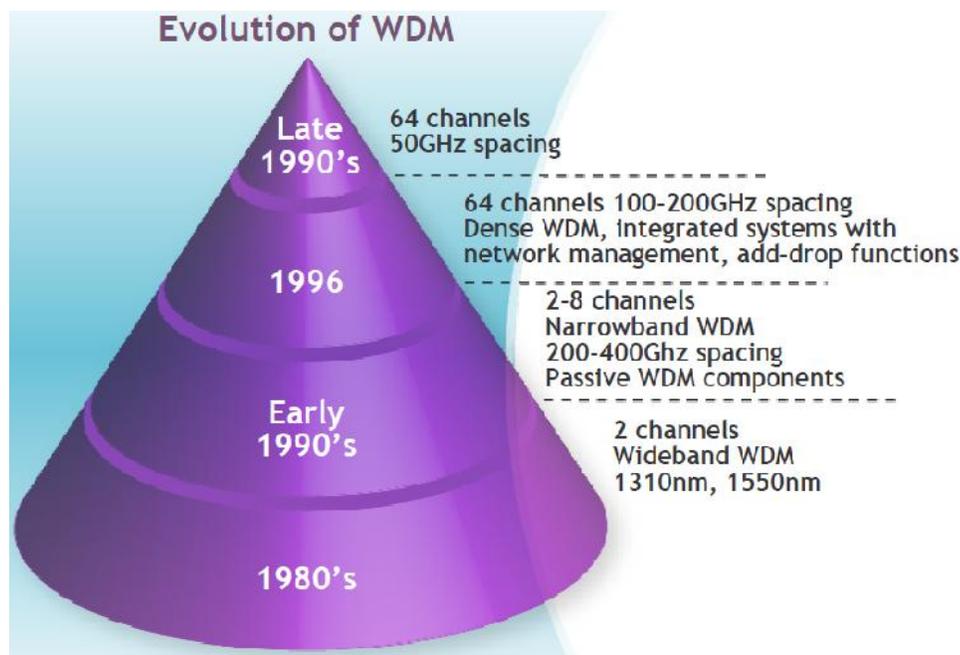


Figura 17: Evolución de WDM

Fuente: (Alcatel-Lucent, 2007)

En un principio el sistema WDM transportaba dos o cuatro longitudes de onda que eran ampliamente espaciadas. WDM y las tecnologías siguientes de CWDM (por sus siglas en inglés, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, o Multiplexación por división aproximada en longitud onda gruesa) y DWDM han evolucionado en referencia a la cantidad de longitudes de ondas que transportaban. WDM tradicional tiene un espacio de difusión para 2, 4, 8, 12 y 16 canales, ésta técnica usualmente tiene limitación de distancia, por debajo de 100km.

Cuando se descubre WDM se usó dos longitudes de onda ampliamente espaciadas un a ventana de espacio entre 1310nm y 1550nm (o 850nm and 1310nm) algunas veces llamado ancho de banda WDM. Más tarde se creó la segunda generación de WDM, algunas veces llamada banda estrecha WDM, en la que había de dos a ocho canales disponibles. Esos canales se encontraban espaciado en intervalos de 400GHz aproximadamente, en la ventana de 1550nm. Véase Figura 17 y Figura 18.

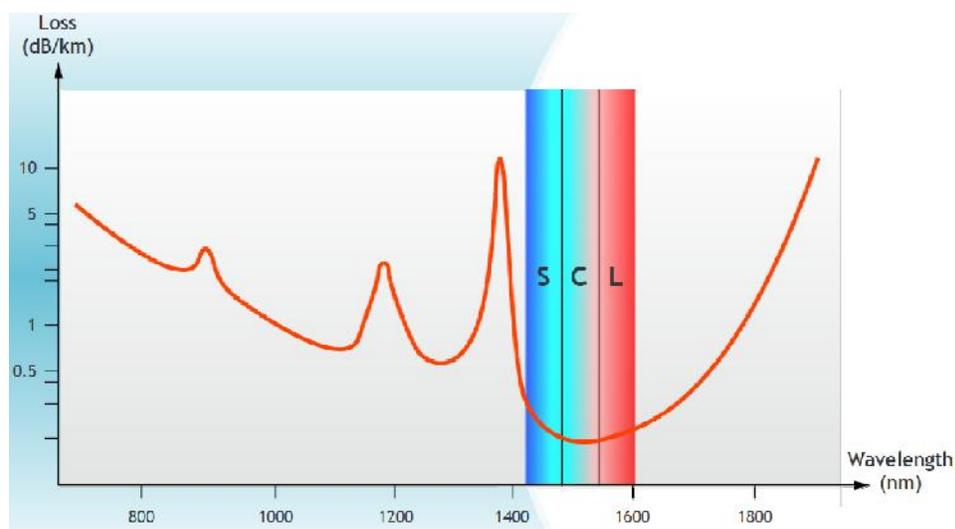


Figura 18: Espectro de Absorción de la Fibra Óptica

Fuente: (Alcatel-Lucent, 2007)

Basado en pérdidas ópticas de la fibra, el rango del espectro ha sido caracterizado con el propósito de crear la compatibilidad con las fuentes de luces, receptores y componentes ópticos, incluyendo la Fibra Óptica.

II.2.1.2 Ventanas de Transmisión para WDM

Para poder realizar el mejor uso del espectro y mayor aprovechamiento de la potencia de transmisión de cada uno de los transmisores en DWDM, se han determinado tres ventanas para la transmisión de información:

- Primera ventana: se encuentra situada en 850nm.
- Segunda ventana: se encuentra ubicada en 1300nm.
- Tercera ventana: se encuentra ubicada en 1550nm. (Alcatel-Lucent, 2007)

II.2.2 CWDM

La Multiplexación por división aproximada en longitud onda gruesa viene dada como la evolución de WDM. Las longitudes de onda utilizables por los sistemas

CWDM fueron estandarizadas por la ITU-T en el año 2002. La norma, denominada ITU-T G.694.2, se basa en una rejilla o separación de longitudes de onda de 20nm (o 2.500GHz) en el rango de 1.270 a 1.610nm pudiendo así transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo, lo que significó un mejor uso del ancho de banda y mayor envío de información en menor tiempo. (Tejedor, 2006)

II.2.3 DWDM

Multiplexación por división de onda densa 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 Gb/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 en una misma fibra, sistema

denominado UDWDM (por sus siglas en inglés, *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*, o Multiplexación por división de onda ultra densa), con una separación entre canales de 10 GHz.

II.2.3.1 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-3R.

II.2.3.2 Componentes característicos de un sistema DWDM

Básicamente los elementos que generalmente se encuentran en un sistema DWDM son: los OTMs (por sus siglas en inglés, *Optical Terminal Multiplexer*, o Terminal óptico multiplexor), los OLAs (por sus siglas en inglés, *Optical Line Amplifier*, o Amplificador óptico de línea) y los OADMs (por sus siglas en inglés, *Optical Add/Drop Multiplexer*, o Multiplexor óptico de adición/extracción) (Sangucho & Morocho, 2009) .Véase Figura 19

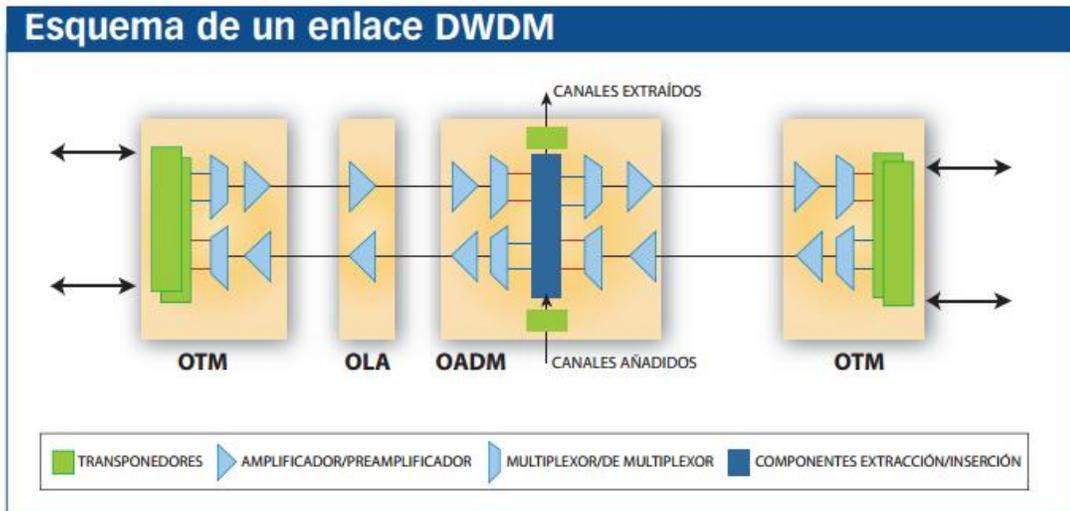


Figura 19: Esquema básico de un sistema DWDM

Fuente: (Millan, 2006)

II.2.3.3 Transponedores

Los transponedores actuales ya no emiten a una frecuencia fija a su salida, sino que pueden ser sintonizados para trabajar con cualquier longitud de onda. La implicación inmediata de esto es que los operadores pueden reducir drásticamente la cantidad de repuestos así como equipar su red para trabajar con nuevos canales más rápidamente. Por otro lado, esto permitirá en un futuro cercano dar lugar a redes ópticas inteligentes, con la misma capacidad de provisión dinámica del ancho de banda, encaminamiento, protección y restauración, que las actuales redes de datos.

Actualmente, los transponedores también son capaces de soportar la tecnología de solitón que, básicamente, son pulsos estables que viajan a través de la fibra sin variar su forma, lo cual permite que las no linealidades y la dispersión de la fibra se compensen entre sí, alcanzando mayores distancias.

II.3 Conmutación automática de las redes ópticas

Obteniendo una visión en conjunto, el plano de control de la red óptica con conmutación automática tiene por finalidad:

- Facilitar la configuración rápida y eficaz de las conexiones dentro de una red de capa de transporte, para el soporte de conexiones conmutadas y de conexiones permanentes programables.
- Reconfigurar o modificar conexiones que soportan llamadas ya establecidas.
- Realizar una función de restauración.

Una arquitectura de plano de control bien diseñada debe dar a los proveedores de servicio el control de sus redes, al mismo tiempo que proporciona una estructura de comunicaciones rápida y fiable. El plano de control en sí debe ser fiable, escalable, y eficaz. Debe ser lo suficientemente genérico para soportar tecnologías diferentes, satisfacer necesidades comerciales diferentes y a una distribución diferente de las funciones por los vendedores (es decir, un empaquetamiento diferente de los componentes del plano de control).

El plano de control ASON consta de diversos componentes que suministran funciones específicas, incluida la determinación de ruta y señalización. Los componentes del plano de control se describen en términos que no imponen restricciones a la forma en que estas funciones se combinan y se reúnen en lotes. Las interacciones entre estos componentes, y el flujo de información necesario para la comunicación entre ellos, se obtienen gracias a interfaces.

En la Figura 20 se presenta una visión de alto nivel de las interacciones de los planos de control, gestión y transporte para el soporte de conexiones conmutadas de una red de capa. Esta figura también incluye la red de comunicación de datos (RCD), que suministra los trayectos de comunicación para transportar información de señalización y gestión. (ITU, 2007)

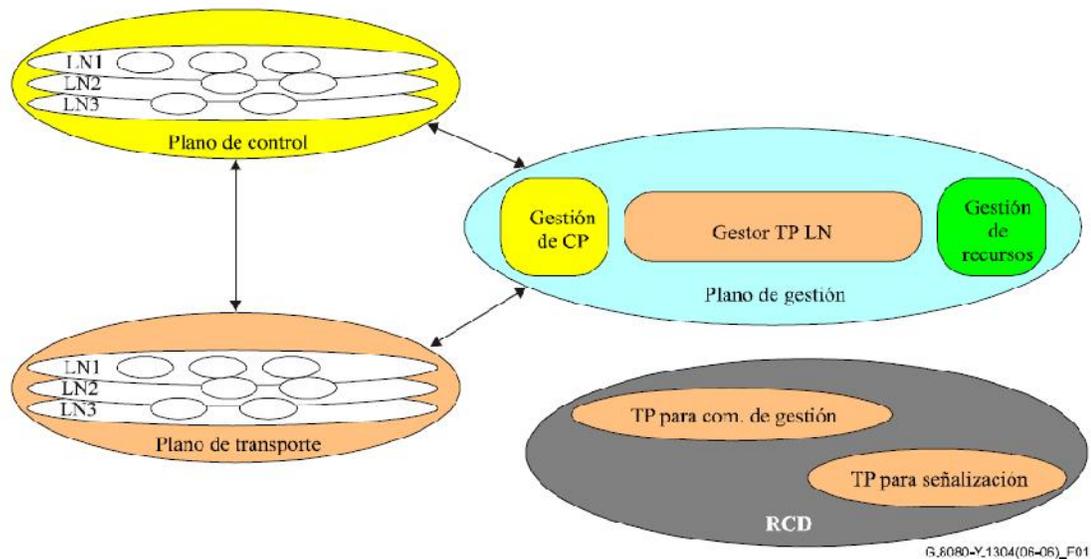


Figura 20: Relaciones entre los componentes arquitecturales

Fuente: (ITU, 2007)

II.3.1 Características de ASON

- Capacidad para introducir nuevos servicios ópticos, entre estos servicios se destacan dos: Servicio de Ancho de Banda bajo Demanda (BODS, *Bandwidth On Demand Service*) y Redes Privadas Virtuales Ópticas (OVPN, *Optical Virtual Private Network*)
- Capacidad de Enrutamiento Dinámico, auto detección de “vecinos”, auto detección de enlaces de conexión y auto detección de topología.
- Dado que la red ASON es capaz de enrutar y restaurar las conexiones automáticamente en una forma mucho más tolerante a fallas, el requerimiento

de mantener la consistencia de la base de datos de topología es satisfecho. (Díaz Yáñez & Jiménez Jiménez, 2010)

II.3.2 Interfaces del Plano de Control

ASON fue diseñada en su concepción inicial para soportar múltiples clientes y diferentes tecnologías. Esta diversidad crea los diferentes dominios de cada plano. La conexión intradominios e inter-dominios dentro de la capa de control, se realiza a través de las interfaces I-NNI (por sus siglas en inglés, *Internal Network to Network Interface*, o Red interna para la interfaz de red), E-NNI (por sus siglas en inglés, *External Network to Network Interface*, o Red externa a la interfaz de red), respectivamente, e I-NMI (por sus siglas en inglés, *Internal Network to Management Interface*, o Red interna para la interfaz de administración). (Díaz Yáñez & Jiménez Jiménez, 2010)

II.3.3 Enrutamiento y Señalización

La arquitectura de ASON trata separadamente las llamadas y su control de conexión. Esto permite la introducción de servicios mejorados, en donde una simple llamada puede estar compuesta de más de una aplicación. Esta característica brinda beneficios a las áreas de mantenimiento y restauración.

El control de la conexión a través de múltiples dominios requiere la cooperación entre los controladores de estos diferentes dominios. Una Federación se define como la comunidad de dominios que cooperan para una mejor gestión de sus conexiones.

Están definidos dos tipos de Federaciones: el modelo de federación conjunta, en donde un controlador de conexión tiene autoridad sobre otros controladores de dominios diferentes. El segundo modelo es un modelo totalmente cooperativo, en donde no existe la figura de un líder.

II.3.5 Evolución de IP/MPLS hacia ASON/MPLS

La tecnología MPLS (por sus siglas en inglés, *Multiprotocol Label Switching*, o Multiprotocolo mediante etiquetas) crece como la base para las nuevas redes de banda ancha ya que antes estaba basada principalmente en ATM, con velocidades que típicamente iban de los 155,52 Mbps hasta varios Gbps. ATM viene usándose desde que se hizo popular en 1988, y su renovación ya es un hecho.

MPLS ofrece grandes ventajas a la hora de definir y establecer VPNs. Además, MPLS ya tiene otras soluciones tecnológicas avanzadas, como son MPLS y GMPLS (por sus siglas en inglés, *Generalized Multi-Protocol Label Switching*, o o Multiprotocolo mediante etiquetas generalizado), orientadas al dominio óptico, que permiten a las

II.3.6 MPLS

El desarrollo de MPLS se llevó a cabo a mediados de los 90s para conseguir mayor eficiencia en redes ATM que transportan tráfico IP. La implementación de MPLS sobre una red IP tradicional introduce las siguientes ventajas:

- El encaminado se realiza de acuerdo a etiquetas de longitud corta y fija de nivel 2 en las capas OSI (por sus siglas en inglés, *Open System Interconnection*, o Modelos de interconexión de sistemas abiertos). Esto permite que el encaminado sea más eficiente que con las cabeceras tradicionales de nivel 3 y longitud variable.
- Ofrece la posibilidad de encaminado explícito, se crea un camino completo examinando un solo paquete. Los demás paquetes con el mismo destino no deberán ser examinados.
- Permite una administración de tráfico más flexible y eficiente por medio de la ingeniería de tráfico que permite equilibrar de forma óptima la utilización de los

recursos, de manera que no haya algunos que estén muy utilizados, con posibles cuellos de botella, mientras otros puedan estar subutilizados.

- Ofrece soporte de QoS, mediante el establecimiento de rutas explícitas.

Debido a que MPLS utiliza la técnica de separar el control del encaminamiento, es capaz de operar sobre diferentes protocolos de nivel de enlace. Esto significa que MPLS puede ser implementado como un *router* más *switches* integrados.

Después de la integración de MPLS en las redes no orientadas a conexión como IP, se trató de hacer las redes más homogéneas al subir un nivel más en los protocolos de control y diseñar uno que pueda englobar la otra gran jerarquía de red como es SDH3, surgió GMPLS y con él se puede dar soporte a redes de conmutación de longitudes de onda (WDM), de paquetes (IP) y de circuitos (SDH).

GMPLS soporta cinco interfaces: interfaz de conmutado de paquetes, interfaz de conmutado a nivel 2, interfaz de multiplexado por división de tiempo, interfaz de conmutado por longitud de onda e interfaz de conmutado de fibra. (Díaz Yáñez & Jiménez Jiménez, 2010)

II.4 Detección Coherente

La detección coherente en Fibra Óptica posee el mismo método aplicado en los receptores, cuando se transmiten microondas. Cuando es aplicado a la transmisión de longitudes de onda, un espectro de señales de fase moduladas en una longitud de onda, es recibido en un mezclador óptico. El oscilador local (una fuente de laser constante DC) sintonizado a una rejilla 50GHz es enviado al mezclador, a través de pulsaciones. Sólo la señal óptica en la frecuencia del oscilador local se amplifica (pulsaciones constructivas), mientras que todas las otras frecuencias que no sean coherentes con el oscilador local son atenuadas. La aplicación exitosa de esta

técnica requiere grandes capacidades de procesamiento en señales digitales que sólo se pueden lograr en ultra-alta velocidad, con un material como el silicio. Una solución eficaz coherente es proporcionada por la combinación de detección coherente, ultra-alta velocidad en el procesador de señales digitales (DSP *Digital Signal Processing*,) en el receptor coherente y un formato de fase de modulación, tal como modulación por cambio de fase en cuadratura (QPSK *Quaternary Phase-Shift Keying*) o modulación por cambio de fase binaria (BPSK *Binary Phase-Shift Keying*). Aunque la arquitectura del receptor coherente es más compleja que en las soluciones convencionales, la solución coherente ofrece dos ventajas fundamentales:

- La recuperación de la información transportada por completo en el campo óptico, dando acceso a toda la información de la señal, tales como polarización, amplitud y fase. Esto introduce enormes oportunidades en el DSP para compensar las distorsiones lineales, tales como dispersión cromática y dispersión por modo de polarización, que son inducidos por la transmisión dentro de la fibra óptica.

- El uso de las dos polarizaciones ortogonales de la señal óptica para la codificación de información múltiple. La multiplexación por división en polarización (PDM *Polarization Division Multiplexing*) duplica la capacidad de transportar y aumenta la eficiencia espectral mientras mantiene la compatibilidad, con separación entre canales de 50GHz en los filtros ópticos, como se soporta en el multiplexor óptico de adición/extracción reconfigurable (ROADM *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*).

Los formatos de modulación diferentes, dominio de fase y dominio de polarización, pueden combinarse y asociarse con detección coherente. Las siguientes modulaciones logran un mejor rendimiento en su clase y eficiencia:

II.4.1 PDM-BPSK (con detección coherente)

Lo mejor en su clase de 40 Gb/s de transmisión. La señal es una combinación de PDM y una sola portadora modulada en BPSK llevando un bit por símbolo y viajando a la velocidad de 20Gbaud por símbolo. Ofrece lo mejor en rendimiento de distancias ultra-largas debido a su excelente resistencia a los efectos no lineales y la compatibilidad con la actual transmisión de señales a 10 Gb/s sin retorno a cero (NRZ) ASK.

II.4.2 PDM-QPSK (con detección coherente)

Lo mejor en la clase de 100 Gb/s de transmisión. La señal es una combinación de PDM y una sola portadora modulada en QPSK llevando dos bits por símbolo y viajando a una velocidad de 25Gbaud por símbolo. Está optimizado para el transporte de grandes capacidad gracias a su mejor alcance, mejor resistencia a las deficiencias de fibra y excelente compatibilidad con los actuales 10 base Gb/s y 40 canales Gb/s. (Alcatel-Lucent, 2010) Véase Figura 21

Benchmarking 100G wavelength transport	PDM-QPSK (single carrier coherent) 50 GHz slot	FDM PDM-QPSK (coherent) 50 GHz slot	OPFDM RZ-DQPSK (non-coherent) 100 GHz slot	PDM-DQPSK (non-coherent) 50 GHz slot
Transmission reach	Best	Why? → Single carrier coherent fast baud rate minimizes non-linear effects		
Polarization mode and chromatic dispersion tolerance	Best	Why? → Coherent technology with advanced DSP compensates linear effects		
Compatibility with 10G and 40G neighbors	Best	Why? → Single carrier coherent fast baud rate minimizes cross-channel non-linear effects		
Filtering (ROADM cascading)	Best	Why? → Single carrier into one 50 GHz slot maximizes the number of traversing ROADMs before OEO		
Power consumption and footprint	Best	Why? → Single carrier coherent highly integrated design maximizes the integration of functions in CMOS		
Cost and complexity	Best	Why? → Single carrier coherent highly integrated design minimizes complexity and cost		

Figura 21: Comparación de diferentes modulaciones en transmisión coherente de 100G para las nuevas generaciones
Fuente: (Alcatel-Lucent, 2010)

II.5 Herramientas para el desarrollo del proyecto

II.5.1 Algoritmo de Dijkstra

Dado un grafo a cuyos arcos se han asociado una serie de pesos, se define el camino de coste mínimo de un vértice U a otro V, como el camino donde la suma de los pesos de los arcos que lo forman es la más baja entre las de todos los caminos posibles de U a V. El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo (donde N es el número de vértices) que sirve para encontrar el camino de coste mínimo desde un nodo origen a todos los demás nodos del grafo. Fue diseñado por el holandés Edsger Wybe Dijkstra en 1959. El fundamento sobre el que se asienta este algoritmo es el principio de optimalidad: si el camino más corto entre los vértices U y V pasa por el vértice W, entonces la parte del camino que va de W a V debe ser el camino más corto entre todos los caminos que van de W a V. De esta manera, se van construyendo sucesivamente los caminos de coste mínimo desde un vértice inicial hasta cada uno de los vértices del grafo, y se utilizan los caminos conseguidos como parte de los nuevos caminos. (Torrubia & Terrazas, 2006)

II.5.2 Lenguaje de programación Java

La empresa Sun Microsystems lanzó a mediados de los años 90 el lenguaje de programación Java que, aunque en un principio fue diseñado para generar aplicaciones que controlaran electrodomésticos como lavadoras, frigoríficos, entre otros, debido a su gran robustez e independencia de la plataforma donde se ejecutase el código, desde sus comienzos se utilizó para la creación de componentes interactivos integrados en páginas Web y programación de las aplicaciones independientes. Estos componentes se denominaron applets y casi todo el trabajo de los programadores se dedicó al desarrollo de éstos. Con los años, Java ha progresado enormemente en varios ámbitos como servicios HTTP (por sus siglas en inglés, *Hypertext Transfer Protocol*, o protocolo de transferencia de hipertexto), servidores de aplicaciones, acceso a base de datos (JDBC). Como vemos Java se ha ido

adaptando a las necesidades tanto a unos como a otros. Debido a la explosión tecnológica de estos últimos años Java ha desarrollado soluciones personalizada para cada ámbito tecnológico.(Díaz, 2003)

II.5.3 MATLAB

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con números escalares –tanto reales como complejos–, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones. MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio.

MATLAB es un gran programa de cálculo técnico y científico. El lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo. (García de Jalón, Rodríguez, & Vidal, 2005)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

La siguiente sección tiene como propósito señalar al lector claramente las herramientas y los procesos utilizados para realizar la investigación de forma secuencial con el fin de cumplir con los objetivos planteados en el capítulo I, y adicionalmente se ofrece una descripción detallada de cómo se llevó a cabo el proyecto.

III.1 Tipo de Investigación

Este diseño corresponde a un proyecto de investigación de tipo factible, ya que según la UPEL (Universidad Pedagógica Experimental Libertador, 2006) “El Proyecto Factible consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos. El Proyecto debe tener apoyo en una investigación de tipo documental, de campo o un diseño que incluya ambas modalidades.”, por lo tanto refleja la situación de dicho trabajo de grado, que busca solventar la baja capacidad transmisión de datos para un grupo de empresas pero sobretodo a la población de una región de Venezuela.

III.2 Fases Metodológicas

III.2.1 Etapa de Investigación

Se realizó una investigación teórica y conceptual de todo lo relacionado con los sistemas de transmisiones ópticas, funcionamiento, composición, equipo e implementación, además de las tecnologías DWDM y ASON.

Se familiarizó con las técnicas de diseños en fibra óptica, además de la revisión y estudio de las recomendaciones de la ITU.

III.2.2 Análisis y determinación de la fibra instalada y sus equipos.

Como primer objetivo en esta fase, se recogió información de la fibra instalada en la región Centro Occidente de Venezuela, con el fin de determinar las distancias entre nodos y la tipología de la misma, para poder llevar a cabo toda la implementación en el diseño.

Mediante MapSouce se determinaron las distancias existentes entre cada uno de los nodos, para poder obtener los cálculos de factores que afecten la red y poder designar los equipos mas convenientes para disminuir los efectos de los mismos.

Mediante una matriz de tráfico se determinaron las longitudes de ondas requeridas en la red tomando en cuenta las necesidades del cliente. Con la ayuda del algoritmo de Dijkstra basado en un lenguaje de programación llamado JAVA, se realizó la búsqueda del mejor camino, el cual vendría determinado por el recorrido menor distancia existente entre dos ciudades.

Por último, se buscaron los equipos ideales para cumplir con las exigencias técnicas de la red, calculando y detallando los fenómenos ópticos que afectan a la misma.

III.2.3 Simulación de fallas

Se realizaron pruebas iterativamente simulando hasta tres cortes de fibra para observar la capacidad de la red en encontrar otro trayecto en caso de que alguno de los enlaces que componen la ruta principal sufriera alguna falla. Dicha simulación se realizó por medio de un programa creado en el lenguaje de programación JAVA.

III.2.4 Definición final del diseño

En esta última etapa, se definieron todos los equipos que formaron parte de la red, tomando en cuenta cada uno de los factores que podrían afectar la señal, para ello, se realizaron los cálculos del presupuesto de potencia mediante operaciones realizadas con la ayuda del software llamado MATLAB, además de otras simulaciones y parámetros otorgados por el operador de telecomunicaciones. Por último, se definió la arquitectura de la red, especificando cada uno de los elementos que la deben conformar.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO

De manera cónsona con el marco metodológico, se planteó el desarrollo en cuatro macro fases. En este capítulo, se describen las etapas del trabajo realizado, así como también se explica de forma detallada cada una de las fases que se llevaron a cabo para realizar el proyecto. Se comienza con el estudio de la fibra óptica ya instalada, sus nodos y distancias en las regiones asignadas, continuando con la evaluación del tráfico posible en la red. Posteriormente, se detallan como se lograron los cálculos para determinar la factibilidad técnica de la red, y por último, se explica el proceso de simulación de fallas de los enlaces.

IV.1 Estudio de la fibra óptica.

IV.1.1 Cableado y anillo nacional de fibra existente en Venezuela

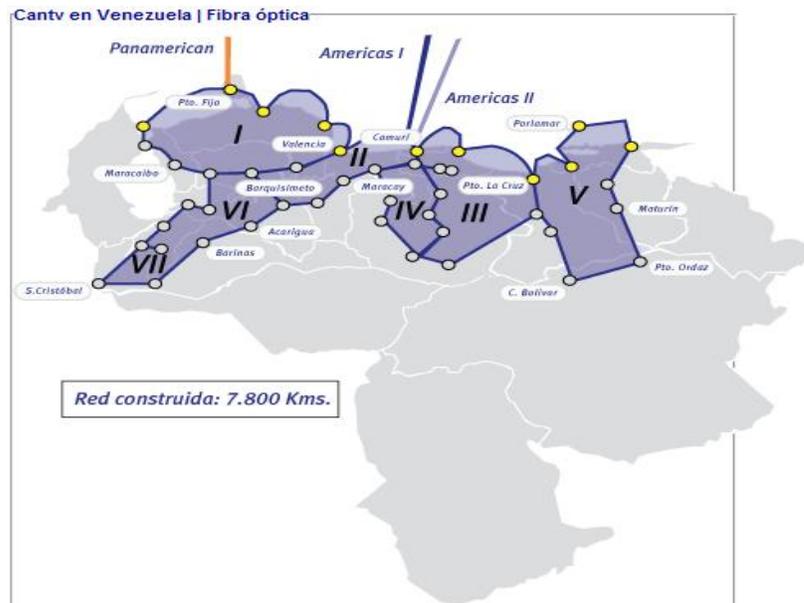


Figura 22: CANTV en Venezuela y la fibra óptica

Fuente: (CANTV, 2012)

En la Figura 22 se puede observar la fibra que se encuentra instalada en todo el territorio nacional propiedad de la Compañía Anónima Nacional Teléfonos de Venezuela (CANTV).

IV.1.2 Asignación de nodos a utilizar en el proyecto

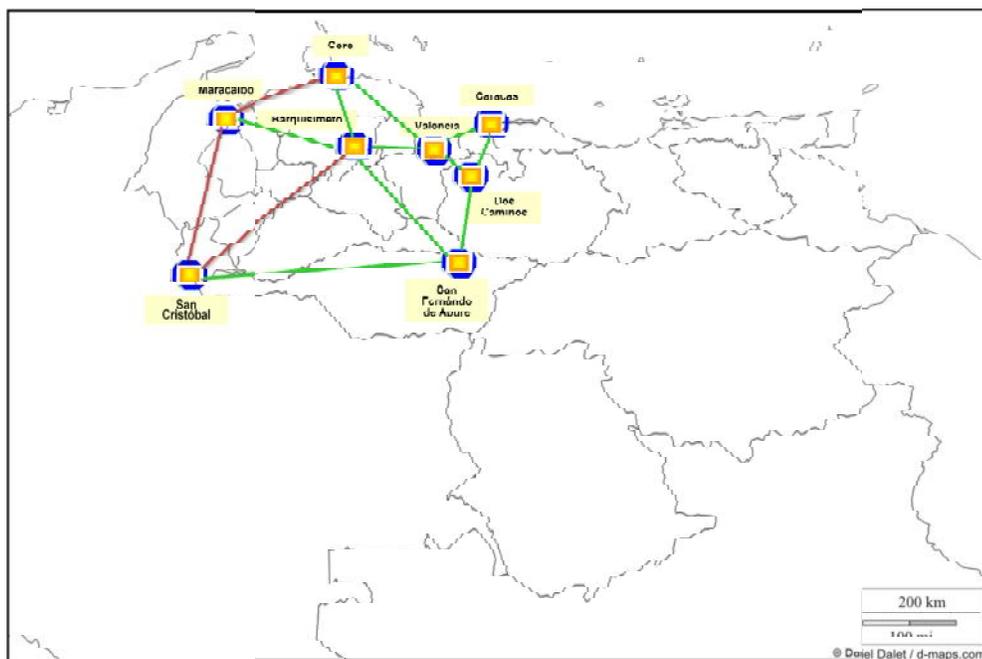


Figura 23: Nodos escogidos por el cliente para el proyecto

Fuente: Elaboración propia

La región Centro Occidente de Venezuela posee una red de Fibra Óptica compuesta por ocho nodos como se puede observar en la Figura 23. Si se observa detalladamente los enlaces están compuestos por dos tipos de fibra, identificados con dos colores en la figura. La fibra señalada en color rojo es la G652 y las líneas que se encuentra en color verdes es la fibra G655.

Tabla 4: Atributos de la fibra G.652.D I

Fuente: (ITU, 2009)

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm ² km)	$D_{\text{min}}(\lambda): 1460\text{-}1550 \text{ nm}$	$\frac{7.00}{90} (\lambda - 1460) - 4.20$
	$D_{\text{max}}(\lambda): 1550\text{-}1625 \text{ nm}$	$\frac{2.97}{75} (\lambda - 1550) + 2.80$
	$D_{\text{min}}(\lambda): 1460\text{-}1550 \text{ nm}$	$\frac{2.91}{90} (\lambda - 1460) + 3.29$
	$D_{\text{max}}(\lambda): 1550\text{-}1625 \text{ nm}$	$\frac{5.06}{75} (\lambda - 1550) + 6.20$
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Attenuation coefficient (Note 2)	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
	Maximum at 1625 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient (Note 3)	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

NOTE 1 – According to clause 6.2, a maximum PMD_Q value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD_Q.

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

NOTE 3 – Larger PMD_Q values (e.g., $\leq 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) can be agreed for particular applications between the manufacturer and user.

Tabla 5: Atributos de la fibra G.652.D II

Fuente: (ITU, 2009)

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125.0 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\text{min}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1324 nm
	$S_{0\text{max}}$	0.092 ps/nm ² × km

IV.1.3 Medición de la fibra usando la herramienta MapSource

Como se muestra en la Figura 24, se realizó la medición de la distancia entre cada uno de los nodos, mediante MapSource, ya que por su facilidad de uso, únicamente se debía conocer la localización geográfica de cada uno de ellos y la aplicación otorgaba el camino existente para interconectar las ciudades en cuestión.



Figura 24: Representación de los nodos y la fibra de la región Occidental de Venezuela utilizando la herramienta MapSource

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Coordenadas geográficas de los nodos

Fuente: Elaboración propia

Nodo	Coordenadas geográficas
Caracas	N10 30.382 W66 54.857
Valencia	N10 10.977 W68 00.199
Dos Caminos	N9 34.402 W67 18.539
San Fernando	N7 53.538 W67 28.558
Barquisimeto	N10 03.809 W69 18.971
Coro	N11 24.435 W69 40.682
Maracaibo	N10 38.498 W71 36.451
San Cristobal	N7 46.081 W72 13.942

IV.2 Análisis de los requerimientos de la red

Para el diseño óptimo de una red de fibra óptica DWDM-ASON es indispensable conocer cual es la necesidad de tráfico existentes entre cada una de sus interfaces, ya que de éstas dependerá la cantidad de lambdas y de Muxponders que se utilizarán.

A continuación se presentará la tabla de requerimientos de tráfico entre cada una de las ciudades según los requerimientos del operador.

Tabla 7: Requerimiento de tráfico entre cada una de las ciudades

Fuente: Elaboración propia

Ciudad/Nodo (# de Lambdas de 10 G)	Maracaibo (M)	San Cristobal (SC)	Coro (C)	Barquisimeto (B)	Valencia (V)	Caracas (CC)	Dos Caminos (LD)	San Fernando de Apure (SF)
Maracaibo (M)	6	6	6	8	8	12	6	4
San Cristobal (SC)	6	6	6	6	10	14	6	4
Coro (C)	6	6	6	10	12	16	6	4
Barquisimeto (B)	8	6	6	6	12	16	6	4
Valencia (V)	8	10	12	12	6	16	6	4
Caracas (CC)	12	14	16	16	16	6	6	4
Dos Caminos (LD)	6	6	6	6	6	6	6	4
SF de Apure (SF)	4	4	4	4	4	4	4	4

Principalmente se observó que las necesidades de tráfico entre algunas interfaces no eran las mismas, lo cual significaba realizar diferentes cálculos dependiendo de cual ruta se estaba estudiando.

Se realizó una planificación de la red para la necesidad de cada una de las interfaces, sabiendo que existen muxponders capaces de comprimir la información contenida en varias lambdas y enviarla a través de una sola, sin olvidar que éstos están diseñados para un número determinado de Gigabit, ya sea 10Gb, 40Gb o 100Gb. Se tomó como prioridad el mayor aprovechamiento de la red, así como también se dejaron longitudes de onda libres en alguna de las interfaces en caso de que la red creciera en los próximos años.

Tomando en cuanto lo mencionado anteriormente, se llegó a la siguiente conclusión:

- Interfaces que requerían 40Gb de transmisión: Se utilizó un Muxponder con la capacidad de comprimir la información contenida en cuatro lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante una lambda de 40Gb. Lo que significa que la necesidad de tráfico esta abarcada completamente.
- Interfaces que requerían 60Gb de transmisión: Se utilizaron dos Muxponder con la capacidad de comprimir la información contenida en cuatro lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante dos lambdas de 40Gb cada una, lo cual significa un ancho de banda de 80Gb de los cuales se usarán 60Gb, dejando los otros 20Gb para casos en los cuales la red aumente su necesidad de tráfico, logrando así una escalabilidad y un mayor aprovechamiento del ancho de banda de la misma. No se utilizó el Muxponder que permite obtener una lambda de 100Gb a partir de diez lambdas de 10Gb, ya que para estos tipos de redes siempre se busca dejar un máximo de holgura de un veinte por ciento, para casos en que la red aumente sus necesidades de tráfico.
- Interfaces que requerían 80Gb de transmisión: Se utilizó un Muxponder con la capacidad de comprimir la información contenida en diez lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante una lambda de 100Gb, dejando los otros 20Gb para casos en los cuales la red aumente su necesidad de tráfico, logrando así una escalabilidad y un mayor aprovechamiento del ancho de banda de la misma.
- Interfaces que requerían 100Gb de transmisión: Se utilizó un Muxponder con la capacidad de comprimir la información contenida en diez lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante una lambda de 100Gb. Lo que significa que la necesidad de tráfico esta abarcada completamente.
- Interfaces que requerían 120Gb de transmisión: Se utilizaron dos Muxponder, uno con la capacidad de comprimir la información contenida en cuatro lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante un lambda de 40Gb, y otro

con la capacidad de comprimir la información contenida en diez lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante un lambda de 100Gb, lo cual significa un ancho de banda de 140Gb de los cuales se usarán 120 Gb, dejando los otros 20 Gb para casos en los cuales la red aumente su necesidad de tráfico, logrando así una escalabilidad y un mayor aprovechamiento del ancho de banda de la misma.

- Interfaces que requerían 140Gb de transmisión: Se utilizaron dos Muxponder, uno con la capacidad de comprimir la información contenida en cuatro lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante un lambda de 40Gb, y otro con la capacidad de comprimir la información contenida en diez lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante un lambda de 100Gb, lo que significa que la necesidad de tráfico esta abarcada completamente. No se utilizaron dos Muxponder que permite obtener 2 lambdas de 100Gb a partir de veinte lambdas de 10Gb, ya que para estos tipos de redes siempre se busca dejar un máximo de holgura de un veinte porciento, para casos en que la red aumente sus necesidades de tráfico.
- Interfaces que requerían 160Gb de transmisión: Se utilizaron dos Muxponder con la capacidad de comprimir la información contenida en diez lambdas de 10Gb cada una y enviarla mediante dos lambda de 100Gb cada una, lo cual significa un ancho de banda de 200Gb de los cuales de usarán 160 Gb, dejando los otros 40 Gb, que corresponden al veinte porciento de holgura en la interfaz, para casos en los cuales la red aumente su necesidad de tráfico, logrando así una escalabilidad y un mayor aprovechamiento del ancho de banda de la misma.

Para realizar la matriz de tráfico se tomó en cuenta que la red debía resistir a tres fallas o cortes en las interfaces que la componen, es por ello que se decidió reservar el número de lambdas correspondientes a la necesidad de tráfico, a la hora de estudiar el camino que debía recorrer la información, para ir de un nodo a otro. De esta forma se aseguró que la ruta que se podía tomar para comunicar dos nodos no

estaba limitada a ninguna interface o camino, más bien todas las rutas pertenecientes a la red eran viables para comunicar dos nodos, siempre y cuando éstas interfaces se encontraran operantes.

IV.3 Cálculo del presupuesto de potencia (*Optical Power Budget*)

Un paso fundamental en la fase de diseño de una red de fibra óptica es el cálculo de presupuesto de potencia, ya que con dichos cálculos se conoce la distancia por la cual un mismo haz de luz puede transmitir información sin perder fidelidad hasta el otro extremo. Según el *Network Dictionary* el *optical power budget* “se refiere a la distribución de la potencia óptica disponible transmitida en una fibra dada por una fuente dada entre las diversas pérdidas producidas por mecanismos tales como atenuación de la fibra, pérdidas por acoplamiento empalme y conectores, con el fin de asegurar una señal adecuadamente fuerte en el receptor” (Jielin, 2007). El principio de los cálculos es simple, se debe distribuir la potencia disponible que proviene de la fuente sin sobrepasar las pérdidas que se obtienen a lo largo del enlace. La potencia total viene dada por la sensibilidad del receptor y la potencia de transmisión.

La potencia de transmisión y recepción vienen expresadas en dBm, mientras que las pérdidas se expresan en dB, esto facilitará los cálculos del link budget. En cualquier diseño práctico, se deben tomar en cuenta ciertas indemnizaciones por pérdidas externas debido a degradación de los componentes, por envejecimiento o reemplazamiento, variación de temperaturas ambientales, por manufactura, etc., las cuales combinadas se refieren a margen de potencia (P_m), expresadas en dB. Ahora bien, la ecuación del presupuesto de potencia se puede expresar de la siguiente manera: (Rao, 2000)

$$P = P_o - P_m - (L_c + n \cdot L_e + d \cdot L_f)$$

Ecuación 14

- P Sensitividad del receptor
 P_oPotencia de transmisión
 P_m Margen de potencia
 L_c Pérdida por conectores
 n número de empalmes
 L_e Pérdida por empalmes
 d Distancia del enlace
 L_f Atenuación de la fibra

Para poder resolver la Ecuación 14, se necesitan los parámetros previamente estipulados, a continuación se anexa una tabla en donde se encuentran todos los datos requeridos previamente definidos por el operador de telecomunicaciones, el equipo encargado de la transmisión y recepción es el ALU 1830 PSS (ver APÉNDICE C):

Tabla 8: Resumen de especificaciones técnicas otorgadas por el operador para el cálculo de presupuesto de potencia

Fuente: Elaboración propia

Potencia en transmisión (dBm)	-1
Potencia en recepción (Sensitivity dBm)	-21
Atenuación Fibra (dB)	0,25
Distancia Trayecto (Km)	Variado
Atenuación por empalme (dB)	0,1
Número de Empalmes	1 cada 2km
Perdida por conector (dB)	1
Margen del equipo (dB)	3
Margen de la fibra (dB)	3
Ganancia del amplificador (dB)	23

Con la Ecuación 14 y los datos obtenidos en la tabla anterior, podemos determinar el Power Budget de la siguiente manera:

$$P = F_o - P$$

Ecuación 15

$$P = -1 - (-21)$$

$$P = 20 \text{ dB}$$

Por lo tanto ningún enlace puede sobrepasar el límite de 20dB en atenuación, ya que de lo contrario se requeriría amplificación. Debido a la gran cantidad de nodos que se tienen en el diseño (ver Figura 23), se debían realizar cálculos de presupuesto de potencia para cada uno de los enlaces entre cada nodo, teniendo un total de 13 enlaces. Asimismo, se debían calcular otros efectos como la dispersión cromática y la dispersión por polarización. Por lo tedioso y lento del proceso, se buscó conseguir una manera más rápida y eficiente de realizar todos los cálculos, llegando a la conclusión que el software MATLAB sería la herramienta ideal para solucionar el problema (ver APÉNDICE B).

IV.3.1 Cálculo del presupuesto de potencia mediante la herramienta MATLAB

Mediante un código de programación de elaboración propia, hecho en MATLAB, se realizaron los cálculos de atenuación de cada uno de los trece enlaces que componen la red DWDM-ASON en la región Centro Occidental de Venezuela. El programa realizado solicita al usuario los diferentes parámetros necesarios para el cálculo del presupuesto de potencia, además del tipo de fibra y ancho del laser, estos últimos valores solicitados para el cálculo de las dispersiones DC y la PMD que explicaremos en el próximo apartado (ver IV.3.2 Estudio de los parámetros de dispersión). A continuación se muestra en la Figura 25, la ventana principal en donde se solicitan los datos al usuario, se utilizó como ejemplo el enlace Caracas-Valencia con una distancia de 156 Km, el resto de los datos son los que se muestran en la **Error! Reference source not found.:**

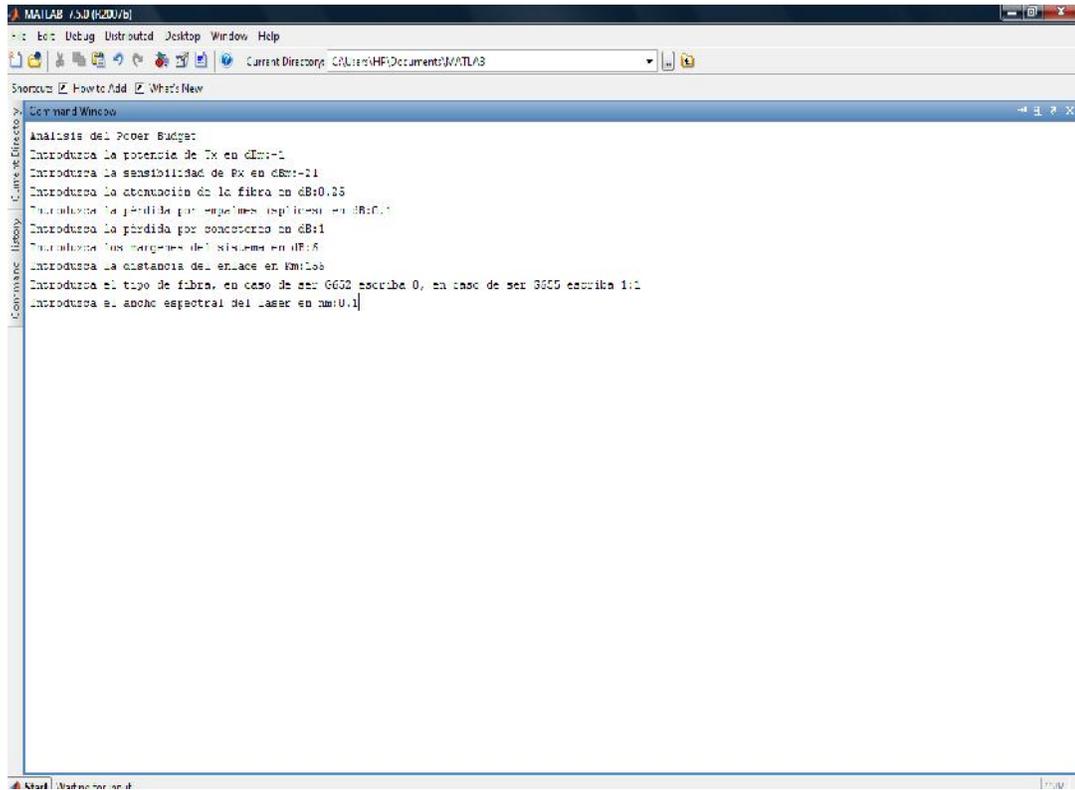


Figura 25: Ventana de introducción de parámetros para el cálculo del *power budget*

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar abajo en la Figura 26, están encerrados en un cuadro de color rojo, los resultados arrojados luego de la introducción de los datos en el programa. Los valores que no están en el mencionado rectángulo, son los correspondientes a las dispersiones DC y PMD.

En la primera línea se puede ver la atenuación total del enlace Caracas-Valencia con un valor de 54,8dB, mientras que en la segunda línea observamos el valor de 20dB que corresponde al *power budget* coincidiendo así con el resultado obtenido en la Ecuación 15. Ya que las pérdidas totales sobrepasan el límite establecido de 20dB, será necesario colocar amplificadores de línea en el trayecto para compensar la pérdida de potencia. La cantidad de amplificadores necesarios y su

ubicación en el enlace pueden ser observados en la línea cuatro y cinco, respectivamente, dentro del recuadro en la Figura 26, que en este caso son tres amplificadores, uno cada 52 km. Por último, en la línea tres, se obtiene el valor correspondiente a la atenuación total por tramo luego de colocar dichos amplificadores, el cual es 19,7dB, siendo este parámetro aceptable, ya que es menor que el presupuesto de potencia (20dB) y menor que la ganancia del amplificador (23dB).

```

MATLAB 7.5.0 (R2007a)
File Edit Debug Distributed Desktop Window Help
C:\Users\HPID\Documents\MATLAB
Shotcuts How to Add What's New
Command Window
Analisis del Power Budget
Introduzca la potencia de Tx en dBm: 1
Introduzca la sensibilidad de Rx en dBm: -21
Introduzca la atenuación de la fibra en dB/C: 25
Introduzca la pérdida por empalmes (aplicar) en dB: 1
Introduzca la pérdida por conectores en dB: 1
Introduzca los mensajes del sistema en dB: 5
Introduzca la distancia del enlace en km: 100
Introduzca el tipo de fibra, en caso de ser BSS escriba 0, en caso de ser G652 escriba 1: 1
Introduzca el ancho espectral del laser en nm: 1
Atenuación total del sistema óptico = 54.800000dB
Presupuesto de potencia total del sistema óptico = 20.000000dB
Atenuación total luego de colocar los tramos y colocar amplificadores en el sistema óptico = 19.700000dB
Su enlace requiere 3.000000 amplificadores
Los amplificadores están por colocarse cada 52.000000km
Su enlace posee 12.400000ps de dispersión cromática
Su enlace posee 0.624500ps de dispersión polarizada
Su enlace posee 83.024500ps de dispersión
>>
    
```

Figura 26: Cálculos en MATLAB del *power budget* para el enlace Caracas-Valencia

Fuente: Elaboración propia

Los amplificadores en línea se encargan de amplificar la señal compuesta DWDM para transportar por una distancia más larga, estos son bidireccionales. Todos los amplificadores usados en el proyecto están basados en tecnología EDFA, garantizan una potencia de salida de hasta 20,5 dBm en la banda C y una ganancia de

hasta 23 dB. Entre sus beneficios, se incluyen un Canal de Supervisión Óptica (OSC *Optical Supervisory Channel*), soporte a 88 canales y Reducción Automática de Potencia (APR *Automatic Power Reduction*). El equipo a usar es el modelo AM2325B de ALU. (Alcatel-Lucent, 2011)

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. (Sangucho & Morocho, 2009)

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 trece 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 20 dB.

IV.3.2 Estudio de los parámetros de dispersión

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 el límite de la distancia de dispersión cromática en Km, está dado por la Ecuación 8.

Este tipo de dispersión confina a los diseñadores de redes ópticas a usar compensadores de dispersión cromática que agregan ruido y atenuación extra a la señal, además de delimitar las distancias recorridas por un mismo impulso óptico sin tener que regenerarse en el plano eléctrico. Gracias a las nuevas tecnologías de detección coherente y modulación PDM-QPSK ya citadas (ver sección II.4 Detección Coherente), se pueden llegar a distancias de hasta 9000km sin necesidad de regenerar eléctricamente. En el próximo título se explicará de manera más detallada los beneficios de las mencionadas tecnologías.

IV.3.2.1 Superación de deficiencias en relación a la dispersión en la fibra para un mejor rendimiento mediante nuevas técnicas de detección y modulación

En las actuales redes DWDM, la dispersión cromática se compensa con módulos ópticos de compensación de dispersión fijos o ajustables (DCM o TDCM). Los compensadores DCM generalmente se distribuyen a lo largo de la línea óptica en cada sitio de amplificación, y crean un impacto desfavorable en el alcance de transmisión mediante la adición de efectos no lineales y ruido óptico debido a la necesidad de amplificación adicional para compensar las pérdidas que introducen. La electro-óptica con tecnología coherente permite una compensación de dispersión basada en electrónica en el extremo del receptor, se elimina la necesidad de dispositivos de gestión de la dispersión de la línea y mejora el alcance total de la transmisión.

La tecnología convencional de 40Gb/s también requiere TDCM ópticos en el lado del receptor para sintonizar con precisión la dispersión residual porque en las líneas técnicas de gestión de dispersión sólo puede proporcionar una cantidad limitada de compensación, la cual es generalmente insuficiente para cubrir todas las aplicaciones de red. Además, el tiempo de sintonización de TDCM es típicamente del orden de minutos, y esto afecta gravemente la reconfiguración rápida de la longitud de onda cuando la restauración de la red fotónica se implementa. Por el contrario, las redes electro-ópticas de alto rendimiento con tecnología coherente utiliza compensación electrónica rápida por medio de avanzados algoritmos DSP y ofrece compensación de dispersión en un marco de tiempo de milisegundos, ofreciendo una flexibilidad mucho mayor en las reconfiguraciones de la red y capacidades de restauración mucho más rápidas en las longitudes de onda.

En las antiguas infraestructuras de fibra, el PMD es un factor muy importante para degradaciones de la propagación de la señal, ya que introduce penalidades de distorsión que impiden un desempeño de calidad en las transmisiones de 40 Gb/s o 100 Gb/s. Las técnicas avanzadas de DSP utilizadas en la solución coherente pueden

compensar mejor los efectos de PMD y habilitar sin problemas la transmisión a través de cualquier red de fibra a 40 Gb/s y 100 Gb/s.

Una cuestión importante al abordar las actualizaciones de la red fotónica es la compatibilidad con los canales existentes de transmisión a tasas más bajas - por ejemplo, las convencionales de 10 Gb/s y 40 Gb/s canales con diferentes formatos de modulación - junto con la capacidad de adaptarse a las actuales instalaciones de fibra óptica.

La próxima generación de redes electro-ópticas de alto rendimiento con tecnología de detección coherente permite actualizar sin problemas a altas tasas de bits los canales de las redes existentes que fueron diseñados originalmente para 2,5 Gb/s, o capacidad de 10 Gb/s, con los siguientes beneficios:

- Compensación electrónica automática, que tolera grandes valores de dispersión cromática permitiendo tramos sin fisuras por DCM.
- La compensación de dispersión es altamente tolerante permitiendo el despliegue canales de 40 Gb/s y 100 Gb/s, incluso en instalaciones de fibra de generaciones antiguas que fueron diseñadas originalmente sin DCM de 2,5 Gb/s de transporte.
- Excelente compensación PMD permitiendo la actualización a 40 Gb/s y 100 Gb/s de las antiguas redes de fibra con altos valores de PMD, en la que incluso la transmisión de 10 Gb/s canales sería un reto.

Se ha demostrado que una señal a 40 Gb/s basado en QPSK (transmitida a 10 GBaudios de tasa por símbolo) pueden sufrir interferencias no lineales inducidas por canales vecinos a 10Gb/s, especialmente cuando la transmisión se produce a través fibra de baja dispersión como la UIT -T G.655. Tal efecto de modulación transversal de fase (XPM) se produce porque las variaciones de amplitud a 10GBaudios en canales tradicionales a 10 Gb/s con modulación ASK generan ruido de fase en la transmisión a 40 Gb/s (siendo a una velocidad prácticamente equivalente) y hace que

sea más difícil de detectar en el receptor los cuatro estados de fase a 40 Gb/s. Esta interferencia puede reducir dramáticamente el alcance máximo de los canales a 40 Gb/s cuando son espectralmente junto a los canales de 10 Gb/s.

Una mitigación posible es introducir bandas de guarda - es decir, múltiples ranuras vacías entre-espectrales convencionales 40 Gb / s canales y 10 canales Gb / s, sin embargo, esto tiende a reducir severamente la capacidad máxima de la fibra y limitar la libertad en la asignación de canales en caso de las reconfiguraciones de la red.

La selección del formato de modulación óptima con la mayor tolerancia a los efectos no lineales, y combinándolo con la detección coherente, permite ofrecer la mejor opción en su clase para un alcance máximo de transmisión y mayor compatibilidad con los canales vecinos a 10Gb/s. (Alcatel-Lucent, 2010)

IV.3.3 Cálculos de dispersión mediante la herramienta MATLAB

Consecuentemente a lo explicado en la sección anterior, tanto la dispersión cromática como la dispersión por modo de polarización no afectarán los enlaces de la red diseñada, ya que con las nuevas técnicas, los resultados de los cálculos son prácticamente insignificantes. Sin embargo, se realizaron de igual manera los cómputos en la simulación mediante el uso de MATLAB para comprobar dicha hipótesis.

En la Figura 27, corresponde al mismo ejemplo simulado en la del enlace Caracas-Valencia, pero en este caso se encerró en el recuadro los resultados obtenidos para las dispersiones. En la primera línea se puede visualizar los 62,4ps de dispersión cromática, mientras que en la segunda línea se extrajo el valor de 0,6245ps de dispersión polarizada. Finalmente, la última línea muestra la dispersión total que sería la suma de las dispersiones anteriormente comentadas, en este ejemplo es 63,0245ps, demostrando así que estos efectos no afectarían este enlace.

En el Capítulo V, se elaboró una tabla resumen en donde se podrán observar todos los valores de los trece enlaces, extraídos de las simulaciones hechas en MATLAB.

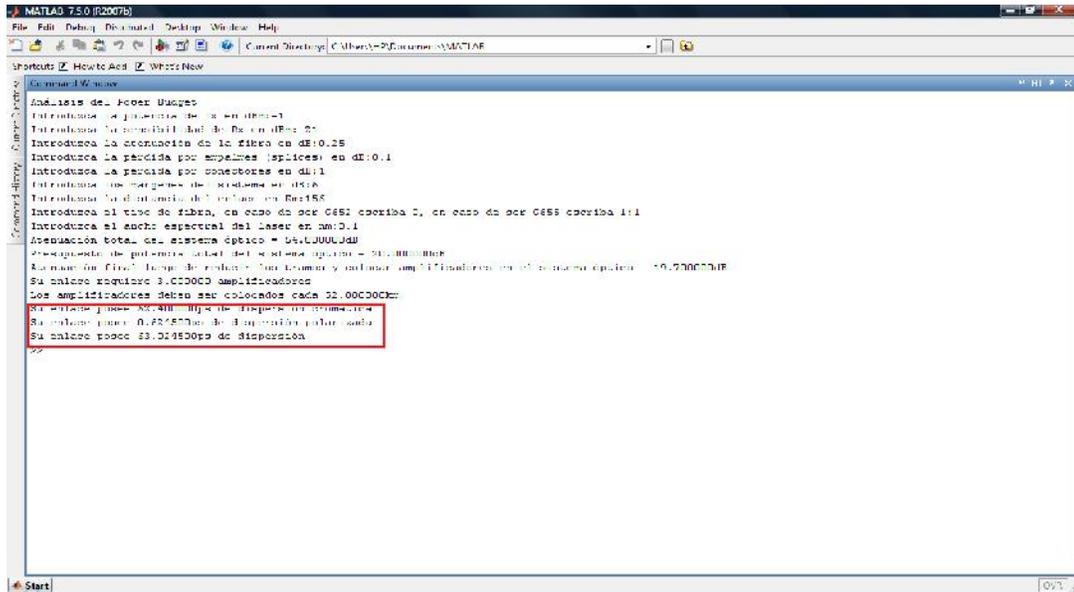


Figura 27: Cálculos en MATLAB de la dispersión para el enlace Caracas-Valencia

Fuente: Elaboración propia

IV.4 Simulación de fallas en la red

IV.4.1 Algoritmo de búsqueda del mejor camino para el proyecto

Para realizar el algoritmo de búsqueda del mejor camino entre dos nodos, se tomó como referencia el algoritmo de Dijkstra (ver APÉNDICE B) APÉNDICE D, ya que éste otorgaba la mejor ruta tomando como parámetro el peso o distancia entre cada una de las interfaces, dándonos a conocer como la mejor ruta aquella que presente menos kilometraje en la trayectoria para la comunicaciones de dos ciudades.

Para poder adaptar dicho algoritmo a lo que se requería para el trabajo de grado, se utilizó un lenguaje de programación llamado JAVA (ver APÉNDICE B) APÉNDICE D, el cual nos permitió darles las características necesarias al algoritmo de Dijkstra para que éste fuera compatible con lo requerido, y de esta manera cumplir con el objetivo planteado.

El algoritmo utilizado, representó la búsqueda del mejor camino bajo cualquier situación, puesto que este no se encuentra sujeto a la primera red diseñada, si no que éste pudo cambiar dependiendo de las interfaces que se encontraban disponibles. Este algoritmo consiguió la mejor ruta entre dos nodos para más de tres cortes de fibra o fallas interfaces. La única forma de que esto no sucediera, sería el caso crítico en que el nodo de salida o de llegada no poseyera una interface de comunicación, ya que todos los posibles caminos adyacentes, se encontraron inhabilitados.

IV.4.2 Proceso de simulación de fallas en la red

Se realizó la simulación de fallas con la ayuda de la interface creada en JAVA la cual consistió en eliminar rutas progresivamente para observar si la misma iba cambiando y concordando con aquellas interfaces que no habían sido eliminadas o que no habían presentado fallas.

El proceso para la simulación fue el siguiente:

- 1) En un principio se realizaron varias simulaciones de búsqueda de mejores caminos para la comunicación entre dos nodos, con todas aquellas interfaces que conformaban la red, para evaluar el recorrido que proponía el programa. Se verificó, en todos los casos, que éste mostrara el mejor camino existente entre los dos nodos que estaba siendo evaluados dependiendo del kilometraje de cada una de las interfaces.
- 2) Se eligieron dos nodos, entre los cuales se necesitaba recorrer varias interfaces para lograr la comunicación entre los mismos.
- 3) Se eliminó una de las interfaces por las cuales se necesitaba atravesar, para llegar de un nodo al otro. El programa encontró otra ruta la cual estaba conformada por otra(s) interface(s) diferente a la que había sido eliminada y de igual manera correspondía al mejor camino existente si se tomaba en cuenta las interfaces que se encontraban disponibles.

- 4) De igual forma que en el punto 3, se eliminó una de las interfaces por la cual se necesitaba atravesar para recorrer, el camino encontrado por el programa, después de la eliminación de la primera interface. Nuevamente el programa encontró una nueva ruta, que no dependía de la(s) interface(s) que habían sido seleccionadas por el mismo para la ruta anterior, y ésta correspondía a la mejor ruta posible en la red después de la inhabilitación de dos interfaces.
- 5) De igual manera que en los punto 3 y 4, se eliminó otra interface que era indispensable para el tercer camino encontrado. Una vez mas el algoritmo creado fue capaz de encontrar una ruta distinta a la anterior con las interfaces que se encontraban disponibles.
- 6) Finalmente, se observó, que el programa era capaz de encontrar la mejor ruta entre dos nodos sin importar que cantidad de cortes de fibra se presentaran, siempre y cuando existiera una ruta posible entre los dos estados que se encontraban en evaluación.

A continuación se ilustrará el proceso de simulaciones en JAVA mediante tres cortes de fibra. Se eligieron 2 ciudades aleatoriamente y se realizó diversos cortes de fibra que afectaron cada uno de los caminos que se iban encontrando a fin de observar como el programa suministraba rutas alternativas:

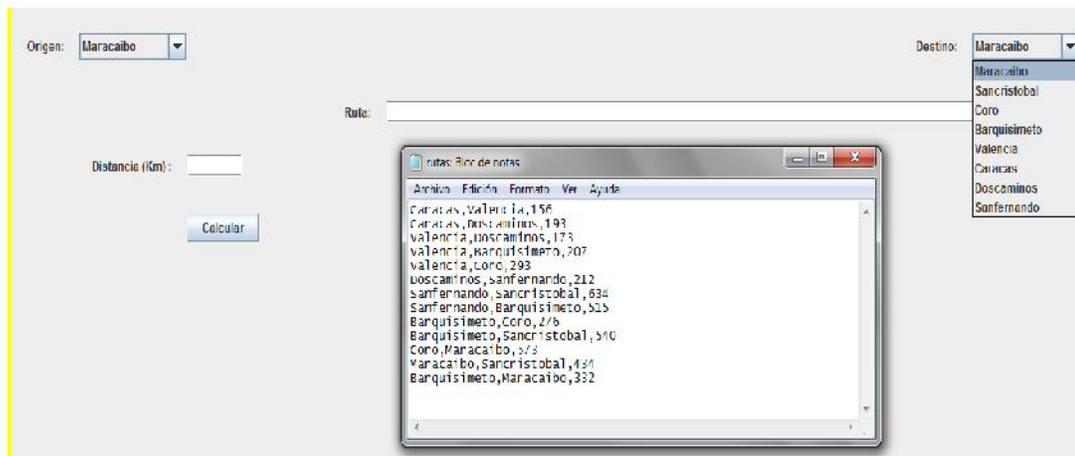


Figura 28: Ventana principal del programa de simulaciones

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Figura 28 el programa cuenta con dos menús, uno de ellos denominado “Origen” en la cual se puede seleccionar la ciudad desde la cual se desea partir, y el otro denominado “Destino” que va a corresponder a la ciudad a la cual se desea llegar. En el recuadro llamado “Ruta” aparecerán las ciudades por las que se debe pasar para llegar desde la ciudad de origen hasta la ciudad de destino, tomando en cuenta el mejor camino (el camino que represente la menor distancia en km). En el recuadro “Distancia” aparecerá la trayectoria total a recorrer en km, desde inicio a fin. La ventana que se encuentra en la parte interior de la figura, es un archivo .txt, el cual se encuentra enlazado al programa realizado en JAVA. Dicha ventana contiene los diferentes caminos posibles y la distancia que representa cada uno de ellos.

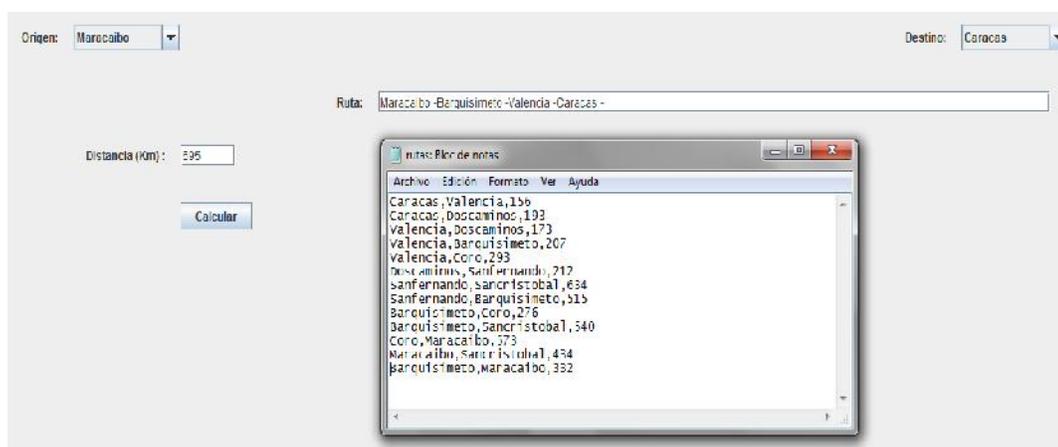


Figura 29: Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 29 se realizó la simulación entre dos nodos, Maracaibo y Caracas. En la ventana que dice “Origen” se seleccionó la ciudad de Maracaibo y en la ventana que dice “Destino” se seleccionó la ciudad de Caracas. En el recuadro “Ruta” se puede observar la trayectoria obtenida, la cual es: Maracaibo-Barquisimeto; Barquisimeto-Valencia; Valencia-Caracas, representando una distancia de 695km a recorrer. Ésta corresponde a la trayectoria mas corta posible

entre los nodos Maracaibo-Caracas en la topología existente, tomando en cuenta los pesos o distancias de cada uno de los posibles caminos. En la Figura 30 que se muestra a continuación, se puede apreciar la topología y la trayectoria, que se va a recorrer, de forma gráfica.

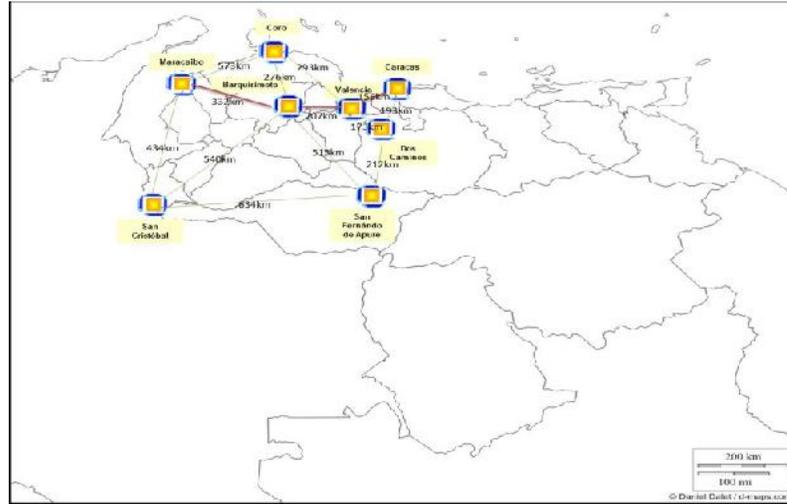


Figura 30: Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas
Fuente: Elaboración Propia

Después de observar la mejor ruta entre los nodos Maracaibo-Caracas que nos proporcionó el programa a partir de la red original, se realizó un corte de uno de los caminos, como se puede observar en la Figura 31, que formaba parte del primer trayecto Maracaibo-Caracas.

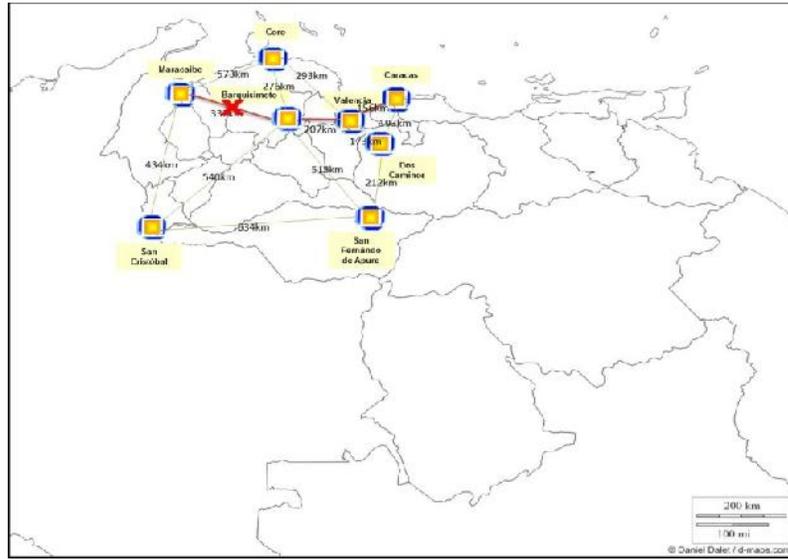


Figura 31: Representación en el mapa del primer corte de fibra (enlace Maracaibo-Barquisimeto)

Fuente: Elaboración Propia

Al realizar la inhabilitación de uno de los posibles caminos, se simuló la existencia de alguna falla en el mismo.

Para efectos de la simulación se eligió el trayecto Maracaibo-Barquisimeto, ya que representaba uno de los caminos que debía atravesar la ruta seleccionada anteriormente o ruta principal. En la Figura 32 que se muestra a continuación se realizó la misma simulación mostrada anteriormente eliminando el camino que existía entre Maracaibo-Barquisimeto, que se encuentra resaltado en color azul.

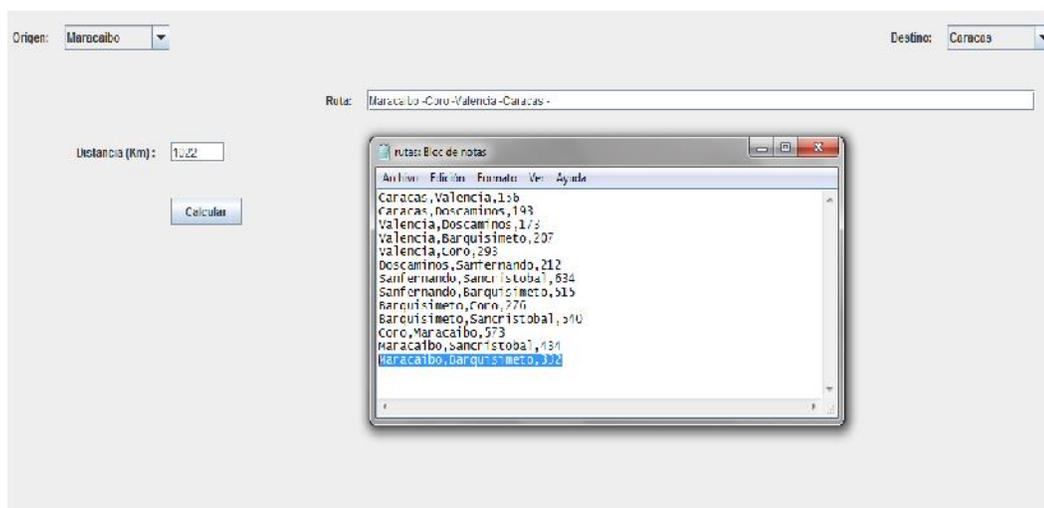


Figura 32: Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con el primer corte de fibra (Maracaibo-Barquisimeto)

Fuente: Elaboración Propia

Al correr la simulación con la eliminación del enlace propuesto anteriormente, se puede observar que la nueva ruta está compuesta por el trayecto: Maracaibo-Coro; Coro-Valencia; Valencia-Caracas, que representa una distancia de 1022km y a su vez es la mejor ruta existente después del primer corte de fibra.

Como se muestra en la siguiente Figura 33, se puede observar que a pesar de que una de las posibles alternativas no se encuentra disponible, el programa es capaz de encontrar una ruta adyacente, correspondiente a la ruta con menor distancia, en kilómetros, presente para ese momento en la red, ya que se había realizado el primer corte de fibra (la ruta Maracaibo-Barquisimeto).

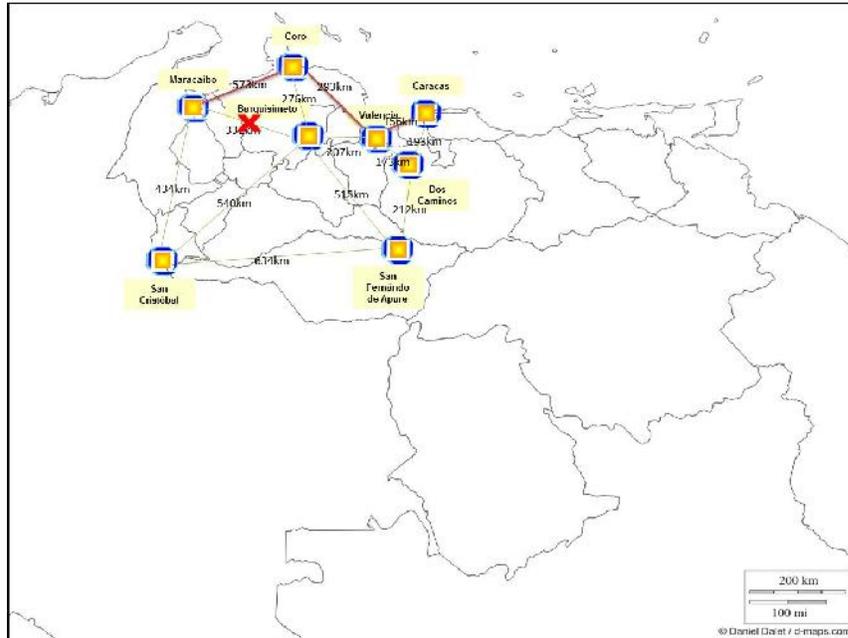


Figura 33: Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después del primer corte de fibra (Maracaibo-Barquisimeto)
Fuente: Elaboración Propia

Después de haber observado la ruta propuesta por el programa al haber inhabilitado uno de los trayectos, se procedió a eliminar una segunda ruta. Para efectos de la simulación se eligió la ruta Maracaibo-Coro, ya que ésta representaba uno de los caminos principales del trayecto encontrado entre Maracaibo y Caracas después del primer corte de fibra, como se muestra en la Figura 34 en la siguiente página.

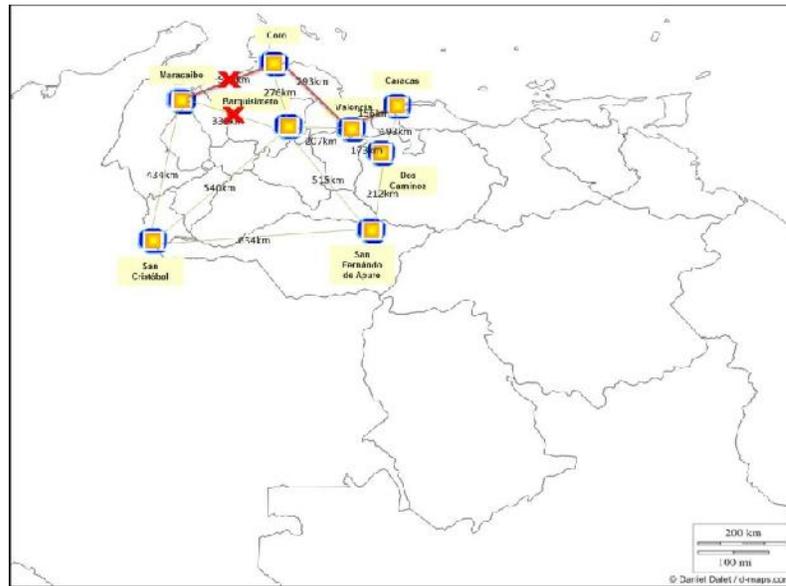


Figura 34: Representación en el mapa del segundo corte de fibra (enlace Maracaibo-Coro)

Fuente: Elaboración Propia

Igualmente que en el primer corte, se eliminó un segundo camino. En esta simulación fue la ruta Maracaibo-Coro, para que el programa no tomara en cuenta dicho enlace como un posible camino entre el trayecto Maracaibo-Caracas y así obtener la tercera vía posible entre ambas ciudades.

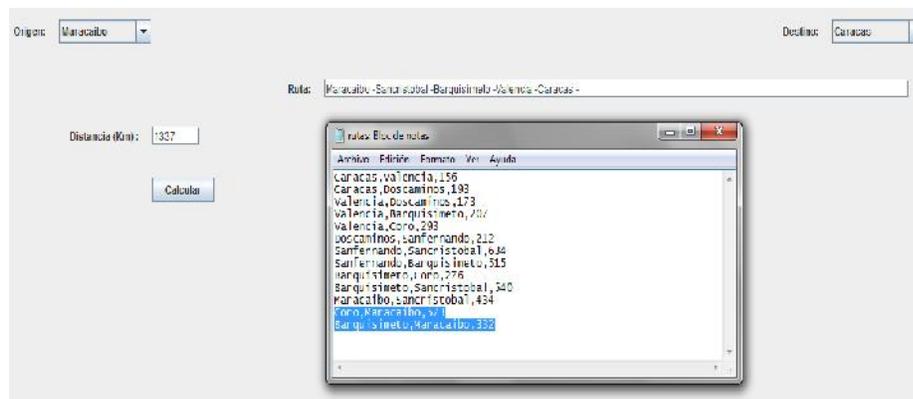


Figura 35: Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con dos cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro)

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 35, se encuentran resaltadas, en color azul, las rutas que no estaban disponibles y de igual manera el programa propuso un nuevo trayecto, que estaba conformada por lo enlaces entre: Maracaibo-San Cristóbal; San Cristóbal-Barquisimeto; Barquisimeto-Valencia; Valencia-Caracas, representando una distancia de 1337km a lo largo de todo el recorrido. En la Figura 36 que se muestra a continuación se puede observar detalladamente el nuevo trayecto obtenido mediante el algoritmo creado en JAVA, representado en el mapa de Venezuela.

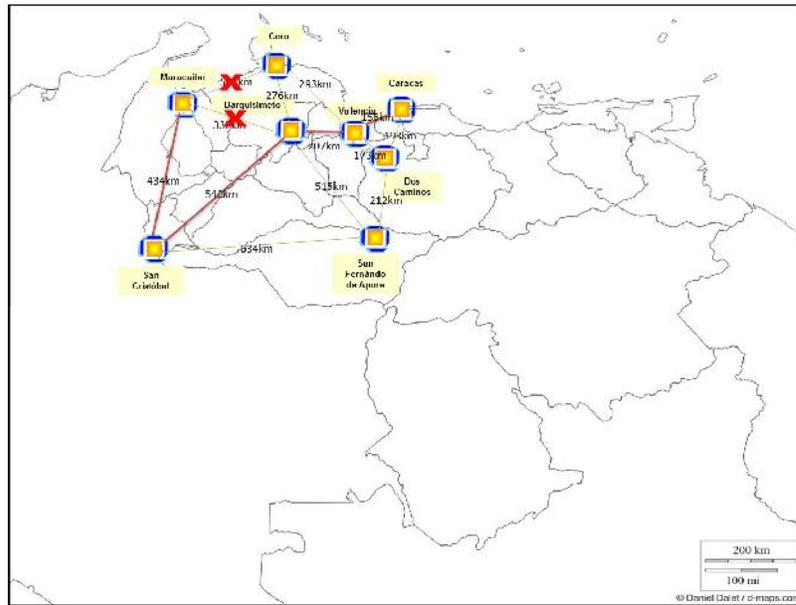


Figura 36: Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después de dos cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro)

Fuente: Elaboración Propia

Después de observar el camino que otorgó el software al realizar el segundo corte de fibra, se efectuó el tercer corte de fibra. Para efectos de la simulación, se eliminó el tramo San Cristóbal-Barquisimeto, ya que formaba parte del trayecto que se había determinado después del segundo corte de fibra, como se muestra en la Figura 37 que se presenta a continuación.

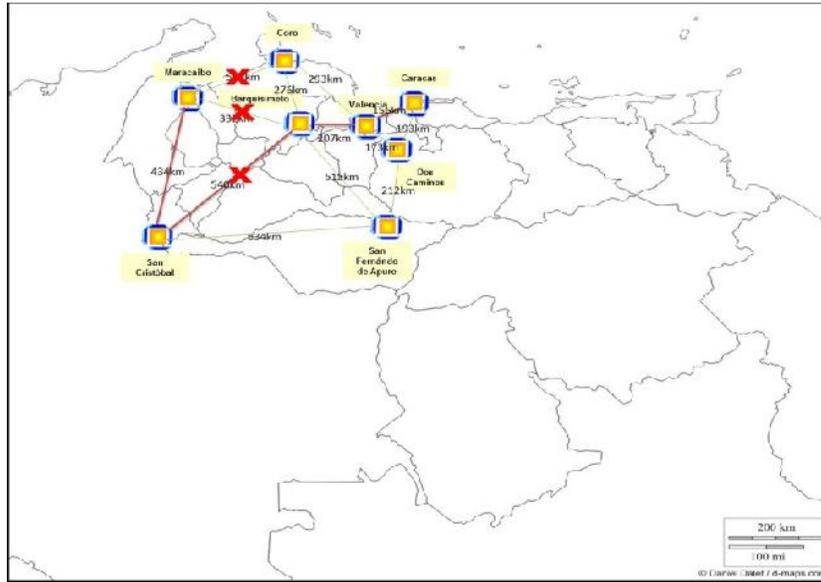


Figura 37: Representación en el mapa del tercer corte de fibra (enlace San Cristóbal-Barquisimeto)
Fuente: Elaboración Propia

Igualmente que en los primeros dos casos, se eliminó un camino. En esta simulación fue la ruta San Cristóbal-Barquisimeto, para que el programa no tomara en cuenta dicho enlace como un posible camino entre el trayecto Maracaibo-Caracas y así obtener la cuarta vía posible entre ambas ciudades, superando así los tres cortes de fibra en la red diseñada.

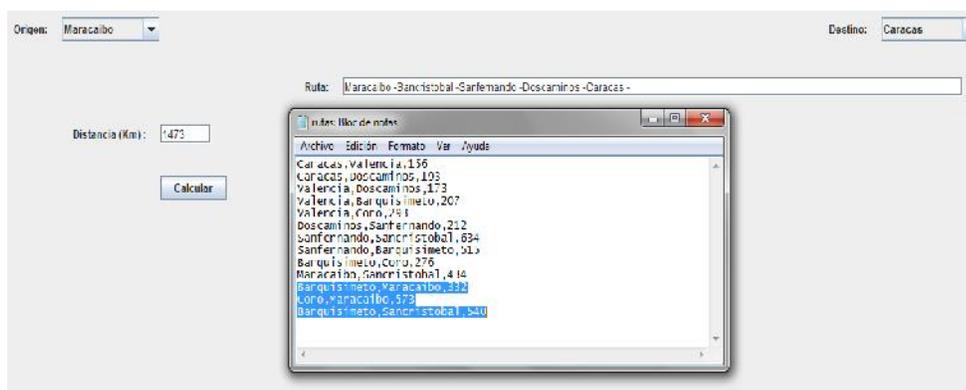


Figura 38: Simulación del recorrido entre las ciudades Maracaibo-Caracas con tres cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro/ San Cristóbal-Barquisimeto)

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Figura 38 las rutas eliminadas se encuentran resaltadas en color azul. Además se creó un nuevo camino independiente a los enlaces que se encontraban deshabilitados o con fallas para el momento. Este nuevo trayecto estaba conformado por las rutas: Maracaibo-San Cristóbal; San Cristóbal-San Fernando; San Fernando-Dos Caminos; Dos Caminos-Caracas, con una distancia a lo largo de todo el recorrido de 1473km, que representó el camino mas corto entre los nodos Maracaibo-Caracas, después de las fallas presentadas en las primeras tres rutas.

En la Figura 39 que se presenta a continuación se puede observa gráficamente el nuevo trayecto seleccionado.

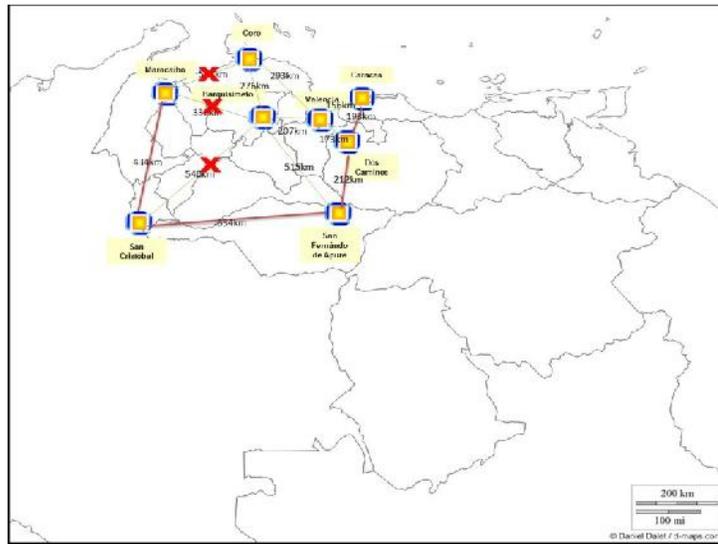


Figura 39: Representación en el mapa de la mejor ruta Maracaibo-Caracas después de tres cortes de fibra (Maracaibo-Barquisimeto/Maracaibo-Coro/Barquisimeto-San Cristóbal)

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Dicho capítulo contiene todos los productos obtenidos de las fases previamente planificadas. Se explican desde las investigaciones teóricas relacionadas a redes DWDM-ASON hasta los análisis de distancias, equipos o tráfico en la red. También se plasman las simulaciones obtenidas al culminar el diseño con un software especializado en redes de fibra óptica y final definición de la arquitectura.

V.1 Investigación exhaustiva referente a redes DWDM-ASON

Durante meses de investigación, se obtuvo un marco teórico sólido y muy completo, que comprende desde las informaciones más básicas tales como definiciones y conceptos hasta la explicación de tecnologías modernas como ASON. Mediante la realización de dicha averiguación se obtuvo información que permitió conocer y aclarar nociones para poder desarrollar el proyecto, otorgando facultades necesarias para el análisis de situaciones relevantes en el diseño de una red amplia de fibra óptica. Por ejemplo se observó que según las características del diseño la fibra que más conviene para el presente proyecto es del tipo Monomodo G652 y G655, esto debido a su fortaleza con respecto a la atenuación y tomando en cuenta que las distancias entre las ciudades involucradas son considerables.

V.2 Levantamiento de información de la ubicación de los nodos y distancias

Luego de haber usado las distintas herramientas para medición de las distancias en metros, se obtuvo la siguiente tabla en donde se resumen los trayectos entre cada ciudad en las cuales se encuentran cada uno de los nodos definidos en el

proyecto. Dichos cálculos se realizaron mediante las herramientas MapSource y Google Maps, tal y como se mencionaron en el capítulo anterior.

Tabla 9: Distancia entre nodos de la red

Fuente: Elaboración propia

	Caracas	Valencia	Dos Caninos	San Fernando	Barquisimeto	Coro	Miracaibo	San Cristóbal
Caracas		156	198					
Valencia	156		173		207	298		
Dos Caninos	198	173		212				
San Fernando			212		515			634
Barquisimeto		207		515		276	332	540
Coro		298			276		573	
Miracaibo					332	573		484
San Cristóbal				634	540		484	

V.3 Determinación de los requerimientos de tráfico y protección de la red

Se observó mediante la matriz de tráfico y la cantidad de ancho de banda requerido por cada una de las ciudades, que el número de lambdas necesarios para el diseño fue de 45, con esto se asegura la ruta de trabajo o principal además de las rutas de protección, las cuales se usarán en caso de que el trayecto que se encuentre operante presente algún tipo de falla.

A continuación se presenta la tabla que expresa el número de lambdas requeridas, por cada nodo, dependiendo de las necesidades de tráfico de cada uno de ellos.

Tabla 10: Requerimiento de tráfico entre cada una de las ciudades
Fuente: Elaboración Propia

		Matrícula (ciudades) por i																																	
		M	M	M	M	M	M	S	S	S	S	S	S	C	C	C	C	B	B	B	B	V	V	V	V	C	C	C	C	L	L				
M-C		X																																	
C-V			X																																
M-B				X																															
M-S					X																														
S-C						X																													
C-B							X																												
S-C								X																											
B-V									X																										
V-C										X																									
LD-C											X																								
LD-V												X																							
B-S													X																						
LD-S														X																					

LEYENDA:

Mux- Ponder de 100 G en 1 lambda da: λ (color rojo)

Mux- Ponder de 40 G en 1 lambda da: λ (color azul)

Mux- Ponder de 10 G en 1 lambda da: λ (color negro)

V.4 Determinación de los fenómenos ópticos y factibilidad técnica de los enlaces

Luego de culminados los cálculos, tanto de presupuesto de potencia como de efectos ópticos, de cada uno de los trece enlaces, se verificó la factibilidad de técnica de los mismos, además se determinó los efectos ópticos que afectaba a cada tramo y se estableció la cantidad de amplificadores requeridos, como también, las distancias requeridas para su instalación.

A continuación se presentarán dos tablas, Tabla 11 y Tabla 12, en donde se sintetizan cada uno de los enlaces con sus especificaciones. Se dividieron en dos tablas, por razones de visualización, sin ningún orden específico.

Tabla 11: Resumen I de efectos ópticos de los enlaces y especificaciones de los amplificadores

Fuente: Elaboración propia

Caracas-Valencia		Valencia-Dos Caminos	
Distancia del enlace (Km)	156	Distancia del enlace (Km)	173
Atenuación total del enlace (dB)	54,8	Atenuación total del enlace (dB)	59,9
Cantidad de amplificadores	3	Cantidad de amplificadores	4
Distancia entre cada amplificador (Km)	52	Distancia entre cada amplificador (Km)	43,25
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,7	Atenuación por tramo luego de división (dB)	18,38
Dispersión cromática (ps)	62,4	Dispersión cromática (ps)	69,2
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,62	Dispersión por modo de polarización (ps)	0,65
Dispersión total (ps)	63,02	Dispersión total (ps)	69,85
Caracas-Dos Caminos		Valencia-Coro	
Distancia del enlace (Km)	193	Distancia del enlace (Km)	293
Atenuación total del enlace (dB)	65,9	Atenuación total del enlace (dB)	95,9
Cantidad de amplificadores	4	Cantidad de amplificadores	7
Distancia entre cada amplificador (Km)	48,25	Distancia entre cada amplificador (Km)	41,86
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,58	Atenuación por tramo luego de división (dB)	18,97
Dispersión cromática (ps)	77,2	Dispersión cromática (ps)	117,2
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,69	Dispersión por modo de polarización (ps)	0,86
Dispersión total (ps)	77,89	Dispersión total (ps)	118,05
Valencia-Barquisimeto		Barquisimeto-San Fernando	
Distancia del enlace (Km)	207	Distancia del enlace (Km)	515
Atenuación total del enlace (dB)	70,1	Atenuación total del enlace (dB)	162,5
Cantidad de amplificadores	5	Cantidad de amplificadores	12
Distancia entre cada amplificador (Km)	41,4	Distancia entre cada amplificador (Km)	42,92
Atenuación por tramo luego de división (dB)	18,35	Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,88
Dispersión cromática (ps)	82,8	Dispersión cromática (ps)	206
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,71	Dispersión por modo de polarización (ps)	1,13
Dispersión total (ps)	83,51	Dispersión total (ps)	207,13

Tabla 12: Resumen II de efectos ópticos de los enlaces y especificaciones de los amplificadores

Fuente: Elaboración propia

Barquisimeto-Coro	
Distancia del enlace (Km)	276
Atenuación total del enlace (dB)	90,8
Cantidad de amplificadores	6
Distancia entre cada amplificador (Km)	46
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,82
Dispersión cromática (ps)	110,4
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,83
Dispersión total (ps)	111,23
Barquisimeto-Maracaibo	
Distancia del enlace (Km)	332
Atenuación total del enlace (dB)	107,6
Cantidad de amplificadores	8
Distancia entre cada amplificador (Km)	41,5
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,06
Dispersión cromática (ps)	132,8
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,91
Dispersión total (ps)	133,71
San Cristóbal-Maracaibo	
Distancia del enlace (Km)	434
Atenuación total del enlace (dB)	138,2
Cantidad de amplificadores	10
Distancia entre cada amplificador (Km)	43,4
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,84
Dispersión cromática (ps)	737,8
Dispersión por modo de polarización (ps)	1,67
Dispersión total (ps)	739,47
Coro-Maracaibo	
Distancia del enlace (Km)	573
Atenuación total del enlace (dB)	179,9
Cantidad de amplificadores	14
Distancia entre cada amplificador (Km)	40,93
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,46
Dispersión cromática (ps)	974,1
Dispersión por modo de polarización (ps)	1,91
Dispersión total (ps)	976,01

Dos Caminos-San Fernando	
Distancia del enlace (Km)	212
Atenuación total del enlace (dB)	71,6
Cantidad de amplificadores	5
Distancia entre cada amplificador (Km)	42,4
Atenuación por tramo luego de división (dB)	18,6
Dispersión cromática (ps)	84,8
Dispersión por modo de polarización (ps)	0,72
Dispersión total (ps)	85,52
San Cristóbal-San Fernando	
Distancia del enlace (Km)	634
Atenuación total del enlace (dB)	198,2
Cantidad de amplificadores	15
Distancia entre cada amplificador (Km)	42,27
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,88
Dispersión cromática (ps)	253,6
Dispersión por modo de polarización (ps)	1,25
Dispersión total (ps)	254,85
San Cristóbal-Barquisimeto	
Distancia del enlace (Km)	540
Atenuación total del enlace (dB)	170
Cantidad de amplificadores	13
Distancia entre cada amplificador (Km)	41,54
Atenuación por tramo luego de división (dB)	19,57
Dispersión cromática (ps)	918
Dispersión por modo de polarización (ps)	1,86
Dispersión total (ps)	919,86

V.5 Búsqueda de la ruta de trabajo y protección entre dos nodos

Se realizó un algoritmo basado en un lenguaje de programación llamado JAVA, mediante el cual se pudo obtener la mejor ruta sin importar la cantidad de cortes de fibra o fallas de los enlaces, siempre y cuando existiera un camino existente entre los nodos que se encontraban en evaluación.

En el tomo del trabajo de grado, se plasmó en el capítulo IV (ver IV.4.2 Proceso de simulación de fallas en la red) una simulación con tres cortes fibra en dos nodos específicos (Maracaibo-Caracas). A través del programa realizado, se obtuvieron rutas de protección, para interconectar los nodos en evaluación, cada vez que se simulaba la avería en alguno de los caminos que conformaban la ruta de trabajo o principal, creaba una ruta nueva de soporte, tomando en cuenta siempre el camino de menor distancia requerida.

Se realizaron pruebas con los trece enlaces, simulando tres fallas posibles, sin obtener errores, obteniendo un 100% de fiabilidad, comprobando así que el programa en JAVA, es robusto y capaz de encontrar una solución, siempre y cuando exista, independientemente de cualquier falla que se encuentre en la topología.

V.6 Definición de equipos y arquitectura definitiva de la red

Para la determinación de cada uno de los equipos que componen la red, se calcularon los efectos ópticos que afectan la señal, dados por el operador de telecomunicaciones y el tutor industrial. Varios de los componentes ya estaban instalados, por lo tanto, solo se tomaron en cuenta las especificaciones técnicas.

A continuación, se representa de manera gráfica en el mapa de Venezuela la arquitectura definitiva de la red DWDM-ASON de la región Centro Occidente del país, parte de sus componentes y equipos, además de otros datos importantes para su diseño. Véase Figura 40 y Figura 41.

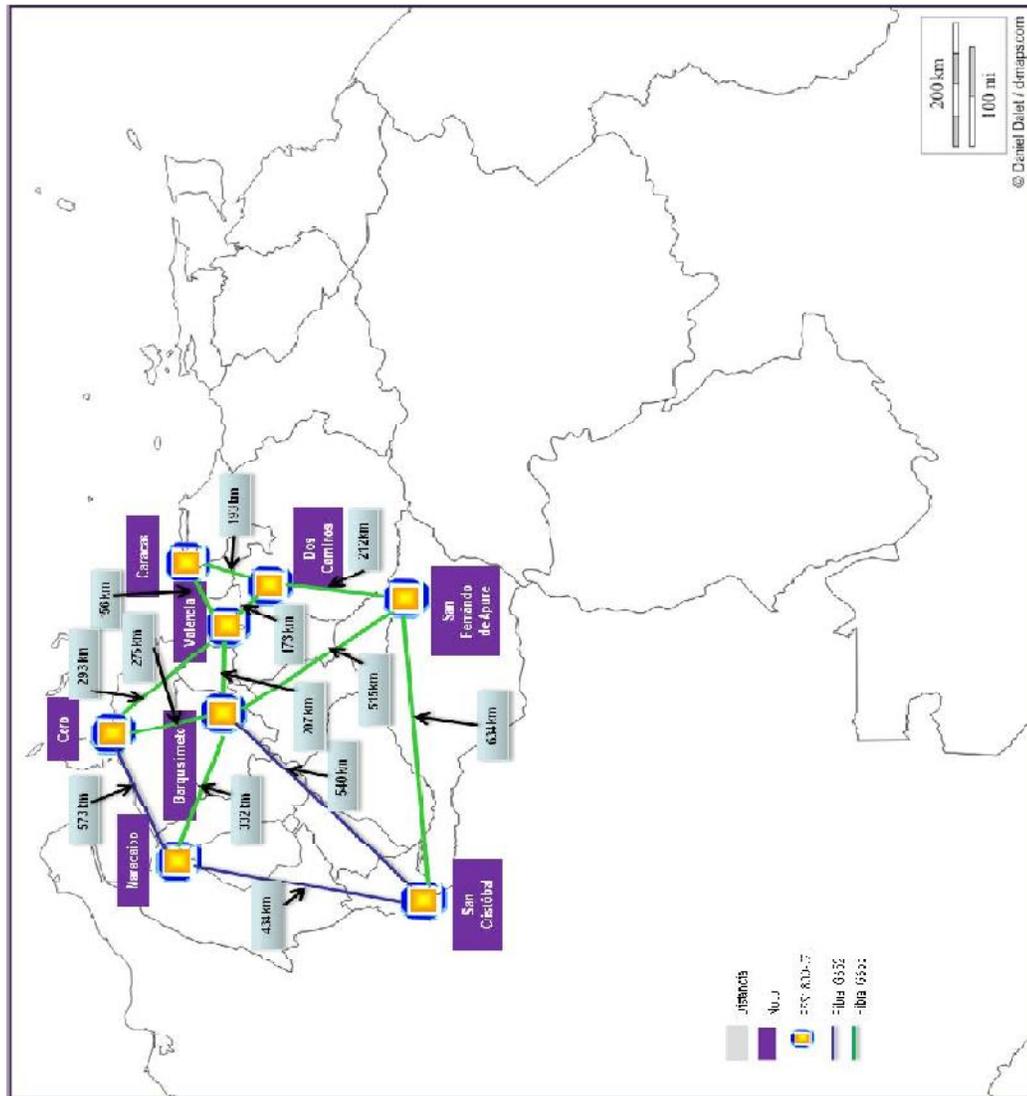


Figura 40: Arquitectura definitiva de la red y sus distancias
Fuente: Elaboración propia

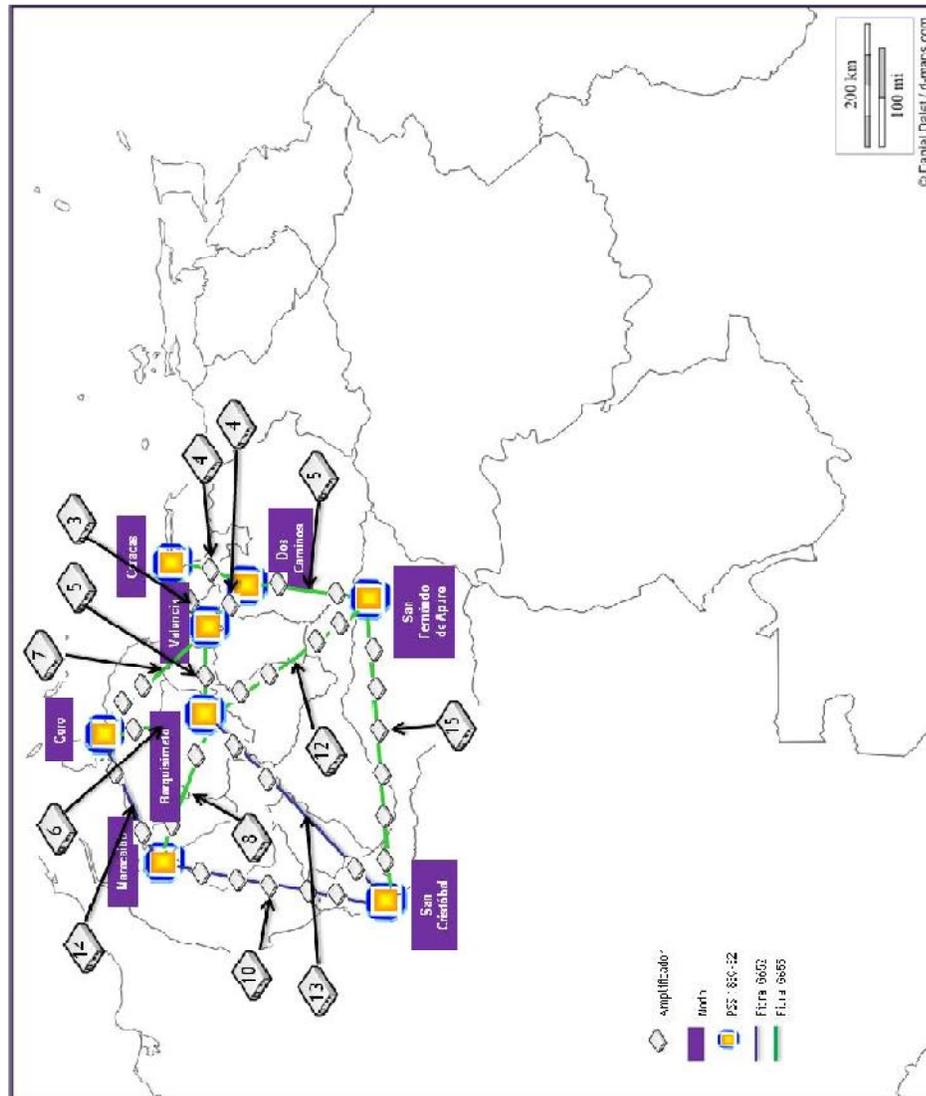


Figura 41: Arquitectura definitiva de la red y amplificadores

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas al finalizar el trabajo especial de grado, y las recomendaciones que se consideran necesarias para diseño futuro de una red de fibra óptica DWDM-ASON y/o continuidad del proyecto.

VI.1 Conclusiones

- Hace muchos años la fibra de vidrio fue descubierta como un medio de transmisión que podía alcanzar grandes velocidades a través de la reflexión total. Ésta poseía una limitante en cuanto a la atenuación de la señal que por ella transitaba. Debido a la inclusión de las tecnologías DWDM-ASON y la detección coherente, se ha comprobado que ésta, conforma el medio de transmisión más eficaz ya que las limitantes de atenuaciones y otros efectos ópticos se han superado.
- A fin de establecer las distancias entre enlaces, se utilizó la herramienta MapSource, se usó el camino de las carreteras y vías principales entre cada ciudad (nodo), estableciendo que es operacionalmente, más sencillo, rápido y con menos uso de recursos, la instalación y mantenimiento de la red. Por lo cual se recomienda su uso para futuros diseños de redes.
- De la investigación se determinó que la utilización del equipo ALU PSS1830 es indispensable para la factibilidad del proyecto, ya que internamente cuenta con la detección coherente en la recepción de la señal, reduciendo así, los efectos de las dispersiones creadas por diversos factores presentes en la transmisión óptica y ésta permita obtener mayores distancias sin necesidad de realizar transformaciones eléctricas de la señal.
- Los resultados obtenidos luego del cálculo del presupuesto de potencia de cada enlace, arrojaron altas atenuaciones que afectan la señal, principalmente

por las largas distancias de los tramos y el uso de dispositivos ya instalados como la fibra o empalmes. Por lo tanto, se requirió el uso de amplificadores EDFA para garantizar la conexión de los nodos.

- Se determinó mediante la matriz de tráfico y la cantidad de ancho de banda requerido por cada una de las ciudades, que el número de lambdas necesarios para el diseño fue de 45, con esto se asegura la ruta de trabajo o principal además de las rutas de protección.
- Esta teóricamente comprobado que la mejor modulación para usar en redes electro-ópticas de alto rendimiento, son las modulaciones PDM-BPSK y QPSK-PDM con detección coherente, teniendo en cuenta que ofrece la mejor solución de su clase para 40 Gb/s de transmisión y 100 Gb/s, respectivamente. Adicionalmente de poseer una portadora única, altas tasas de símbolos en Gbaudio de tasa por símbolo 20 y 25 Gbaudio de tasa por símbolo, respectivamente, son muy robustas para los efectos no lineales y son altamente tolerantes a canales adyacentes a 10Gb/s.
- Al definir los tipos de interfaces y longitudes de ondas, se concluyó hacer uso de canales a 40Gb/s y 100Gb/s solamente, ya que al usar longitudes de onda con mayores capacidades, se le da una mayor escalabilidad y tiempo de vida útil a la red. Por ello, no se recomienda considerar el uso de canales a 10Gb, ya que se puede observar que dicha longitud de onda posee diferente forma de detección cuando es comparada con longitudes de onda de 40Gb y 100Gb, lo que significaría tener dos tipos de detección en el receptor, que proporciona mayor complejidad en la red.
- Se desarrolló un programa, basado en el algoritmo de Dijkstra aplicado en el lenguaje JAVA, consiguiendo un método efectivo y automatizado para encontrar el mejor camino entre dos nodos y simular las diferentes fallas o cortes de fibra, comprobando que no solo es capaz de soportar las tres averías inicialmente planteadas en los objetivos, sino también, puede superar más fallas siempre y cuando exista un camino posible.

VI.2 Recomendaciones

- Es recomendable, efectuar una evaluación financiera si se desea dar continuidad al proyecto, ya que la evaluación técnica del diseño de la red se demostró que es totalmente factible. Se debe considerar la inversión tanto de equipos como del personal, costos de operación y mantenimiento, de esta manera, se podrá considerar definitivamente la viabilidad real del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcatel-Lucent. (2007). *Transmission Networks WDM Technology Fundamentals*. Manual de entrenamiento.
- Alcatel-Lucent. (2010). *Next-generation Electro-Optics Technology with Coherent Detection*. Nueva Jersey: Bell-Labs.
- Alcatel-Lucent. (2011). *1830 PSS-36/32/16 Product Information and Planning Guide*. Nueva Jersey: ALU.
- Alcatel-Lucent. (2011). *Alcatel-Lucent 1830 PSS-36/32/16 (Photonic Service Switch) Overview*. Nueva Jersey: Alcatel-Lucent.
- Bagad, V. S. (2009). *Optical Fiber Communication*. Pune, India: Technical Publications Pune.
- CANTV. (2012). *Historia de CANTV*. Retrieved from Sitio WEB de CANTV : <http://www.cantv.com.ve/seccion.asp?pid=1&sid=158>
- Cisco. (2008). *Fiber Types in Gigabit Optical Communications*. Retrieved 2012, from Cisco Corporation Web Site: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/white_paper_c11-463661.html
- ComScore. (2010). *Situación de internet en latinoamérica*.
- Díaz Yáñez, M. B., & Jiménez Jiménez, M. S. (2010). *Estudio de la Conmutación de Longitudes de Onda para Multiprotocolo (MPλS) en Redes ASON (Automatically Switched Optical Network)*. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Díaz, S. G. (2003). In S. G. Díaz, *Java a tope* (p. 1). Málaga: Universidad de Málaga.

- EMMT. (2012, Marzo 12). *EMMT*. Retrieved from <http://marismas-emtt.blogspot.com/2009/09/adios-las-atenuaciones-por-curvaturas.html>
- García de Jalón, J., Rodríguez, J. I., & Vidal, J. (2005). *Aprenda Matlab 7.0*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hui, R., & O'Sullivan, M. (2009). *Fiber optic measurement techniques*. San Diego, USA: Elsevier Academic Press.
- ITU. (2007). *Arquitectura de la red óptica con conmutación G.8080/Y.1304*. Ginebra: Internacional Telecommunications Union.
- ITU. (2009). *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. Ginebra: International Telecommunication Union.
- J. P. Morgan. (2010). *Nothing But Net*. Nueva York: J. P. Morgan.
- Jielin, D. (2007). *Network Dictionary*. Silicon Valley: Javvin Technologies, Inc.
- Llorente, A. (2011 de Mayo de 2011). *Cableado de fibra óptica para comunicaciones de datos (1ª parte)*. Recuperado el 2 de Febrero de 2012, de fibraoptichoy.com: <http://www.fibraoptichoy.com/cableado-de-fibra-optica-para-comunicaciones-de-datos-1%C2%AA-parte/>
- Millan, R. (2006). DWDM corrige las limitaciones de la fibra. *Redes & Telecom*, 2.
- Muñoz, R., Masip Bruin, X., Sánchez López, S., Solé Pareta, J., Domingo Pascual, J., & Junyent, G. (2010). *Mecanismo de Encaminamiento Dinámico en Redes ASON*. Universitat Politècnica de Catalunya, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC, Departament d'Arquitectura de Computadors, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelona, España.

Ramaswami, R., Sivarajan, K., & Sasaki, G. (2010). *Optical Networks: A Practical Perspective* (Tercera ed.). Burlington, Massachusetts, USA: Elsevier.

Rao, M. M. (2000). *Optical Communication*. Hyderabad: Orient Blackswan.

Sangucho, C. E., & Morocho, W. B. (2009). *Diseño de la red backhaul para una nueva salida de cable submarino, utilizando la fibra óptica del oleoducto de crudos pesados a disposición del estado ecuatoriano*. Tesis, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, Quito, Ecuador.

Tejedor, R. J. (2006, agosto). *Que es*. Retrieved from <http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit158/60-62.pdf>

Torrubia, G. S., & Terrazas, V. M. (2006). *Algoritmo de Dijkstra. Un tutorial Interactivo*. Madrid, España: Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2006). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Abreviaturas y Acrónimos

A

ALU Alcatel-Lucent

ASON *Automatic Switched Optical Networks*

ATM *Asynchronous Transfer Mode*

B

BIT *Binary digit*

BER *Bits Error Rate*

BODS *Bandwidth On Demand Service*

BPSK *Binary Phase-Shift Keying*

C

CWDM *Coarse Wavelength Division Multiplexing,*

D

DGD *Differential Group Delay*

DMD *Direfencial Mode Delay*

DSF *Dispersion Shifted Fibers*

DSP *Digital Signal Processing*

DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing*

E

E-NNI *External Network to Network Interface*

F

G

GMPLS *Generalized Multi-protocol Label Switching*

GRIN *Graded index*

GSMP *General Switch Management Protocol*

GVD *Group Velocity Dispersion*

H

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

I

I-NMI *Internal Network to Management Interface*

I-NNI *Internal Network to Network Interface*

IP *Internet Protocol*

ITU-T *International Telecommunication Union -Telecommunication Standardization Sector*

L

LAN *Local Area Network*

LED *Light Emitting Diode*

M

MPLS *Multiprotocol Label Switching*

N

NA *Numerical Aperture*

O

OADM *Optical Add/Drop Multiplexer*

OFL *Overfilled Bandwidth*

OLA *Optical Line Amplifier*

OSI *Open System Interconnection*

OTM *Optical Terminal Multiplexer*

OTN *Optical Transport Network*

P

PDM *Polarization Division Multiplexing*

PMD *Polarization Mode Dispersion*

Q

QPSK *Quaternary Phase-Shift Keying*

R

ROADM *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*

S

SDH *Synchronous Digital Hierarchy*

SI *Step Index*

T

TDM *Time División Multiplexing*

U

UDWDM *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*

V

VCSEL *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*

W

WDM *Wavelength Division Multiplexing*

APÉNDICE B

Códigos de programación

Programación en MATLAB

```
clc;
close all;
clear all;
disp('Análisis del Power Budget');

%   Introducción de los datos

ptr=input('Introduzca la potencia de Tx en dBm:');
prec=input('Introduzca la sensibilidad de Rx en dBm:');
af=input('Introduzca la atenuación de la fibra en dB:');
sl=input('Introduzca la pérdida por empalmes (splices) en dB:');
cl=input('Introduzca la pérdida por conectores en dB:');
ms=input('Introduzca los márgenes del sistema en dB:');
dist=input('Introduzca la distancia del enlace en Km:');
g65=input('Introduzca el tipo de fibra, en caso de ser G652 escriba
0, en caso de ser G655 escriba 1:');
ael=input('Introduzca el ancho espectral del laser en nm:');

%   Calculo de dispersión

if (g65==0)
    dc=(17*ael*dist);
    pmd=(0.08*(sqrt(dist)));
    dtot=dc+pmd;
end
if (g65==1)
    dc=(4*ael*dist);
    pmd=(0.05*(sqrt(dist)));
    dtot=dc+pmd;
end

%   Calculo del power budget
p=ptr-prec;
aft=af*dist;
slt=(dist/2)*sl;
clt=cl*2;
l=aft+slt+clt+ms;
cont=0;
div=2;

disp(sprintf('Atenuación total del sistema óptico = %fdB',l));
```

```
% Ciclo para determinación del power budget

if p<1 && (1-p)>10
    while (p<1)
        dist1=dist;
        dist1=(dist/div);
        cont=cont+1;
        div=div+1;
        aft=af*dist1;
        slt=(dist1/2)*sl;
        l=aft+slt+clt+ms;
    end
end

amp=(dist/cont);

% Impresión de resultados

disp(sprintf('Presupuesto de potencia total del sistema óptico =
%fdB',p));
disp(sprintf('Su enlace requiere %f amplificadores',cont));
disp(sprintf('Los amplificadores deben ser colocados cada
%fkm',amp));
disp(sprintf('Atenuación final luego de reducir los tramos y colocar
amplificadores en el sistema óptico = %fdB',l));
disp(sprintf('Su enlace posee %fps de dispersión cromática',dc));
disp(sprintf('Su enlace posee %fps de dispersión polarizada',pmd));
disp(sprintf('Su enlace posee %fps de dispersión',dtot));
```

Programación en JAVA (algoritmo de Dijkstra)

```
import java.util.*;

public class Grafo {
    char[] nodos; // Letras de identificación de nodo
    int[][] grafo; // Matriz de distancias entre nodos
    String rutaMasCorta; // distancia más
corta
    int longitudMasCorta = Integer.MAX_VALUE; // ruta más
corta
    List<Nodo> listos=null; // nodos
revisados Dijkstra

    // construye el grafo con la serie de identificadores de nodo en
una cadena
    Grafo(String serieNodos) {
```

```
        nodos = serieNodos.toCharArray();
        grafo = new int[nodos.length][nodos.length];
    }

    // asigna el tamaño de la arista entre dos nodos
    public void agregarRuta(char origen, char destino, int
distancia) {
        int n1 = posicionNodo(origen);
        int n2 = posicionNodo(destino);
        grafo[n1][n2]=distancia;
        grafo[n2][n1]=distancia;
    }

    // retorna la posición en el arreglo de un nodo específico
    private int posicionNodo(char nodo) {
        for(int i=0; i<nodos.length; i++) {
            if(nodos[i]==nodo) return i;
        }
        return -1;
    }

    // encuentra la ruta más corta desde un nodo origen a un nodo
destino
    public String encontrarRutaMinimaDijkstra(char inicio, char fin)
{
        // calcula la ruta más corta del inicio a los demás
        encontrarRutaMinimaDijkstra(inicio);
        // recupera el nodo final de la lista de terminados
        Nodo tmp = new Nodo(fin);
        if(!listos.contains(tmp)) {
            System.out.println("Error, nodo no alcanzable");
            return "Bye";
        }
        tmp = listos.get(listos.indexOf(tmp));
        int distancia = tmp.distancia;
        // crea una pila para almacenar la ruta desde el nodo final
al origen
        Stack<Nodo> pila = new Stack<Nodo>();
        while(tmp != null) {
            pila.add(tmp);
            tmp = tmp.procedencia;
        }
        String ruta = "";
        // recorre la pila para armar la ruta en el orden correcto
        while(!pila.isEmpty()) ruta+=(pila.pop().id + " ");
        return distancia + ": " + ruta;
    }

    // encuentra la ruta más corta desde el nodo inicial a todos los
demás
    public void encontrarRutaMinimaDijkstra(char inicio) {
        Queue<Nodo> cola = new PriorityQueue<Nodo>(); // cola de
prioridad
```

```

        Nodo          ni = new Nodo(inicio);          // nodo
inicial

        listos = new LinkedList<Nodo>(); // lista de nodos ya
revisados
        cola.add(ni);          // Agregar nodo inicial a la
cola de prioridad
        while(!cola.isEmpty()) {          // mientras que la cola no
esta vacia
            Nodo tmp = cola.poll();          // saca el primer elemento
listos.add(tmp);          // lo manda a la lista de
terminados
            int p = posicionNodo(tmp.id);
            for(int j=0; j<grafo[p].length; j++) { // revisa los
nodos hijos del nodo tmp
                if(grafo[p][j]==0) continue;          // si no hay
conexión no lo evalua
                if(estaTerminado(j)) continue;          // si ya fue
agregado a la lista de terminados
                Nodo nod = new
Nodo(nodos[j], tmp.distancia+grafo[p][j], tmp);
                // si no está en la cola de prioridad, lo agrega
                if(!cola.contains(nod)) {
                    cola.add(nod);
                    continue;
                }
                // si ya está en la cola de prioridad actualiza la
distancia menor
                for(Nodo x: cola) {
                    // si la distancia en la cola es mayor que la
distancia calculada
                    if(x.id==nod.id && x.distancia > nod.distancia)
{
                        cola.remove(x); // remueve el nodo de la
cola
                        cola.add(nod); // agrega el nodo con la
nueva distancia
                        break;          // no sigue revisando
                    }
                }
            }
        }

        // verifica si un nodo ya está en lista de terminados
public boolean estaTerminado(int j) {
    Nodo tmp = new Nodo(nodos[j]);
    return listos.contains(tmp);
}

        // encontrar la ruta mínima por fuerza bruta
public void encontrarRutaMinimaFuerzaBruta(char inicio, char
fin) {
    int p1 = posicionNodo(inicio);

```

```
int p2 = posicionNodo(fin);
// cola para almacenar cada ruta que está siendo evaluada
Stack<Integer> resultado = new Stack<Integer>();
resultado.push(p1);
recorrerRutas(p1, p2, resultado);
}

// recorre recursivamente las rutas entre un nodo inicial y un
nodo final
// almacenando en una cola cada nodo visitado
private void recorrerRutas(int nodoI, int nodoF, Stack<Integer>
resultado) {
// si el nodo inicial es igual al final se evalúa la ruta en
revisión
if(nodoI==nodoF) {
int respuesta = evaluar(resultado);
if(respuesta < longitudMasCorta) {
longitudMasCorta = respuesta;
rutaMasCorta = "";
for(int x: resultado) rutaMasCorta+=(nodos[x]+" ");
}
return;
}
// Si el nodoInicial no es igual al final se crea una lista
con todos los nodos
// adyacentes al nodo inicial que no estén en la ruta en
evaluación
List<Integer> lista = new Vector<Integer>();
for(int i=0; i<grafo.length;i++) {
if(grafo[nodoI][i]!=0 &&
!resultado.contains(i)) lista.add(i);
}
// se recorren todas las rutas formadas con los nodos
adyacentes al inicial
for(int nodo: lista) {
resultado.push(nodo);
recorrerRutas(nodo, nodoF, resultado);
resultado.pop();
}
}

// evaluar la longitud de una ruta
public int evaluar(Stack<Integer> resultado) {
int resp = 0;
int[] r = new int[resultado.size()];
int i = 0;
for(int x: resultado) r[i++]=x;
for(i=1; i<r.length; i++) resp+=grafo[r[i]][r[i-1]];
return resp;
}

public static void main(String[] args) {
Grafo g = new Grafo("abcdefgh");
g.agregarRuta('f', 'e', 156);
}
```

```
g.agregarRuta('f','g', 193);
g.agregarRuta('e','g', 173);
g.agregarRuta('e','d', 207);
g.agregarRuta('e','c', 293);
g.agregarRuta('g','h', 212);
g.agregarRuta('h','d', 515);
g.agregarRuta('h','b', 634);
g.agregarRuta('d','c', 276);
g.agregarRuta('d','b', 540);
g.agregarRuta('c','a', 573);
g.agregarRuta('a','b', 434);
//g.agregarRuta('d','a', 540); falta distancia real
(Barquisimeto-Maracibo)
    char inicio = 'f';
    char fin     = 'b';
String respuesta = g.encontrarRutaMinimaDijkstra(inicio,
fin);
    System.out.println(respuesta);
}
}
```

Programación en JAVA (Búsqueda de nodos)

```
public class Nodo implements Comparable<Nodo> {
    char id;
    int distancia = Integer.MAX_VALUE;
    Nodo procedencia = null;
    Nodo(char x, int d, Nodo p) { id=x; distancia=d; procedencia=p;
}
    Nodo(char x) { this(x, 0, null); }
    public int compareTo(Nodo tmp) { return this.distancia-
tmp.distancia; }
    public boolean equals(Object o) {
        Nodo tmp = (Nodo) o;
        if (tmp.id==this.id) return true;
        return false;
    }
}
```


APÉNDICE D

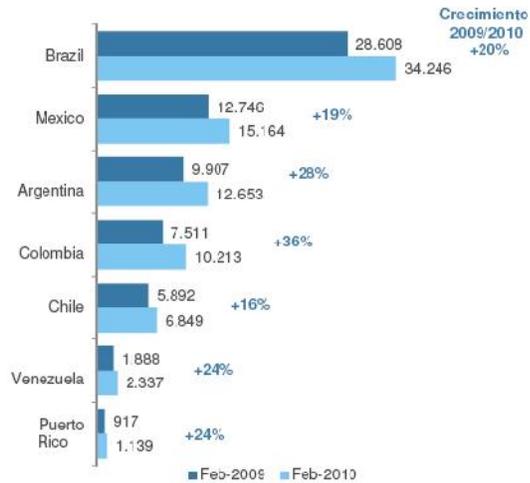
Estudios

Colombia muestra el Mayor Crecimiento porcentual de la Región

El mayor porcentaje de crecimiento se observó en Colombia, que incrementó su población web en 36% durante 2009.

En términos absolutos, Brasil aportó la mayor cantidad de usuarios, con una tasa de crecimiento de 20%, lo que se traduce en casi 6 millones de nuevos usuarios web durante el año pasado.

Población Online de América Latina
Visitantes Únicos (ooo) +15 conectándose desde su Hogar o Trabajo



©comScore, Inc. Proprietary and Confidential.

Fuente: comScore World Metrix, Datos Febrero 2010

Figura 42 Población Online de América Latina 2010

Fuente: (ComScore, 2010)