

**DETERMINACIÓN DEL CAMINO ÓPTIMO DE MIGRACIÓN HACIA UNA AON DE
UN OPERADOR DE TELECOMUNICACIONES EN COLOMBIA**

Ing. Esp. JAVIER CORTÉS CARVAJAL



Universidad del Valle

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – ÉNFASIS EN ELECTRÓNICA
2016**

**DETERMINACIÓN DEL CAMINO ÓPTIMO DE MIGRACIÓN HACIA UNA AON DE
UN OPERADOR DE TELECOMUNICACIONES EN COLOMBIA**

Ing. Esp. JAVIER CORTÉS CARVAJAL

**Trabajo de investigación para
optar por el título de Magister en
Ingeniería con énfasis en
electrónica**

Director: M.Sc. FABIO G. GUERRERO



Universidad del Valle

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – ÉNFASIS EN ELECTRÓNICA
2016**

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	CONSIDERACIONES INICIALES	1
1.1.1	Ruta de migración de servicios de telecomunicaciones	1
1.1.2	Criterios de evaluación de arquitecturas existentes	2
1.1.3	La red de transmisión de telecomunicaciones	3
1.1.4	Estándares de migración de la red de transmisión	4
1.1.5	Transporte TDM o basado en la conmutación de circuitos:	6
1.1.6	Transporte basado en la conmutación de paquetes	6
1.2	REDES CONVERGENTES	8
1.2.1	La red NGN	9
1.2.2	Arquitectura NGN	10
1.3	ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA Y EL PLANO DE CONTROL	11
1.3.1	Plano de Gestión:	11
1.3.2	Plano de Transporte:	12
1.3.3	Plano de Control:	12
1.4	MODELOS NORMALIZADOS DEL PLANO DE CONTROL	13
1.5	IMPACTO DEL PROYECTO	14
2	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	16
2.1	EL MODELO DE MIGRACIÓN	16
2.1.1	Generalidades del modelo	16
2.1.2	Análisis Inicial del Contexto	20
2.1.3	Evaluación de negocio	23
2.1.4	Demanda de tráfico proyectado	23
2.1.5	Consideraciones para el diseño y configuración de la red	26
2.1.6	Planeación financiera del negocio	29
2.2	VALIDACIÓN DEL MODELO	31
2.2.1	Planeación de negocios en redes de telefonía móvil	32
2.2.2	Ampliación de servicio en redes de larga de distancia	34
2.2.3	Esquema eficiente de encaminamiento y gestión de redes de transmisión	34
2.3	CAMINO DE MIGRACIÓN HACIA UNA AON	34
2.3.1	Metodología para la evaluación del costo de migración	36
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1	CASO DE ESTUDIO – RED DE EMCALI	38
3.1.1	Análisis de crecimiento de tráfico en Cali	38
3.1.2	Análisis inicial del contexto	41
3.1.3	Caracterización de la red de EMCALI	44
3.1.4	Evaluación de negocio de EMCALI	49
3.1.5	Demanda de tráfico proyectado	49
3.2	MIGRACIÓN DE EMCALI HACIA UNA AON	50
3.2.1	Migración a corto plazo - Configuración de la Arquitectura MPLS o invertir en ASON	50
3.2.2	Migración a mediano plazo – Cambio de fibra en los enlaces del núcleo de la red	53
3.2.3	Migración a largo plazo - GMPLS para la red metro de EMCALI	54
3.3	MODELO SIMPLIFICADO DE LA RED	57
3.4	MIGRACIÓN A CORTO PLAZO	58
3.4.1	Ventajas de la topología actual	59
3.4.2	Limitaciones de la topología actual	59
3.4.3	Escenario de simulación en OpenSimMPLS	60
3.5	MIGRACIÓN A MEDIANO PLAZO	63
3.5.1	Escenario de simulación de conexión punto a punto	64

3.5.2	Transmisión WDM	68
3.5.3	Transmisión DWDM con fibra G.655	72
3.6	MIGRACIÓN A LARGO PLAZO	76
3.6.1	Red de acceso completamente óptica	77
3.6.2	Red de transmisión completamente óptica	77
3.6.3	Presupuesto óptico	79
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
5	BIBLIOGRAFIA.....	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1-1 – Evolución de los servicios hacia el internet de las cosas.....</i>	1
<i>Figura 1-2 – Alcance de la red de transmisión.....</i>	3
<i>Figura 1-3 – Formato de trama MPLS.....</i>	7
<i>Figura 1-4 – Modelo de redes convergentes NGN.....</i>	8
<i>Figura 1-5 – Características de la red NGN.....</i>	9
<i>Figura 1-6 – Ejemplo de aplicación de una arquitectura NGN.....</i>	10
<i>Figura 1-7 – Arquitectura en capas de una red óptica basada en el plano de control.....</i>	11
<i>Figura 1-8 – Interfaces UNI y NNI en un contexto multi operador.....</i>	12
<i>Figura 1-9– Arquitectura de los modelos ASON y GMPLS.....</i>	13
<i>Figura 1-10 – Relación Organismos de estandarización.....</i>	14
<i>Figura 2-1 – Planificación Iterativa para escenarios competitivos.....</i>	16
<i>Figura 2-2 – Proceso de migración por periodo.....</i>	17
<i>Figura 2-3 – Fases de planeación por capas.....</i>	18
<i>Figura 2-4– Escenario de migración a largo, mediano y corto plazo.....</i>	19
<i>Figura 2-5 – Modelo de maduración del servicio.....</i>	21
<i>Figura 2-6 – Diagrama de iteración para integrar todos los planes.....</i>	23
<i>Figura 2-7 – Tipos de tasas binarias.....</i>	24
<i>Figura 2-8 – Perfil de tráfico típico en una red en 24 horas.....</i>	24
<i>Figura 2-9 – Arquitectura de una red completamente óptica (AON).....</i>	26
<i>Figura 2-10 – Escalabilidad de los enrutadores actuales.....</i>	28
<i>Figura 2-11 – Consumo energético de dispositivos de red.....</i>	28
<i>Figura 2-12 – Modelo de la estructura del plan de negocio.....</i>	29
<i>Figura 2.13 – Estrategias de implementación de recursos por ciclo de vida.....</i>	30
<i>Figura 2.14 – Crecimiento del tráfico y su costo de migración.....</i>	35
<i>Figura 3.1 – Modelado del Comportamiento temporal de habitantes y subscriptores aplicando DS.....</i>	39
<i>Figura 3.2– Número de subscriptores por operador en Cali [Fuente: Informes SIUST - MinTIC].....</i>	40
<i>Figura 3.3 – Proyección de tráfico con base en los resultados del modelo de crecimiento de subscriptores... ..</i>	41
<i>Figura 3-4 – Estructura en capas de la Red de Emcali.....</i>	41
<i>Figura 3-5 – Ingresos por otras líneas de negocio.....</i>	43
<i>Figura 3-6 – Módulos de la Red de Emcali.....</i>	44
<i>Figura 3-7 – Modelo en capas de la red NGN de EMCALI.....</i>	46
<i>Figura 3-8 – Estadísticas de utilización de la red Metro Ethernet.....</i>	48
<i>Figura 3-9 – Trafico del núcleo de la red a horas pico (2:32PM).....</i>	51
<i>Figura 3-10 – Relación de Normas y Organismos de estandarización.....</i>	54
<i>Figura 3-11 –Implementación de recursos.....</i>	55
<i>Figura 3-12 – Modelo simplificado del núcleo de la red SDH de EMCALI.....</i>	57
<i>Figura 3-13 – Modelo simplificado del núcleo de la red NGN de EMCALI.....</i>	58
<i>Figura 3-14 – Topología Metro Ethernet utilizada por el operador.....</i>	58
<i>Figura 3-15 – Escenario de simulación de la red de EMCALI en OpenSimMPLS.....</i>	60
<i>Figura 3-16 – Trafico sobre las rutas establecidas previamente.....</i>	61
<i>Figura 3-17 – Enlace activo L6, enlace de backup L3, L4.....</i>	61
<i>Figura 3-18 – Nueva ruta de tráfico L3, L4 por daños en el enlace L6.....</i>	61
<i>Figura 3-19 – Estadísticas de simulación del modelo de migración a corto plazo.....</i>	62
<i>Figura 3-20 – Trafico saturando el núcleo de la red.....</i>	63
<i>Figura 3-21 – Escenario de simulación de conexión punto a punto con fibra G.652B.....</i>	65
<i>Figura 3-22 – Respuesta de simulación en la segunda y tercera ventana de transmisión.....</i>	67
<i>Figura 3-23 – Escenario de Simulación de un sistema WDM de 8 canales en la ventana de 1550 nm.....</i>	68

<i>Figura 3-24 – Espectro de la señal WDM compuesta en la ventana de 1310 nm</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3-25– Respuesta de simulación en la segunda ventana de transmisión</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3-26 – Escenario de simulación con 40λs y fibra G.655.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3-27 – Espectro de la señal DWDM con 40 λs en la ventana de 1550 nm.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3-28– Diagramas de Ojo del sistema DWDM con 40 λs en la ventana de 1550 nm</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3-29 – Esquema general del anillo con 4 OADMs y 16 λs.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3-30 – Diagramas de simulación de un anillo con 4 OADMs y 16 λ s en la ventana de 1550 nm.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3-31 – Esquema contenido dentro de cada subsistema de OADM.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3-32 – Análisis Espectral de los canales ópticos en los OADMs.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.33 – Respuesta del sistema a 40Gbps por canal (Incluido procesamiento en OADMs).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura A.1 – Planos funcionales de una red ASON multi operador.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura A.2 – Interacciones del plano de gestión/transporte con recursos de transporte.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura A.3– Conexión permanente de A a B.</i>	<i>90</i>
<i>Figura A.4 – Conexión conmutada de A a B.</i>	<i>91</i>
<i>Figura A.5 – Conexión lógica permanente.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura A.6 – Relación entre dominios.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura B.1 – Plano de control común en una red óptica multi - tecnología.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura B.2 – Jerarquía de conmutación en GMPLS.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura B.3 – Configuraciones posibles de controladores de señalización y conmutadores.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura B.4 – Estructura de un mensaje RSVP – TE transportado en un datagrama IP.</i>	<i>102</i>
<i>Figura B.5 – Intercambio de mensajes para el establecimiento y liberación de un LSP</i>	<i>102</i>

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1.1 – Evolución de la red de transmisión (servicio portador)</i>	5
<i>Tabla 3.1 – Portafolio de servicios de EMCALI</i>	42
<i>Tabla 3.2 – Entorno competitivo de EMCALI</i>	42
<i>Tabla 3.3 - Contenido de cada módulo de la red de EMCALI</i>	45
<i>Tabla 3.4a – Criterios de evaluación</i>	52
<i>Tabla 3.4b – Criterios de evaluación de la migración a corto plazo</i>	53
<i>Tabla 3.5 – Criterios de evaluación de la migración a mediano plazo</i>	53
<i>Tabla 3.6 – Fabricantes y opciones de equipos comerciales</i>	55
<i>Tabla 3.7 – Criterios de evaluación de la migración a largo plazo</i>	55
<i>Tabla 3.8 – Distancias en km entre los principales nodos de la red</i>	57
<i>Tabla 3.9 – Características del escenario de simulación</i>	65
<i>Tabla 3.10 – Respuesta de simulación en la segunda y tercera ventana de transmisión con fibra G652</i>	68
<i>Tabla 3.11 – Características del escenario de simulación</i>	68
<i>Tabla 3.12 – Respuesta de simulación en la segunda y tercera ventana de transmisión</i>	71
<i>Tabla 3.13 – Características del escenario de simulación</i>	72
<i>Tabla 3.14- Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión</i>	76

RESUMEN

El sector de las Telecomunicaciones como elemento transversal en el desarrollo de la sociedad moderna está en su fase dorada gracias a fenómenos como la globalización, la automatización y las fuerzas del mercado que han establecido un ritmo en el crecimiento de tráfico en las redes de acceso y la disminución de precio del ancho de banda; escenario que ha obligado a los operadores a fortalecer las redes de transmisión con modelos de migración y arquitecturas de altas prestaciones que mejoren la relación costo – beneficio y les permita prestar “el mejor servicio” con grandes utilidades [1].

En Colombia los inicios de estas redes de transmisión datan de la época en que fue autorizada para prestar el primer servicio de telefonía de larga distancia la firma belga “Mourlon and Co”[2], desde entonces, las tecnologías FDM¹, TDM²/PDH³ fundamentaron el crecimiento de las actuales redes ópticas WDM⁴. Sin alejarse de desarrollos globales, los operadores regionales y nacionales han mantenido una dinámica de fortalecimiento periódico de sus redes en sintonía con los rápidos cambios tecnológicos globales (crecimiento de tráfico en las redes de acceso, redes IP móviles 3G y 4G, abaratamiento del ancho de banda, ampliación de canales dedicados a grandes empresas, creación de servicios para las entidades gubernamentales, entre otros).

Entendiendo el futuro como las “Redes completamente ópticas” (AON⁵) y el término óptimo como la relación entre los beneficios obtenidos y el costo de la solución para lograr la ventaja de ofrecer un servicio competitivo con utilidades económicamente atractivas [3][4], este documento se presenta como resultado de la pregunta que dio el origen a ésta investigación: **¿Cómo determinar el camino óptimo de migración para alcanzar una red completamente óptica?**

El punto de partida de la investigación es encontrar el camino óptimo como mejor alternativa de crecimiento de la red de transmisión, evaluado en términos de costos, tiempos de inversión y beneficios alcanzados. Para alcanzar los objetivos, el proyecto se centra en las características de crecimiento de la red de transmisión con base en los criterios definidos en el primer capítulo.

El primer capítulo del documento presenta las generalidades del proyecto, que incluye los conceptos base para el posterior desarrollo: Consideraciones iniciales del proyecto, modelo de migración de referencia, la importancia de migración dentro de la red de transmisión para alcanzar una AON y las opciones evolutivas que tiene la red de transmisión, donde se identifican los modelos de migración de redes de transmisión de acuerdo con los estándares de la UIT⁶, del IETF⁷, la OIF⁸.

El capítulo dos presenta la metodología aplicada que describe las fases del proyecto para alcanzar la construcción del modelo de migración con base en la exploración e identificación de la arquitectura actual del operador, su infraestructura, las topologías, los enlaces y en general el funcionamiento de la red de transmisión del operador.

El tercer capítulo muestra los resultados obtenidos en el trabajo de investigación, realizando la simulación de los pasos que el operador puede seguir determinando el camino de migración hacia la AON. Al Final del documento se exponen las conclusiones y recomendaciones, resultado del trabajo de investigación realizado.

¹ **FDM** (Multiplexado por División de Frecuencia, **Frecuency Division Multiplex**)

² **TDM** (Multiplexado por División de Tiempo, **Time Division Multiplex**)

³ **PDH** (Jerarquía Digital Plexiocrona, **Plesiochronous Digital Hierarchy**)

⁴ **WDM** (*Multiplexación por División de Longitud de Onda*, **Wavelength Division Multiplexing**)

⁵ **AON** (*Redes Completamente Ópticas*, **All Optical Networks**)

⁶ **UIT – T** (*Unión Internacional de Telecomunicaciones-Sector Telecomunicaciones*)

⁷ **IETF** (*Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet*, **Internet Engineering Task Force**)

⁸ **OIF** (*Foro de interconexión de redes ópticas*, **Optical Internetworking Forum**)

ABSTRACT

The telecommunications industry now days is the cornerstone in the development of modern society. The market forces have accelerated its growth and set an scenario of data traffic progression and decreasing price of bandwidth, creating the need for strengthen transmission networks, using migration patterns and architectures that will improve the cost - benefit and allow them to provide "the best service" for large profits [1].

The beginning of these transmission networks in Colombia dates from the time of service long distance telephone Belgian firm "Mourlon and Co" [2], since that point in the national telecom history, technologies i.e. FDM, TDM, PDH, SDH substantiated growth of existing WDM optical networks. Close to the global developments, regional and national telecom operators had been maintained a dynamic strengthening of their networks in line with the telecom world´s changes (traffic growth in access networks, mobile networks IP 3G and 4G, the cheapest bandwidth, companies expansion loyal to large enterprises, creating new services for government agencies).

Understanding the future as the "all-optical networks" (AON) and the term "optimal" as the relationship between benefits and cost of the solution to achieve the advantage of offering a competitive service with economically attractive profits [3] [4] this document presented the results of the question that began this research: **How to determine the optimal migration path to achieve an All Optical Network?**

The starting point of the research is to find the optimal path as best alternative to migrate the transmission network, evaluated in terms of cost, time investment and benefits achieved. To achieve the objectives, the project focuses on the growth characteristics of the transmission network based on the criteria defined in the first chapter.

The first chapter presents an overview of the project, including the basis for further development concepts: Initial considerations of the project, migration model reference, the importance of migration within the transmission network to achieve an AON and evolutionary options available to the transmission network, where migration patterns of transmission networks according to the standards of the ITU, IETF, OIF are identified.

Chapter two presents the methodology applied where the project phases are described to achieve the construction of the migration model based on the exploration and identification of the current architecture of the operator, their infrastructure topologies, links and overall operation the transmission network operator.

The third chapter shows the results of the research work, performing the simulation of the steps that the operator can continue to determine the migration path to the AON. The conclusions and recommendations resulting from the research work carried out are set at the end of the document.

OBJETIVOS

GENERAL

Definir un camino de migración con base en criterios de ingeniería hacia una AON en el estrato de transporte de la red NGN metropolitana de EMCALI a partir de un modelo de red óptico simplificado utilizando la herramienta computacional OptSim, que sirva de apoyo a los funcionarios del Departamento GUENT⁹ en la toma de decisiones para la expansión de la red.

ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio de la topología y enlaces de la red óptica actual en el estrato de transporte de la red metropolitana NGN de EMCALI considerando el tráfico actual y su proyección a mediano plazo.
- Establecer los escenarios de migración más aceptados por los organismos internacionales hacia una AON con base en el estudio de la topología y enlaces actuales de la red incluyendo la red de acceso y el número de usuarios conectados a cada nodo.
- Comparar las alternativas de migración usando un modelo simplificado de simulación en OptSim mostrando los resultados de rendimiento y relación costo/beneficio en cada etapa del camino de migración.

⁹ **GUENT** (*Gerencia Unidad Estrategia en el Negocio de las Telecomunicaciones*)

1 INTRODUCCIÓN

En el sector de las telecomunicaciones, las arquitecturas de las redes cambian para satisfacer nuevas necesidades, nuevos servicios y aplicaciones de los clientes, introduciendo equipos nuevos y buscando una suave transición con la infraestructura existente como consecuencia de un proceso de convergencia. En una compañía de telecomunicaciones, éstas actividades de migración deben darse a la par con un análisis del mercado, un análisis del entorno regulatorio para la creación de nuevos servicios y la implementación de nuevas tecnologías. Todos los factores citados, implican para cada compañía una apropiada planificación y un cuidadoso análisis de las alternativas con mayor impacto, con el fin de asegurar un equilibrio entre la capacidad necesaria, la calidad asociada al servicio que se presta y las inversiones requeridas para lograr una exitosa migración [5].

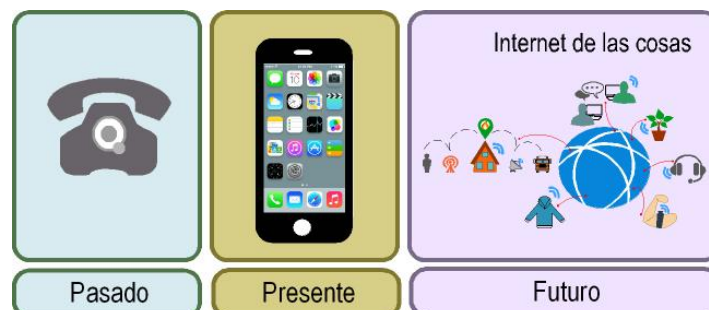
1.1 CONSIDERACIONES INICIALES

1.1.1 Ruta de migración de servicios de telecomunicaciones

Para la elección de un camino de migración existen factores tecnológicos y sociales a ser considerados para que la solución del operador sea eficiente, rentable, de costos competitivos, de fácil mantenimiento, que acelere el proceso de convergencia y se adapte al entorno local. Factores sociales como la falta de acceso de la población de la región a servicios de banda ancha, baja tele densidad; factores tecnológicos y económicos como el desarrollo de nuevas infraestructuras basadas en cloud computing, la transformación de las TIC¹⁰ y las PyME¹¹ al nivel de las grandes compañías, el crecimiento de la red de telefonía móvil hacia la era del gigabyte y la tendencia de las redes fijas hacia AONs inteligentes [6][7].

La elección de ese camino de migración debe incluir la evolución de los servicios de telecomunicaciones personales; como se presenta en la Figura 1.1 la ruta evolutiva muestra un futuro digitalizado y automatizado donde todas las cosas estarán conectadas a una infraestructura de telecomunicaciones, eso incluye carreteras, aparatos de salud, sensores de todo tipo recopilando y procesando grandes cantidades de información, [8] [9].

Figura 1-1 – Evolución de los servicios hacia el internet de las cosas



¹⁰ TIC (Tecnologías de la Información y de la Comunicación)

¹¹ PyME (Pequeñas y Medianas Empresas)

Para encontrar la ruta de migración las arquitecturas existentes deben ser analizadas mediante herramientas de planificación, un único análisis no sería una estrategia correcta, por cuanto la perspectiva del presente trabajo se enfoca en el planteamiento de un método de migración enmarcado en [5][10][11][12][13][14][15] y en la WTDC¹² de 2006, como una de las posibilidades sobre el futuro de una red de telecomunicaciones. Los pasos a alcanzar se enuncian a continuación:

1. Análisis y previsión de nuevos servicios
2. Caracterización de la red actual
3. Modelo económico y planes de negocios
4. Análisis de arquitecturas y tecnologías de vanguardia
5. Diseño, dimensionamiento y optimización de la solución

1.1.2 Criterios de evaluación de arquitecturas existentes

Los juicios de valor para determinar el camino óptimo de migración tienen como base de referencia los aspectos citados a continuación que se definen como criterios a tener en cuenta [16] [17] [18] [19]:

- **Número y capacidad de los nodos:** Las redes de telecomunicaciones deben adaptarse a varios tipos de tráfico que incluye: el tráfico IP, el tráfico de las redes privadas virtuales de grandes empresas, el tráfico de vídeo y el tráfico de voz proveniente de la telefonía fija y móvil. Para dirigir toda esta información a través de la red cada nodo de la red debe tener equipos de enrutamiento y conmutación que recibe el tráfico de un enlace entrante y lo envía hacia otro enlace de salida. Con el fin de proteger el tráfico contra fallos de hardware o cortes de cables, debe instalarse una capacidad de respaldo de tal manera que el tráfico afectado sea desviado alrededor del nodo o enlace que falla. El número de nodos y enlaces debe guardar un equilibrio entre disponibilidad de servicio y costo económico; lo anterior debido a que una red con una cantidad considerable de nodos brindará un porcentaje alto de disponibilidad del servicio pero el costo se elevaría en términos de CAPEX¹³ y OPEX¹⁴.
- **Características de Enrutamiento y conmutación:** Los problemas de enrutamiento y conmutación se han tratado extensamente mediante modelos matemáticos y algoritmos durante los últimos veinte años resolviendo muchos problemas de diseño con los progresos en este campo. Por lo anterior, es un elemento a considerar dentro del modelo de migración, analizando la capacidad de cálculo de una ruta óptima en la red.
- **Capacidad por enlace:** Los vínculos entre nodos deben proporcionar la suficiente capacidad (ancho de banda reservada) para soportar todas las conexiones concurrentes que puedan existir en una hora pico. La capacidad se instala en pasos discretos, en el momento de la implementación de la red, o en la adaptación de una red existente en función de cada tecnología específica y limitaciones secundarias del medio de transmisión y de la tecnología misma.
- **Compatibilidad:** En el proceso de planeación surgen una variedad de restricciones de compatibilidad de hardware junto con las limitaciones de enrutamiento tiene que deben tenerse en cuenta.
- **Costo económico:** En una red de múltiples capas el costo distribuye en: i) Los dispositivos de conmutación y de conversión (OXC¹⁵, convertidores de longitud de onda, ADMs¹⁶), ii) Dispositivos

¹² WTDC (Conferencia Mundial para el Desarrollo de las Telecomunicaciones, *World Telecomm. Development Conference*)

¹³ CAPEX (Gastos de Capitalización, **Capital Expenditure**)

¹⁴ OPEX(Gastos Operacionales, **Operational Expenditure**)

¹⁵ OXC (Crosconector Óptico, **Optical Cross Connect**)

¹⁶ ADM (Multiplexor de Adición y Extracción, **Add Drop Multiplexer**)

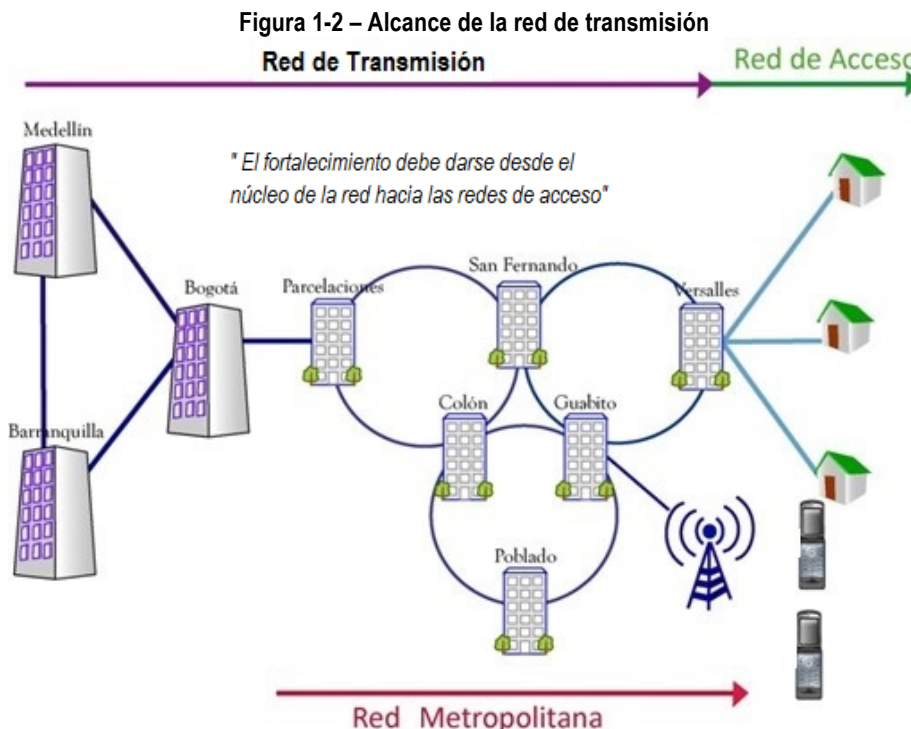
terminales (tarjetas de línea, puertos), iii) Equipos de transmisión (fibras, enlaces de radio, líneas alquiladas, y amplificadores ópticos).

Aunque la estructura exacta de costos depende de cada tecnología específica, el costo de los dispositivos se puede generalizar en los equipos en los nodos, los enlaces lógicos, y los enlaces físicos. El costo de un puerto se puede atribuir directamente a la finalización de la conexión lógica, bajo el criterio de que cada tarjeta de línea proporciona un único puerto, es decir, se termina un solo enlace lógico. En consecuencia, el costo de un enlace lógico depende de su capacidad de los puertos, la longitud geográfica y las características de los puertos en los extremos. Por otro lado, se debe considerar el costo de cada enlace físico que incluye la instalación (depende de la longitud) además de los mux/demux y los amplificadores, éstos amplificadores se pueden incluir dentro de la fibra correspondiente.

Finalmente, en cada nodo de la red se debe incluir el costo de los OXC y los convertidores de longitud de onda. El costo de los empalmes o de cables internos de conexión (pathcords) son insignificantes en comparación con el costo total de la red y se pueden omitir en un proceso de planificación estratégica.

1.1.3 La red de transmisión de telecomunicaciones

La red de transmisión se ubica en el núcleo de la red como se presenta en la figura 1.2, en ella se recoge todo el tráfico de todas las redes de acceso y lo “transporta” hacia su destino a través de nodos metropolitanos y de larga distancia; éstas redes se basan en tecnologías TDM (FDM, PDH,SDH) y PSC¹⁷ (Frame Relay, ATM¹⁸, MPLS¹⁹).



¹⁷ **PSC** (Capacidad de conmutación de paquetes, **Packet Switching Capability**)

¹⁸ **ATM** (Modo de Transferencia asíncrono, **Asynchronous Transfer Mode**)

¹⁹ **MPLS** (Conmutación de etiquetas Multiprotocolo, **Multiprotocol Label Switching**)

La red de acceso conecta a los usuarios finales a un operador de servicios a través de medios cableados e inalámbricos; en la última década ésta red ha cambiado desde el tradicional acceso conmutado hasta las actuales tecnologías (xDSL²⁰, HFC²¹, WiFi, UMTS²² y LTE²³), y buscan un punto de equilibrio en las redes completamente ópticas a través de FTTH²⁴ [13]. *Ese mejoramiento tecnológico debe darse desde el núcleo de la red (red de transmisión) hacia las redes de acceso, haciendo frente al crecimiento del tráfico que se da desde las premisas de usuario.*

¿Por qué los operadores locales no cambian de una vez todos los pares de cobre por medios más eficientes como la fibra óptica?, cuando se habla en términos de inversión la respuesta es lógica: mientras un central telefónica puede costar una unidad (en términos unidades de millones de dólares), el tendido de cable junto con toda la infraestructura relacionada tiene un costo de 3 unidades. En éste sentido desde los 80s se han hecho muchas investigaciones que permitan alargar la vida útil del cobre y así nacieron y se fortalecieron tecnologías multiservicio como RDSI²⁵ y xDSL. En tanto se acercan los límites de velocidades de éstas tecnologías lentamente avanza la fibra óptica desde el núcleo de la red hasta el interior de las residencias con tecnologías FTTx.

Las redes completamente ópticas (AON) son redes en las que la longitud de onda permanece en el dominio óptico sin realizar ninguna conversión al dominio eléctrico en una comunicación extremo a extremo. Aunque la AON incluye el segmento de la red de transmisión y el segmento de la red de acceso, como se muestra en la figura 1.2, para alcanzar una AON se debe tener una red de transmisión con equipos de altas prestaciones ópticas como multiplexores add-drop ópticos reconfigurables (ROADM²⁶) que permitan una comunicación extremo a extremo completamente óptica [20].

Por lo anterior, en este trabajo de investigación se entiende que para lograr una AON, es esencial que los nodos de la red de transmisión deben tener características de conmutación y de conversión de longitud de onda en el dominio óptico que permitan llevar servicios con las prestaciones de la fibra óptica hasta la premisa de usuario.

1.1.4 Estándares de migración de la red de transmisión

Las redes de transmisión aparecieron con el surgimiento y masificación de la telefonía básica por la necesidad de comunicar grandes volúmenes de tráfico entre centrales telefónicas. En este sentido, la economía de escala ha desempeñado un papel importante, pues implica el mismo costo instalar y mantener una troncal con un ancho de banda reducido entre dos oficinas de conmutación que realizar el mismo ejercicio con un gran ancho de banda. En consecuencia, las compañías elaboraron esquemas para multiplexar muchas comunicaciones en un mismo canal físico. Su evolución tardó varias décadas desde el tratamiento analógico hasta la actual digitación en la que se destacan la etapa de transmisión asíncrona y síncrona.

La digitalización de señales eléctricas permitió la multiplexación de señales en el tiempo y el surgimiento de las redes de transmisión TDM manteniendo una preponderancia en las redes telefónicas; en los 70's la jerarquía PDH con cable coaxial y el par trenzado como medio de transmisión y con diferencias en las velocidades de las jerarquías de multiplexación para Norte América, Japón y Europa que causaron problemas de interoperabilidad incrementando con equipamiento adicional para interconectar éstas redes. Fue necesario

²⁰ **xDSL** (Tecnología basada en Línea Digital de Abonado, **x Digital Subscriber Loop**)

²¹ **HFC** (Tecnología Híbrida Fibra-Coaxial, **Híbrid Fiber-Coaxial**)

²² **UMTS** (Sistema de Telecom. Móvil Universal, **Universal Mobile Telecommunications System**)

²³ **LTE** (Evolución a largo plazo, **Long Term Evolution**) – (Tecnología 4G)

²⁴ **FTTH** (Fibra Hasta la Casa, **Fiber to the Home**).

²⁵ **RDSI** (Red Digital de Servicios Integrados)

²⁶ **ROADM** (Multiplexor óptico de adición y extracción reconfigurable, **Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer**)

crear estándares globales para las redes de transmisión como soporte para el crecimiento del mercado global de las telecomunicaciones, reduciendo costos, facilitando la interoperabilidad [21].

En la década de los 80s, con la comercialización de la fibra óptica, se crearon muchas redes ópticas propietarias que dificultaron la interconexión entre ellas, por lo que se vio la necesidad de establecer un estándar óptico común. En 1985, Bellcore empezó a trabajar en el estándar llamado SONET²⁷. Más tarde el entonces CCITT²⁸ se unió al esfuerzo y produjo el estándar SDH²⁹ con el conjunto de recomendaciones CCITT (G.707 y G.708); estandarizando las velocidades de línea, esquemas de codificación, jerarquías binarias, tipos de elementos, arquitecturas y funcionalidades de operación y mantenimiento [22].

En la recomendación G.709 la UIT-T define un número de capas de la jerarquía OTN y como las señales individuales de los clientes no pueden ocupar toda una longitud de onda, se proporciona un mecanismo para la multiplexación por división de tiempo (TDM) de múltiples clientes en una longitud de onda. Los principales clientes de OTN incluyen SDH y Ethernet.

La evolución y características de las diferentes generaciones en redes de transporte que se han desarrollado se describen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 – Evolución de la red de transmisión (servicio portador)

Generación	Familia	Diseñada para	Tipo de Multiplex	Medio de Tx	Capacidad	Protocolos de InterRed
1ra	PDH	Voz	FDM/E/E/E	Coaxial, Radio	Mbps	NO
2da	SONET/SDH	Voz, Datos, video	TDM/O/E/O	Fibra, Coaxial, Radio	Gbps	IP,ATM
3ra	OTN	Voz, Datos, video, aplicaciones de tiempo real, QoS, VoD, VoIP.	WDM/O/O/O	Fibra, Radio	Tbps	IP, MPLS,GMPLS

Fuente: [23]

El papel desempeñado por la UIT - T ha sido fundamental en el desarrollo global del sector, mediante la estandarización de SONET/SDH logró establecer el orden sobre el caos generado con las redes PDH en los años 70's y 80's. SONET/SDH se instituyó como la columna vertebral de los operadores en los años 90's con interfaces ópticas que utilizaban al principio una única longitud de onda y con WDM permitió transmitir varios canales ópticos y estandarizar la arquitectura OTN³⁰ capaz de transporta señales Ethernet a 10 /40 /100 Gbps desde conmutadores y enrutadores IP basados en las recomendaciones G.872 y G.709. Debido a que éstas redes deben ofrecer un alto grado de calidad de servicio (QoS) y flexibilidad, en 2004 se crearon los estándares ASON/ASTN³¹ para automatizar la gestión de recursos, las conexiones de la red y mantener un alto grado de QoS. La arquitectura de estas redes se basa en los planos de gestión, control y transporte como muestra la figura 1.3, pero aún persiste un problema de estandarización en el plano de control [23].

El crecimiento de trafico de las redes de datos basadas en conmutación de paquetes a finales de los 90's y comienzos de los años 2000 originaron una alternativa de evolucionar las redes de transmisión utilizando

²⁷ SONET (Red óptica síncrona, **Synchronous Optical Network**)

²⁸ CCITT (Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía)

²⁹ SDH (Jerarquía digital síncrona, **Synchronous Digital Hierarchy**)

³⁰ OTN (Optical Transport Network, **Red de Transmisión Óptica**)

³¹ ASON IASTN (Redes Ópticas Conmutadas Automáticamente/ Redes de Transmisión Conmutadas Automáticamente)

tecnologías MPLS, MPAS y GMPLS, estableciendo un modelo estandarizado por la IETF para redes de transmisión que permiten simplificar la arquitectura del núcleo de la red a IP/DWDM [24].

Hoy en día, frente a estas dos opciones (ASON y GMPLS) los operadores deben tomar decisiones de convergencia tecnológica que ayude a reducir sus costos de operación (OPEX) y prescindir de los gastos innecesarios con equipos de red (CAPEX) cuyas inversiones puedan resultar riesgosas para la empresa. **La convergencia busca ofrecer el mayor número de servicios con la menor cantidad de infraestructura posible**, en algunos casos integrando servicios residenciales de banda ancha, servicios empresariales avanzados, telefonía y televisión IP entre otros; además de la migración de servicios TDM hacia tecnologías IP/Ethernet, buscando disminuir riesgos y convertir la base de los servicios en tecnologías IP sin realizar grandes inversiones.

1.1.5 Transporte TDM o basado en la conmutación de circuitos:

Las primeras generaciones de redes de transporte (PDH y SDH) se convirtieron en sinónimo de tecnologías de conmutación con técnicas de multiplexación por división de tiempo (TDM³²) que se basan en asignación, reserva y conmutación de ranuras de tiempo a lo largo de la ruta de conexión (conocidas igualmente por realizar conmutación de circuitos). Las velocidades están estandarizadas por la UIT (por ejemplo, E1, E2, STM1, etc.) y cada tributario lleva un tipo similar de tráfico resultando transparente para la red de transporte, lo que se conoce como un servicio TDM. En éste tipo de tráfico no existe ninguna diferenciación de los paquetes en una misma conexión y el ancho de banda se mantiene constante todo el tiempo independientemente de las actividades del cliente, de manera que si no se está utilizando, tampoco se puede compartir pues un puerto físico TDM no da esa posibilidad [24].

Los equipos modernos de transporte han evolucionado y combinan tecnologías ADM, DWDM, ROADM en un mismo nodo óptico pero aún carecen de la posibilidad de realizar multiplexación de paquetes y cuando se requiere de éste servicio las redes SDH lo montan previamente (antes de entrar a la red de transporte) utilizando la tecnología Ethernet RPR³³. sin embargo RPR no ha tenido éxito debido al costo y a la rigidez de la topología en anillo propiciando el nacimiento de las Plataformas de Transporte Óptico de Paquetes P- OTP³⁴ [25].

Las P-OTPs tienen como objetivo integrar la conmutación SDH, OTN, DWDM y ROADM en el mismo nodo de transporte. Estas tecnologías ya existen comercialmente y siguen evolucionando a la par con las OTNs; la diferencia entre las soluciones presentadas por los fabricantes está en las implementaciones de los conmutadores, pues algunos mantienen la lógica de SDH con circuitería que separa la ODU³⁵ del paquete, mientras otros fabrican dispositivos que funcionan igual independientemente del servicio. En cualquier caso, se mantienen los requerimientos y características de cada servicio realizando el procesamiento necesario de tramas SDH, paquetes y ODUs [26][27].

1.1.6 Transporte basado en la conmutación de paquetes

En la última década la naturaleza del tráfico de redes corporativas y en redes públicas ha cambiado como consecuencia derivada del crecimiento de internet y la migración de servicios tradicionales TDM a paquetes IP, lo que ha obligado a muchos operadores a cambiar la infraestructura de transporte a redes basadas en la conmutación de paquetes. Tradicionalmente la jerarquía digital Ethernet (EDH) había sido popular en las redes de área local y enlaces de acceso por sus características; pero gradualmente ha ido desplazando a las tecnologías de basadas en TDM impulsado por los siguientes factores:

³² **TDM** (Multiplex por División de Tiempo, **Time Division Multiplex**)

³³ **RPR** (Anillo flexible de paquetes, **Resilient Packet Ring**)

³⁴ **P-OTP**(Packet – Optical Transport Platform)

³⁵ **ODU** (Optical Data Unit)

- Menores costos por puerto comparado con tecnologías TDM.
- Flexibilidad en las velocidades de conexión (10Mbps, 100Mbps, 1Gbps, 10Gbps, 40Gbps y 100Gbps).
- Soporta enlaces de la misma velocidad de las redes TDM. (40Gbps y 100Gbps)³⁶. Que con características particulares se conocen como Metro Ethernet.

Las redes de transporte basadas en la conmutación de paquetes funcionan con base en la información contenida en el encabezado de los paquetes donde además se encuentra información del servicio que requiere el paquete y se conoce como CoS (Clase de servicio), permitiendo que cada paquete tenga un tratamiento diferencial sobre la misma conexión. El tratamiento de la CoS depende de la tecnología de conmutación de paquetes utilizada pero en general tienen como características:

- Flexibilidad de ancho de banda de cada conexión.
- Multiplexación estadística y no determinística como en TDM.
- Capacidad para proveer servicios diferenciales a cada paquete de la misma conexión.
- Capacidad de compartir puertos físicos sobre múltiples conexiones.

El incremento del tráfico de paquetes en las redes de transporte motivó su migración aunque los dispositivos de red de conmutación de paquetes son diferentes a los utilizados en redes TDM y el mantenimiento de la calidad del servicio (QoS) en redes de paquetes requieren de protocolos y medidas especiales por la naturaleza estadística del tráfico, pero aun así, existe un considerable ahorro en gastos de capital (CAPEX) y gastos de operación (OPEX) al utilizar tecnologías Metro Ethernet [28].

En los últimos años el enfoque del transporte de paquetes ha sido permitir servicios orientados a la conexión utilizando tecnologías de conmutación como Ethernet o MPLS, que mediante la ampliación de sus capacidades los organismos de estandarización están atendiendo las necesidades en el núcleo de la red. En resumen, las tecnologías de transporte se enfocan en:

- Prestar el servicio de transporte a múltiples tecnologías clientes.
- Permitir conexiones a gran escala
- Tener alto grado de flexibilidad y una rápida recuperación ante fallos en la red.
- Con capacidad de diagnóstico y notificación de fallos mediante OAM³⁷ en el plano de datos

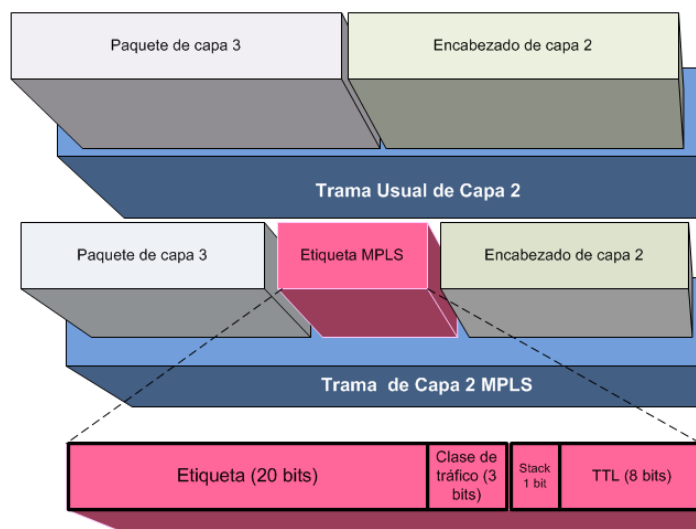
La tecnología MPLS se ha venido utilizando en redes para el transporte de paquetes IP y servicios de capa 2 del modelo OSI (ATM, Frame Relay y Point to Point Protocol) utilizando arquitecturas para la emulación de pseudo cableado (PWE³⁸) mediante los 32 bits que utilizan las etiquetas MPLS de los cuales: 20 bits identifican la etiqueta y 3 bits identifican la clase de servicio (CoS), donde se habilitan los servicios diferenciados dentro de la red MPLS. Ver Figura 1.3.

Figura 1-3 – Formato de trama MPLS

³⁶ Estándares IEEE 802.3ba; IEEE 802.3bg; IEEE 802.3bj.

³⁷ **OAM** (Operación, administración y Mantenimiento del servicio)

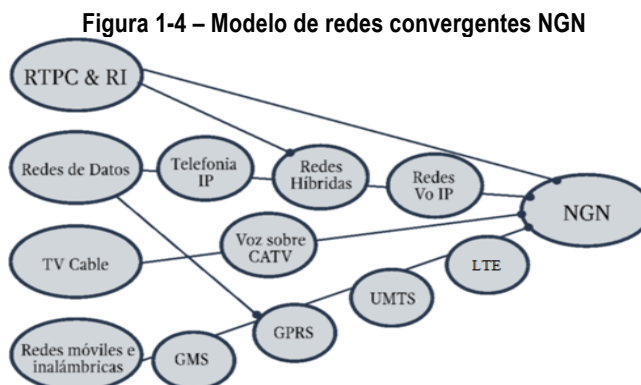
³⁸ **PWE** (Pseudo Wire Emulation).



1.2 REDES CONVERGENTES

El proceso de convergencia como se muestra en la figura 1.4 se refiere a diversos niveles (convergencia, integración e internetworking); aunque estos términos tienen mucho en común, son diferentes:

- En la convergencia se crea una arquitectura de referencia con base a la aproximación de distintas redes cuyos modelos de referencia tienen capas funcionalmente diferentes.
- En la integración una primera red con procesos basados en un modelo de referencia proporciona también servicios a una segunda red de manera que la segunda red está integrada en la arquitectura de referencia de la primera.
- La interconexión de redes (Internetworking) es la cooperación de diferentes arquitecturas de red sin la necesidad de cambiar sus infraestructuras [29].



Fuente: [29]

De acuerdo a los servicios prestados por un operador (voz y datos multimedia) La convergencia tiene requisitos de canal diferentes (velocidad de transmisión, retardo, tasa de errores, etc.) que determinan las diversas categorías del servicio y en cada una de ellas se deben garantizar condiciones mínimas de QoS³⁹.

³⁹ QoS (*calidad de servicio*, **Quality of Service**)

Las redes convergentes deben garantizar en una única arquitectura el sistema de señalización y el control en la capa de transporte de las diferentes redes que las componen; un caso típico e igualmente crítico es la interconexión de redes de conmutación de circuitos (RTPC⁴⁰, redes orientadas a la conexión) y las redes de conmutación de paquetes (Redes IP, No orientadas a la conexión).

La solución que planteó la industria es la integración en una red de servicios multimedia de banda ancha acondicionada para la transmisión de la información generada por todas las redes heredadas llamada red NGN⁴¹. En ésta figura 1.4 se presentan los caminos de convergencia de las redes heredadas y su continuidad en el desarrollo de la infraestructura, en cada paso el operador debe analizar los aspectos financieros y el retorno de la inversión. La NGN es la visión final de la red que cumple con todos los requisitos de una red convergente universal [30].

1.2.1 La red NGN

Existen varias definiciones para el término NGN, pero desde el punto de vista técnico, una red de próxima generación la define la UIT -T como:

"una red basada en paquetes capaz de proveer múltiples servicios de telecomunicaciones de banda ancha, con tecnologías de transporte habilitadas con QoS y con funciones relacionadas con los servicios independientes de las capas subyacentes a las tecnologías de transporte. Permiten el acceso sin restricciones a usuarios propios y a usuarios de otras redes y soporta movilidad generalizada para la prestación coherente y ubicua de servicios a los usuarios" [31].

Figura 1-5 – Características de la red NGN



De ésta definición se derivan las siguientes características (ver figura 1.5):

- Se refiere a la transmisión de datos en redes basadas en la transmisión de paquetes que utilizan el protocolo IP como estándar, de allí que en la literatura técnica se utilice mucho el término de “redes todo IP” (“all IP networks”) para referirse también a las redes NGN.
- Son redes que entregan servicios con tecnologías neutrales independientes de las tecnologías de las capas subyacentes (Fibra, cobre, coaxial, inalámbrica, entre otras) donde el transporte permite establecer características de diferenciación de la calidad de servicio (QoS) extremo a extremo.

⁴⁰RTPC (Red Telefónica Pública Conmutada)

⁴¹ NGN (Red de Próxima Generación, Next Generation Network)

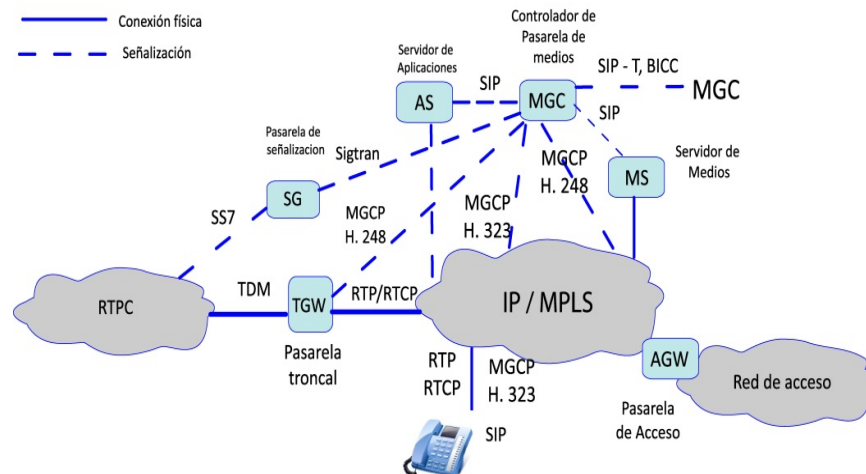
- El aprovisionamiento del servicio (asignación de recursos para prestar el servicio) está desacoplado del transporte de forma que el acceso no tiene restricciones para usuarios de diversos operadores (proveedores de servicios).
- Debe tener interfaces abiertas que permitan la interconexión con redes heredadas (TDM, CaTV, GSM, GPRS, entre otras).
- Los servicios convergentes se entregan sobre redes fijas y/o móviles que usuarios que pueden ser fijos, nómadas o móviles.

Concretamente, la NGN se puede ver como una “red de comunicaciones que permite acceso sin restricción a todos los productos y servicios independientemente del proveedor o de la conexión con que cuenta” [30] [73].

1.2.2 Arquitectura NGN

La arquitectura distribuida se basa en la velocidad de los distintos componentes físicos de la red NGN que se comunican los protocolos definidos y las APIs⁴². El MGC⁴³ (controlador de pasarela de medios) y el MG⁴⁴ (pasarela de medios) son componentes físicos que desempeñan el papel principal en la NGN. La pasarela de medios es responsable de la conversión de medios de comunicación en la interfaz entre dos tipos de redes (por ejemplo, formato de TDM en el lado de la red PSTN a la secuencia RTP en el lado de la red IP). Hay distintos tipos de pasarelas que soportan la interconexión de NGN y otras redes (Access AGW, Residencial RGW, Trunking TGW). Ver Figura 1.6.

Figura 1-6 – Ejemplo de aplicación de una arquitectura NGN



La MGC actúa como una entidad de control de la arquitectura física de la NGN que controla todas las MG y en general todas las arquitecturas distribuidas NGN. Además, la MGC maneja el proceso de llamada (ubicación de recursos, origen y destino de la comunicación, entre otros) utilizando el protocolo MGCP (MEGACO/H.248). El transporte multimedia se maneja con RTP⁴⁵ y su extensión RTCP⁴⁶. Para

⁴² **API** (Interface de programación de aplicaciones, **Application Programming Interface**)

⁴³ **MGC** (Controlador de pasarelas de medios, **Media Gateway Controller**)

⁴⁴ **MG** (Pasarela de medios, **Media Gateway**)

⁴⁵ **RTP**(Protocolo de transporte de tiempo real, **Real Time Transport Protocol**)

⁴⁶ **RTCP**(Protocolo de control de transporte de tiempo real, **Real Time Transport Control Protocol**)

el control de llamadas voz IP los protocolos H323 y SIP juegan un papel importante dentro de las plataformas NGN.

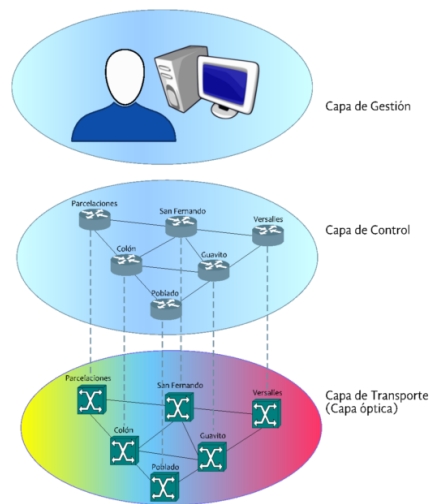
La pasarela de señalización SG es responsable de la interconexión entre la RTPC y la red IP/MPLS y realiza la conversión de señalización respectiva (SS7 en la red RTPC y sigtran en la red IP/MPLS) y transfiere los mensajes a la MGC.

Los servicios y sus características se implementan en el servidor de aplicaciones (AS) y la interconexión con la MGC se establece con una API o utilizando el protocolo SIP. La arquitectura de referencia NGN da flexibilidad, escalabilidad y crea un modelo de referencia abierto para plataformas de próxima generación.

1.3 ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA Y EL PLANO DE CONTROL

Las redes de transmisión TDM se operan mediante un sistema de gestión centralizado conocido como NMS⁴⁷ que les permite a los operadores llevar a cabo tareas de administración, mantenimiento, gestión de fallas, gestión de configuración y suministrar servicios desde un punto central. A pesar de ser un sistema ampliamente aceptado, tiene limitaciones significativas en el aprovisionamiento de servicios que pueden tomar periodos de horas hasta semanas por requerir numerosos procesos de configuración manual. Para resolver éste inconveniente de gestión centralizada, los organismos de estandarización (UIT e IETF) introdujeron el plano de control y con ello el actual modelo en capas de una red óptica [29].

Figura 1-7 – Arquitectura en capas de una red óptica basada en el plano de control



En la figura 1.7 se muestra la arquitectura de una red óptica que basa su funcionamiento en el plano de control, la funcionalidad de conmutación en la capa de transporte se controla desde instancias que contienen todos los dispositivos de red y relacionados con el plano de control.

1.3.1 Plano de Gestión:

“El plano de gestión realiza las funciones de gestión para el plano de transporte, el plano de control y el sistema en general. Asimismo, coordina todos los planos. Como se indica en las Rec. UIT-T M.3010 y G.7718, el plano

⁴⁷ NMS (Sistema de Gestión de Red, Network Management System)

de gestión realiza las funciones de gestión siguientes: gestión de la calidad de funcionamiento, gestión de averías, gestión de la configuración, gestión de contabilidad y gestión de la seguridad” [34].

1.3.2 Plano de Transporte:

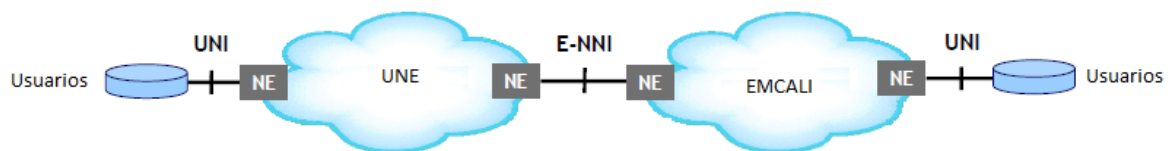
“Se encarga de la transferencia unidireccional o bidireccional de información de usuario entre dos puntos. Asimismo, también puede transferir información de control y de gestión de red. El plano de transporte está estratificado y es equivalente al término “red de transporte” definido en la Rec. UIT-T G.805”. [idem].

1.3.3 Plano de Control:

“El plano de control realiza el control de llamada y las funciones de control de conexión. A través de la señalización, el plano de control establece y libera conexiones y puede restaurar una conexión en caso de fallo. El plano de control también realiza otras funciones de apoyo a la llamada y control de conexión, tales como enrutamiento de difusión de información” [idem].

La configuración de la conexión se inicializa mediante puntos de referencia o interfaces estandarizadas UNI⁴⁸ y NNI⁴⁹ entre los dominios de red. Debido a que los dominios se establecen por políticas de los operadores, el dominio entre los puntos de referencia son puntos de servicio de marcación. Los dispositivos de usuario se puede conectar a la red de transmisión en el punto de referencia UNI, que representa un punto de atención al usuario, mientras que entre redes se encuentra el punto de referencia E-NNI, lo que representa un punto de demarcación de servicio multi-dominio de establecimiento de conexión. El punto de referencia dentro de un dominio es un I – NNI que representa un punto de conexión de soporte intra-dominio de establecimiento de conexión.

Figura 1-8 – Interfaces UNI y NNI en un contexto multi operador



La figura 1.8 muestra un caso típico de dos operadores con redes ópticas, para comunicarse con sus clientes establecen una conexión a través de la interfaz UNI, pero al requerir la conexión con otra red deben hacerlo a través de una interfaz NNI.

Las arquitecturas actuales de red de transmisión se clasifican en el modelo de superposición (overlay) y el modelo de pares (peer). Aunque ambos modelos tienen un núcleo óptico que proporciona servicios de longitud de onda a interfaces cliente en el borde de la red, son diferentes:

En la Figura 1.9a se presenta el modelo de superposición, que oculta los detalles internos del núcleo de la red y por lo tanto requiere de dos mecanismos independientes e interoperables para el control, aprovisionamiento y gestión de servicios ópticos. Un mecanismo opera en el núcleo de la red y el otro actúa como interfaz entre el núcleo y los componentes de borde que soportan rutas ópticas con señalización dinámica sin ver el interior de la topología del núcleo. El modelo de superposición impone el control entre el núcleo y el borde por ocultar eficazmente los contenidos dentro del núcleo de la red.

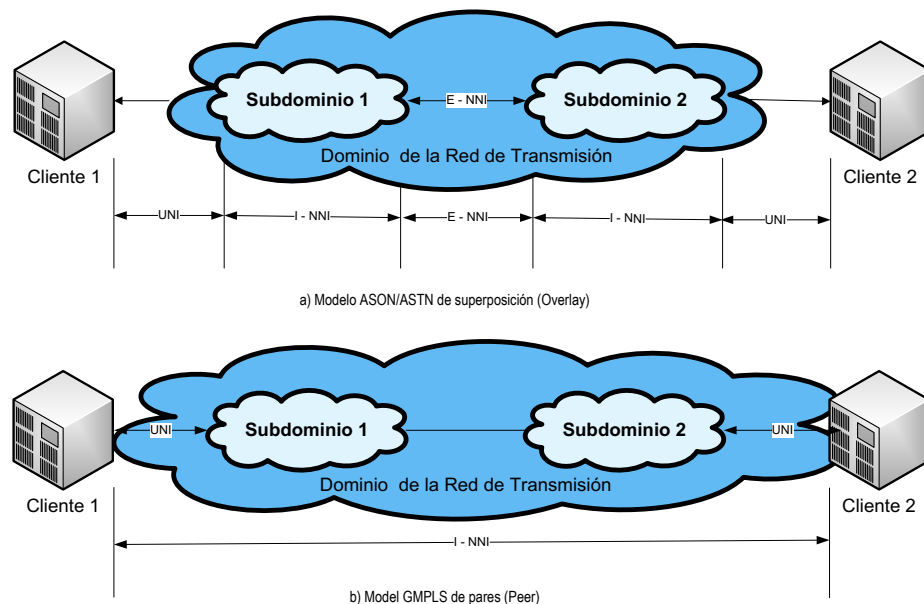
⁴⁸ UNI (Interface Red a Usuario, User to Network Interface)

⁴⁹ NNI (Interface Red a Red, Network to Network Interface)

En la Figura 1.9b se muestra el modelo de pares, que considera la red como un único dominio, la apertura del núcleo de la red a los componentes de borde forma una topología interna visible capaz de participar en el aprovisionamiento y las decisiones de enrutamiento. Si bien esto tiene la ventaja de proporcionar un plano de control unificado, hay algunas consideraciones importantes:

- La disponibilidad de información topológica a todos los elementos que intervienen hace que este modelo sea menos seguro.
- Se requieren nuevos mecanismos de control estandarizados ya que los disponibles son propietarios.
- Se necesitan opciones para la protección y la restauración del tráfico.

Figura 1-9– Arquitectura de los modelos ASON y GMPLS



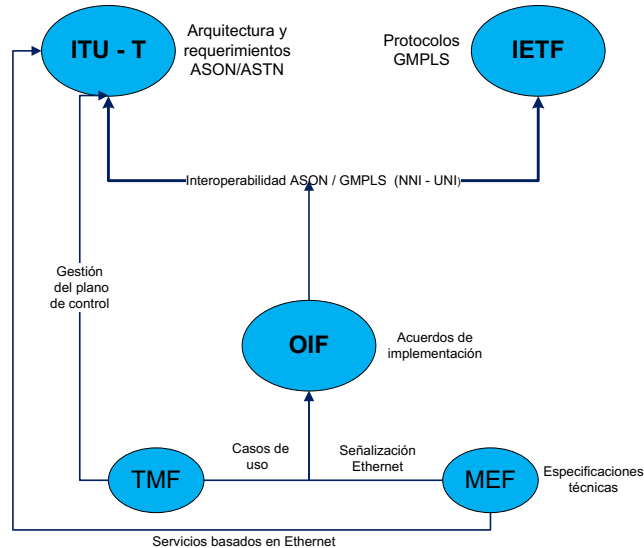
Existe otro modelo, conocido como el modelo híbrido, que combina los otros dos modelos, tomando ventajas de ambos modelos y proporcionando más flexibilidad. En este modelo, algunos componentes de borde sirven como pares a la red central y comparten la misma instancia de un mecanismo de control común con la red central a través de la interfaz NNI.

1.4 MODELOS NORMALIZADOS DEL PLANO DE CONTROL

El plano de control debe ofrecer aprovisionamiento dinámico y una supervisión del rendimiento preciso, además de la restauración eficiente de la red en el dominio óptico. Para la implementación del plano de control se requiere del intercambio de información entre las entidades de control y gestión que participan en el proceso de control. Para lograrlo, debe existir una rápida señalización entre nodos de conmutación para intercambiar y actualizar información de control necesaria para la gestión de las conexiones y otras funciones de control. Esta señalización puede implementarse en banda o fuera de banda. Sin embargo, existen razones de peso para disociar los canales de control de los de datos, por ejemplo, el tráfico de datos debe ser transparente en el dominio óptico para aumentar la eficiencia de la red, o que en un momento de congestión no haya ningún canal con capacidad disponible para el control [35] [74].

En la última década el plano de control óptico ha recibido mucha atención y se creó un conjunto detallado de normas UIT –T, IETF y OIF [36]. Sin embargo, hay varios elementos de seguridad y gestión de red están aún sin estandarizar (Ver figura 1.10).

Figura 1-10 – Relación Organismos de estandarización



En el Anexo A se describen las características del modelo de migración ASON/ASTN de la UIT y en el Anexo B se describen las características del modelo de migración GMPLS.

1.5 IMPACTO DEL PROYECTO

Como se presenta en éste capítulo, las redes de telecomunicaciones han tenido importantes cambios en las últimas décadas impulsando nuevos servicios en la medida en que las capacidades de red aumentan [1]. Con un origen en servicios basados en la conmutación de circuitos y ahora con la conmutación de paquetes y la conmutación de longitudes de onda el mercado se centra en proporcionar servicios de mayor capacidad de manera rentable [4][22].

Es claro que el crecimiento del tráfico constante va a continuar con una mayor diversidad de servicios de distribución de contenido, video de alta definición, video 4K y los modelos económicos creados alrededor de la banda ancha. Las redes de telecomunicaciones se convirtieron en tuberías estáticas de gran capacidad que deben dinamizarse rápidamente o dejaran de satisfacer las necesidades de la capa de aplicación. Este escenario exige nuevas arquitecturas de red y modelos de migración que proporcionen buen costo, escalabilidad y ventajas operativas.

Por otro lado, la construcción de una infraestructura que permita accesos de banda ancha con un alto porcentaje de penetración es un importante motor de la economía digital, al igual que la modernización de una amplia gama de industrias como la medicina, la educación, el entretenimiento y la agricultura. La construcción de redes de alta velocidad cableadas e inalámbricas será el centro de una economía digital que lograra la competitividad a largo plazo; creando empleos, mejorando los salarios y compitiendo en una economía global de la información [37].

2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

En este capítulo se propone paso a paso una metodología genérica basada en el “manual de referencia de la UIT para la Planificación de redes de telecomunicaciones en la evolución de arquitecturas” [5], en “Análisis de costos de migración para mejorar las redes WDM” [38] y en [10][11][12][14][16][18][19]. Ésta metodología de evaluación brinda un primer acercamiento basado en la identificación del camino óptimo como alternativa de menor costo frente a los beneficios obtenidos por la compañía que permitan satisfacer la calidad de servicio de las aplicaciones masivas de un mercado en crecimiento.

La definición de un camino de migración depende de las necesidades de tráfico proyectadas y de una gama de factores que deben ser considerados. La solución debe ser de menor costo (CAPEX), fácil de mantener (OPEX) y adaptada al entorno local, es decir, eficiente, rentable y de rápida implementación.

2.1 EL MODELO DE MIGRACIÓN

El proceso de migración de una red es un tema crítico para los operadores en una época de globalización, digitalización, automatización e intensa competencia, por lo que se requieren herramientas y modelos flexibles con directrices prácticas, para tomar la decisión más acertada (óptima). En éste sentido, este trabajo busca ser un modelo que sirva como referencia a las posibilidades que tiene un operador en migrar sus redes hacia una red completamente óptica.

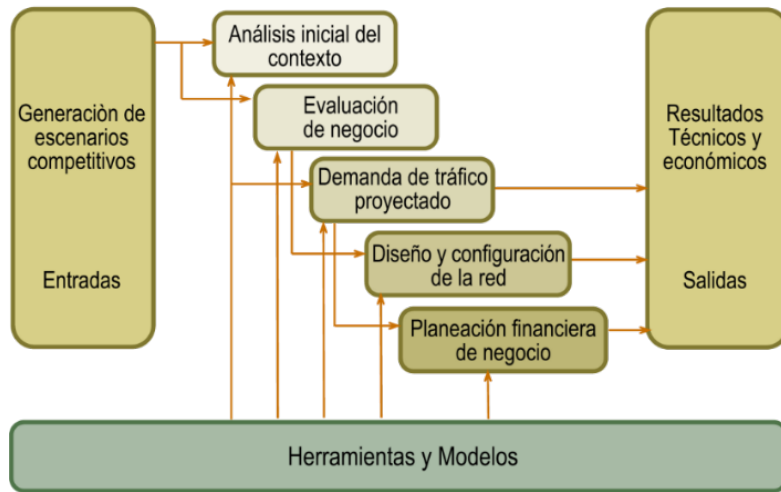
2.1.1 Generalidades del modelo

Según la estructura presentada en la Figura 2.1, Cualquier escenario debe iniciar en premisas basadas en la situación del mercado competitivo real, que permita tener un diseño coherente con la misión del operador, que sea factible tecnológica y económicamente. En éste proceso iterativo se deben seleccionar soluciones factibles y desechar las no realistas. Al final del análisis, se obtiene un plan de negocio más detallado junto con los planes de inversión.

En [5] se recomienda realizar el análisis iterativo de las etapas presentadas en la figura 2.1 con herramientas y modelos que permitan la evaluación del contexto, el modelo de negocio, el tráfico proyectado, la arquitectura de la red, configuración de la red y planeación financiera del negocio. Según los posibles escenarios competitivos (entradas), se debe determinar cuáles son factibles desde el punto de vista técnico y económico (salidas).

Figura 2-1 – Planificación Iterativa para escenarios competitivos

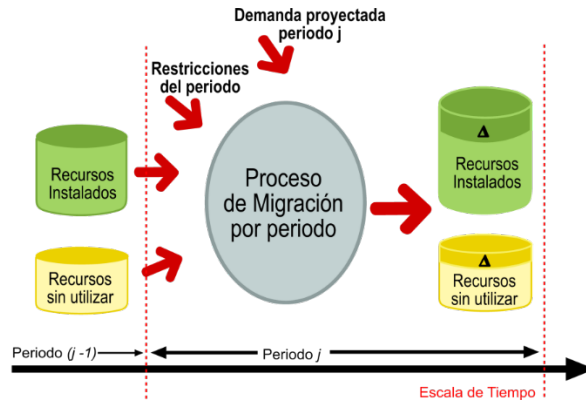
Planificación Iterativa para escenarios competitivos



Fuente: [5]

El objetivo en cada etapa o periodo de migración es determinar la cantidad y el costo de los recursos para cumplir con los incrementos pronosticados cómo se muestra en la figura 2.2. El proceso de migración se puede dividir en sub-problemas a solucionar en uno o varios periodos con el fin de amortiguar el costo de inversión. Cada periodo de migración requiere información sobre el monto total de los recursos de la tecnología a adquirir en el **periodo t** y dispuestos en el **periodo j**. Las nuevas adquisiciones no pueden estar disponibles desde el momento de la compra, ya que estos recursos son las entradas en el periodo siguiente.

Figura 2-2 – Proceso de migración por periodo



Fuente: [5]

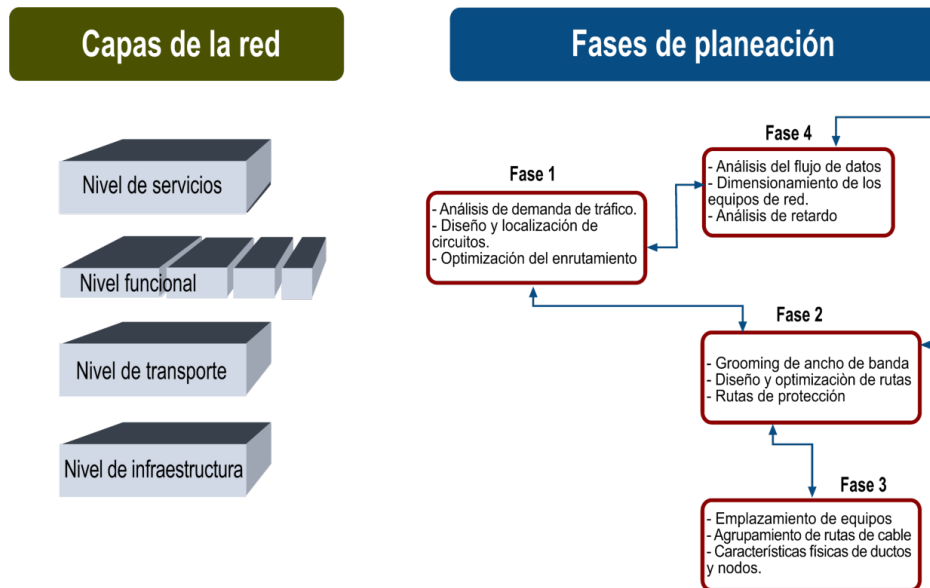
Igualmente, es necesario tener en cuenta los diferentes costos que intervienen en la solución proyectada: el porcentaje de utilización de los equipos instalados y los equipos que no se están utilizando, pero adquiridos por aprovechamiento de economías de escala.

Cada paso del proceso requiere tomar una decisión entre las alternativas disponibles, cada decisión afecta a la decisión de futuro y la solución global. A medida que el árbol de soluciones crece, rápidamente crece número de posibles ramas. Una estrategia típica para podar el árbol de decisiones es la consideración de las

restricciones tecno - económicas y la reducción del número de intervalos de tiempo. Como resultado de este proceso, se obtienen soluciones óptimas en cada periodo o etapa de migración.

Como se muestra en la figura 2.3, la estructura de capas es inherente a la complejidad y a las tecnologías relacionadas en una red, lo que implica que la migración de la red se debe realizar de acuerdo a cada capa, cada segmento y cada tecnología.

Figura 2-3 – Fases de planeación por capas



Fuente: [5]

El proceso de migración inicia con la fase de proyección de servicios y la demanda de tráfico; en una segunda fase se considera el diseño de las funciones involucradas y tecnologías como: conmutación, enrutamiento, móvil, datos, etc - los resultados son insumos para las capas de transmisión y control. En una tercera fase se realiza el diseño y la planificación de la transmisión que son las entradas de la capa física; finalmente una cuarta fase involucra elementos físicos como ductos, cables, FO, etc.

- La estructura en capas adopta la relación cliente-servidor (la capa superior se apoya en la capa inferior y provee recursos a la capa superior).
- Cada segmento corresponde a la comunicación extremo a extremo desde las instalaciones del cliente (red de acceso) hasta cada enlace sobre los nodos de la red de transporte.
- Cada tecnología incluye la FO, WDM, PDH, SDH, PSTN, ATM, IP, NGN, GSM, UMTS, HSDPA, LTE, etc.

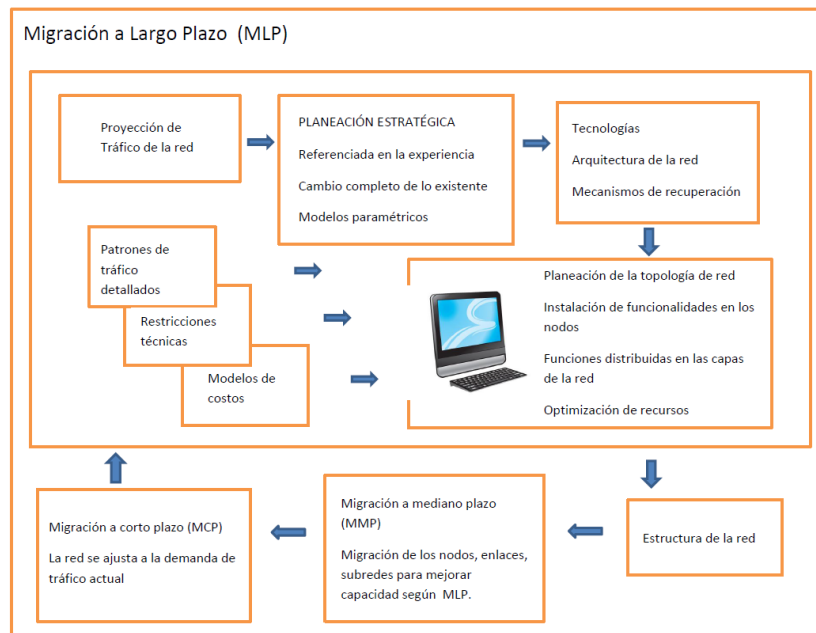
Los parámetros de calidad de servicio miden la satisfacción del cliente y determina la calidad de servicio percibida por el usuario. Estos parámetros sirven a los proveedores para gestionar y mejorar la forma en que ofrecen sus servicios, y los clientes también pueden asegurarse de que están recibiendo el nivel de calidad contratado, según los acuerdos de nivel de servicio (ANS), donde se determina el costo por el servicio prestado y su grado de calidad [39].

Estos parámetros se obtienen a partir de métodos de medición objetiva y subjetiva. La medición objetiva se obtiene a partir de la medición de variables físicas en circuitos, redes y señales que se utilizan como indicadores internos para la caracterización de la calidad del servicio. La medición subjetiva se obtiene mediante el diseño de encuestas de opinión de los clientes y es un indicador externo, que miden de forma directa de las características en una llamada, el ruido, el eco, etc. Igualmente, las métricas de QoS se obtienen mediante parámetros primarios como cálculo estadístico, opinión basada en los parámetros medidos y los factores de degradación del equipo, etc.[39]

El proceso de migración debe suplir **la demanda de tráfico proyectada**, teniendo en cuenta los posibles requisitos y limitaciones. Como se esquematiza en el la figura 2.4, dependiendo de la escala de tiempo del caso de migración se pueden llevar a cabo diferentes actividades [5] [40]:

- **Migración a largo plazo (MLP):** Se definen y dimensionan las partes de la red que se caracterizan por una larga vida útil y grandes inversiones para su implementación. Este proceso debe incluir una planeación estratégica que identifique varias opciones tecnológicas y arquitecturas de red; incluye también una planeación fundamental que utiliza los resultados de la planeación estratégica para definir la estructura de la red (nodos, tipo de fibra, topología y funciones entre capas).
- **Migración a Mediano Plazo (MMP):** Parte del análisis del comportamiento de los nodos, enlaces y subredes definidas en el MLP; junto con la lista de acciones de migración, procedimientos involucrados en el proceso de migración para garantizar la convergencia según lo que se establezca en los planes a largo plazo. Aquí se debe tener como objetivo la mejora de la capacidad de los nodos y enlaces de la red según los resultados de MLP.
- **Migración a Corto Plazo (MCP):** Se determinan las rutas y los sistemas de telecomunicaciones que soporten la demanda actual. Es decir, la red se debe ajustar para satisfacer la demanda actual con la capacidad ya instalada sin inversiones adicionales de capital.

Figura 2-4– Escenario de migración a largo, mediano y corto plazo



Fuente: [5]

2.1.2 Análisis Inicial del Contexto

Las redes actuales no pueden sostenerse en el mercado con servicios homogéneos como la voz o como ISP; los operadores no pueden permitir que sus redes se conviertan en tuberías estáticas de gran capacidad pues no podrán satisfacer las necesidades de los usuarios y rápidamente saldrán del mercado. La evolución se centra en proporcionar servicios de contenido de manera rentable y para alcanzar ese punto las redes de transmisión deben contar con las suficientes longitudes de onda con altas velocidades de línea, con conmutación de granularidad gruesa y una capa óptica configurable que fomente el crecimiento de servicios dinámicos; es decir, con tecnologías que proporcionen adquisición al mejor costo, buena escalabilidad y ventajas operativas [1].

El contexto del sector tiene como reto principal la creación rápida de nuevos servicios de telecomunicaciones de valor agregado con bajo costo de desarrollo y pequeños tiempos de salida al mercado. Los expertos hablan de una reducción de 1 o 2 órdenes de magnitud con respecto al escenario de hace décadas que han reducido el proceso a meses, semanas, días y en algunos casos incluso horas. Desde luego éste imperativo empresarial se basa en que la infraestructura, el transporte, la conmutación y la funcionalidad de la red permiten la rápida creación y despliegue de servicios de valor agregado.

En los modelos tradicionales el ciclo de vida de un servicio (análisis de requisitos de análisis, diseño, desarrollo, prueba y despliegue) implica recursos masivos y en muchos casos con poca reutilización. En los nuevos modelos, en cambio, se han desarrollado herramientas que aceleran el ciclo de vida como BPEL o SCXML; herramientas que reducen el costo de diseño y desarrollo de servicios, aunque todavía dependen de la asistencia de especialistas en tecnologías de la información (TI). Este nuevo contexto para la rápida creación de servicios se basa en plantillas de servicio que ofrecen granularidad, reutilización de servicios y reducen los tiempos de comercialización reduciendo notablemente los costos.

Análisis y previsión de nuevos servicios

El ciclo de vida en la creación de servicios consta de 5 fases: concepción, definición, diseño, desarrollo e implementación y prueba, una vez agotadas estas cinco fases se procede al despliegue del mismo. Existen tecnologías que aceleran estos pasos del ciclo de vida de los servicios, tales como BPEL⁵⁰ o SCXML⁵¹. Estas técnicas y herramientas se utilizan para reducir costos en las fases de diseño y desarrollo, pero el procedimiento de creación todavía depende de la asistencia de especialistas en TI [41].

Aunque está fuera del alcance del proyecto, la UIT-D define en el manual de referencia para la planeación de redes que para la concepción y definición de un nuevo servicio es necesario realizar un análisis de los siguientes aspectos:

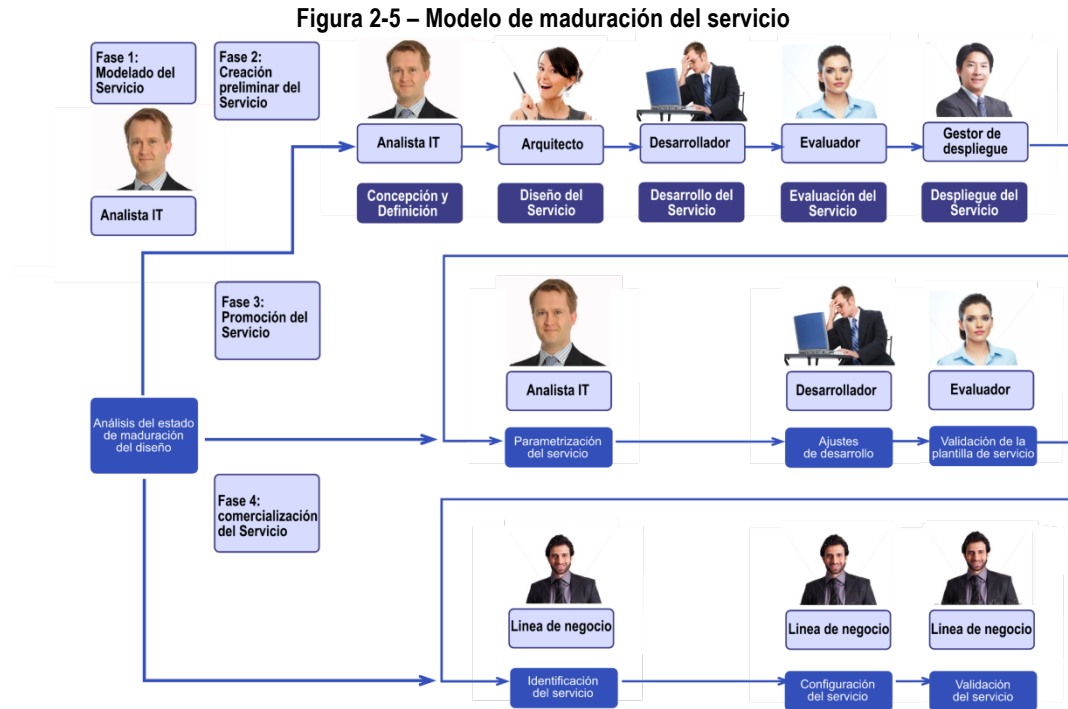
- Características de cliente potencial:
 - a. Estrato socio-económico,
 - b. Tipo de economía de la región.
 - c. Tipología residencial alta, media y baja.
 - d. Nivel de consumo según estrato.
- Características de los servicios:
 - a. Requisitos de servicio
 - b. Proveedores de contenido
 - c. Niveles de QoS en términos de demora, jitter, pérdida, fiabilidad, disponibilidad.
 - d. Seguridad

⁵⁰ BPEL: Business Process Execution Language.

⁵¹ SCXML: State Chart Extensible Markup Language

e. Compatibilidad

En coherencia con lo anterior, en [41] se plantea el modelo de maduración del servicio mostrado en la figura 2.5. La creación de un nuevo servicio de valor agregado se puede dividir en 4 fases: Análisis y modelado del Servicio, creación preliminar del servicio, promoción del servicio y comercialización del servicio.



Fuente: [41]

El proceso de análisis y modelado del servicio debe estar a cargo de una analista de IT que considere y tome decisiones sobre la madurez del servicio en función de factores tales como la regulación gubernamental, el número potencial de suscriptores según estrato, los servicios derivados, proceso de gestión de negocio, la aceptación del usuario, la madurez tecnológica, la estabilidad, la escalabilidad y la gobernabilidad.

- Para la creación de nuevos servicios se parte de la experiencia de los servicios existentes. El analista inicia con la creación de un boceto para el modelado del servicio y toma la decisión de continuar hacia la siguiente fase. Las herramientas utilizadas en esta fase incluyen Telecom Service Maturity Model (T-SMM) y software de ayuda relacionado.
- En la segunda fase (creación del servicio), se aplica el modelo tradicional del ciclo de vida del servicio con los mismos roles y herramientas del método tradicional.
- La fase tres (promoción del servicio) es clave en el ciclo de vida, pues no se genera ningún servicio ejecutable, sino una plantilla de servicio abstraído de servicios ya concluidos para una futura reutilización. En esta fase, el analista de IT primero parametriza las características del servicio de acuerdo a la fase 1 (Modelado del Servicio), después los desarrolladores realizan la implementación para crear una plantilla de servicio. Finalmente, los evaluadores de IT validan la plantilla con el escenario de servicios existentes.
- La fase cuatro (comercialización del servicio) es una fase productiva y eficiente que puede repetirse continuamente. A diferencia de las otras tres fases, esta fase está totalmente a cargo de la línea de negocios.

Previsión de servicios:

Existen ejemplos históricos como RDSI, teletex, telefax, telex que muestran que la previsión de un servicio puede fallar debido a factores externos, lo cual indica que no todas las veces es posible predecir el éxito de un servicio con alto grado de confianza [42]. Frente a estos ejemplos, la industria ha mejorado las prácticas de predicción mediante el modelado y la incorporación de los posibles efectos en la red con distribuciones de probabilidad, extrapolaciones y patrones de tendencia como lo muestran los siguientes métodos de previsión [5]:

- Método de análisis de tendencias en el tiempo – Se asume que el desarrollo seguirá una curva ajustada a los datos históricos existentes.
- Método de Relación explícita entre la demanda y factores determinantes – Trabaja bajo el supuesto de que se hará lo mismo en el futuro.
- Método de Comparación tecnológica de las áreas de la red - se supone que el área menos desarrollada alcanzará el nivel de la más desarrollada.
- Método de juicio personal (subjetiva) – Se prevé que la red se comporte de acuerdo a los conocimientos y la experiencia en proyectos anteriores.

Para el proyecto, se toma como referencia el modelo logístico de predicción de tendencias temporales. El desarrollo del modelo sigue una curva inicialmente creciente, que pasa por un punto de inflexión y, finalmente se ralentiza aproximándose a una asíntota, el "nivel de saturación", o de "máxima densidad".

El modelo se basa en la función logística o curva S, que se utiliza en modelos de crecimiento de poblaciones y difusión en redes sociales:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

De acuerdo a la UIT, el modelo se ajusta bien de acuerdo a la densidad de clientes a partir en un lugar poblado, etc. La expresión matemática para el modelo logístico función YV y cálculo de la densidad correspondiente DV es:

$$D_v = Y_v D_{MAX_v} \quad (2)$$
$$Y_v = \frac{1}{(1 + e^{-C_v(T-T_0)})^{1/M_v}} \quad (3)$$

Y_v = Comportamiento de la función

D_{MAX_v} = Límite de saturación de la densidad, correspondiente a la demanda total

D_v = Densidad, correspondiente a la demanda total

$Y_v(0)$ = El valor de Yv en el momento inicial del análisis

$$Y_v(0) = \frac{N_v(0) + L_v(0)}{P_v(0)} \Big/ D_{MAX_v} \quad (4)$$

$N_v(0)$ = Población total inicial

$L_v(0)$ = Tipo de zona inicial (1 ... 4)

$P_v(0)$ = Tipo socio económico inicial

$C_v(0)$ = Número de subscriptores iniciales

M_v = Coeficiente de corrección

$$M_v = -\frac{\ln 2}{\ln Y_v(0)} \quad (5)$$

Para definir la función es suficiente conocer dos puntos de la curva y el valor de saturación. Los dos puntos podrían ser el número actual de clientes y el número de clientes en algún momento pasado.

2.1.3 Evaluación de negocio

El número de escenarios y la alta interrelación entre las decisiones en cada nivel de la organización: financiera, técnica y operativa requiere implementar cuidadosamente un proceso integrado para la información en cada etapa que se resume en la Figura 2.6.

Figura 2-6 – Diagrama de iteración para integrar todos los planes



Fuente: [5]

Los grandes rangos de variación en muchos casos y la necesidad de optimizar las sinergias en la competencia obligan a intercambiar los resultados entre los procesos y tienen un sistema de información en toda la organización basada en los sistemas de soporte operacional (OSS) para facilitar la coherencia y la velocidad de aplicación.

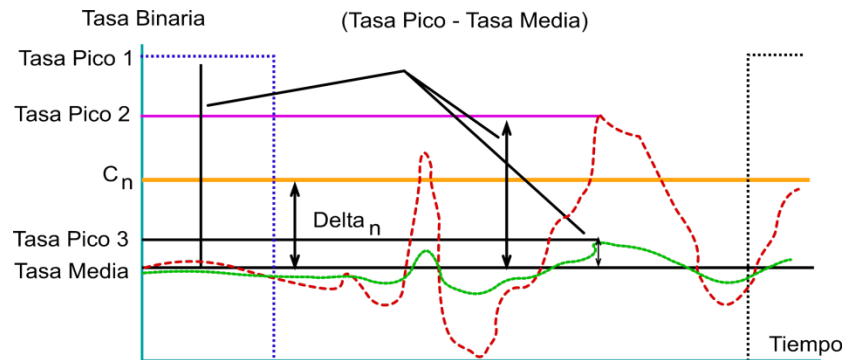
2.1.4 Demanda de tráfico proyectado

Hasta hace unos años, las características del tráfico se expresaba en términos de llamadas generadas por los usuarios, pero con las redes de datos, se basan en otros parámetros como: iniciación de sesión, transferencia de información, solicitudes generadas desde la interfaz usuario, paquetes gestionados por un recurso a través de la red, Mbps transportados a través de un enlace, etc. Por lo anterior, dentro del proceso de migración de una red es necesario realizar la caracterización del tráfico para determinar las posibles opciones que permitan definir un diseño óptimo y así mismo el mejor camino de migración.

La gestión de interconexión de redes es un área significativa desde la perspectiva técnica como financiera para garantizar que los servicios se proporcionen fuera de las fronteras de la red y para tener la posibilidad de vender servicios a otros operadores.

- **Unidades de tráfico para la caracterización de servicio (Velocidad - tasa media, tasa máxima):** La velocidad binaria es el número de bits que se producen por unidad de tiempo, y se expresan en bits por segundo (bps), en la figura 2.7. se muestran tres casos con diferentes variaciones de la tasa de bits.

Figura 2-7 – Tipos de tasas binarias



Fuente: [5]

La tasa media para los 3 casos es la misma, pero las tasas pico media y máxima son significativamente diferentes. La tasa binaria efectiva corresponde a C_n (C_1 , C_2 , C_3), definida como la tasa media más un delta, en función de (Tasas pico y media), H (Hurst) y el tamaño de búfer.

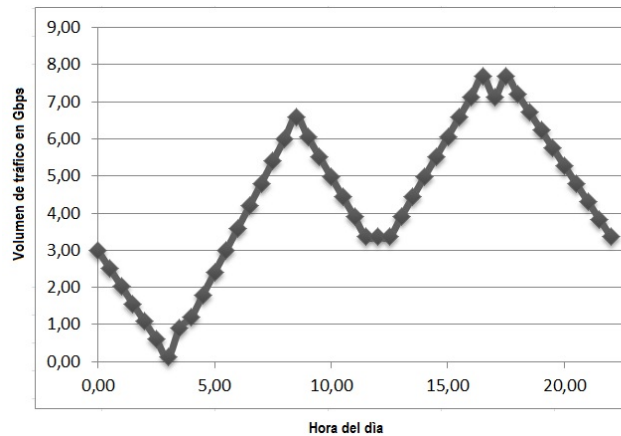
- **Determinación del tráfico total y por servicio:** El tráfico total de originado y terminado es fácil de calcular y prever por ser proporcional al número de clientes y a la tasa de tráfico promedio por suscriptor; por lo general el operador mide conoce. Pero, un estudio de tráfico más preciso debe incluir también el tráfico por cada servicio utilizado por cada suscriptor o por un grupo de clientes. Por ejemplo, para el servicio de VoIP, se debe especificar la tasa binaria requerida para crear una matriz de VoIP con el número de abonados que utilizan este servicio de forma simultánea y establecer el grado de servicio.
- **Período de referencia para el dimensionamiento (Hora pico):** El mayor tráfico no se produce a la misma hora todos los días, por lo tanto se define el concepto TCBH⁵², como los 60 minutos con el más alto tráfico. Puede ocurrir que algunos días el tráfico durante la hora pico sea mayor que el TCBH, pero al obtener la media de varios días se acerca más al valor pico.

También se debe diferenciar si la hora pico se da en todo el sistema de telecomunicaciones, o únicamente en algunos nodos o enlaces. Algunos enlaces pueden tener una hora pico diferente a la hora pico del resto del sistema. En la práctica, es significativo tener una hora pico bien definida para realizar las mediciones de tráfico, dimensionamiento, y otros aspectos.

- **Perfiles de tráfico:** El tráfico varía en función de la actividad en la sociedad. Una investigación de las variaciones de tráfico muestra que es parte de una naturaleza estocástica en parte, de naturaleza determinista.

Figura 2-8 – Perfil de tráfico típico en una red en 24 horas

⁵² TCBH (tiempo consistente por hora de ocupación, *time consistent busy hour*)



Fuente: [5]

Durante un período de 24 horas el tráfico normalmente se ve como se muestra en la figura 2.8. El primer pico es causado por los suscriptores en el comienzo de las horas de trabajo en la mañana. Alrededor de 12:00 es el almuerzo, y por la tarde hay actividad de nuevo. Alrededor de las 16 horas hay un nuevo pico y se genera una reducción después de las 20:00. El tamaño de los picos depende si el intercambio se encuentra en una zona residencial o en un área comercial.

- **Modelos de tráfico:** Mediante la aplicación de modelos matemáticos basados en la teoría de tráfico, se expresa una relación entre capacidad de red, demanda de servicio y nivel de desempeño. De manera, que ante un modelo de tráfico particular, el desempeño de la red se puede predecir como punto de partida para el diseño de mecanismos de control de admisión, de flujo, de congestión, de memoria y la asignación de recursos como el ancho de banda el enrutamiento, etc [43].

En las últimas décadas el modelamiento de tráfico se ha convertido en un área de investigación para el desarrollo de modelos que predigan el impacto del tráfico sobre los recursos de la red, evaluando la QoS ofrecida, como referencia se enuncian los siguientes modelos:

- Modelos de Tráfico no Correlacionados (se aplican exitosamente en el análisis y control de redes telefónicas y redes teleinformáticas, pues los tráficos de voz y datos interactivos se ajustan con suficiente exactitud a las suposiciones básicas que generan estos modelos [44])
 - Modelos de Tráfico sin Memoria
 - Modelos de Renovación
- Modelos de Tráfico Correlacionado con Dependencia de Rango Corto (Se aplican al análisis de desempeño en los nodos y conducen a procedimientos apropiados de asignación de recursos, control de congestión, etc. Con los modelos Markovianamente modulados se puede encontrar un comportamiento diferente que corresponde mucho mejor con la realidad.)
 - Tráfico Markovianamente Modulado
 - Procesos tipo fase
 - Proceso de Llegadas Markovianas
- Modelos de Tráfico Correlacionado con Dependencia de Rango Largo (Para representar el tráfico de una fuente de video MPEG2 incluyendo las principales medidas de desempeño de un conmutador que acepta este tipo de tráfico)
 - Movimiento Browniano Fraccional
 - Modelos FARIMA
 - Modelos M/G/∞
 - Modelos Wavelet Multifractales

- Modelos de Mapas Caóticos

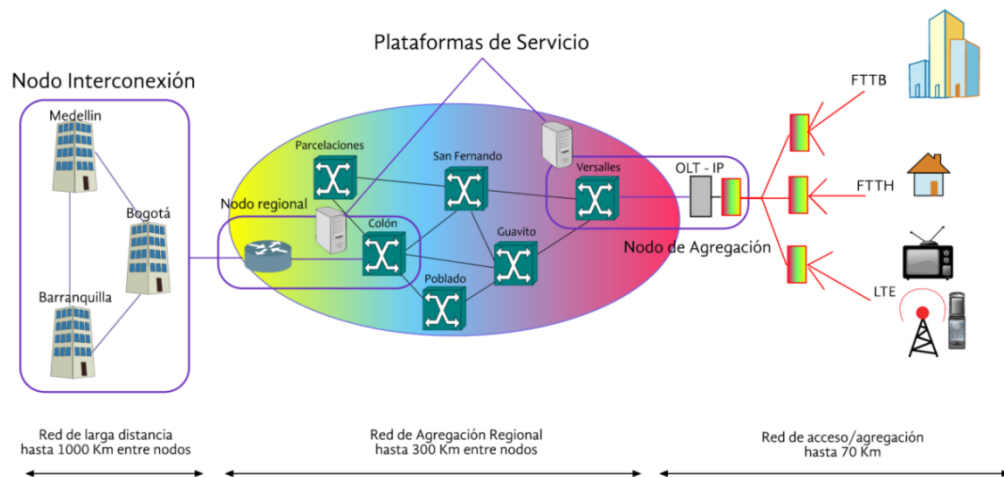
2.1.5 Consideraciones para el diseño y configuración de la red

Como se presentó en el primer capítulo de este documento, las redes actuales son muy heterogéneas, requiriendo técnicas de diseño y configuración que garanticen calidad de servicio, mantenimiento, operación, administración y previsión con bajos costos. Una visión general del diseño de una red requiere de modelos y métodos matemáticos y teorías relacionadas con la optimización del manejo del tráfico y del crecimiento de la red como los presentados en [5][43]. Esos modelos matemáticos están orientados a resolver problemas relacionados con la teoría de redes con flujo multi-commodity (theory of multi-commodity flow networks). Modelos matemáticos útiles cuya profundización se sale de la frontera éste trabajo de investigación.

Se debe conocer el tráfico proyectado para definir el diseño y la configuración que tendrá la red. Los estudios y modelos de predicción indican que el crecimiento de tráfico en las redes de acceso genera un flujo con crecimiento exponencial en las redes de transporte [3][44]. Por ejemplo, al considerar suscriptores residenciales con velocidades de acceso promedio de **20 Mbps** en una red metropolitana con **1,5 millones de usuarios** las velocidades en la red troncal pueden alcanzar valores cercanos a los **30 Tbps** y *conexiones que soporten más de 160 longitudes de onda de 80 Gb/s*, con velocidades de línea del orden de los 12 Tbps.

La red completamente óptica: Comercialmente la fibra óptica está presente en las redes desde los 80s por su capacidad para transportar grandes volúmenes de tráfico por cada hilo de fibra. En sus inicios sólo se utilizaron enlaces punto a punto en el núcleo de la red, pero con el tiempo se ha extendido su utilización llegando a todos los segmentos de la red y en los últimos días se habla de fibra hasta el hogar (FTTH). Aunque un operador tenga tendidos de fibra hasta la premisa de usuario la red no se puede considerar completamente óptica, pues la característica fundamental es que tanto los enlaces como en los nodos de conmutación se realiza un tratamiento de la señal en el dominio óptico, hecho que permite asegurar que aún queda un largo camino por recorrer en investigación y desarrollo para alcanzar la utopía de la red completamente óptica. Ver figura 2.9.

Figura 2-9 – Arquitectura de una red completamente óptica (AON)



En una red completamente óptica (AON) una señal DWDM debe pasar a través de múltiples nodos de manera "transparente", lo que quiere decir que cualquier procesamiento que se realice deberá mantener la

señal en el dominio óptico, en éste sentido, cuando se referencia una red transparente es porque no requiere realizar la conversión OEO en ninguno de los nodos y en ninguno de canales DWDM (Ver rec. UIT T G.680)[45].

De acuerdo a la UIT, el futuro de las redes ópticas son las AONs con base a los diseños innovadores de conmutadores ópticos y OXCs, donde los datos de usuario viajan en un dominio completamente óptico; para ello existe la necesidad de redes ópticas transparentes donde no haya conversión OEO⁵³ en los nodos de la red, ésta eliminación de la conversión OEO permitirán aumentar un más velocidades de transmisión efectiva (throughput extremo a extremo). Las AONs, según la UIT se categorizan en:

- Redes con enrutamiento a nivel de longitud de onda (WRNs⁵⁴),
- Redes ópticas de conmutación de ráfagas (OBSNs⁵⁵),
- Redes ópticas de conmutación de paquetes (OPSNs⁵⁶).

Para el desarrollo actual de las AONs ha jugado un papel importante el surgimiento de Multiplexores Ópticos Reconfigurables (ROADMs⁵⁷, MDROADMs⁵⁸) con los que se puede agregar, extraer y dejar pasar de forma transparente un gran número de longitudes de onda en diferentes direcciones, con la posibilidad de reconfiguración dinámica. El grupo de estudio 15 de la UIT está desarrollando normas internacionales (conocidas como "Recomendaciones") para definir las características de los MD-ROADM (UIT-T G.x) y en la "función de degradación" de los elementos de red completamente óptica (segmento DWDM, PXC, OADM, etc) entre dos puntos de conversión OEO (según recomendación UIT-T G.680) [33].

En la mayoría de los nodos de las redes actuales se está realizando la conversión O/E/O para realizar un proceso que se conoce como "opaco" de conmutación de paquetes y longitudes de onda. Aunque las fibras ópticas permiten a la fecha velocidades del orden de los terabits por segundo (Tbps), cuando llegan a los nodos de conmutación se forman cuellos de botella al realizar la conversión O/E/O, por lo que los conmutadores actuales están limitados a las velocidades manejadas por la electrónica del orden de los gigabits por segundo (Gbps). Dentro de los obstáculos que aún quedan por superarse para alcanzar la red completamente óptica están [20]:

- Es necesario el desarrollo de conmutadores ópticos con tiempos de configuración del orden de los nanosegundos.
- Se debe avanzar en la investigación y el posterior desarrollo de memorias ópticas que sirvan como buffers en los actuales conmutadores, pues actualmente se utilizan líneas de fibra de retardo FDL⁵⁹ que incrementan la longitud del camino que una señal óptica debe recorrer hasta que el dispositivo tome la decisión de conmutar.
- Optimización en el proceso de conversión de longitud de onda en el dominio óptico.

Una de las razones principales para la monitorización continua y el control del funcionamiento correcto de los componentes AON está relacionado con el hecho de que la transmisión en AONs está limitada por un número de efectos tales como la diafonía óptica, el ruido de emisión espontánea amplificada, la saturación de láser, las no linealidades de la fibra, reflexiones, la acumulación de fluctuación de fase y estrechamiento del ancho de banda de la señal causada por la concatenación de filtros.

⁵³ OEO (conversión de dominio Óptico / Eléctrico / Óptico).

⁵⁴ WRNs (Redes con enrutamiento de longitudes de onda, **Wavelength-Routed Networks**)

⁵⁵ OBSNs (Redes ópticas de conmutación de ráfagas, **Optical Burst Switched Networks**)

⁵⁶ OPSNs (Redes ópticas de conmutación de paquetes, **Optical Packet Switched Networks**)

⁵⁷ ROADM (Multiplexor óptico de adición y extracción reconfigurable, **Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer**)

⁵⁸ MDROADM (ROADM multigrado, **Multi Degree – ROADM**)

⁵⁹ FDL (Línea de retardo de fibra, **Fiber Delay Line**)

Ventajas de una red completamente óptica

Reducción de equipos y espacios : Debido a las características de funcionamiento de los semiconductores los equipos electrónicos en los nodos de la red ocupan varios y en algunos casos hasta cientos de bastidores o racks en tanto los equipos ópticos modernos pueden manejar capacidades superiores y pueden ubicarse en un solo bastidor. Aunque se reduciría espacio en el núcleo de la red, la reducción significativa se daría en la “red externa”, pues los equipos basados en tecnología óptica pasiva reducen en alto porcentaje los espacios utilizados. Ver figura 2.10.

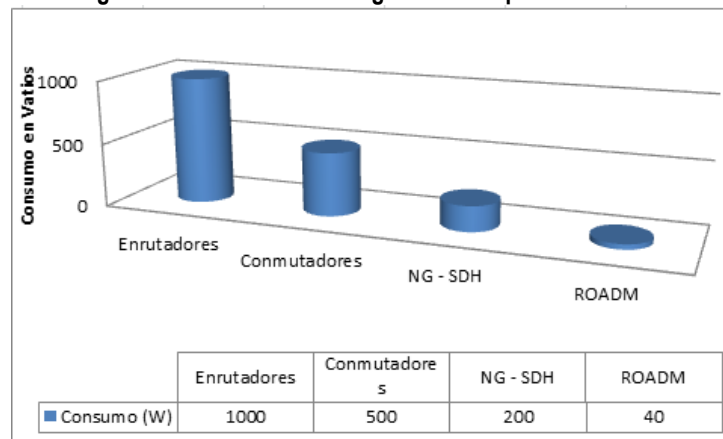
Figura 2-10 – Escalabilidad de los enrutadores actuales



Fuente: Deutch Telecom

Optimiza el rendimiento energético y ayuda al medio ambiente: De acuerdo a datos del CEET60 internet actualmente consume el 2% de la energía del mundo y se espera que el incremento de las aplicaciones y servicios de banda ancha aumente éste consumo al 10% en los próximos años; producto de todos los equipos de cómputo, dispositivos de red y refrigeradores entre otros [46]. Parece lógico que al reducir el tamaño de los equipos se reduciría igualmente el consumo energético utilizando nodos ópticos en la red. Ver Figura 2.11.

Figura 2-11 – Consumo energético de dispositivos de red



Fuente: Nokia – Siemens Networks

⁶⁰ CEET (The Centre for Energy-Efficient Telecommunications at the University of Melbourne)

2.1.6 Planeación financiera del negocio

El objetivo del plan de negocio es determinar las principales actividades que se realizarán para la migración técnica de la red. Además, se obtiene un modelo económico que permite evaluar las diferentes alternativas con el fin de obtener el camino óptimo en términos de la relación costo / beneficio.

El plan de negocio, por su parte, presenta el cálculo de los indicadores financieros que permiten a los gerentes evaluar los resultados financieros de una empresa con el fin de tomar las mejores decisiones para el funcionamiento general. Debido a la cantidad de alternativas y la necesidad de encontrar la viabilidad económica, la evaluación de negocio se utiliza para determinar de forma iterativa las alternativas técnico-económicas con que se obtienen los mejores resultados en un mercado competitivo. El plan de negocio debe incluir:

- Objetivos a alcanzar en términos de ventas y suscriptores
- Ingresos futuros esperados por clase de servicio de acuerdo a la planeación
- Gastos previstos (inversiones y operaciones) en general y por servicio
- Estados contables e indicadores financieros que caracterizan la rentabilidad del proyecto.

La estructura de evaluación sigue el modelo de la figura 2.12. Cada caja se expande con más detalle como una función de la planeación de tiempo con la correspondiente des-agregación normal.

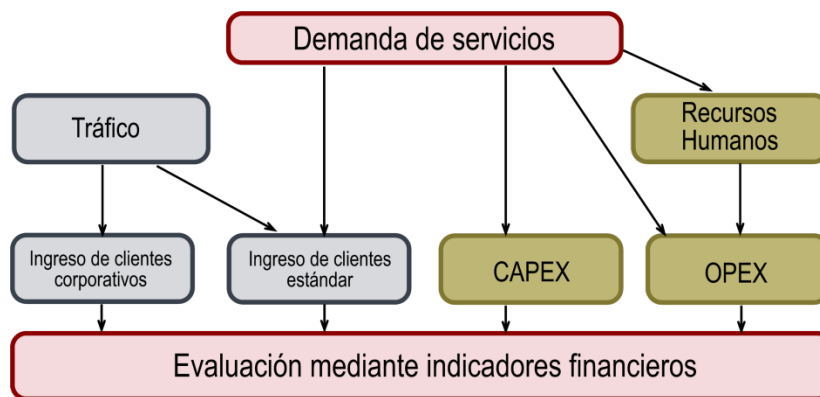
El modelo económico de servicios: Por la gran cantidad de nuevos servicios y la variedad de características del mercado, una de las más interesantes actividades de migración es el modelo económico de los costos de servicios, ingresos y rentabilidad, ya sea por servicio o por paquetes de servicios.

El modelo de referencia la UIT-D [5] hace parte del modelo económico general de NGN e incluye el análisis de variantes tecnológicas sobre la demanda de servicios, dimensionamiento, tarifas, ingresos y rentabilidad.

Para considerar correctamente los impactos de los nuevos servicios, se deben diferenciar en la evaluación económica factores debidos a:

- Operación global de la compañía.
- La solución total en la red global
- La plataforma de banda ancha necesaria para los nuevos servicios
- Plataforma específica para cada tipo de servicio

Figura 2-12 – Modelo de la estructura del plan de negocio



El Modelado y diferenciación de los recursos se debe realizar con respecto a factores de costo e ingresos según el tipo de servicio como referencia para medir el impacto, para definir la estrategia de

introducción del servicio o del conjunto de servicios. Por ejemplo, para la evaluación y delimitación de los servicios multimedia se tienen como principales factores:

- Número de usuarios
- Número de puertos de banda ancha
- CAPS⁶¹ y la tasa de Sesiones
- Tasa binaria sostenida equivalente en los diferentes segmentos de la red.
- Requerimientos de Memoria de almacenamiento.

El dimensionamiento y cálculo de costos debe realizarse según los siguientes recursos de la red :

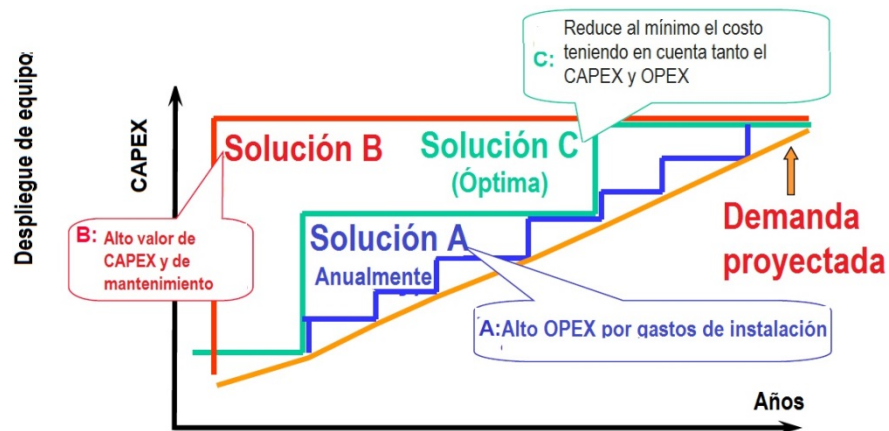
- Las plataformas de servicios específicos a ser dimensionadas por servicio con la evaluación de los costos correspondientes como : VoIP, VoD, IPTV, mensajería unificada, distribución de contenidos, mensajería multimedia, etc
- Las plataformas comunes y los recursos de red para todos los servicios de banda ancha que se requieren deben ser dimensionados y cotizados de acuerdo a los flujos agregados de todos los servicios agrupados por afinidad según ANS (Acuerdo de Nivel de Servicio) o QoS.
- Se deben modelar los gastos operativos diferenciados según tipo de servicio para operación técnica, mantenimiento, actualizaciones de software, comercialización, promoción, entrenamiento, etc.

Ciclo de vida de amortización Vs. la modernización: El equipamiento y la infraestructura de telecomunicaciones deben instalarse en periodos de tiempo en función de la evolución de la demanda. Los intervalos de aprovisionamiento deben ser función de la tasa de crecimiento de la demanda, la capacidad de los sistemas y la modularidad, el ciclo de vida de los equipos instalados y los costos asociados correspondientes La figura 2.13 muestra tres escenarios de aprovisionamiento para una demanda dada a través del tiempo:

- En el escenario A, el aprovisionamiento se realiza a cortos intervalos regulares (anual o trimestral) que minimizan la capacidad de reserva, pero aumenta los costos de instalación por el elevado número de intervenciones.
- En el escenario B, se realiza el aprovisionamiento según la demanda esperada durante un largo período, con un alto costo de inversión inicial en CAPEX y un valor alto mantenimiento para un equipo instalado con una baja tasa de utilización.
- En el escenario C, el número y el volumen de aprovisionamiento se ha optimizado para reducir al mínimo costo teniendo en cuenta tanto el CAPEX y OPEX, manteniendo las tasas de utilización con la suficiente de calidad de servicio.

Figura 2.13 – Estrategias de implementación de recursos por ciclo de vida

⁶¹ CAPS (*Intentos de Llamada por Segundo, Call Attempts Per Second*)



El problema de optimización dinámica en se encarga de los períodos de aprovisionamiento óptimos con el fin de minimizar los costos en función de los siguientes parámetros:

- Tasa de crecimiento de la demanda y confiabilidad proyectada.
- Capacidad de modularidad del equipo
- Ciclo de vida técnico y capacidad de proporcionar nuevos servicios
- Ciclo de vida económico
- costos fijos y los costos incrementales de equipamiento
- Costos de operación y mantenimiento
- Costos laborales
- Tasa de interés y tasa de inflación

En el caso de la disponibilidad de las nuevas tecnologías de la misma funcionalidad con mayor capacidad o cuando aparecen nuevas funcionalidades como en la migración hacia NGN o LTE, las decisiones que se adopten por el planificador introduce escenarios adicionales:

- Aumentar la capacidad con la misma modularidad de la tecnología (Sistemas STM- 16) versus saltar a la siguiente modularidad tecnológica (sustituir STM- 16 por STM -64 o STM- 256).
- Sustitución de la tecnología existente por la siguiente generación con mayor capacidad.

El proceso de evaluación tiene que considerar y comparar el valor actual neto de las posibles alternativas con todos los gastos y los ingresos por cada alternativa. La selección adecuada de las alternativas debe cumplir con los requisitos de rentabilidad y proporcionar el mejor valor actual neto y la Tasa Interna de Retorno (TIR) dará la decisión final.

Los parámetros clave que más influyen en la decisión son el grado de obsolescencia de los equipos o el tiempo restante del período de ciclo de vida, los nuevos clientes, las tarifas y los flujos de efectivo esperados por los nuevos servicios. Hacer una evaluación comparativa con el fin de sobrevivir en un entorno competitivo.

2.2 VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo presentado tiene desarrollos exitosos en la ampliación de servicio en redes de larga de distancia, migración a un esquema eficiente de encaminamiento y gestión de redes de transmisión, planeación de negocios en redes de telefonía móvil y migración de redes hacia NGN [5].

2.2.1 Planeación de negocios en redes de telefonía móvil

En la década del 2000 uno de los grandes retos para los operadores era la planeación de migración de redes móviles de 2G a 3G, para ese momento las alternativas suponían tecnologías de migración CDMA y UMTS. Por lo cual las decisiones finales comprometerían el tipo de tecnología, políticas de nuevos servicios, inversiones previstas y rentabilidad que establecerían el éxito o fracaso del operador en el mercado.

En éste caso, la validación del modelo se realizó en un país en vía de desarrollo donde se identificaron los parámetros de evaluación que dieron como resultado un escenario de migración hacia la tecnología intermedia GSM buscando finalmente la implementación de EDGE o 3G UMTS. Para determinar ese camino se calcularon las inversiones necesarias según las etapas de modernización de la infraestructura, su viabilidad, el modelo tecno-económico y su posterior implementación sobre la herramienta STEM.

La evaluación inicial contempló el tamaño del mercado nacional con el valor promedio para cada parámetro de negocio. Con el objetivo de tener un tiempo apropiado de observación de la migración se estableció un periodo de 10 años (Y1 a Y10) y el periodo de planeación corresponde al año Y0. El estudio inicial corresponde a una población de cerca de 3 millones de personas con una tasa de crecimiento acumulativa de 2.5% por año; con una tasa de penetración de servicios móviles baja comparada con la de países desarrollados.

A partir del procesamiento de la información geográfica del país se definieron 3 escenarios con base a la densidad poblacional, la superficie, la penetración de subscriptores, el número de células y el tráfico. Urbano para las principales ciudades; suburbano para ciudades intermedias y rural cuyos parámetros de población son bajos.

La caracterización realizada implica una clara diferenciación en la infraestructura y costos relacionados. De acuerdo con el estudio se deben evaluar dos escenarios de migración para conocer el impacto de las inversiones y la evolución de los ingresos:

- Escenario A: Evolución a EDGE en los 900 MHz y 1800 MHz con servicios que dependen de las velocidades pico y la calidad de servicio que ofrece la tecnología actual en las regiones de baja densidad y EDGE en las regiones de alta densidad. Este escenario ahorraría inversiones en infraestructura en las regiones de baja densidad poblacional con prestando servicios con baja y media velocidad. Los servicios adicionales se pueden ofrecer con EDGE con velocidades GSM/GPRS (144 Kbps).
- Escenario B: Explotar toda la potencialidad de los servicios ofrecidos con UMTS que implicaría una importante inversión en infraestructura y en licencias de otra banda de frecuencias (2GHz). En éste escenario se generan ingresos adicionales con velocidades de 384kbps a 2 Mbps.

El próximo paso es hacer la proyección de tráfico con respecto a las velocidades máximas de manera que se puedan realizar pruebas y verificar el cumplimiento de los niveles de servicio y QoS en periodos de medición del SBR (Sustained Bit Rates) de 5 minutos. El SBR se utiliza también como la relación entre el flujo de información y los propósitos de dimensionamiento para estimar los volúmenes de información generados.

Según el modelo el análisis del proceso de migración debe considerar las diferentes tecnologías en la solución y establecer variables de comparación como criterios para determinar el número de estaciones en cada caso (GSM/GPRS, GSM/EDGE, UMTS y CDMA):

1. Cobertura eficiente de las frecuencias licenciadas. La cobertura disminuye el radio en relación cuadrática con la frecuencia.
2. Cobertura según el ancho de banda de los servicios de datos previendo que son muy sensibles a la relación señal/ruido, especialmente en las frecuencias altas.
3. Cobertura en función de la topografía del terreno.

4. Cobertura de servicios de voz en función del área y número de abonados.
5. Cobertura según grado de servicio y acorde a las mediciones del SBR.

Las estaciones base (BS) deben ser dimensionadas de acuerdo a estos 5 factores y según el área de cobertura así:

- Áreas urbanas densas: Desplegar inicialmente tecnología GSM o 3G con radios iniciales entre 1 a 4 km sin necesidad de bandas de frecuencias adicionales. La ventaja es la mayor capacidad de tráfico en Erlangs por sitio GSM o 3G con el requerido aumento del ancho de banda en cada BS por nuevos servicios.
- Áreas suburbanas: Desplegar tecnología GSM con radios entre 4 a 10 km con menores capacidades.
- Áreas rurales: El radio de las celdas es de 10 a 20 km en estas áreas se pueden instalar de manera paralela a la tecnología existente nuevos servicios en otra banda de frecuencias.

La evaluación del negocio para este caso de estudio se realizó con la herramienta STEM donde se tuvieron en cuenta segmentos de mercado, proyección de servicios y subscriptores, red de radio acceso según escenario geográfico, ubicación de las estaciones base, red de transmisión para interconectar las estaciones base, red de transporte hacia los nodos principales y hacia otras redes.

Para el modelo de negocio fue necesario considerar aspectos como tráfico actual y futuro (creciente para datos y decreciente para servicios de voz), inversión en infraestructura con depreciación anual del 7%, consumo de servicios residencial y empresarial, horarios de ocupación de la red en franjas empresariales y franjas residenciales por día y por año.

Con la aplicación del modelo y de la herramienta STEM se planteó el camino de migración definiendo un crecimiento acumulativo de clientes del 8%, la proyección de multiservicios en las diferentes clases de servicio, número de estaciones base y enlaces de transmisión según área geográfica, costos de mantenimiento y operación, proyección de CAPEX y OPEX.

Como resultado final del caso de estudio se concluye que con las vigentes economías de escala ambos escenarios son posibles. Un crecimiento simultaneo de clientes mejora las tasas de penetración y da la posibilidad nuevos servicios de banda ancha que implican nuevas inversiones y crecimiento del negocio en ambas dimensiones; los nuevos usuarios implican una inversión importante en infraestructura lo que hace viable el negocio.

El tráfico de voz con UMTS brinda mejor eficiencia espectral y disminuye el número de estaciones base en áreas urbanas densas, en tanto EDGE para servicios de voz requiere menos estaciones en las áreas suburbanas; sin embargo en el caso de los servicios de datos EDGE requiere mayor número de estaciones en las zonas urbanas. Para servicios multimedia UMTS facilita la integración de voz, datos y video extremo a extremo con un esquema fácil de operación y mantenimiento, facilitando el despliegue de servicios de banda ancha y aumentando la penetración de subscriptores de banda ancha.

En el estudio realizado se identificó que en el año 3 (Y3) UMTS superaría las prestaciones de EDGE por lo que las ganancias en términos relativos en ambos casos serían similares según el periodo que cada tecnología requiere para su despliegue total.

Como conclusión se llegó a que EDGE es una solución apropiada a mediano tiempo con inversiones inferiores pero igualmente con retornos inferiores en las posibilidades de negocio. Aunque UMTS representaba una

solución ambiciosa que requería altas inversiones iniciales podía incorporar más servicios y tendría ventajas económicas especialmente en el periodo entre el mediano plazo y el largo plazo.

2.2.2 Ampliación de servicio en redes de larga de distancia

Para la proyección de servicios y a partir de la creación de una malla de nodos de conmutación de circuitos en la red de larga distancia de AT&T en EEUU se estableció una matriz que permitió medir:

- Tráfico por suscriptor en lugares poblados según la clase de servicio y el nivel de la red.
- Carga de tráfico entre las troncales de intercambio y tráfico de interés entre las diferentes redes metropolitanas.
- Evaluación de la variación del tráfico según el mes del año.

De acuerdo al modelo, se realizó la matriz de proyección de tráfico identificando un coeficiente de variación dependiente de las medidas de tráfico actual, variaciones de tráfico anual, proyección de suscriptores y proyección de crecimiento de tráfico basado en un modelo económico favorable que permita mantener tarifas bajas.

2.2.3 Esquema eficiente de encaminamiento y gestión de redes de transmisión

Para la migración de la red de transmisión nacional de Bulgaria, el modelo permitió aplicar una técnica de enrutamiento jerárquico para la distribución de carga de tráfico a través de las diferentes centrales TANDEM:

- Se encaminó el tráfico en porcentajes iguales en cada nodo mediante la valoración del coeficiente α ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- En cada nodo se estableció un valor de calidad de servicio (QoS) para determinar el encaminamiento según la jerarquía de las troncales que se verían afectadas.
- Debido al número de nodos fue necesaria la utilización de la herramienta software para la planeación de redes PLANITU alimentado con la matriz de tráfico de entrada y salida en cada nodo.

La consolidación del modelo permitió realizar la transición hacia una red con un esquema administración y enrutamiento de tráfico (dual-homing) eficiente, robusto y confiable que simplificó la gestión de la red. Además, ese nuevo esquema preparó la red para una suave transición hacia NGN de clase 4 mediante la instalación de MGW en las centrales principales de tránsito.

2.3 CAMINO DE MIGRACIÓN HACIA UNA AON

El tráfico de las redes al ritmo actual se está duplicando cada dos años requiriendo modelos de migración que aumenten la capacidad de transmisión, los sistemas de conmutación y una arquitectura eficiente. Las redes de acceso deben garantizar anchos de banda de al menos 20Mbps a 50 Mbps por suscriptor mediante combinación de sistemas de fibra óptica, HFC y tecnologías inalámbricas. Frente al agotamiento de la capacidad, los operadores de red requieren definir una ruta que les permita seleccionar la alternativa más adecuada de migración. Como se muestra más adelante, no es suficiente con un despliegue arbitrario de tecnología de vanguardia que puede significar una alta capacidad pero insuficiente calidad de servicio en aplicaciones multimedia masivas.

Un camino de migración implica estrategias progresivas que le hacen frente al crecimiento de tráfico en redes heterogéneas mejorando parcialmente las características en algunos tramos de la red. Otra estrategia de

migración es la rápida, inmediata o “big bang”, utilizada cuando el operador migra a una nueva tecnología incompatible con las tecnologías instaladas anteriormente.

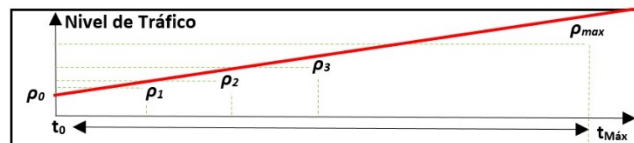
Frente al agotamiento de la capacidad en la red, existen las siguientes alternativas de migración:

- **Incremento del número de canales ópticos con velocidad estática de operación** mediante una migración gradual en algunos sectores de la red o de ser el caso en toda la red (migración big bang).
- **Incremento de la velocidad del canal óptico con velocidad estática WDM.** También puede darse de manera gradual por sectores o rápida en toda la red.
- **Incremento de la velocidad del canal óptico y migración a operación dinámica como ASON o GMPLS.** En este caso la implementación del plano de control para el establecimiento de las rutas ópticas representa una estrategia de migración rápido o big bang.

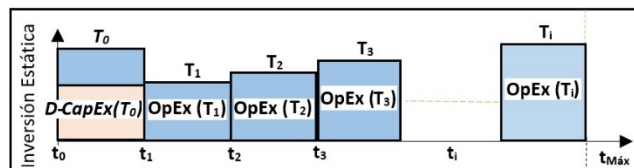
De acuerdo a [1][3][20][33] el futuro son las “Redes completamente ópticas” (AON) y en la definición del camino óptimo de migración el término óptimo se refiere a la relación entre los beneficios obtenidos y el costo de la solución para lograr la ventaja de ofrecer un servicio competitivo con utilidades económicamente atractivas. Por lo anterior, el camino de migración debe llevar a la implementación final de una AON con el respectivo análisis de costos.

El costo del camino de migración $MC(t)$ se determina por i) los gastos diferenciales de capitalización (**D-CapEx**) que representan las inversiones en espacios nuevos, infraestructura y equipamiento necesario para la migración, ii) gastos de operación (**OpEx**) que representan el costo de funcionamiento de la red durante el periodo de operación.

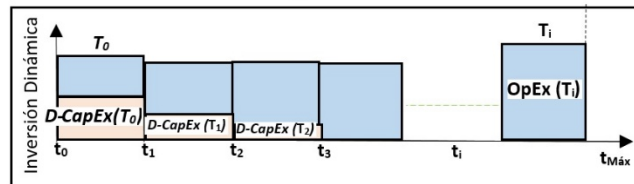
Figura 2.14 – Crecimiento del tráfico y su costo de migración



a. Evolución temporal del tráfico de la red



b. Crecimiento del costo de migración - Inversión Estática



c. Crecimiento del costo de migración - Inversión Dinámica

Fuente: [38]

Considerando la estrategia de migración rápida o bigbang, el escenario estático y dinámico tendrá una evolución temporal diferencial del costo de migración como se muestra en la figura 2,14:

- La figura 2,14a muestra la evolución temporal del tráfico medida con base en la capacidad de la red, empieza en T_0 cuando el tráfico es igual ρ_0 a medida que el tiempo pasa (periodos de tiempo intermedios denotamos como T_i (corresponde a meses o años según lo defina el operador). El tráfico crece hasta el punto ρ_{max} (nivel de tráfico máximo de la red según lo establezca el operador); el punto ρ_{max} se alcanza cuando la capacidad de la red se haya agotado nuevamente y se requiera otra actualización.
- La figura 2.14b muestra el crecimiento del costo de migración para el caso estático (se presenta cuando se adquieren nuevos equipos de actualización únicamente en el instante T_0). De esta manera los gastos diferenciales de capitalización, **D-CapEx**, se da únicamente entre el instante T_0 ; de T_1 en adelante no requiere más inversiones. En éste caso los gastos operacionales, **OpEx**, crecen de forma monolítica dependiendo del incremento de los diferentes parámetros (Energía, salarios, etc).
- En el escenario dinámico presentado en la figura 2.14c la inversiones los de nuevas rutas ópticas y nuevos equipos dependen del tráfico cursado en la red. Lo que implica sólo hacer inversiones estrictamente necesarias para operar la red durante este cada periodo de instalación, retardando la adquisición e instalación del equipo restante para los siguientes periodos de tiempo. El porcentaje de inversiones en los periodos futuros debe ser significativamente bajo con relación al primer periodo.

2.3.1 Metodología para la evaluación del costo de migración

Dada la variable de costo total del camino de migración $MC(T)_{a,b}$ que determina las inversiones requeridas desde el escenario **A** hasta el escenario **B** (operando en el escenario **B** durante el periodo T). El camino de migración se define por los componentes, equipamiento e infraestructura y su correspondiente operación que dependen de la suma de 2 componentes:

- **D-CapEx_{a,b}**: corresponde al costo de capitalización diferencial de cualquier equipo nuevo, infraestructura, o espacio que se requiera en los nodos, enlaces y sistema de gestión de la red para migrar desde el escenario A al B. Este valor es el resultado de la suma de la adquisición, instalación y configuración de los nuevos equipos, infraestructura y locaciones. El costo de adquisición depende del número, tipo y nuevos componentes (aprobados por la alta dirección de la empresa). Lo anterior **No incluye** equipos o infraestructura previamente desplegado en el escenario A que puede ser utilizado en el escenario B. En el caso de requerirse nueva infraestructura el costo de compra debe incluirse en ésta variable. La instalación de nuevos equipos y el costo de configuración dependen del número de técnicos requeridos para ejecutar dicha tarea, su salario, periodo de tiempo para completar la tarea y viáticos. En [47] se encuentran las ecuaciones detalladas de adquisición, instalación y configuración. Dependiendo del incremento del tráfico se pueden dar las nuevas inversiones de actualización hacia el escenario B como se muestra en la figura 2,14b el **D-CapEx** también toma en cuenta la dependencia temporal de los parámetros de costo.
- **OpEx(T)_b**: Es el costo de operación requerido en el escenario B operando durante el periodo T. Esto incluye los costos en los nodos, enlaces y el sistema de gestión de la red asociados con el mantenimiento, consumo de energía, procedimientos de reparación de fallas y arrendamiento de espacios, infraestructura o equipamiento (se deben considerar el equipamiento viejo y el nuevo). El

costo de mantenimiento depende del número de técnicos a cargo de la gestión de la red y tareas generales de mantenimiento junto con su salario. Los gastos de consumo de energía dependen del costo de la energía en pesos por kilovatio, número, y toda la potencia consumida de los equipos e infraestructura. Finalmente los costos de reparación de fallas dependen de las fallas experimentadas de la red durante el periodo T , el costo de los componentes de reemplazo el número de técnicos necesarios para reparar la falla, su tasa salarial, el tiempo necesario para reparar la falla, como también los viáticos de los técnicos, las piezas cambiadas. En [47] se puede ver la ecuación que detalla esta evaluación de costos.

La metodología de los operadores de red para determinar el camino óptimo de migración se sintetiza así:

1. Definir claramente el escenario A y el escenario de migración B detallando la arquitectura de cada nodo, enlace, configuración y sistema de gestión utilizado.
2. Determinar el nivel de crecimiento de tráfico anual proyectado y el tráfico máximo definiendo el ρ_0 y el ρ_{max} .
3. Determinar el periodo de operación T como se escribe en [47].
4. Para cada alternativa de migración hacia el escenario B:
 - a. Determinar el número de instantes de inversión en los que el operador debe incurrir en nuevas capitalizaciones **D-CapEx** en el caso estático solamente es un periodo; en el caso dinámico es función de ρ_0 , la tasa de crecimiento de tráfico, y el nivel de tráfico en el que el escenario dinámico alcance el **D-CapEx** requerido en el escenario estático como se describe en [47].
 - b. Cada inversión instantánea, evaluación del **D-CapEx_{a,b}** considera el costo de los nuevos elementos en los nodos, enlaces y el sistema de gestión requerido por la red en el escenario B como se describe en [47].
 - c. Evaluar el **OpEx** considerando el consumo de energía, reparación de fallas, mantenimiento de la red en los nodos, enlaces, sistemas de gestión en el escenario B como se describe en [47].
 - d. Determinar el camino de migración con el más bajo costo de migración **MC(T)_{a,b}** igual a la suma de **D-CapEx** en todos los instantes de inversión más el valor del **OpEx (T)**.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CASO DE ESTUDIO – RED DE EMCALI

3.1.1 Análisis de crecimiento de tráfico en Cali

El tráfico en las redes de telecomunicaciones continuará creciendo y las arquitecturas deberán desarrollarse no sólo para tener servicios más rápidos o menos llamadas caídas, en esencia las nuevas políticas sociales buscan también conectar a las comunidades rurales y brindar alternativas a las pequeñas empresas para ofertar sus productos en el mundo; de manera que se implementen servicios (telemedicina, teleeducación, agricultura georeferenciada) que permitan el mejoramiento de la calidad de vida a costos viables [37].

Como punto de referencia en las tendencias de crecimiento de tráfico global, se presentan los aspectos más relevantes de las proyecciones de Cisco Visual Networking Index (VNI) [48]:

- El tráfico IP mundial anual superará el umbral de los dos Zettabytes (10^{21} bytes) en 2019, año en el que el tráfico crecerá a una tasa compuesta anual (CAGR) de 168,0 exabytes por mes. El tráfico IP global ha aumentado más de cinco veces en los últimos 5 años, y aumentará casi tres veces durante los próximos 5 años. En general, el tráfico IP crecerá a una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR) del 23 % desde 2014 hasta 2019.
- El tráfico de redes metropolitanas superó el tráfico de larga distancia en 2015, representará el 66 % del total del tráfico IP en 2019. El mayor crecimiento de las redes de metropolitanas se debe al importante papel de las redes de distribución de contenidos, que evitan enlaces de larga distancia y entregan el tráfico a las redes metro y redes troncales regionales. Las redes de contenido llevarán a más de la mitad del tráfico de Internet en 2019. A nivel mundial, 62% de todo el tráfico de Internet cruzará las redes de distribución de contenidos a nivel mundial para el año 2019, frente al 39 % registrado en 2014.
- Más de la mitad del tráfico IP se originará con dispositivos que no son PC (No PC como tablets, phablets, teléfonos inteligentes, máquinas IP) en 2019. En 2014, sólo el 40% del total del tráfico IP se originó con dispositivos que no PC, pero en 2019 la cuota de dispositivos No PC crecerá al 67%.
- El tráfico procedente de dispositivos inalámbricos y móviles superará el tráfico procedente de dispositivos cableados en 2019. Mientras en el año 2014, los dispositivos conectados físicamente representaron la mayor parte del tráfico IP (54%), en 2019 los equipos conectados a Wi-Fi y dispositivos móviles representarán el 66 % del tráfico IP.

En el contexto local y con base a los datos del Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali (en 2016 con una población de 2'394.328 habitantes, una tasa de natalidad de 20,2, una esperanza de vida de 71.9 años y una tasa de mortalidad de 5.5 por cada mil habitantes), se utilizó un modelo basado en la teoría de dinámica de sistemas para la predicción de la población como base fundamental de la construcción del modelo de crecimiento de tráfico.

La dinámica de sistemas (DS), creada a principios en la década de 1960 por Jay Forrester del MIT, es una técnica para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos con aplicaciones en todas las áreas del conocimiento. El enfoque de éste modelado se utiliza para el análisis de los efectos de los bucles o ciclos de realimentación, en términos de flujos y depósitos adyacentes [49] [50].

La implementación de la dinámica de sistemas se realizó utilizando el Software Vensim⁶² donde se construyeron los diagramas de Forrester que se muestran en las figura 3.1a y 3.1b.

En la figura 3.1a se presenta el modelo de predicción de la población en la ciudad de Cali con base en los datos del DANE⁶³ [79] y de los informes “Cali en cifras” [76] [77] y “Cali como vamos” [78] del Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali, la figura 3.1c se presentan los resultados del modelo de predicción que indican que para el año 2030 habrá cerca de 2’820.000 habitantes en el casco urbano de la ciudad.

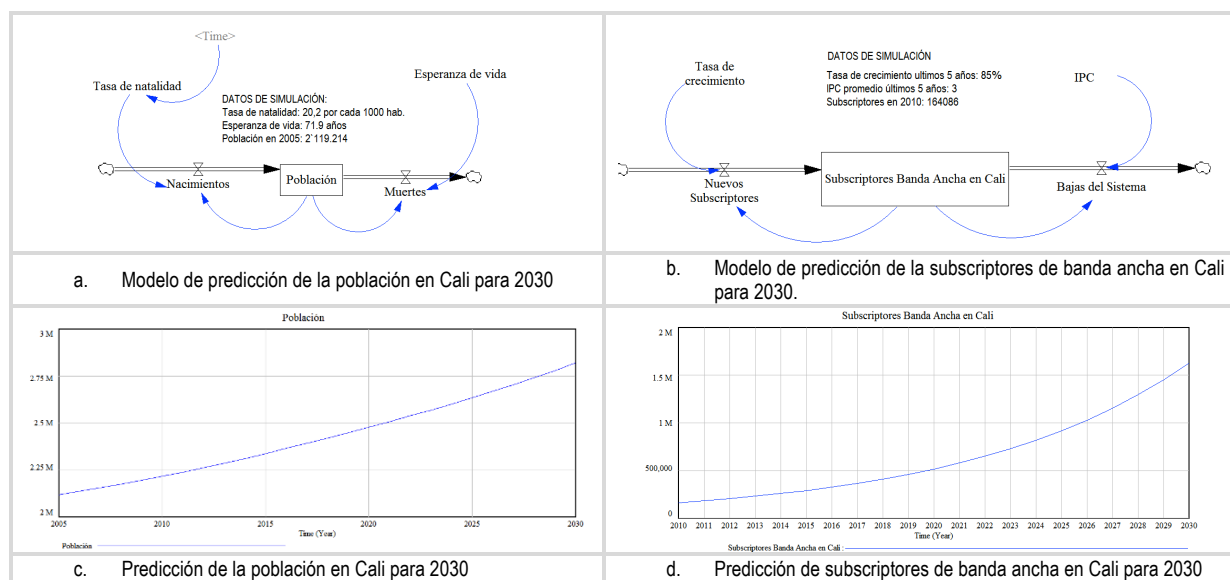


Figura 3.1 – Modelado del Comportamiento temporal de habitantes y subscribers aplicando DS.

En la figura 3.1b se muestra el modelo de predicción de subscribers de banda ancha en la ciudad de Cali con base en los datos del SIUST⁶⁴, la figura 2.18d se presentan los resultados del modelo de predicción que indican que para el año 2030 habrá cerca de 1’517.000 subscribers de banda ancha en el casco urbano de la ciudad.

En la construcción del modelo de predicción se tuvo en cuenta el porcentaje de crecimiento de subscribers en la ciudad en los últimos 6 años y el IPC de los últimos cinco años como elemento fundamental de la economía para que los habitantes puedan apostarle a contratar una conexión de internet.

El modelo de predicción tiene estrecha relación con el crecimiento de los últimos años graficado en a figura 3.1. Donde tomando como base los datos de los informes trimestrales del SIUST y el Ministerio de las TICs [51][52], empresas como Telmex y UNE han tenido un crecimiento importante en la ciudad restando la participación en el mercado que tenía EMCALI. Por su lado, EMCALI ha presentado un estancamiento en los últimos años debido a la intervención de la empresa y a la competencia que ve una oportunidad en la ciudad.

⁶² <http://vensim.com/>: Industrial strength simulation software for improving the performance of real systems.

⁶³ DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

⁶⁴SIUST: Sistema de Información Unificado del Sector de Telecomunicaciones.

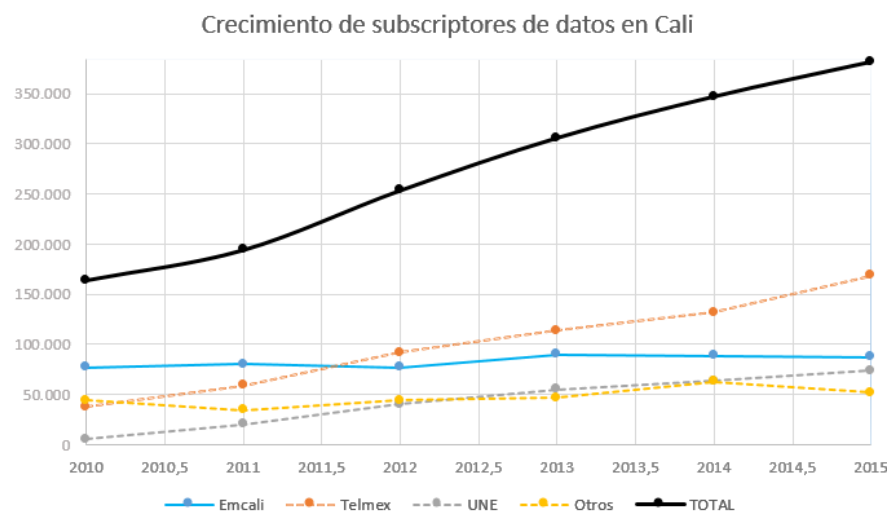


Figura 3.2– Número de suscriptores por operador en Cali [Fuente: Informes SIUST - MinTIC]

Como muestra la figura 3.2, el crecimiento del número de suscriptores de banda ancha es producto del aumento en el consumo de servicios de ‘streaming’ de música y video, películas en línea, aplicaciones y servicios para pymes entre otros. Igualmente crece de forma constante el tráfico de datos a través de las redes móviles de los diferentes operadores de telecomunicaciones.

De acuerdo a la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) más del 90% de las conexiones de internet en el país son de banda ancha. Sin embargo el concepto de banda ancha contrasta con la limitada capacidad de las conexiones por estar desactualizado. La CRC definió para antes de 2010 una velocidad de “bajada” (downstream) superior a 128Kbps y desde 2010 la banda ancha se consideraba una conexión de “bajada” 1024Kbps; para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) el 92% de las suscripciones tienen velocidades inferiores a los 4Mbps y todas las conexiones 3G y 4G entran en esta categoría.

Tomando como referencia el escalafón mundial de 2014 mientras la velocidad promedio de países como Corea del sur (primer puesto) estaba en 25,3 Mbps, Estados Unidos 11,5 Mbps (Puesto 11) en Colombia el promedio era de 3,4 Mbps (puesto 87) y Venezuela 1,3 Mbps (Puesto 134). Con base a estos datos y para hacer frente a las principales economías globales la CRC se encuentra en proceso de cambio en la definición de lo que en el país se considera una conexión banda ancha y se espera definir una velocidad entre 5Mbps y 10 Mbps para 2016.

Mientras La Unión Europea tiene como objetivo para el año 2020 que todos los ciudadanos tengan acceso a velocidades de 30 Mbps o superiores, Estados Unidos ha redefinido el concepto de banda ancha a 25 Mbps como velocidad mínima para que sea considerada de banda ancha.

El escenario mundial y la tendencia de crecimiento de la figura 3,2 muestran que el aumento de conexiones banda ancha (cableadas y móviles 3G y 4G) según la normativa CRC está generando un crecimiento exponencial en el tráfico de la red como se presenta en la figura 3,3.

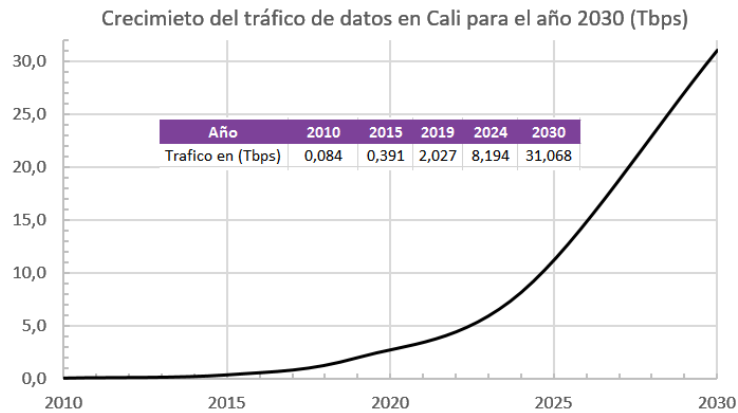
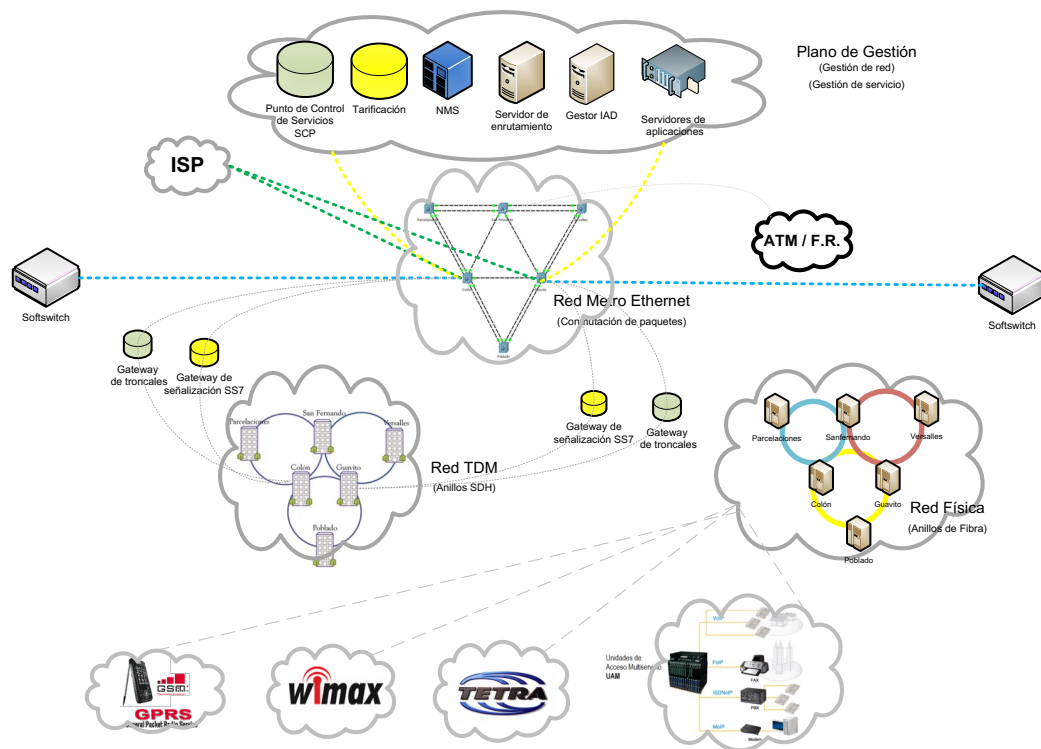


Figura 3.3 – Proyección de tráfico con base en los resultados del modelo de crecimiento de suscriptores

3.1.2 Análisis inicial del contexto

Se inicia el análisis iterativo buscando escenarios competitivos con el análisis del contexto, la evaluación de negocio, la demanda de tráfico proyectada y la configuración de la red; según la estructura presentada en la Figura 3.4.

Figura 3-4 – Estructura en capas de la Red de Emcali



[Fuente: EMCALI GUENT]

Emcali tiene en servicio una red convergente multiservicios con la que provee una variedad de servicios de telecomunicaciones como se presenta en la tabla 3.1. La tendencia de la compañía es integrar todos los servicios en una única infraestructura IP. El análisis del caso de estudio inicia tomando como referencia la figura 3.4 para la planificación iterativa para escenarios competitivos.

EMCALI actualmente presta el servicio de telefonía pública básica conmutada TPBC e internet en los municipios de Cali, Jamundí y Yumbo atendiendo una población de 2.568.160 habitantes, acorde con las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE [53]. Emcali además ofrece servicios a los segmentos residencial y empresarial (Ver tabla 3.1).

Tabla 3.1 – Portafolio de servicios de EMCALI

Servicio	Solución
VOZ	Telefonía básica conmutada; GSM Telefonía inalámbrica; PBX digital; IP PBX; IP Trunk; E1 Enlace digital; Líneas SIP; Servicios especiales; D.I.D.; Larga distancia nacional; Larga distancia internacional;
INTERNET Y DATOS	Banda ancha alta velocidad; Dedicado; Inalámbrico (WiFi - Wimax); IP FijasLan to Lan; GPRS; Videoconferencia; Difusión video y audio streaming; IPTV; Contenido; Hosting; Disco duro virtual;
TELEVISIÓN	Alianza DIRECTV
OTROS	Número único empresarial 524XXXX; Cobro revertido 018000; Televoto 900220; Teleinfo o tarifa con prima 901 ; Conmutador virtual;

Con el proceso de desregulación inicio en Colombia a través de la Ley 72 de 1989, definiendo a los servicios de telecomunicaciones como un servicio público que podían proveerse a través del estado o de concesionarios, abriendo la posibilidad de participación privada en el sector. Además, con la Ley 37 de 1993 y la Ley 142 de 1994 se fijó el régimen de libre competencia en la prestación de los servicios de telefonía básica conmutada, lo que volvió más interesante el mercado local para los operadores internacionales, generando un ambiente competitivo. En la ciudad de Cali, además de EMCALI prestan servicios de telecomunicaciones Telmex, Telefónica y UNE como se describe en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 – Entorno competitivo de EMCALI

Empresa	Descripción	Servicio	Solución
Telefónica	Es un importante grupo de telecomunicaciones en Colombia compuesto por cuatro empresas: Telefónica Telecom, Telefónica Movistar, Terra y Atento. Ésta compañía se ha convertido en un referente mundial, con una orientación estratégica, definida hacia un servicio personalizado con soluciones para diversas necesidades con un manejo integral de soluciones. La empresa tiene sus servicios dirigidos a tres tipos de clientes: Hogar, Negocios y Empresas.	INTERNET Y DATOS	Banda ancha; Centro de seguridad corporativa, Puerto Wi Fi, Valor agregado: - IP Fija - WiFi- Página Web - Antivirus McAfee
		TELEVISIÓN	Bares y Restaurantes, Salas de Espera, Salas de Belleza, Gimnasios, Jardines Infantiles y Colegios Local, RDSI Primario y E1 Conmutado,
		VOZ	Larga distancia, Multilínea, PBX, Mantenimiento diferencial, Troncal SIP Soluciones móviles
		OTRAS SOLUCIONES	Puesto de trabajo informático, Puesto de voz, Datacenter, Conectividad Cloud Computing, - Terabox, - Sonora, - Site Builder
Claro (Telmex)	Telmex comenzó un agresivo plan de expansión fuera de México con la apertura de oficinas y servicios. En el 2004 Telmex compró la totalidad de acciones de AT&T Latin America y logra presencia en Colombia, Argentina, Brasil, Perú, Chile y Uruguay, también el mismo año compró en Brasil Embratel de MCI y NET. En el año 2007 adquiere las acciones de Verizon Dominicana en la República Dominicana. Actualmente la compañía se llama Claro Codetel y su dueño es Carlos Slim. En Colombia compró cinco de las empresas	INTERNET Y DATOS	Banda ancha; Empresarial, Dedicado Plataforma IP MPLS
		TELEVISIÓN	Análoga; Avanzada; HD Especializada hoteles
		VOZ	Local; Larga distancia; Telefonía 018000

UNE	más importantes de telecomunicaciones del país en el 2008: TV cable, Superview, Cablecentro, Satelcaribe y Cablepacífico. Esta compañía distribuye sus segmentos en tres categorías: Hogares, Negocios y Grandes Empresas.		IP Centrex; Citofonía virtual; Call centers Telefonía virtual; Fax a E-Mail
	UNE EPM Telecomunicaciones S.A. tiene una importante participación accionaria en Colombia Móvil (25%), EPM Bogotá (66.46%), Empresa de Telecomunicaciones de Pereira (56%) y Edatel (56%). Gracias a estas integraciones y participaciones hoy UNE ofrece más servicios a precios competitivos. Ofertas comerciales empaquetadas que se ajustan a la necesidad y a los gustos de los hogares, las personas y las empresas.	INTERNET Y DATOS	Alta velocidad; Móvil; Alianza con HP; Dedicado; Empresa segura; Internet Data Center; Comunicación entre sedes, proveedores y/o clientes
		TELEVISIÓN	Empresarial; interactiva; Empresarial Sin ánimo de lucro
		VOZ	Telefonía básica; Telefonía avanzada; Troncal SIP; Conmutador virtual; Telefonía fija (RDSI PRI); LARGA DISTANCIA; Plan Dinámico Mipyme; Plan Mipyme Indirecto; Plan Móvil Mipyme; Línea 800 nacional; Línea 800 internacional; Teleconferencia; Línea 900.

3.1.2.1 Análisis de la red de servicios de EMCALI

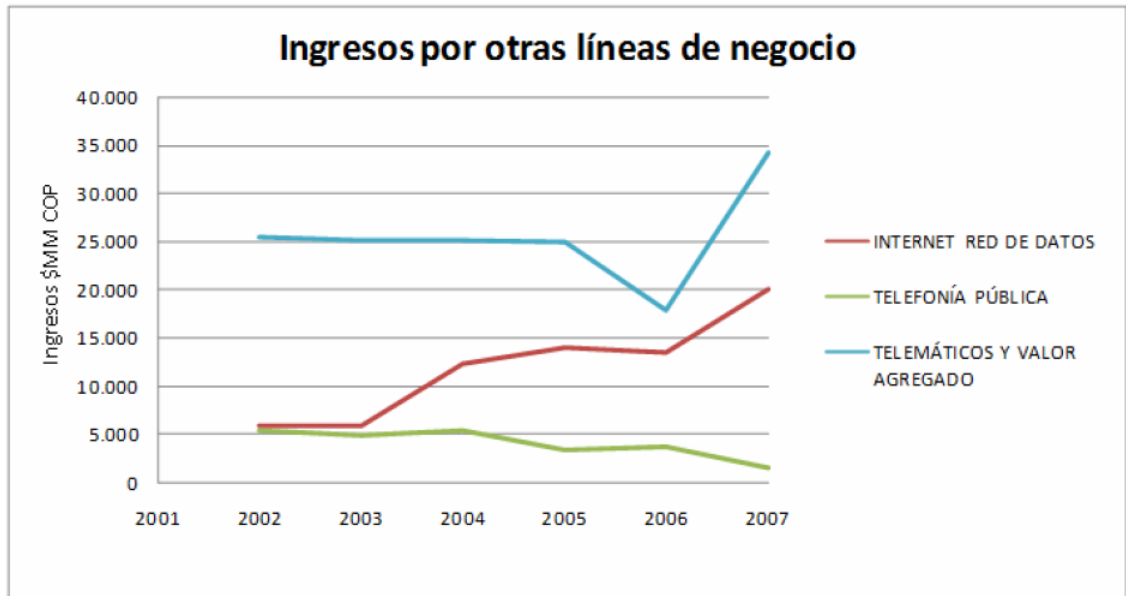
La componente de telecomunicaciones de EMCALI consta de una planta interna que hace referencia a todos los elementos ubicados internamente a las locaciones de la misma, una planta externa que incluye tendidos de cable de cobre y fibra entre otros, la red de transmisión y los equipos que aseguran la prestación del servicio de datos de la empresa como se muestra en la figura 3.5.

El núcleo de la red lo constituye la red metro Ethernet, a través de ella se realiza la conexión al ISP y se prestan los servicios a los usuarios finales, igualmente los clientes de telefonía convencional se están migrado hacia ésta red vía el Gateway de señalización SS7 y los softswitch ubicados en los nodos de Colón y Guabito. La red física la constituyen varios anillos de fibra que unen los diferentes nodo principales y secundarios; igualmente, a ella se conectan servicios como GSM/GPRS, WiMax, Tetra y las unidades de acceso multiservicio ubicadas cerca a la premisa del usuario; sobre la red física se transporta SDH y metro Ethernet de forma paralela, pero utilizando pares de fibra diferente. El plano de gestión se encarga de realizar las tareas correspondientes de identificación, aislamiento y corrección de fallas, atención al cliente, evaluación y medidas para mantener el rendimiento de la red, configuración y tarificación de servicios y la seguridad de la información de los clientes para garantizar calidad en la prestación del servicio.

La firma presta servicios de telecomunicaciones en la ciudad de Cali y algunos municipios vecinos haciendo uso de una red compuesta por las siguientes plataformas:

- Telefonía básica conmutada local (TBCL)
- Internet y red de datos
- Telefonía pública
- Interconexión con otras redes
- Servicios telemáticos y de valor agregado

Figura 3-5 – Ingresos por otras líneas de negocio



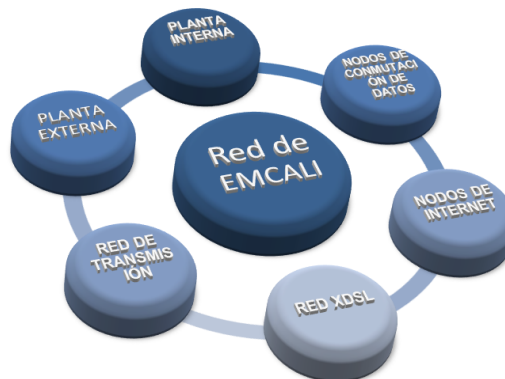
Fuente: EMCALI / GUENT

De acuerdo a los datos del GUENT, en los últimos años la compañía ha mostrado una tendencia decreciente en el rubro más significativo que es la TBCL y que representa el 76 % de sus ingresos, pero en contraprestación los ingresos provenientes de otras líneas de negocio como la red de datos, internet y servicios de valor agregado han mostrado un comportamiento creciente, con un crecimiento de 2000 usuarios promedio desde 2002 (ver figura 3.5).

3.1.3 Caracterización de la red de EMCALI

En ésta fase se realizó una exploración y refinamiento bibliográfico, necesario para entender la topología, los enlaces, la infraestructura y el funcionamiento de las redes del operador a través de visitas técnicas a los diferentes nodos y continuas entrevistas con las personas a cargo.

Figura 3-6 – Módulos de la Red de Emcali



[Fuente: EMCALI GUENT]

El proceso inicia con el conocimiento detallado del núcleo de la red de telecomunicaciones de la empresa (red de transmisión), entendiendo el funcionamiento de sus elementos y con ello conociendo el estado actual para

desarrollar una estrategia de transición hacia una AON. La información de éste capítulo se basa en la página del SIUST, documentos del GUENT⁶⁵, entrevistas realizadas al personal encargado del área y en documentos de SintraEMCALI, producto de la socialización hecha de la componente de Telecomunicaciones en el proceso de defensa contra la privatización.

La figura 3.6 muestra los módulos que constituyen la red de EMCALI y en la tabla 3.3 se describe cada uno de los componentes.

Tabla 3.3 - Contenido de cada módulo de la red de EMCALI

PLANTA INTERNA	PLANTA EXTERNA	RED DE TRANSMISIÓN	NODOS DE CONMUTACIÓN RED PÚBLICA DE DATOS	NODO DE INTERNET	BANDA ANCHA (xDSL)
Centrales Tandem (Colón 2, Centro 5, Guabito 3)	874,992 pares de cobre	Nodos de transmisión: multiplexores SDH nivel 2 (STM4) marca GPT (Siemens)	Conmutadores ATM en su backbone, basados en una infraestructura de conmutación de paquetes, con switches Magellan de Nortel.	Conexión a los NAS (RAS) (MAX TNT, APX8000), interconectados con la red PSTN a través de PRI's y son autenticados por un servidor AAA RADIUS (Navisradius de Lucent).	82,447 Puertos en planta interna. 66,054 clientes instalados y 16,393 puertos disponibles.
30 Centrales Telefónicas Digitales	16 radio bases para Telefonía Inalámbrica	252 sistemas E1 a nivel de línea	El backbone tiene (6) equipos Passport 160 (PP) en las centrales de Limonar, San Fernando, Centro, Versalles y La Flora interconectados a través de enlaces E3/ATM con interfaces eléctricas a través de la red SDH.	Los Servicios de Internet se prestan a través de los siguientes servidores: - Servidores de Hosting y FTP. Sistema Unix y sistema operativo Solaris 9. Servidores de Correo y WebMail con sendmail y Framework de Horde	
1 central telefónica inalámbrica (estándar GSM)	483 km. de Fibra Óptica en 12 anillos y 32 tramos troncales	Tramos protegidos en configuración 1+1 a nivel de línea óptica STM4	El backbone tiene trece (13) equipos Passport 50 (614 puertos instalados) versión PCR 4.2 con los cuales también se atienden los requerimientos de alta velocidad (backplane 1.6 Gbps).	La topología de la red actual de Internet está compuesta por los siguientes equipos: Un (1) Switch de Core, que integra todos los dispositivos de la Red. Un (1) enrutador de Borde ZTE T64 que conecta el nodo con el backbone de Internet a través de un carrier internacional.	
(Gateway de señalización y de troncales – TDM IP		Interfaces STM1, PDH140, E3 y E1 a nivel de tributarios eléctricos	Acceso implementado con equipos DPN-100/3 (tecnología ATM)		
Softswitch		Tarjetas de alimentación y conmutación en configuración 1+1.	El Backbone está interconectado con Medellín (UNE) y Bogotá (UNE) con enlaces E3/ATM a través de la red de UNE. Desde el nodo de San Fernando se cuenta con un enlace E3/ATM con el nodo de Internet de EMCALI EICE ESP GUENT a través de un router Cisco 7507.		
Nodo de Internet y nodo red de datos			En las centrales de Tequendama, Colón, Salomia, Parcelaciones, Yumbo, Zona Franca Manuel Carvajal Sinisterra y Peñón se tienen Passport 50 interconectados a través de E1.		
Enlaces de microondas					
Sistema Digital para comunicaciones trunking (Tetra)					

[Fuente: EMCALI GUENT]

3.1.3.1 Red NGN de EMCALI

La firma tiene una red multicapa con una plataforma adquirida en 2007 de ZTE (Zhong Xing Telecommunication Equipment) que permite la prestación de servicios integrados de voz, datos y video acordes con las prácticas mundiales de convergencia NGN. Con ésta plataforma ofrece accesos de banda ancha, servicios de internet,

⁶⁵ **GUENT** (Gerencia Unidad Estrategia en el Negocio de las Telecomunicaciones)

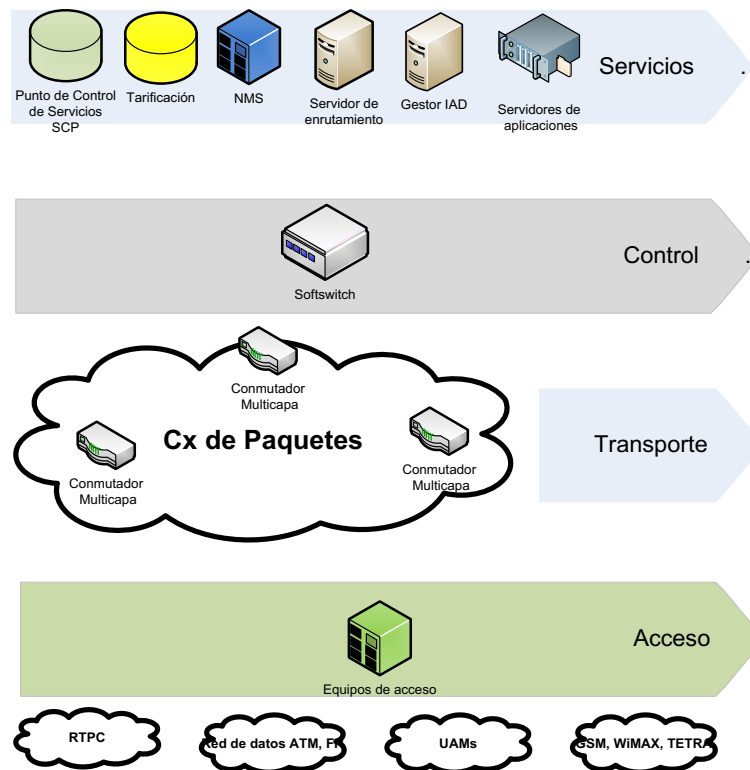
conexiones punto a punto, servicios de voz a través de POTS, telefonía IP, servicios de red inteligente, televisión IP y servicios de IVR, entre otros. La red NGN de EMCALI está conformada por cuatro capas como lo muestra la figura 3.7.

- La capa de servicios facilita la creación y entrega de servicios a través de plataformas con interfaces abiertas que permiten el desarrollo de aplicaciones internas y externas.
- La capa de control facilita el establecimiento de sesiones a través de los dispositivos de señalización, en ella se realiza el control de las operaciones y de los dispositivos, asegurando la prestación de servicios a la capa superior y la correcta comunicación con las capas inferiores.
- La capa de transporte garantiza la conexión entre equipos finales dependiendo de los requerimientos del servicio, capacidades de los terminales y la disponibilidad de recursos en los nodos de la red.
- La capa de acceso permite a los usuarios conectarse a la red y acceder al portafolio de servicios de la empresa.

Dentro de dispositivos de red, se destacan funcionalidades de los siguientes equipos:

- El Softswitch: Es el controlador principal del sistema que realiza la gestión de llamadas, la adaptación de los protocolos de acceso, servicio de entrega, OAM (Operación, Administración y Mantenimiento), autenticación y contabilidad.
- El Sistema de Gestión de Red (NMS): Gestiona todos los elementos de red, usualmente se utiliza SNMP para comunicarse con los elementos de la red.
- Pasarela de acceso: Se encuentra en la capa de acceso de la NGN y proporcionar servicios de VoIP a los abonados analógicos.

Figura 3-7 – Modelo en capas de la red NGN de EMCALI



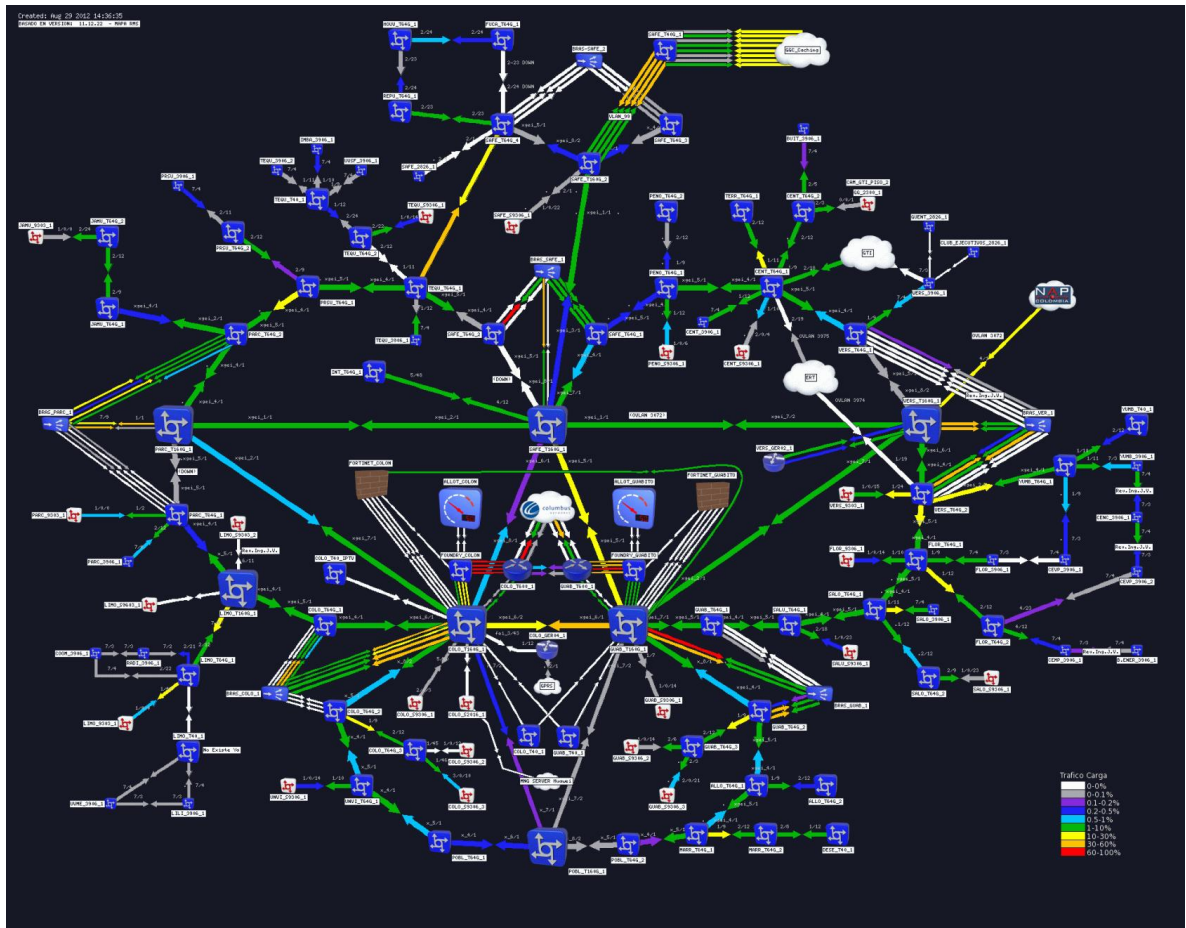
Dispositivos de acceso integrado (IAD): Ofrece servicios de voz y datos para abonados SOHO mediante la conexión de equipos terminales de los abonados, tales como PC, teléfono y fax en la red de paquetes. En cuanto porcentaje de utilización de la red, se presenta un gráfico de las estadísticas de uso en una hora crítica (Datos obtenidos el 29 de agosto de 2012 entre las 2 pm y las 3pm).

En la figura 3.8 se observa que la mayor parte de los enlaces es de color verde (indica que la carga está entre el 1 y el 10% de la capacidad del enlace), aunque existen algunos azules (indica que la carga está entre el 0.2 y el 0.5% de la capacidad del enlace) y grises (indica que la carga está entre el 0 y el 0.1% de la capacidad del enlace).

Los datos se tomaron en una hora de tráfico pico de la red, y evidencian que el tráfico con los usuarios actuales es inferior al 10% de la capacidad instalada. Se debe anotar que esos mismos datos fueron tomados cuando se aprobó la tesis (marzo de 2010) y el porcentaje de utilización en hora pico era inferior al 3%, lo que denota un crecimiento aproximado del 7% en los últimos 30 meses por los usuarios nuevos en el sistema, los abonados migrados a telefonía IP y el aumento de ancho de banda a 2, 4, 8 y 20 Mbps de algunos clientes ADSL.

La red de datos de EMCALI se conoce como "Carrier Ethernet" prestando el servicio de transporte a través de QinQ, los protocolos que tienen en la red para dar continuidad del servicio y ruta de respaldo en caso de ruptura de fibra se realiza con un protocolo propietario de ZTE (Gears), similar al Spanning Tree con algunas mejoras que permiten crear una mayor cantidad de VLANs. En Spanning tree se crean una instancias con deficiencias de restauración (con tiempos de restauración superiores a 3 minutos, con MPLS se podría reducir a 50 mS), cada vez que se crea una VLAN los puertos entran en bloqueo, en escucha o en reenvío (tres estados de spanning tree), además cuando falla una interfaz el protocolo debe recalculer la ruta.

Figura 3-8 – Estadísticas de utilización de la red Metro Ethernet



El servicio de banda ancha se configura a los clientes a través de VLANs punto a punto, en capa 2 se lleva desde la premisa de usuario hasta los equipos BRAS que agregan todo el acceso masivo y el acceso corporativo, los BRAS suben el tráfico a capa 3, autentica los usuarios y lo entrega el tráfico a los enrutadores de Guabito y Colón.

Los servidores BRAS tienen una conexión directa entre ellos. En algunos casos se asigna una única VLAN QinQ a todo el DSLAM e internamente en el DSLAM se configura VLAN por tarjeta (con una densidad de 16 y 24 usuarios por tarjeta). Algunas veces segmentan VLAN por usuario para brindar mayor privacidad y mejor rendimiento. Con el protocolo QinQ (802.1Q avanzado) puede crecer el número de VLANs, con 802.1q se pueden configurar hasta 4096 VLANs, pero con QinQ se crean túneles por cada una, lo que da la posibilidad de crear 4096 “sub VLANs” por cada VLAN 802.1q.

En la configuración que ha realizado el operador siempre ha buscado evitar los saltos, de manera que la información del usuario alcance rápidamente el BRAS, pues entre menos saltos se tengan será más rápido y eficiente la prestación del servicio. En cada salto la trama o el paquete se retarda por el procesamiento que se le debe hacer en el equipo, por ejemplo: si un usuario conectado a Versalles solicita el servicio de Internet, debe atravesar más de 4 equipos (conmutadores y enrutadores), si se trabaja con VLANs la información genera un

bypass por los enrutadores disminuyendo el tiempo de procesamiento (Ver Figura 3.8), ese mismo evento requeriría mayor procesamiento si se trabaja en capa 3 (con protocolo IP).

En la figura 3.8 se identifican la conexión en un sentido entre el nodo de Guabito y el BRAS de Guabito de color rojo, indicando que enlace superó el 60% de su capacidad. Igualmente sucede con la conexión hacia el ISP (Columbus).

El operador tiene colocación de servidores en Boca Ratón (Miami - EEUU), ubicación donde llegan todos los ISP de Estados Unidos y sale de Colombia a través de Columbus.

Los servidores Allot que aparecen cerca a la conexión con Columbus son administradores de ancho de banda, que además de garantizar calidad de servicio, busca evitar que los usuarios superen las velocidades contratadas, aún después del correspondiente control que ejercen los servidores BRAS.

La red cuenta con 130000 usuarios ADSL y casi 200000 abonados de telefonía IP (Se están migrando lentamente todos los usuarios de TBLC).

3.1.4 Evaluación de negocio de EMCALI

De acuerdo a los estudios realizados por [54] los servicios de EMCALI son confiables, pero no se evidencia una atención personalizada, o soporte por medio de Ejecutivos de cuenta. Aunque Emcali ofrece Hosting a los usuarios que compran ADSL, aunque los clientes no hacen uso de este servicio adicional. La empresa logra llegar a sus clientes con su operador nacional 0484 e internacional 00484. Sin embargo, por ser el operador con la mayor penetración en líneas básicas, debería ser el operador más usado para llamadas fuera de la ciudad, esto puede ser por falta de publicidad y tarifas no competitivas.

Según los resultados del estudio [54], EMCALI tiene mayor cobertura que los otros operadores, principalmente debido a la trayectoria que lleva en la ciudad. Su producto fuerte en las PYMES de Salud es la línea básica, negocio en decadencia, pero a nivel de internet fijo, los otros operadores están ganando espacio dentro de la ciudad. Hay una baja percepción con respecto al servicio al cliente, siendo la empresa con mayor cantidad de centros de atención, la calidad del servicio no registra buenos resultados, aparece un bajo registro en atención personalizada, no es homogéneo el resultado con respecto a la cantidad de los centros de atención, pero sigue siendo un operador atractivo por la cantidad de puntos cercanos de pago.

3.1.5 Demanda de tráfico proyectado

Los servicios básicos de telecomunicaciones como la voz, la mensajería sencilla, el correo electrónico y el acceso a Internet son importantes para el desarrollo de las economías locales; hoy en día la prestación de estos servicios a través de la telefonía móvil tiene mayor asequibilidad y capacidad de expansión y ésta oferta se ha venido aumentando gracias a varios factores:

- Ampliación de cobertura y la reducción de costos por economía de escala de los operadores.
- Reducción de costos de equipos por parte de los fabricantes.
- Creación políticas gubernamentales que favorecen la competencia y disminuyen costos.

Pero además de los servicios básicos, la creación de nuevos servicios de valor agregado es imperativa para la supervivencia de un operador en la economía actual. El ciclo de vida en la creación de servicios consta de 5 fases: concepción, definición, diseño, desarrollo e implementación y prueba, una vez agotadas estas cinco fases se procede al despliegue del mismo.

Dentro de las estrategias que ha planteado la empresa están la penetración de la televisión IP con canales de definición estándar con consumo de 4 Mbps por canal y consumo por canal de alta definición de 19,6 Mbps. Además se continuarán ofreciendo servicios agregados que permitan un crecimiento sostenible en el mercado y plantear alternativas como servicios móviles e inalámbricos de banda ancha que sirvan como alternativas para un crecimiento como se plantea en [6] [56][57].

Con base en [44] y las proyecciones de Cisco Visual Networking Index (VNI) [48] proyectando el tráfico para la ciudad de Cali (en el año 2030 con 2'800.000 habitantes – Ver Figura 3.1c) se tendrán en la ciudad más de 1'517.000 conexiones de banda ancha de 20 Mbps (Ver figura 3.1 d), esto requerirá capacidad de manejo de velocidades en el núcleo del orden de 30 Tbps.

Para que la empresa logre mantenerse en el mercado deberá tener un crecimiento similar al de la competencia (UNE y Telmex). En el mejor de los casos y según las proyecciones de tráfico de las redes a nivel global, aplicando el método de análisis de tendencias en el tiempo, donde se asume que el desarrollo seguirá una curva ajustada a los datos históricos existentes y proyectando el número de suscriptores de internet de banda ancha para 2030 coherente a las proyecciones presentadas en la figura 3.3.

3.2 MIGRACIÓN DE EMCALI HACIA UNA AON

El proceso de migración debe suplir la demanda de tráfico proyectada, dependiendo de la escala de tiempo del caso de migración se pueden llevar a cabo diferentes actividades:

- Migración a largo plazo: Se definen y dimensionan las partes de la red que se caracterizan por una larga vida útil y grandes inversiones para su implementación.
- Migración a Mediano Plazo: Parte del análisis del comportamiento de los nodos, enlaces y subredes; junto con la lista de acciones de migración, procedimientos involucrados en el proceso de migración para garantizar la convergencia según lo que se establezca en los planes a largo plazo. En síntesis, aquí se debe tener como objetivo la mejora de la capacidad de los nodos y enlaces de la red.
- Migración a Corto Plazo: Se determinan las rutas y los sistemas de telecomunicaciones que soporten la demanda actual. Es decir, la red se debe ajustar para satisfacer la demanda actual con la capacidad ya instalada sin inversiones adicionales de capital.

3.2.1 Migración a corto plazo - Configuración de la Arquitectura MPLS o invertir en ASON

Opción 1 - MPLS:

De acuerdo al modelo de migración la red se debe ajustarse para satisfacer la demanda actual con la capacidad ya instalada sin inversiones adicionales de capital y MPLS es la alternativa con que cuenta en virtud a las últimas inversiones en equipos que soportan dicha tecnología.

La infraestructura de red actual permite configurar el transporte MPLS, dando la posibilidad de manejar servicios diferenciados con calidad de servicio por varios años. Los puertos de los conmutadores actuales soportan velocidades de 10 Gbps y las distancias entre nodos son cortas (inferiores a 16 kms). Con el tráfico cursado hoy en día se atiende un promedio de 17000 usuarios de datos de 1Mbps y aun así en horas pico se llega a menos del 10% de su capacidad, el único enlace que tiene un porcentaje elevado (10 - 30%) de utilización es el de San Fernando – Guabito. Bajo las condiciones actuales, los conmutadores manejan una velocidad de 10Gbps y está transitando un tráfico promedio de 500 usuarios de forma concurrente en la hora pico, equivale al 2,94% del total de usuarios por nodo.

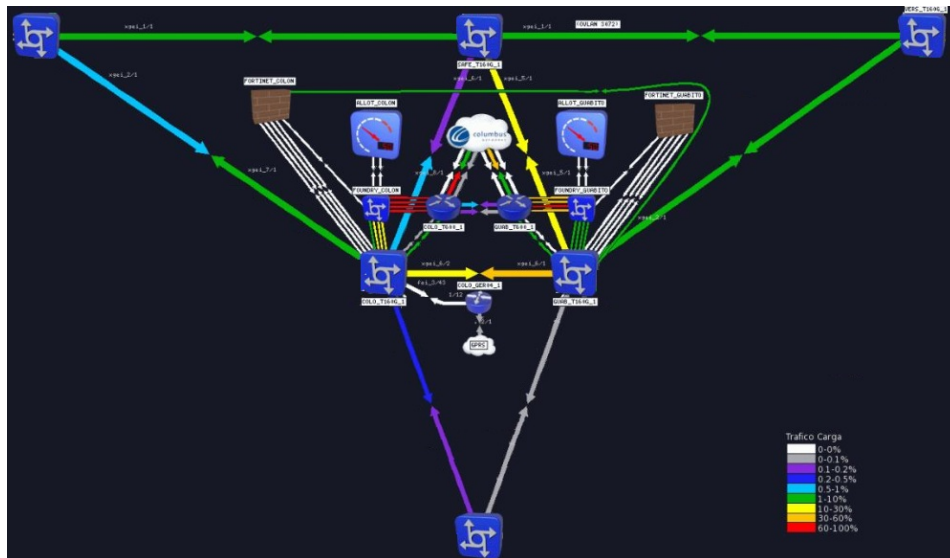
Para migrar el núcleo de la red a la tecnología MPLS se debe realizar una programación en tiempo con los usuarios por sectores de la red, pues implica la desconexión temporal de los servicios.

El análisis de respuesta para la migración hacia una red MPLS se realiza en el siguiente capítulo, utilizando el software de simulación OpenSimMPLS [58]. Con ésta herramienta se realiza la simulación de garantía de servicio sobre MPLS.

MPLS realiza direccionamiento de la información por paquete utilizando etiquetas de capa 2, con las siguientes ventajas asociadas [59]:

- Capacidad de integrar voz, vídeo y datos en una plataforma basada en paquetes con ingeniería de tráfico y garantías de calidad de servicio (QoS).
- Alto rendimiento y disponibilidad de servicios frente a redes metro Ethernet.
- La topología de muchos-a-muchos (any-to-any) ofrece a los administradores flexibilidad para desviar tráfico sobre la marcha en caso de fallo de enlaces y congestión de red.

Figura 3-9 – Trafico del núcleo de la red a horas pico (2:32PM)



Opción 2 – Primer paso de migración hacia ASON

El primer paso en el camino de la evolución hacia ASON es el aumento de flexibilidad mediante la introducción de sistemas WDM reconfigurables. En lugar de los sistemas WDM punto a punto existentes se deben tener nodos capaces de enrutar señales a nivel de longitud de onda, además se requiere invertir en OADMs, OXCs, láseres sintonizables y receptores ópticos compatibles con dichos equipos. Aunque éstos equipos mejorarán la flexibilidad, usualmente no se utilizan en redes metropolitanas, sino en el núcleo de redes de larga distancia reconfigurables. En el entorno metropolitano los operadores están desplegando Gigabit Ethernet. Como opción a corto plazo, se debe definir claramente en el núcleo de la red la arquitectura por capas con WDM reconfigurable. La tabla 3.4b establece la valoración según los criterios establecidos en la tabla 3.4a y en el numeral 1.1.2.

Tabla 3.4a – Criterios de evaluación

ITEM	Descripción	Rango de valores
Número de nodos	<ul style="list-style-type: none"> Indica el número de nodos que deberán cambiarse según la alternativa indicada 	0: No se debe realizar inversión Media: El costo de cada equipo está entre los US\$100.000 y los US\$1000.000 Alta: El costo de cada equipo está entre los US\$100.000 y los US\$1000.000.
Capacidad por nodo	<ul style="list-style-type: none"> (Características de Enrutamiento y conmutación) Modelos y algoritmos de enrutamiento que soporta. 	0: VPN, ACL, MPLS Media: GMPLS Alta: ASON
Capacidad por enlace: <ul style="list-style-type: none"> Dispositivos terminales (tarjetas de línea, puertos). Equipos de transmisión (fibras, enlaces de radio, líneas alquiladas, y amplificadores ópticos) 	<ul style="list-style-type: none"> Ancho de banda para soportar conexiones concurrentes en hora pico. Depende de la capacidad de los puertos, la longitud geográfica y las características de los puertos en los extremos. El costo de cada enlace incluye la instalación además de los demux y los amplificadores, éstos amplificadores se pueden incluir dentro de la fibra correspondiente 	0: La capacidad actual es suficiente Media: Se deben hacer inversiones inferiores a US\$900.000 Alta: Se deben hacer inversiones superiores a US\$1000.000
Compatibilidad	<ul style="list-style-type: none"> Restricciones de compatibilidad de hardware junto con las limitaciones de enrutamiento 	0: Completamente Incompatibles Media: Algunos Problemas de compatibilidad Alta: Completamente Compatibles
Los dispositivos de conmutación y de conversión.	<ul style="list-style-type: none"> Inversión a realizar en OXCs, PXCs, OADMs ROADMs; MDROADMs. 	0: Ninguno Media: OXC y OADM con conversión O/E/O Alta: WRN, OBSN, OPSN

Aunque la estructura exacta de costos depende de cada tecnología específica, bajo supuestos razonables, el costo de los dispositivos se puede generalizar en los equipos en los nodos, los enlaces lógicos, y los enlaces físicos. El costo de un puerto se puede atribuir directamente a la finalización de la conexión lógica, bajo la suposición de que cada tarjeta de línea proporciona un único puerto, es decir, se termina un solo enlace lógico. En consecuencia, el costo de un enlace lógico depende de su capacidad de los puertos, la longitud geográfica y las características de los puertos en los extremos. Por otro lado, se debe considerar el costo de cada enlace físico que incluye la instalación (depende de la longitud) además de los demux y los amplificadores, éstos amplificadores se pueden incluir dentro de la fibra correspondiente.

Finalmente, en cada nodo de la red se debe incluir el costo de los OXC y los convertidores de longitud de onda. El costo de los empalmes o de cables internos de conexión (pathcords) son insignificantes en comparación con el costo total de la red y se pueden omitir en un proceso de planificación estratégica.

Tabla 3.4b – Criterios de evaluación de la migración a corto plazo

ITEM	Opción1 MPLS	Valoración	Opción 2 ASON	Valoración
Número de nodos	6	0	6 ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por nodo (Características de Enrutamiento y conmutación)	1Gbps512Mbps (throughput) MPLS L3 VPN and VPLS/VPWS	0	10Gbps ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por enlace: • Dispositivos terminales (tarjetas de línea, puertos). • Equipos de transmisión (fibras, enlaces de radio, líneas alquiladas, y amplificadores ópticos)		0	ASON /ASTN /GMPLS	MEDIA
Compatibilidad	ALTA	0	ASON /ASTN/GMPLS	MEDIA
Los dispositivos de conmutación y de conversión.		0	OXC y OADM con conversión O/E/O	ALTA

3.2.2 Migración a mediano plazo – Cambio de fibra en los enlaces del núcleo de la red.

El tiempo de vida de la fibra óptica depende de tres parámetros:

- Fatiga dinámica (Susceptibilidad a la corrosión por fatiga o estrés): Los defectos intrínsecos de la fibra puede aumentar de tamaño bajo la acción de la tensión y en presencia de ciertas sustancias. Este crecimiento lento puede resultar en fracturas de los hilos.
- Fallas de fabricación: La fibra tiene defectos con intervalos de nivel atómico a nivel microscópico. Estos defectos generalmente surgen durante la producción de la fibra y actúan como concentradores de esfuerzos, que debido a la poca elasticidad del vidrio, producen muy altas tensiones locales.
- Fatiga estática: El estrés aplicado a la fibra dentro del cable, tensión aplicada de forma constante sobre la fibra genera fatiga estática y acelera el crecimiento de grietas.

Por otro lado, gran parte de la red de fibra óptica instalada en las redes de la compañía funciona sobre fibra monomodo G.652. Este estándar ha ido mejorando con el paso del tiempo y las fibras que se fabrican actualmente están bastante optimizadas respecto a las que se instalaron en las primeras redes. Para conseguir anchos de banda de transmisión elevados se utilizan nuevas modulaciones, sistemas de compensación y fibras G.655, de dispersión desplazada, pensadas para transmitir en tercera ventana. La tabla 3.5 establece la valoración de la migración a mediano plazo según los criterios establecidos en el numeral 1.1.2.

De tomar la alternativa ASON/ASTN, en esta fase, además de las inversiones adicionales requeridas en equipamiento de los nodos con OADMs y OXCs, se puede realizar el procedimiento de entramado genérico (GFP), que se define como una forma muy efectiva de mapeo de las señales de datos en las redes de transporte [21] [22][27][29]. Se adapta el tráfico de señales de cliente de capa superior sobre SDH/SONET a la OTN, desplazando las características de la red hacia servicios ofrecidos a través de GFP sobre WDM y no sobre la red SDH/SONET.

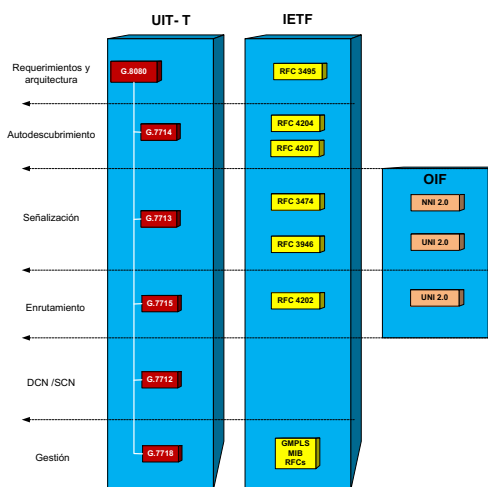
Tabla 3.5 – Criterios de evaluación de la migración a mediano plazo

ITEM	Opción1	Valoración	Opción 2	Valoración
Número de nodos	6	0	6 ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por nodo (Características de Enrutamiento y conmutación)	1Gbps/512Mbps (throughput) MPLS L3 VPN and VPLS/VPWS	0	Continuación 10Gbps ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por enlace: • Dispositivos terminales (tarjetas de línea, puertos). • Equipos de transmisión (fibras, enlaces de radio, líneas alquiladas, y amplificadores ópticos)	Cambiar a cables G655	ALTA	Cambiar a cables G655	ALTA
Compatibilidad	ALTA	0	ASON /ASTN/GMPLS	MEDIA
Los dispositivos de conmutación y de conversión.		0	Continuación OXC y OADM con conversión O/E/O	ALTA

3.2.3 Migración a largo plazo - GMPLS para la red metro de EMCALI

En la figura 3.10 se presenta una relación de las normas y sus funcionalidades acogidas por los organismos de estandarización UIT-T, IETF y OIF.

Figura 3-10 – Relación de Normas y Organismos de estandarización



La industria de telecomunicaciones converge hacia redes basadas en IP, EMCALI no es ajeno a éste entorno de convergencia y desde 2007 viene migrando sus servicios basados en TDM hacia conmutación de paquetes IP. En éste sentido, aunque el modelo ASON es muy robusto, igualmente los equipos que se requieren son muy costosos y dicho modelo se está implementando en redes de larga distancia con altos requerimientos de tráfico y calidad de servicio.

En la tabla 3.6 se muestran los fabricantes en orden de importancia en el mercado al lado de las opciones de equipos utilizados en redes de larga distancia y redes metropolitanas. Todos los fabricantes presentan soluciones con interfaces de 40 Gbps y 100 Gbps que manejan hasta 160 longitudes de onda con la técnica DWDM, además en el caso de las soluciones para largas distancias manejan tecnologías ASON con longitudes sin regeneración superiores a los 2000 km. Para el caso de las soluciones metropolitanas dan la opción de trabajar con MPLS –TP y GMPLS.

Tabla 3.6 – Fabricantes y opciones de equipos comerciales

Fabricante	Solución ASON/ASTN	Solución Metro (GMPLS)
Alcatel - Lucent	LambdaXtreme Transport 1625	Metro Core Connect 1678
Ciena	Ciena 6500	Ciena 4200
Huawei	Optix BWS 1600G/400G	Metro 6100
Infinera	DTN	ATN
NEC	DW4200/DW4000	TM-3000
Nokia – Siemens Nets.	hiT 7100 / hiT 7300	CET - ASPEN
ZTE	ZXWM M920	ZXMP M600

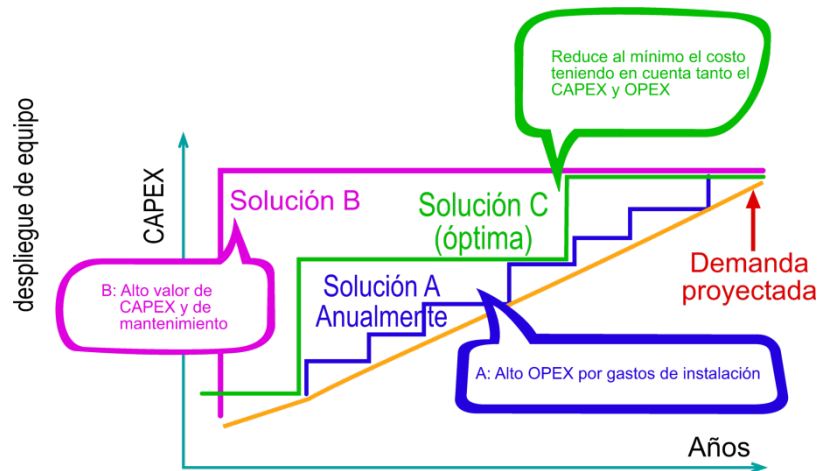
En tanto el crecimiento de las pequeñas redes IP ha permitido que se extiendan las fronteras de las LAN hacia MAN y WAN a través de modelos basados en redes metro Ethernet con costos razonables y a la continua baja por la competencia generada por los fabricantes chinos (Huawei y ZTE). Por ésta razón, los operadores de redes metropolitanas están optando por el modelo GMPLS que les permite comprar equipos con una relación de 1 a 10, frente a los costos de equipos ASON; *es decir mientras un enrutador GMPLS se puede adquirir en U\$100.000 un equipo similar ASON puede estar en los U\$1'000.000*. Esta relación costo/beneficio ha permitido que las redes MPLS y GMPLS sean populares en entornos metropolitanos. La tabla 3.7 establece la valoración de la migración a largo plazo según los criterios establecidos en el numeral 1.1.2.

Tabla 3.7 – Criterios de evaluación de la migración a largo plazo

ITEM	Opción1	Valoración	Opción 2	Valoración
Número de nodos	6	MEDIA	6 ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por nodo (Características de Enrutamiento y conmutación)	GMPLS	MEDIA	Continuación 100Gbps ASON/ASTN	ALTA
Capacidad por enlace: • Dispositivos terminales (tarjetas de línea, puertos). • Equipos de transmisión (fibras, enlaces de radio, líneas alquiladas, y amplificadores ópticos)	Continuación Cambiar a cables G655	MEDIA	Continuación Cambiar a cables G655	MEDIA
Compatibilidad	ALTA	0	ASON /ASTN/GMPLS	MEDIA
Los dispositivos de conmutación y de conversión.	WRN, OBSN, OPSN	ALTA	Continuación OXC y OADM con conversión O/E/O	ALTA

El equipamiento y la infraestructura de telecomunicaciones deben instalarse en periodos de tiempo en función de la evolución de la demanda. Los intervalos de aprovisionamiento deben ser función de la tasa de crecimiento de la demanda, la capacidad de los sistemas y la modularidad, se recomienda el escenario C de la figura 3.11, el número y el volumen de aprovisionamiento se ha optimizado para reducir al mínimo costo teniendo en cuenta tanto el CAPEX y OPEX, manteniendo las tasas de utilización con la suficiente de calidad de servicio.

Figura 3-11 –Implementación de recursos



Los parámetros clave que más influyen en la decisión son el grado de obsolescencia de los equipos o el tiempo restante del período de ciclo de vida, los nuevos clientes, las tarifas y los flujos de efectivo esperados por los nuevos servicios. Hacer una evaluación comparativa con el fin de sobrevivir en un entorno competitivo.

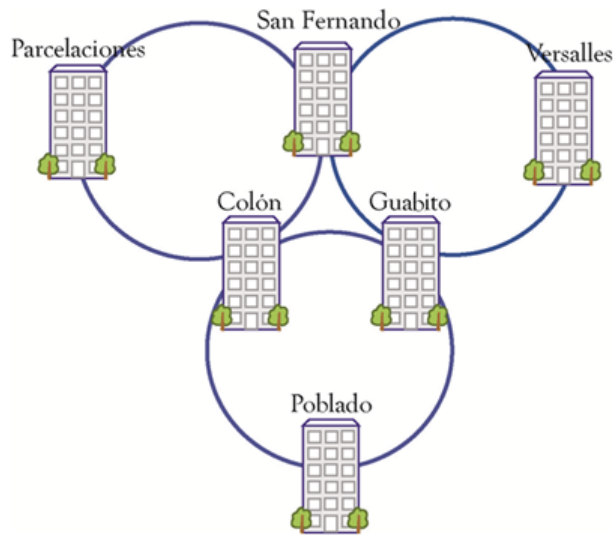
3.3 MODELO SIMPLIFICADO DE LA RED

Con base en los resultados obtenidos se identificaron los nodos principales de la red cuyo nivel de importancia se relaciona con la ubicación y el volumen de subscriptores conectado a cada uno de ellos. A partir de esos datos, se realizó la construcción del modelo simplificado de la red.

Modelo simplificado de la red SDH: La red de transporte es el núcleo de la red de la empresa, antes de adquirir la plataforma multiservicios, la red de estaba constituida por equipos SDH y algunos PDH cuyos usuarios lentamente se han ido migrando hacia la nueva plataforma. Esta red, aún operativa consta de:

- Nodos de transmisión: multiplexores SDH nivel 2 (STM4) y SDH nivel 3 (STM16) y marca GPT (Siemens)
- 252 sistemas E1 a nivel de línea
- Tramos protegidos en configuración 1+1 a nivel de línea óptica STM4.
- Interfaces STM1, PDH140, E3 y E1 a nivel de tributarios eléctricos
- Tarjetas de alimentación y conmutación en configuración 1+1.
- Fibra Óptica (monomodo 1310 nm) usada para conectar entre sí los equipos SDH y PDH a nivel troncal y de acceso terminados en ODFs o cajas terminales ópticas en las diferentes centrales o premisas de grandes clientes.

Figura 3-12 – Modelo simplificado del núcleo de la red SDH de EMCALI



En la figura 3.12 se muestran los nodos principales de la red y los anillos que la constituyen. Los equipos SDH se encuentran ubicados formando cuatro (4) anillos principales con cables de fibra óptica de 96 hilos (fibra que cumple con la recomendación UIT –T G.652d de referencia gty53 -96t), en algunos casos como el anillo de Versalles, Guabito, San Fernando se realizaron tendidos de con un cable adicional de 48 hilos (fibra que cumple con la recomendación UIT –T G.652 de referencia gty53 -48t). Como se presenta en la tabla 3.8 las distancias entre los nodos son inferiores a los 16 kilómetros:

Tabla 3.8 – Distancias en km entre los principales nodos de la red

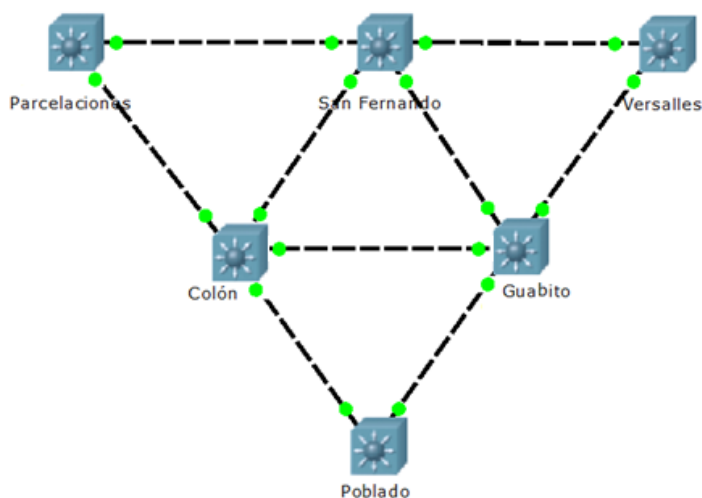
Nodo A	Nodo B	Distancia en kilómetros
San Fernando	Parcelaciones	11.79
San Fernando	Versalles	5.12

San Fernando	Colón	2.93
San Fernando	Guabito	4.87
San Fernando	Poblado	5.87
Colón	Parcelaciones	11.54
Colón	Versalles	6.13
Colón	Guabito	4.90
Colón	Poblado	5.23
Versalles	Parcelaciones	15.27
Versalles	Guabito	4.15
Versalles	Poblado	8.12
Guabito	Poblado	5.72
Guabito	Parcelaciones	13.9

Modelo simplificado de la red de conmutación de paquetes: En los 6 nodos principales de la red (Parcelaciones, San Fernando, Versalles, Colón, Guabito y Poblado) se ubican conmutadores IP de capa 3 (ZTE ZRX10 – T64G) y se interconectan casi de forma paralela a la red SDH utilizando hilos diferentes del cable de fibra la fibra gty53-96t, utilizando la tecnología metro Ethernet en la capa 2 con capacidad de 10 Gbps por enlace como se muestra en la figura. La red cuenta con dos enrutadores ZTE T600 en Guabito y Colón.

Gracias a que se instalaron en la mayoría de enlaces cables de 96 hilos (coexisten la red SDH y la red Ethernet), se utilizan 2 pares para la red SDH, 2 pares por lado de cada anillo para la red metro Ethernet y se están utilizando los demás para clientes corporativos y para alquiler de fibra obscura. En la figura 3.13 se presenta el modelo simplificado del núcleo de la red NGN.

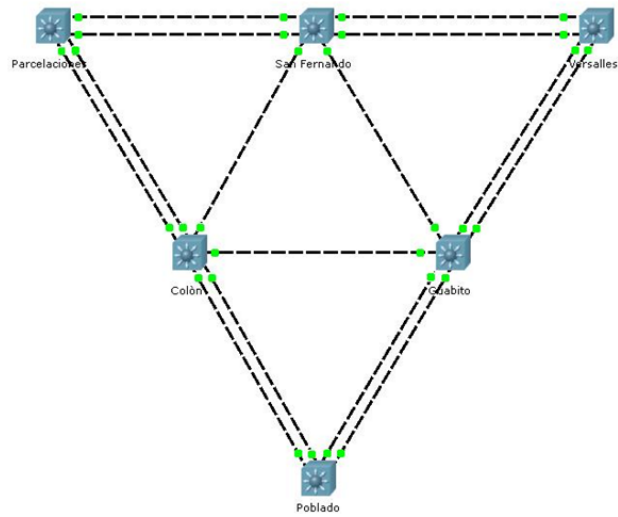
Figura 3-13 – Modelo simplificado del núcleo de la red NGN de EMCALI



3.4 MIGRACIÓN A CORTO PLAZO

La red actual del operador es una Metro Ethernet basada en conmutadores de capa 3 con VLANs conectadas mediante fibra óptica mono modo G.652. El proceso de migración hacia MPLS debe ser planeado cuidadosamente debido a que es un operador “Carrier Ethernet” cuyos equipos están fuertemente atados a esa tecnología mediante QinQ. Una opción es la migración por sectores, buscando la manera de configurar VPLS, mediante técnicas de “seudo cables” o conexiones virtuales [60].

Figura 3-14 – Topología Metro Ethernet utilizada por el operador



La red cuenta con 6 conmutadores de capa 3 ubicados y conectados como se muestra en la figura 3.14 (realizada en Cisco Packet Tracer). Los enlaces dobles se establecen a través de rutas geográficas diferentes, que además de conectar los nodos secundarios intermedios, aumenta la disponibilidad del servicio.

Los equipos están conectados sobre anillos físicos con cables de fibra de 96 hilos con algunos enlaces redundantes como se aprecia en la figura 3.3, tendidos de la siguiente manera:

- Anillo 1: Parcelaciones, San Fernando, Colón.
- Anillo 2: San Fernando, Versalles, Guabito
- Anillo 3: Colón, Guabito, Poblado.

3.4.1 Ventajas de la topología actual

- Al ser una red Metro Ethernet, esta permite configuración tanto de balanceo de cargas y parámetros básicos de QoS. Esto garantiza un tratamiento adecuado del tráfico de la red y algunas características especiales en el tratamiento de los paquetes que circulan por la red, dando prioridad al tráfico según su importancia.
- La topología cuenta con enlaces redundantes que aumenta el porcentaje de disponibilidad del servicio.

3.4.2 Limitaciones de la topología actual

La mayoría de enlaces tiene una ruta alterna para el envío de tráfico, por lo tanto esta red puede ser configurada con parámetros de balanceo de Cargas. El balanceo de cargas permite dividir el tráfico en dos o más caminos para garantizar un óptimo rendimiento. Pero, de presentarse una falla en uno de los enlaces adyacentes a los nodos de San Fernando, Colón y Guabito el rendimiento de la red puede caer. Los enlaces directos entre los nodos citados no cuentan con redundancia, por lo que son vulnerables, y ante una falla no se establece el balanceo de cargas; todo el tráfico será enviado por otro enlace activo que incluye un salto adicional, duplicando el tráfico con el riesgo de saturar y aislar un segmento de la red. Este fenómeno también afectará la calidad del servicio, pues uno de los nodos empezará a descartar paquetes causando degradación del servicio. Para el análisis se simuló varios escenarios donde se representan posibles fallas y la correspondiente solución [60][61].

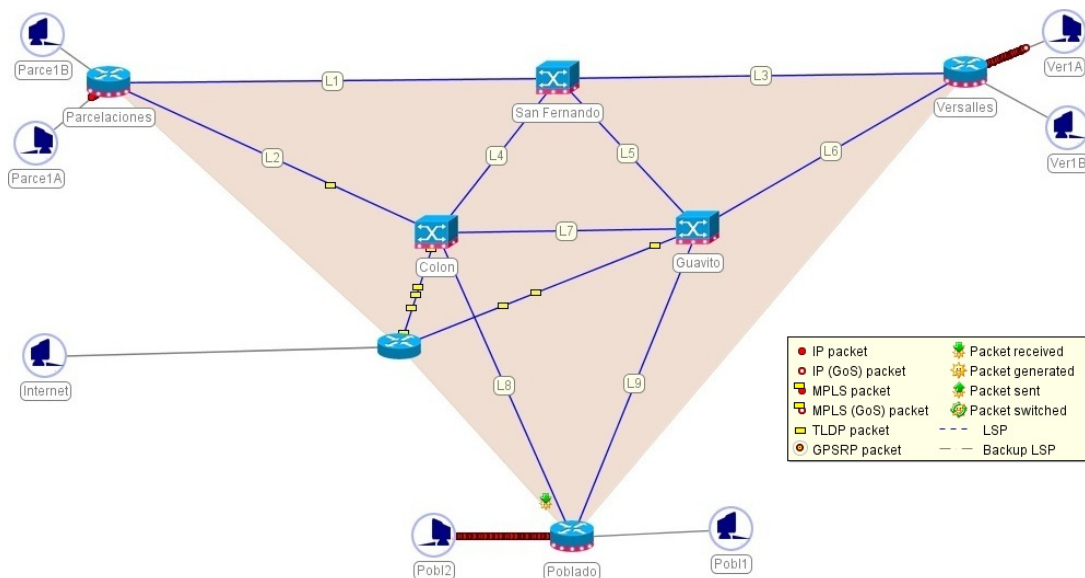
3.4.3 Escenario de simulación en OpenSimMPLS

Se plantean a continuación un escenario MPLS donde se efectúan diferentes tipos de fallas que ponen en evidencia el rendimiento y autorecuperación de MPLS. Se establecen en esto escenarios la efectividad y las soluciones frente a estas fallas.

En este escenario se establecen 3 niveles de calidad de servicio extremo a extremo en las troncales. Se realiza diferenciación de tráfico, optimización de recursos y balanceo de cargas de la red. En la figura 3.15 se ilustran 3 emisores, y 4 receptores generando tráfico con calidad de servicio. Versalles QoS 1, Poblado QoS 2 y parcelaciones paquetes IP.

La simulación es realizada en OpenSimMPLS donde se identifican nodos LSR activos en San Fernando, Colón y Guavito, equipos LER activos en Parcelaciones, Versalles y Poblado, además de un LER estableciendo conexión a Internet a toda la red a través de Columbus. En la simulación los equipos conectados a los LER envían tráfico hacia internet buscando rutas (LSP) de subida (upstream). MPLS no asigna LSPs bidireccionales, por cuanto se deben establecer LSPs de bajada (Downstream) que pueden ocupar la misma ruta física de subida pero con otras etiquetas.

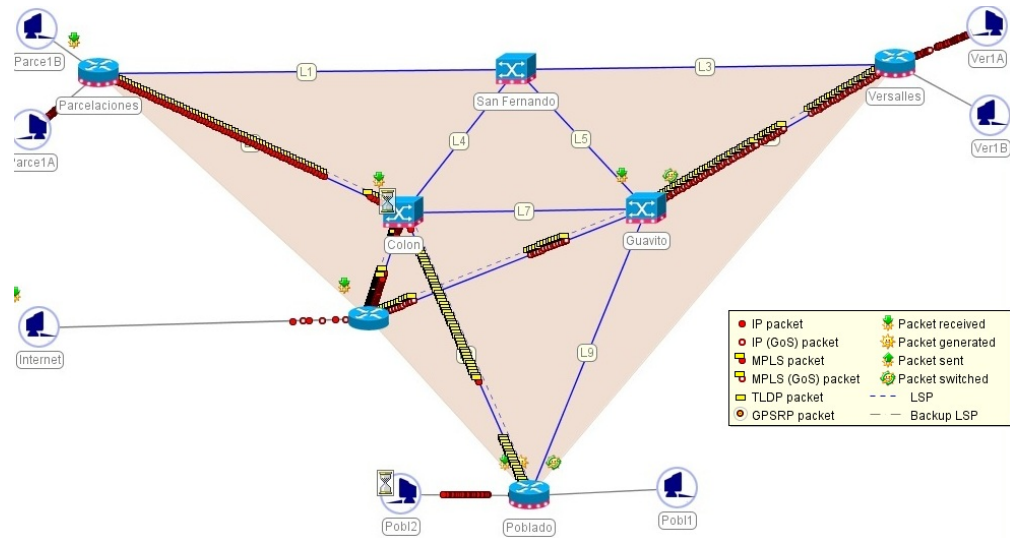
Figura 3-15 – Escenario de simulación de la red de EMCALI en OpenSimMPLS



En el escenario presentado se realiza la simulación sobre las capas 2 y 3 del modelo OSI, la redundancia de las líneas se tiene en cuenta únicamente en la capa física. En la figura 3.4 se identifican las etiquetas enviadas por los generadores de tráfico ubicados en los nodos de Parcelaciones, Versalles y Poblado. Las etiquetas se envían para establecer la ruta extremo a extremo que tendrían los paquetes, una vez establecida la ruta se transmiten ráfagas donde los nodos LSR y LER sólo identifican la etiqueta correspondiente y se asigna la ruta en capa 2.

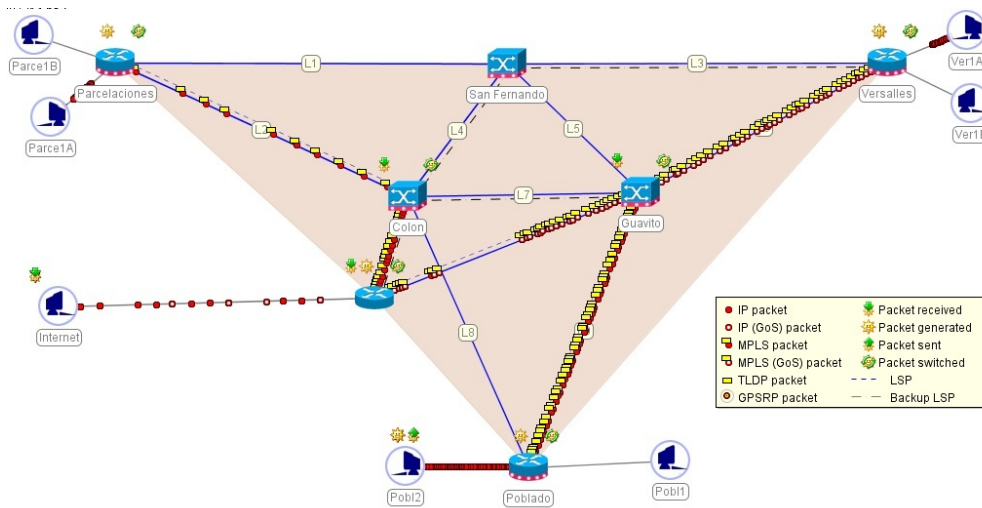
En la figura 3.16 se identifican las líneas punteadas indicando la ruta trazada inicialmente por las etiquetas TLDP, igualmente se observa entrando paquetes IP puros a los LER, se etiquetan, transitan dentro de la red MPLS y al salir se les retira la etiqueta.

Figura 3-16 – Tráfico sobre las rutas establecidas previamente



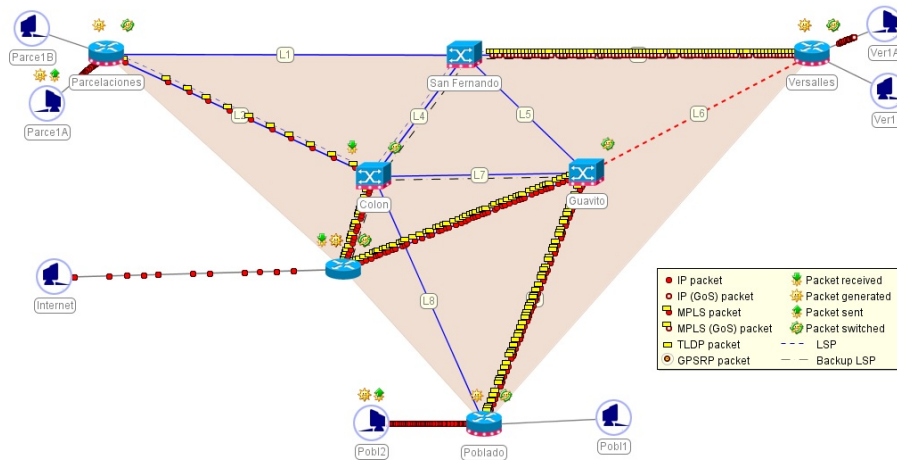
La característica de las redes MPLS es la reserva de recursos extremo a extremo antes de enviar el tráfico, en el caso de la red Metro Ethernet la decisión de la ruta se toma en cada nodo (salto a salto), según la configuración de los dispositivos que haya dispuesto el administrador.

Figura 3-17 – Enlace activo L6, enlace de backup L3, L4.



Por lo anterior ante una caída en un enlace, las características de balanceo de carga y calidad de servicio se deterioran, en tanto la red MPLS garantiza buscar rutas alternativas, si ya existe una ruta de backup, el tiempo de restablecimiento será aún más rápido como se presenta en la figura 3.18, de no existir la ruta alternativa el servicio sufriría un retardo adicional mientras los equipos la buscan.

Figura 3-18 – Nueva ruta de tráfico L3, L4 por daños en el enlace L6.



Ante un eventual fallo del enlace, la ruta de buckup restablece rápidamente la comunicación extremo a extremo entre los nodos de Versailles e Internet. Fallo que podría darse por un corte físico o por saturación en el enlace.

Figura 3-19 – Estadísticas de simulación del modelo de migración a corto plazo



(a) Paquetes recibidos según clase de servicio; paquetes transmitidos por (b) Parcelaciones, (c) Versailles, (d) Poblado

En la figura 3.19 se muestran las estadísticas de paquetes recibidos según prioridad establecida en el escenario de la figura 3.18. Se identifican:

- Paquetes de color rojo con QoS 1 (ver Figura 3.19c – paquetes transmitidos desde el nodo de Versailles hacia internet: 1000 paquetes por segundo).
- Paquetes de color azul con QoS 2 (ver Figura 3.19d – paquetes transmitidos desde el nodo de Poblado hacia internet: 1000 paquetes por segundo).
- Paquetes de color verde, los paquetes IP sin Qos. (ver Figura 3.19a – paquetes transmitidos desde el nodo de Parcelaciones hacia internet: 1000 paquetes por segundo).

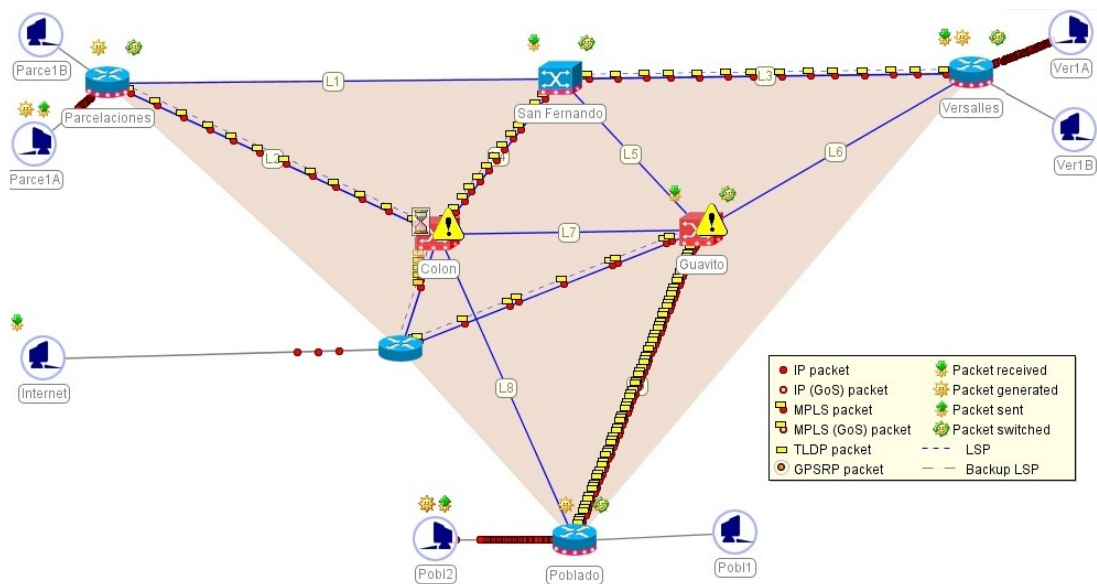
- En la figura 3.19a se grafican los paquetes que ser reciben y dependiendo de la calidad del servicio del paquete se dará mayor prioridad. En éste caso se identifica que aunque se están transmitiendo 1000 paquetes por segundo de los tres nodos, tiene prioridad el tráfico con QoS 1.

Otra de las ventajas de MPLS es la posibilidad de etiquetar paquetes según la clase de servicio y dar prioridad a las etiquetas que transporten un servicio que así lo requiera.

Esta característica da la posibilidad al operador de prestar servicios diferenciados a clientes corporativos a través de la misma infraestructura de red.

La implementación de mecanismo de recuperación local admite que ante la caída accidental de un enlace de la topología que afecte a un LSP por el que circula un flujo tráfico privilegiado, pueda establecerse de una forma adecuada un circuito alternativo cuyas propiedades sean equivalentes y así el tráfico privilegiado pueda ser nuevamente enrutado.

Figura 3-20 – Trafico saturando el núcleo de la red.



La figura 3.20 muestra unos símbolos de admiración en los nodos de Colón y Guavito, que indican que el nivel de congestión está entre el 96% y el 100%; por cuanto es inminente que el nodo comience a descartar paquetes por saturación de su búfer.

Según las proyecciones de tráfico para 2018 deben existir en Cali 450000 suscriptores, aproximadamente 75000 suscriptores por nodo, a una tasa de 10 Mbps por usuario (Valor promedio estimado de banda ancha para 2018) genera un tráfico máximo concurrente de 750 Gbps o un tráfico pico promedio del 5% (37,5 Gps). Condiciones que deben preverse para evitar saturación en uno o varios nodos, generando degradación del servicio como muestra la figura 3.20.

3.5 MIGRACIÓN A MEDIANO PLAZO

Parte del análisis del comportamiento de los nodos, enlaces y subredes; junto con la lista de acciones de migración, procedimientos involucrados en el proceso de migración para garantizar la convergencia según lo que se establezca en los planes a largo plazo. En síntesis, aquí se tiene como objetivo la mejora de la capacidad de los nodos y enlaces de la red.

Desde el punto de vista de la fibra óptica, la empresa instaló los primeros tramos en los 90s enlazando mediante anillos redundantes los principales nodos de transmisión. Desde el año 2007 de forma paralela al servicio de acceso XDSL está ofertando fibra óptica, buscando el retorno de las inversiones realizadas en infraestructura multiservicios y canales ópticos cuya ocupación actual no supera el 10% (ver figura 3.8).

Aparentemente la red está sobredimensionada al tráfico actual y se puede pensar apresuradamente su saturación tardaría años o décadas, pero según las proyecciones el crecimiento de tráfico hará que en un punto requiera pensar en equipos de conmutación WDM en el núcleo y fibras que soporten varias longitudes de onda.

La capa de datos en una red óptica debe realizar un enlace extremo a extremo en el dominio fotónico, para ello se requiere que el medio soporte altas velocidades y además los equipos de conmutación permitan hacer la conmutación sin pasar la señal al dominio electrónico. Mediante la simulación con OpSim y Optisystem se identifican problemas a nivel de longitud de onda.

Aunque existen muchas herramientas como NS de la Universidad de California, REAL de la Universidad de Cornell, NEST de la Universidad de Columbia y software comercial como OMNeT y OPNET se utilizó OptSim haciendo uso de la licencia con que cuenta la Universidad del valle y además se utilizó la versión de prueba descargada de la página oficial de optisystem 11.

3.5.1 Escenario de simulación de conexión punto a punto

Dentro del diseño de una red óptica se deben optimizar los diferentes parámetros para garantizar el funcionamiento correcto ya sea la topología tan sencilla como un enlace punto a punto, un anillo, o una malla, el diseño del sistema se debe considerar como dos partes separadas: el diseño del sistema óptico y el diseño de capa superior.

En el diseño de redes ópticas se deben realizar cálculos tales como el balance de potencia y la determinación de los márgenes máximos y mínimos. Para garantizar que el sistema de fibra tenga la capacidad suficiente para su correcto funcionamiento, se debe calcular el presupuesto de potencia por tramo, que es la cantidad máxima de energía que puede transmitir [62].

Dentro del análisis se debe tener en cuenta el peor de los casos exige asumir la potencia mínima del transmisor y la sensibilidad mínima del receptor. Esto proporciona un margen que compensa las variaciones de la potencia transmitida y los niveles de sensibilidad del receptor [61] [62] [63].

Las pérdidas de un span de fibra se pueden calcular sumando las diversas pérdidas lineales y no lineales. Los factores que pueden causar pérdidas en el enlace incluyen atenuación de la fibra, atenuación por empalmes, la atenuación de conectores, dispersión cromática, y otras pérdidas lineales y no lineales [75].

Dentro de los cálculos se debe tener en cuenta el margen de potencia (P_m), que representa la cantidad de potencia disponible después de restar las pérdidas lineales y no lineales (P_s) del presupuesto de potencia (P_b). Un valor de P_m superior a cero indica que el presupuesto de potencia es suficiente para hacer funcionar el receptor. El margen de potencia (P_m) se calcula mediante la ecuación: ($P_m = P_b - P_s$)

Para evitar la saturación del receptor, la potencia de entrada recibida por el receptor, después de que la señal ha experimentado pérdida en el enlace (P_{in}), no debe exceder la especificación de máxima del fabricante sobre la sensibilidad del receptor ($PR_{m\acute{a}x}$), este nivel de señal se indica como (P_{in}). La potencia máxima del transmisor ($PT_{m\acute{a}x}$) debe ser considerada como la potencia de transmisión para este cálculo. La pérdida del enlace (P_s) se mantiene constante: ($P_{in} = PT_{m\acute{a}x} - P_s$)

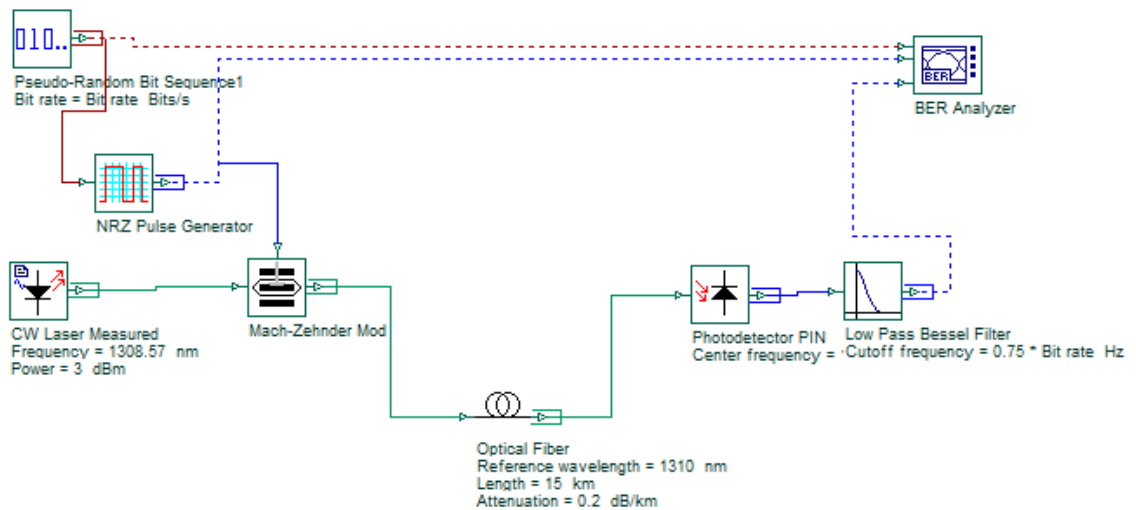
Para el análisis de los canales de fibra se parte de un enlace punto a punto con características constantes, para la simulación se tomó una distancia de longitud de fibra de 15 km en virtud a que es la distancia máxima entre los nodos del modelo simplificado de la red. En la tabla 3.9 se presentan las características del escenario de simulación.

Se utilizaron velocidades de 1Gbps, 10G, 30G y 100G en las ventanas de 1310 nm y de 1550 nm (ver figura 3.21). Como parámetros para el análisis de respuesta se tomaron el factor de calidad en recepción (factor Q), la tasa de Error de Bit (BER) y la atenuación.

Tabla 3.9 – Características del escenario de simulación

Parámetro	Valor/Especificación
Velocidad del sistema	1 - 100 Gbps
Distancia del enlace	15 km
Tecnología de red	Enlace punto a punto
Banda	O (1260 ~ 1360nm) C (1530-1560 nm)
Estándar utilizado	G.652
Tipo de fibra	SSMF-28
Coefficiente de atenuación para 1550nm	0.2 dB/km
Coefficiente de atenuación para 1310nm	0.35 dB/km
Coefficiente de dispersión 1550nm	17 ps/nm·km
Codificación de línea	NRZ-OOK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Tipo de laser	CW
Potencia de transmisión del láser	3 dBm
Figura de ruido	3 dB
Sensibilidad del receptor	-32 dBm
BER mínima	N/A
Filtros de recepción ópticos	Bessel

Figura 3-21 – Escenario de simulación de conexión punto a punto con fibra G.652B



Las fibras g652 son optimizadas para su utilización para la segunda ventana, aunque también pueden transmitir en la tercera ventana. Las fibras G.652.A y B presentan un pico de atenuación por la presencia de OH⁻ en torno a 1383 nm, mientras las G.652.C y D están libres de este pico. Existen dos nuevas categorías para reducir PMD del enlace de 1 a 0,20 ps/√km para poder ofrecer tasas de transmisión de alta velocidad/distancia. Además se ajustaron las tolerancias de algunos parámetros para mejorar las prestaciones de las fibras ópticas.

En los sistemas de comunicación con fibra óptica para medir con precisión el rendimiento del sistema se utilizan parámetros como el Q (factor de calidad) que mide el rendimiento óptico y permite caracterizar el BER [64]. En la Figura 3.11 se muestra la influencia de la del aumento de la velocidad del canal en el rendimiento del sistema de transmisión.

Se debe tener especial cuidado con la potencia de transmisión porque además de generar daños irreversibles sobre la fibra, un exceso de potencia aumenta también los efectos no lineales, aunque el OSNR⁶⁶ aumente.

La potencia inyectada en la fibra en después del modulador de Mach Zehnder es de -0.18 dBm. Comúnmente los equipos encontrados en el mercado para modulación directa utilizan potencias entre +4dBm y +14 dBm [32], mientras que los equipos SDH comúnmente trabajan con potencias entre -3dBm y -10dBm.

Mientras la modulación directa es utilizada para transmisión de video, información digital para CATV y aplicaciones de telefonía de bajo costo y bajas velocidades; la modulación externa se utiliza en equipos de tecnología SDH por su alto rendimiento, altas velocidades de transmisión y por la eficiencia del uso de la potencia que se inyecta a la fibra óptica, además de las distancias que logra recorrer y la eliminación de los chirps lo que evita efectos indeseados durante la transmisión. En relación a los costos, la modulación directa es mucho más económica de la modulación externa, debido no solo al costo del modulador externo, sino también a las consideraciones de diseño y espacio para el modulador externo.

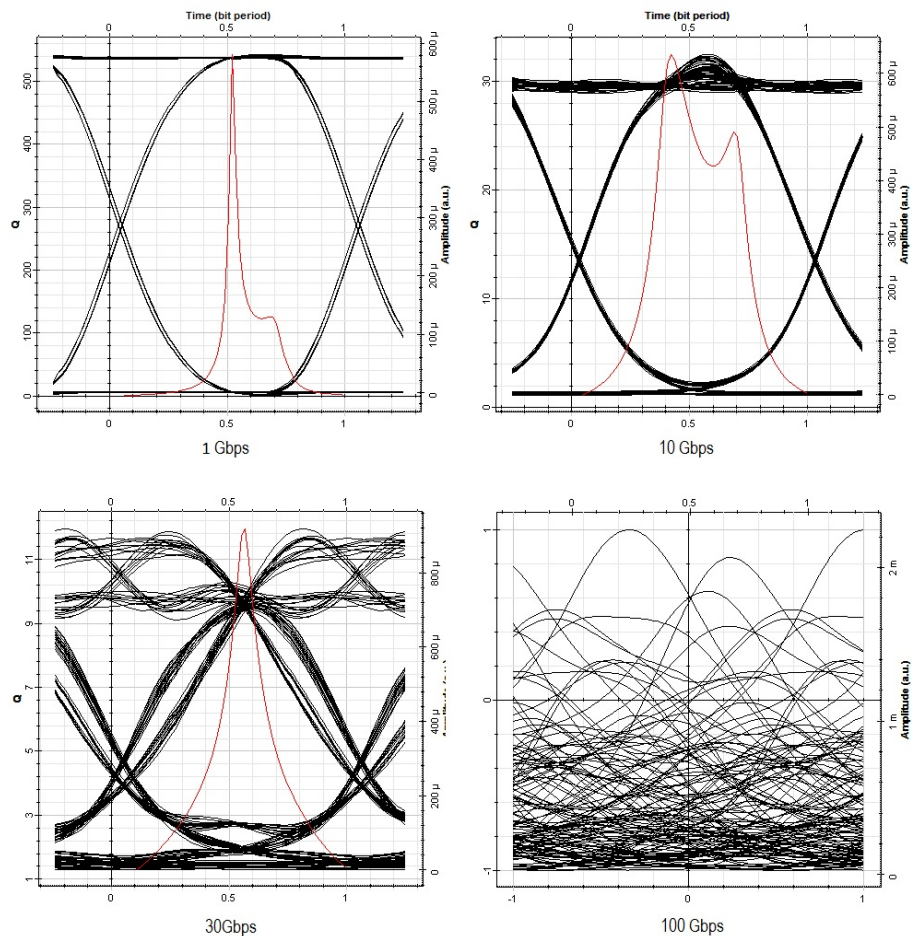
En la figura 3.22 se puede se observa que con una modulación externa en la segunda ventana de operación de la fibra óptica se alcanzan velocidades de 30Gbps con un BER alrededor de 1.16×10^{-6} .

⁶⁶ OSNR (Relación Señal a Ruido Óptico, **Optical Signal to Noise Relationship**)

Como se muestra en la Figura 3.22 la curva del factor Q cambia con el grado de apertura de diagrama en ojo de la siguiente manera: Entre más se acerque al punto donde el diagrama de ojo es más grande, el factor Q es más grande, y el BER correspondiente es más pequeño.

Con los actuales enlaces se pueden transmitir velocidades hasta de 30Gbps en la segunda ventana gracias a que las características de la fibra instalada están optimizadas para dicha ventana, mientras que en la tercera ventana de operación se logran transmitir con confiabilidad a velocidades menores a 20Gbps. En síntesis, con modulación externa y velocidades de transmisión inferiores a los 20Gbps, los enlaces no tienen limitaciones, el problema surge cuando se aumenta la velocidad de transmisión o cuando se involucran varias longitudes de onda en un canal de fibra.

Figura 3-22 – Respuesta de simulación en la tercera ventana de transmisión



La tabla 3.10 muestra los resultados de la simulación de la fibra actual en la segunda y tercera ventana de transmisión, la atenuación es un parámetro que se mantiene constante en la tercera ventana o los 1550nm(0,2 dB/km x15 km = 3dB), pero se puede identificar que la fibra instalada tiene una mejor respuesta en la segunda ventana de transmisión a velocidades altas (Superiores a 10 Gbps). Los equipos operativos actuales manejan éstas velocidades de transmisión. Si se requiere transmitir velocidades mayores se debe pensar en cambiar la fibra por una G.655 que permita inyectar señales WDM a altas velocidades. Se debe tomar la decisión de

cambiar poco a poco los cables de fibra actuales por fibras recomendadas para redes metropolitanas (G.655), que tengan mejores especificaciones, menores pérdidas en todas las bandas de transmisión óptica (1260 nm hasta 1625 nm), baja dispersión del modo de polarización (PMD por sus iniciales en inglés) que flexibilicen los futuros diseños.

El envejecimiento de la fibra trae consigo deterioro de las características óptimas de transmisión, la vida útil de la fibra está entre los 25 y 30 años, con el tiempo: aumenta el coeficiente de atenuación, disminuye la resistencia mecánica a la tracción y aumenta la dispersión por modo de polarización (PMD) [32][65][66][68].

Tabla 3.10 – Respuesta de simulación en la segunda y tercera ventana de transmisión con fibra G652

Velocidad de datos (Gbps)	Factor de Calidad en la ventana de 1310 nm (Q)	BER 1310 nm	Factor de Calidad en la ventana de 1550 nm (Q)	BER 1550 nm
1	778.12	0,00 E -000	686.852	0,00 E -000
10	33,20	4,69 E -242	22.53	2,15 E -012
30	4.7	1,16 E -006	0	1,00 E -000
100	0	1,00 E -000	0	1,00 E -000

3.5.2 Transmisión WDM

Dentro de la optimización de la infraestructura actual se debe pensar inicialmente en enlaces punto a punto WDM que permitan ampliar la capacidad de transmisión de las fibras y agregar grandes volúmenes de tráfico en las redes de acceso, como se prevé en las proyecciones.

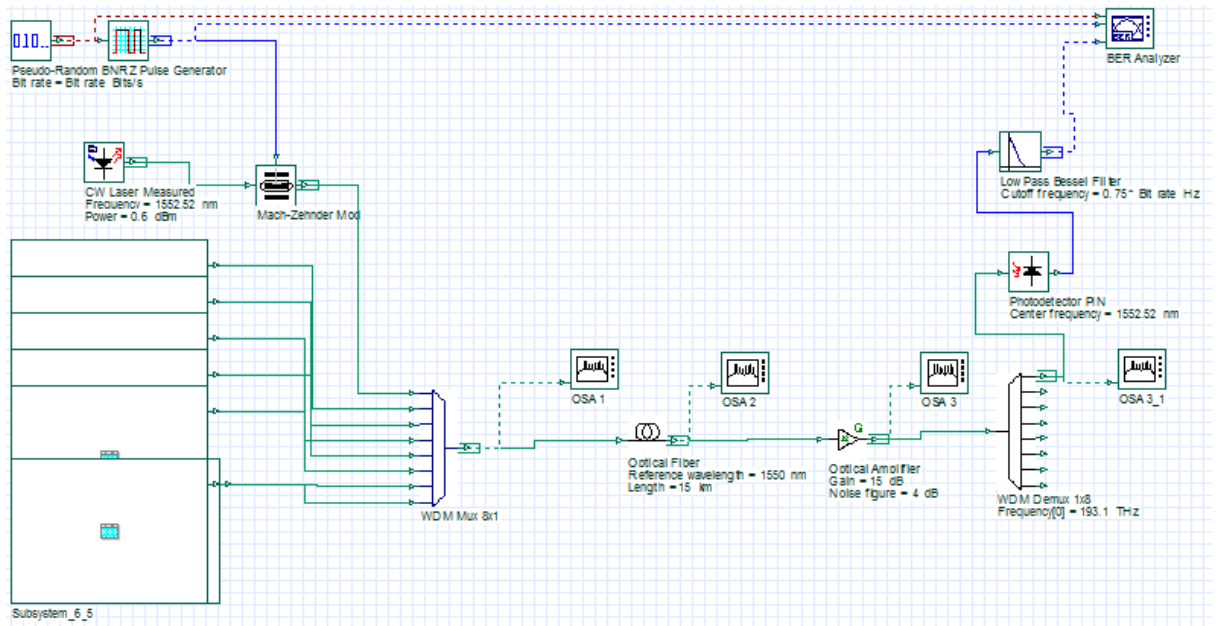
Para el caso particular de los enlaces punto a punto en los nodos de la red de transporte de la empresa se realiza el análisis con respecto a un escenario donde se transmiten 8 longitudes de onda por cada canal físico, realizando una optimización en la utilización de la fibra óptica. En la tabla 3.6 se presentan las características de algunos de los elementos utilizados en el escenario de simulación.

Para la simulación se trabaja en la ventana 1550 nm, con velocidades transmitidas sobre una fibra de 40, 80, 160 y 400Gbps. Correspondientes a velocidades por portadora de 5, 10, 20 y 50Gbps. Características generales de la red WDM simulada:

Tabla 3.11 – Características del escenario de simulación

Parámetro	Valor/Especificación
Velocidad del sistema	5 - 50 Gbps
Distancia del enlace	15 km
Tecnología de red	WDM
Espaciamiento de los canales WDM	100 GHz (0.8 nm)
Banda	C (1530-1560 nm)
Estándar utilizado	G.652
Tipo de fibra	SSMF-28
Coefficiente de atenuación para 1550nm	0.2 dB/km
Coefficiente de dispersión 1550nm	16 ps/nm.km
Codificación de línea	NRZ-OOK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Dispositivo de amplificación	EDFA
Ganancia	15 dB
Tipo de laser	CW
Potencia de transmisión del láser/canal	0,6 dBm
Figura de ruido	4 dB
Sensibilidad del receptor	-32 dBm
BER mínima	N/A
Filtros de recepción ópticos	Bessel

Figura 3-23 – Escenario de Simulación de un sistema WDM de 8 canales en la ventana de 1550 nm.



En la figura 3.23 se presenta el escenario de simulación utilizado donde cada subsistema está constituido por los sub bloques mostrados en la parte superior izquierda de la figura (Generador de Datos, Generador de pulsos BNZR, Laser y Modulador). Las señales transmitidas por los subsistemas se multiplexan y se inyectan a la fibra, se coloca un amplificador óptico de 10 dB para compensar las pérdidas generadas en la fibra, en las etapas de Mux/Demux y en los filtros correspondientes.

Con otras pruebas realizadas en el estudio se encontró que cuando la potencia óptica de entrada es superior a 9 dB, los efectos no lineales se incrementan rápidamente, haciendo que el BER degrade velozmente el sistema.

En la figura 3.23 y 3.24 se presentan los resultados de la simulación de diferentes canales. Para velocidades inferiores a los 20 Gbps la calidad de la señal es alta, el diagrama de ojo es bueno, y el gráfico rojo tiene borde simétrico, lo que indica que efectos no lineales aceptables.

En la figura 3.24 se identifica la dispersión cromática generada en el sistema WDM simulado; efecto que produce un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos en la medida en que se aumenta la velocidad de cada canal óptico, ocasionando superposición entre ellos y limitando las velocidades de transmisión [60].

Figura 3-24 – Espectro de la señal WDM compuesta en la ventana de 1310 nm

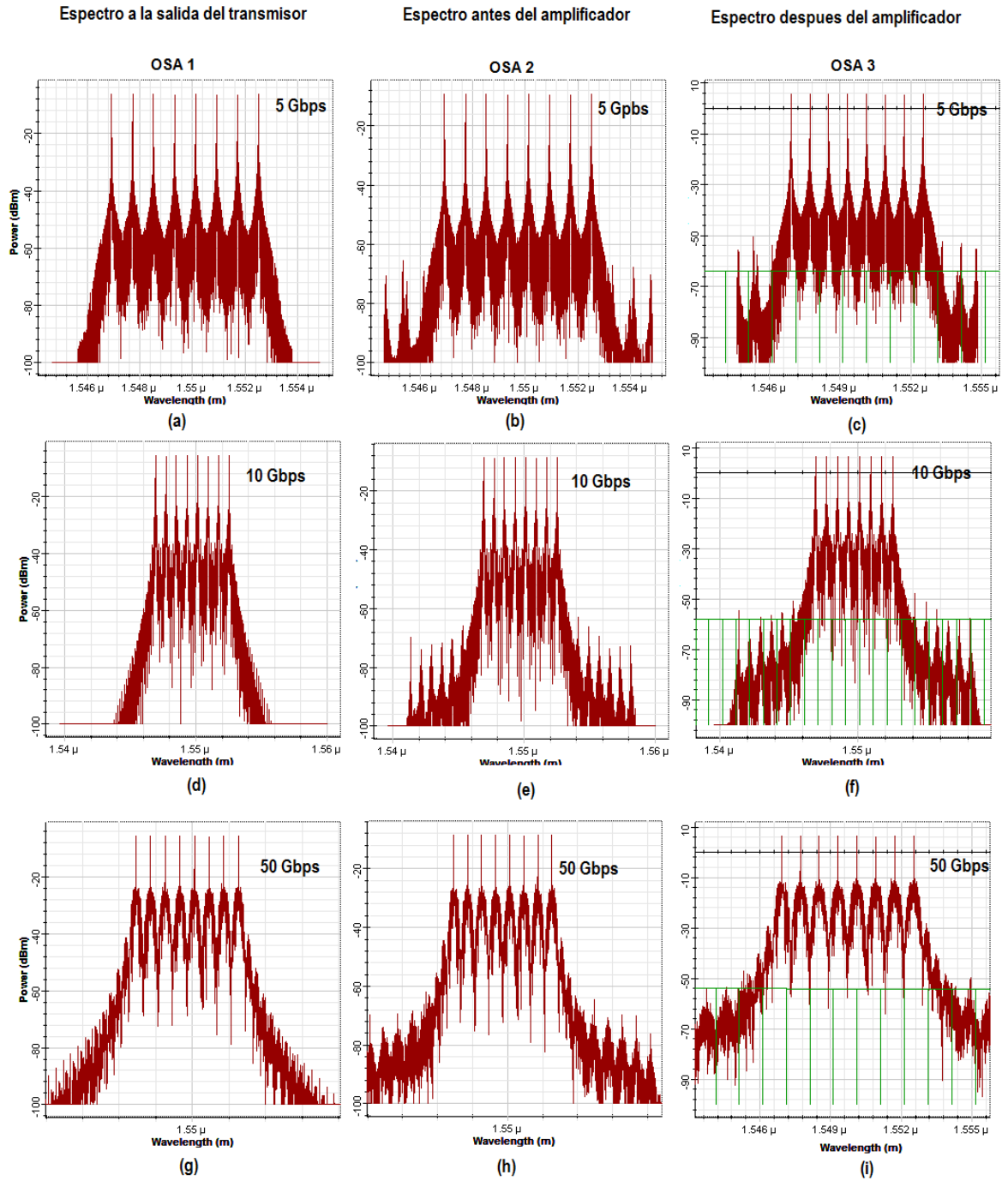


Figura 3-25– Respuesta de simulación en la tercera ventana de transmisión

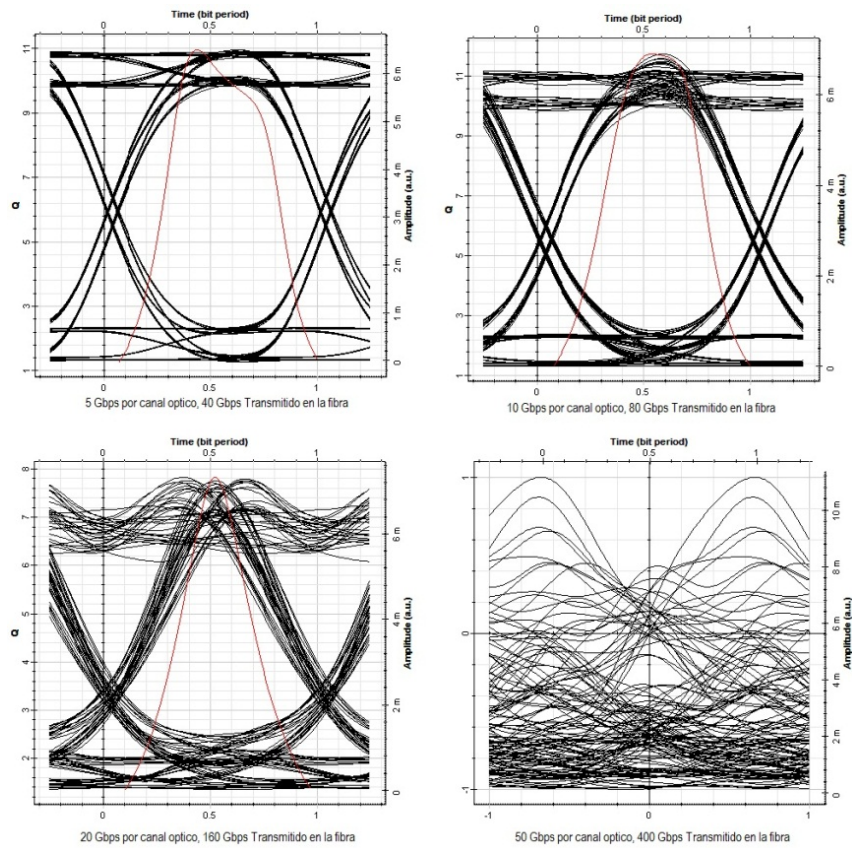


Tabla 3.12 – Respuesta de simulación en la segunda y tercera ventana de transmisión

Velocidad por λ (Gbps)	Velocidad del canal de fibra (Gbps)	Factor de Calidad en la ventana de 1550 nm (Q)	BER 1550 nm
2.5	20	155.18	0,00 E -000
10	80	10.75	2,13 E -027
20	160	2.33	8,50 E -003
50	400	0	1,00 E -000

En la tabla 3.12 se identifica el uso óptimo de la fibra con WDM, pero a pesar del uso óptimo, los efectos de la dispersión cromática y FWM, limitan el la velocidad del sistema, por lo que el operador debe considerar el cambio de los cables a futuro por un estándar con bajo nivel de dispersión cromática (~4ps/nm.Km) como la fibra NZ-DSF que cumple con el estándar G.655. Otra solución por la que podría optar el operador es instalar compensadores de dispersión en los tramos donde se deba transmitir a mayores velocidades o con más de 16 portadoras ópticas.

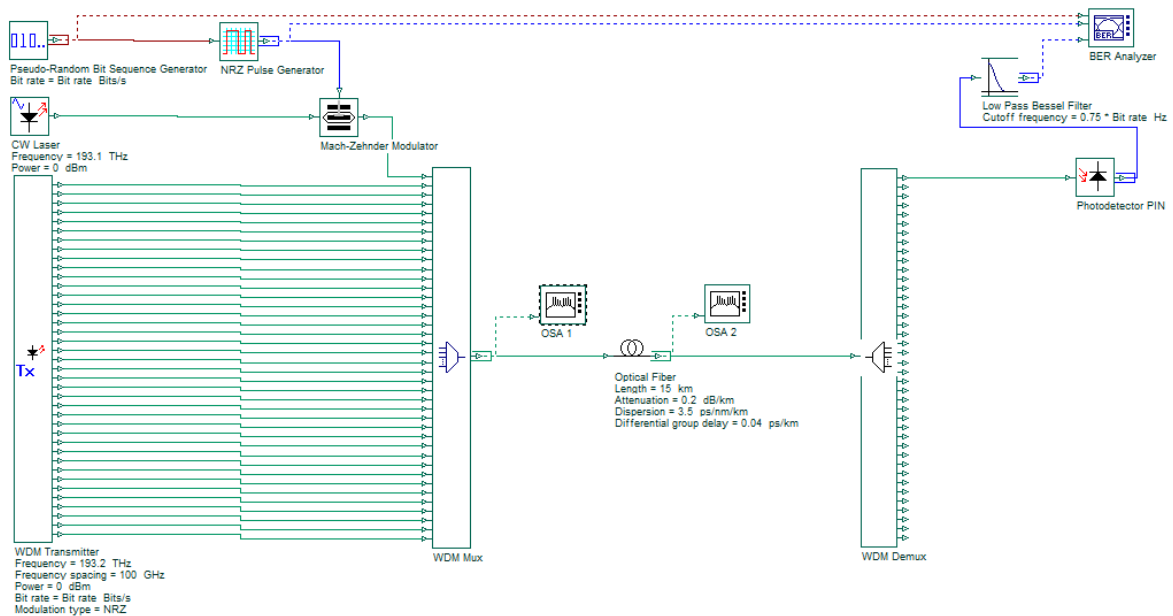
3.5.3 Transmisión DWDM con fibra G.655

Utilizando fibra G.655 se pueden transmitir señales DWDM sin los problemas de dispersión cromática y FWM asociados. La grafica 3.26 muestra un escenario de simulación del sistema utilizando 40 λ s. En la tabla 3.13 se presentan las características de algunos de los elementos utilizados en el escenario de simulación:

Tabla 3.13 – Características del escenario de simulación

Parámetro	Valor/Especificación
Velocidad del sistema	5 – 40 - 60 Gbps
Distancia del enlace	15 km
Tecnología de red	DWDM
Espaciamiento de los canales WDM	100 GHz (0.8 nm)
Banda	C (1530-1560 nm)
Estándar utilizado	G.655
Coefficiente de atenuación para 1550nm	0.2 dB/Km
Coefficiente de dispersión 1550nm	3,5 ps/nm-km
Codificación de línea	NRZ-OOK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Tipo de laser	CW
Potencia de transmisión del láser/canal	0 dBm
Figura de ruido	4 dB
Sensibilidad del receptor	-32 dBm
BER mínima	N/A
Filtros de recepción ópticos	Bessel

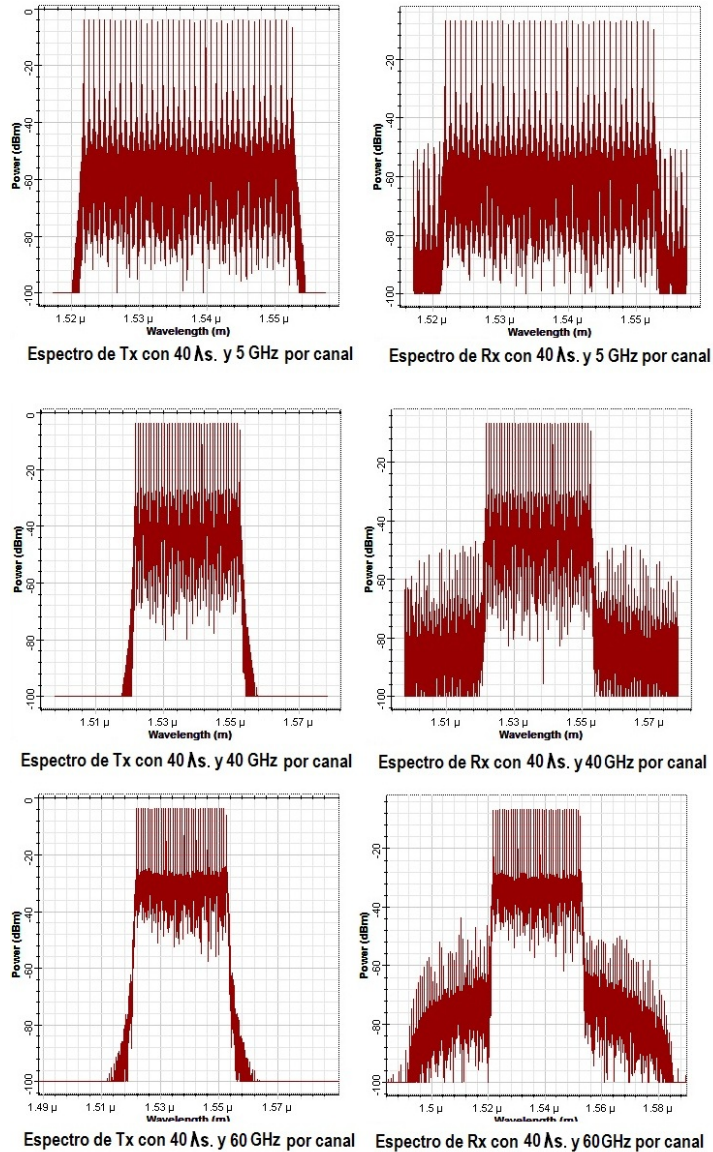
Figura 3-26 – Escenario de simulación con 40 λ s y fibra G.655



El sistema propuesto tiene un alto porcentaje de confiabilidad aunque la tecnología requerida es más costosa por su complejo proceso de fabricación, pues los dispositivos ópticos deben ser muy precisos. Con la fibra monomodo G.655 las características mecánicas, geométricas y de transmisión con dispersión desplazada no

nula NZDS (Non Zero Dispersion Shifted) se especifican en ITU-T G.655. Estas fibras están pensadas para transmitir en tercera ventana con bajos valores de dispersión, entre 1530nm y 1565 nm, aunque se ha previsto que puedan soportar transmisiones en longitudes de onda mayores de 1625 y menores de 1460 nm. Aunque la dispersión cromática es reducida en la ventana de transmisión de las fibras NZDS, nunca puede tener valor cero en este rango de longitud de onda (pero sí en longitudes de onda menores). Esto es debido a que un valor nulo de D potencia efectos no lineales, que es fundamental evitar en aplicaciones WDM. La aparición de fenómenos no lineales también depende del área efectiva de la fibra. Estos se minimizan con áreas efectivas mayores.

Figura 3-27 – Espectro de la señal DWDM con 40 λs en la ventana de 1550 nm



La dispersión cromática (CD) es un parámetro que limita la capacidad de transmisión de la fibra óptica. En sistemas de comunicación de alta velocidad y larga distancia es fundamental controlar su efecto, ya que limita

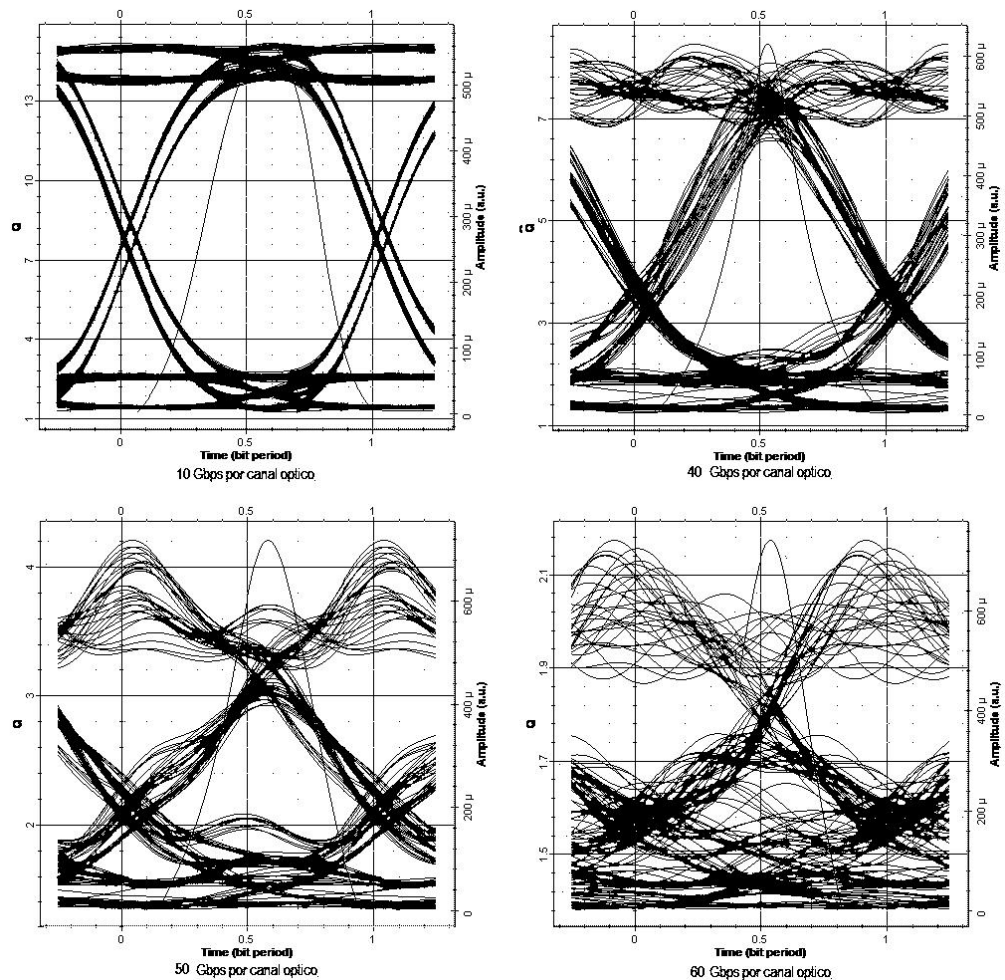
fuertemente la capacidad de transmisión del sistema y para ello es necesario utilizar sistemas de compensación de dispersión cromática.

En la figura 3.27 se identifica la dispersión cromática, ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos en la medida en que se aumenta la velocidad de cada canal óptico, ocasionando superposición entre ellos y limitando las velocidades de transmisión.

Al aumentar la velocidad de transmisión de las redes ópticas DWDM hasta valores de 40 Gbps y superiores, toman importancia las limitaciones debidas principalmente a los siguientes factores como la atenuación (dB/km), la dispersión cromática (CD) y la polarización del modo de dispersión (PMD). Cuanto mayor es la tasa de transmisión, menor es la tolerancia a estos factores, pero existen diferentes métodos de compensación.

La figura 3.28 muestra la manera en que el diagrama de ojo se va cerrando proporcionalmente al aumento de la velocidad por canal óptico. El sistema logra velocidades de $40\text{Gbps} \times 40 = 1.6\text{ Tbps}$, es decir, se obtiene esa velocidad de transmisión enviando 40 longitudes de onda a través de un mismo hilo de fibra.

Figura 3-28– Diagramas de Ojo del sistema DWDM con 40 λ s en la ventana de 1550 nm



En la simulación del sistema se lograron transmisiones de 1.6 Tbps con un BER de 1.4×10^{-17} y un factor de calidad Q de 8.45. En caso de requerir un aumento en la velocidad total de transmisión se puede lograr incrementando el espaciado entre canales a 200 GHz o a 500GHz, de forma que se disminuyen significativamente los efectos adversos de la dispersión cromática y FWM.

En redes DWDM la fibra óptica se presentan efectos que perjudican la transmisión de las señales, por degradar la calidad de la señal óptica, limitando el desempeño de las redes. Estos efectos se clasifican, de forma general, como lineales o no lineales [67] [69] [72].

Los efectos no lineales que generan mayor degradación en un sistema DWDM, son:

- La Modulación de Fase Inducida (SPM) que se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente que depende de la intensidad de la señal, este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso [70].
- La Modulación de Fase Cruzada (XPM) se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica debido a que el índice de refracción efectivo, también depende de la intensidad de cualquier otra onda que se co-propague a través del canal [70].

- La Mezcla de Cuarta Onda (FWM – Four Wave Mixing) que se puede presentar cuando dos o más canales WDM se propagan en una fibra lo cual puede generar nuevos componentes de interferencia de la señal óptica.

En la tabla 3.14 se presentan los efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión, mostrando las principales características de los efectos no lineales [70][71].

Tabla 3.14- Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión

Efecto no lineal	Causa	Dependencia	Impacto	Medida	Minimización del impacto
SPM	Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de onda de la señal. • Velocidad de transmisión. • Tipo de fibra 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanchamiento del pulso. • Dispersión de amplitud. • Interferencia entre símbolos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama del ojo. • BER. • Factor Q. • Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentando la longitud de onda de la señal. • Disminuyendo la tasa de transmisión. • Aumentando el área efectiva de la fibra. • Aumentando la dispersión de la fibra.
XPM	Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia del canal. • Espaciamiento entre canales. • Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no línea, longitud efectiva). • Velocidad de símbolo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de amplitud. • Interferencia (ISI). • Ensanchamiento del pulso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama del ojo. • BER. • Factor Q. • Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentando la separación de los canales. • Aumentando el área efectiva de la fibra. • Aumentando la dispersión de la fibra. • Disminuyendo número de canales.
FWM	Interacción múltiple de fotones.	<ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento entre canales. • Potencia de la señal. • Número de canales. • Tipo de fibra 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de componentes FWM que interfieren con la señal original y otras señales WDM. • Atenuación en la potencia de los canales existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama del ojo. • BER. • Factor Q. • Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la dispersión cromática. • Aumentar la separación entre canales. • Disminuyendo número de canales. • Disminuir la potencia del láser

3.6 MIGRACIÓN A LARGO PLAZO

En éste numeral se definen y dimensionan las partes de la red que se caracterizan por una larga vida útil y grandes inversiones para su implementación. Aunque la firma tenga algunos tendidos de fibra hasta la premisa de usuario, la red no se puede considerar completamente óptica, pues la característica fundamental es que tanto los enlaces como en los nodos de conmutación se realiza un tratamiento de la señal en el dominio óptico, hecho que permite asegurar que aún queda un largo camino por recorrer en investigación y desarrollo para alcanzar la utopía de la red completamente óptica.

En la red completamente óptica, la señal DWDM debe pasar a través de los nodos de manera "transparente", lo que quiere decir que cualquier procesamiento que se realice deberá mantener la señal en el dominio óptico.

La conmutación a nivel óptico se realiza a través de equipos OADMs y las capas de gestión y de control deben encontrar posibles rutas, analizar su viabilidad y realizar la reserva de recursos extremo a extremo utilizando el modelo GMPLS. Dentro de las tareas que se deben ejecutar están:

- Encontrar el camino más corto entre dos nodos con la información de disponibilidad de recursos en los nodos vecinos.
- Analizar la viabilidad de la ruta para cada portadora óptica y realizar la reserva de recursos (analizar y comprobar que el ruido acumulado a lo largo de la ruta, la dispersión, la relación C/N final, etc.).
- Activar la ruta temporalmente y probar la calidad de señal extremo a extremo.
- Poner en servicio con tráfico real.

El despliegue de redes FTTH genera presión de tráfico hacia el núcleo de la red, por ello, con una red completamente óptica se puede absorber el incremento de tráfico en las redes de acceso y evitar posibles cuellos de botella. Del análisis realizado en los numerales anteriores de éste capítulo se sugiere que el núcleo de la red sea con equipos OADMs DWDM y fibras G.655. En tanto la red de acceso se puede trabajar en un principio con GPON, ampliando cobertura, pero en la medida que se retorne la inversión se debe implementar CWDM en las redes de acceso hasta la premisa de usuario.

3.6.1 Red de acceso completamente óptica

La red de acceso completamente óptica puede basarse en las tecnologías PON montadas sobre CWDM y se puede pensar a futuro, en la reutilización de equipos que actualmente están en el núcleo hacia las redes de acceso. Mediante el uso de estas tecnologías en la red de acceso se puede concentrar todo el tráfico de una extensa área metropolitana sobre un único nodo de agregación.

El equipo de borde (reemplaza al actual DSLAM) es el OLT (Optical Line Terminal) que debe contar con puertos de red 100 GbE conectados directamente a un conmutador Ethernet completamente óptico basado en tecnologías de conmutación OBS o OPS.

Para evitar colisiones entre flujos de tráfico con distintas fuentes pero el mismo destino se debe utilizar un protocolo de control de acceso al medio basado en GMPLS de manera que cada canal sabe en qué ranura temporal y con qué longitud de onda debe transmitir.

Las funciones que deben cumplir los equipos de acceso en los tres planos (Gestión, Control, transporte) son:

- Ejecutar los protocolos de Control de Admisión (CAC).
- Conmutar el tráfico interno entre diferentes usuarios de la misma red de acceso.
- Conmutar el tráfico con destino a otros canales.
- Clasificar el tráfico de usuario en función de su destino y la calidad de servicio requerida.

3.6.2 Red de transmisión completamente óptica

Puede basarse en las tecnologías de conmutación OBS o OPS con equipos OADM que agrupan el tráfico formando anillos. En cada anillo debe haber un nodo que concentre y lo encamine hacia el exterior con otros operadores. Los OADMs conmutan el tráfico de varios cientos de Terabit/s sin necesidades de utilizar convertidores opto electrónicos. El componente clave para el desarrollo de estos dispositivos son las memorias ópticas y se realiza mediante la introducción de un retardo en la propagación de la luz para que dé tiempo a realizar el procesamiento de la cabecera del paquete y a configurar el conmutador. El procesamiento de la cabecera se realiza en el dominio eléctrico mediante GMPLS.

Algunos fabricantes ya disponen de soluciones comerciales de este tipo con Regeneradores 3R capaces de amplificar, recuperar la forma y re sincronizar las señales de forma totalmente óptica. El conmutador óptico o matriz de conmutación óptica contiene un el conmutador espacial de fibra y el enrutador de longitud de onda, elemento que más flexibilidad da a la red óptica y permite el establecimiento de enlaces ópticos en longitudes de onda individuales entre elementos de diferentes subredes y posibilita el re encaminamiento óptico extremo a extremo con granularidad de portadora.

El sistema diseñado interconecta a los nodos de San Fernando, Colón, Guabito y Versalles en una topología de anillo con tecnología DWDM y 16 canales ópticos. Según las pruebas de simulación se lograron velocidades por canal óptico de hasta 40 Gbps (640 Gbps por hilo de fibra). El sistema está compuesto por 4 OADMs que agregan y extraen tráfico en cada nodo como muestra la figura 3.29. Las longitudes de onda escogidas se basan en la rejilla de la ITU-T para DWDM.

Figura 3-29 – Esquema general del anillo con 4 OADMs y 16 λ s

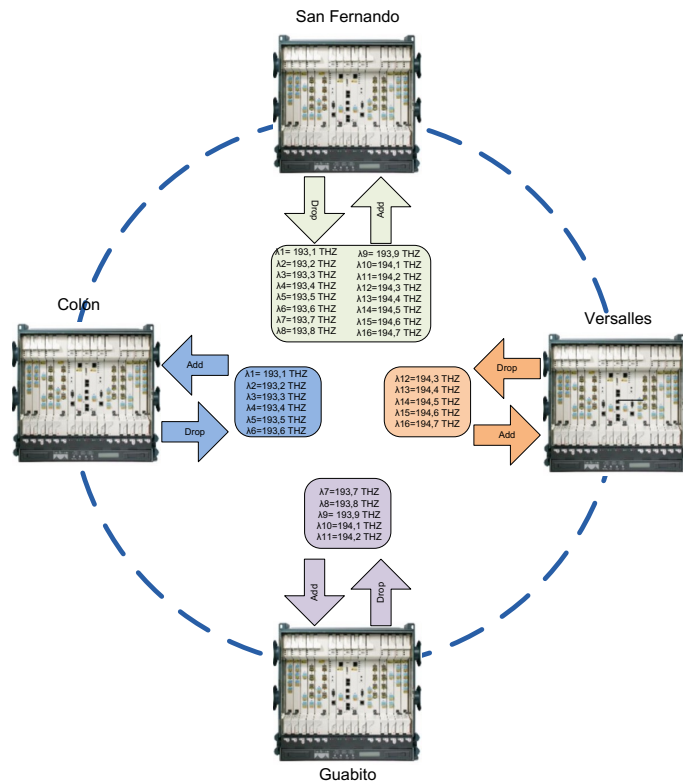
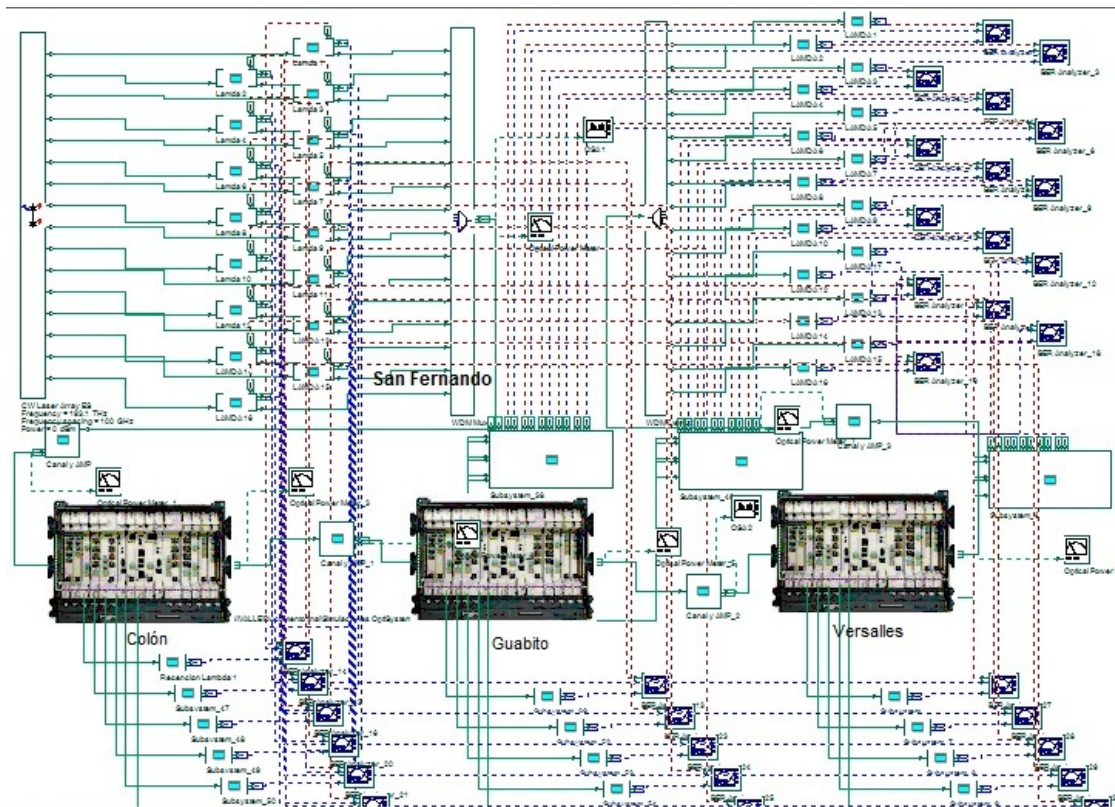


Figura 3-30 – Diagramas de simulación de un anillo con 4 OADMs y 16 λ s en la ventana de 1550 nm



La figura 3.30 muestra el esquema de simulación utilizado para 4 nodos con equipos OADM ubicados en Colón, Guabito, Versalles, San Fernando, con distancias entre nodos de 15 km y con 16 portadoras ópticas en la banda C y espaciamiento de 100 GHz que distribuyen el tráfico de forma completamente óptica en la red.

3.6.3 Presupuesto óptico

Los cálculos de todos los enlaces ópticos realizados se basaron en los valores típicos de potencias de transmisión, sensibilidad de recepción, pérdidas en la fibra óptica, pérdidas por inserción en los OADM, obtenidos de las hojas de características de equipos comerciales (Huawei, Ciena, Cisco y ZTE). Para los empalmes se estima una pérdida de 0.1 dB, los conectores tienen una pérdida típica de 0,5 dB, y en lo que respecta a reservas en el tendido de la fibra se considera un 15% adicional. El sistema se diseñó para transmitir señales individuales de 40 GHz teniendo en cuenta un margen adicional de 20 dB.

Para lograr una simulación apropiada fue necesario utilizar los parámetros de las especificaciones técnicas de los equipos y fibras comerciales. La pérdida de un enlace de fibra óptica está dada por la siguiente ecuación:

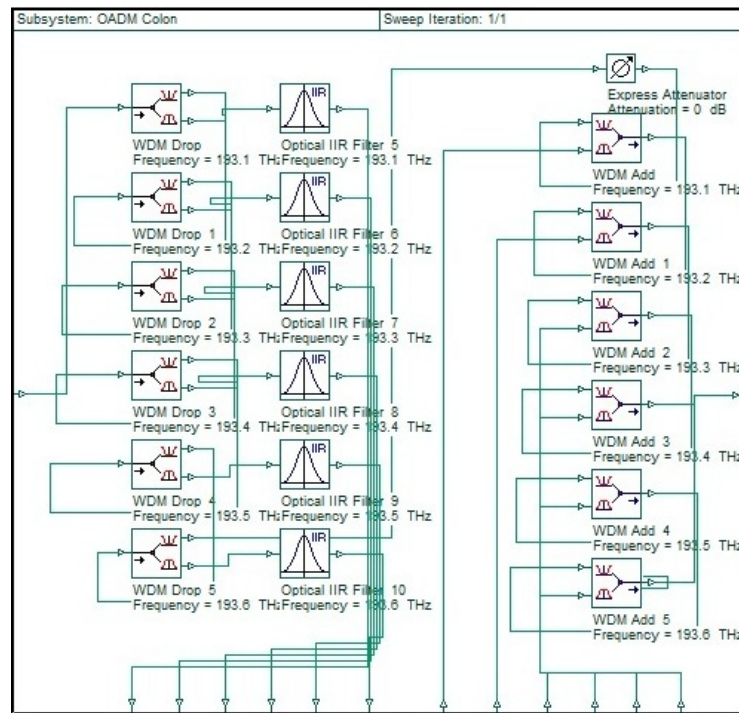
$$\alpha_T = \alpha_f L + \alpha_a + n_e \alpha_e + n_c \alpha_c$$

- α_T Pérdida total
- α_f Atenuación de la fibra (dB/km)
- α_a Atenuación por acoplamiento (dB)
- α_c Atenuación por conectores (dB)

- α_e Atenuación por empalmes (dB)
- L Longitud del enlace (km)
- n_c Numero de conectores
- n_e Numero de empalmes

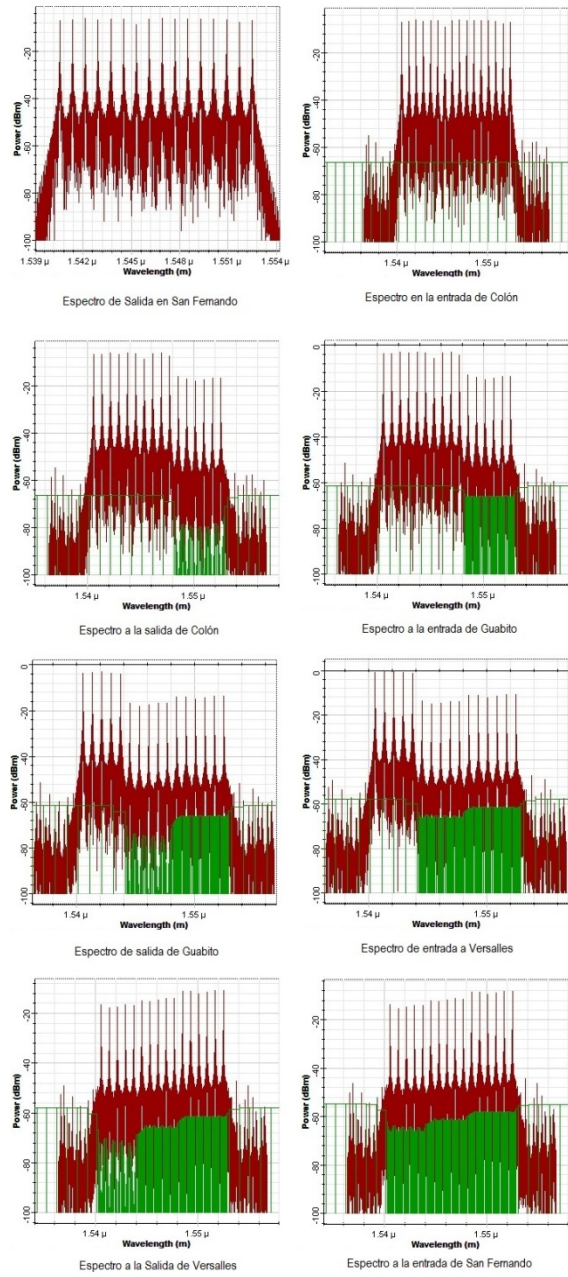
Los valores calculados se utilizan en la simulación del anillo óptico WDM. Los parámetros de atenuación de la fibra, son ingresados a los parámetros del simulador, así como los parámetros de Dispersión Cromática, solapamiento por dispersión y PMD. Las demás pérdidas son simuladas mediante un atenuador que se le fija la sumatoria de las que no están relacionadas con la F.O.

Figura 3-31 – Esquema contenido dentro de cada subsistema de OADM



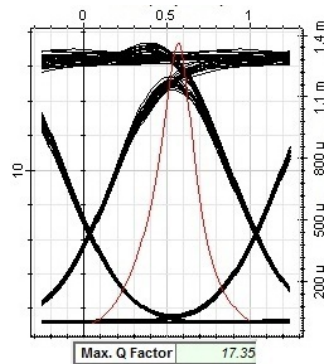
Cada nodo está simulado por un Bloque OADM, un juego de Bloques de Recepción conformados por un elemento foto detector y un filtro pasa bajos y un Bloque conformado por los transmisores correspondientes al número de longitudes de onda a subir en cada nodo. A cada bloque de recepción se le ha conectado un analizador de BER para hacer el estudio de respuesta del anillo. En la Figura 3.31 se muestra como está conformado el Bloque OADM.

Figura 3-32 – Análisis Espectral de los canales ópticos en los OADMs

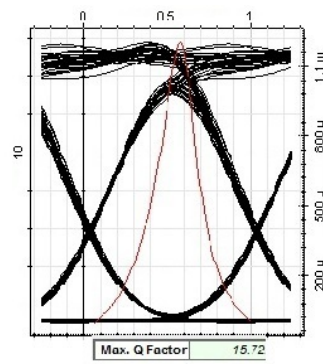


Las líneas de color verde representan el ruido generado por la densidad espectral media en las dos polarizaciones y representa el ruido que interfiere a las portadoras generadas con el espectro de salida inicial en el nodo de San Fernando.

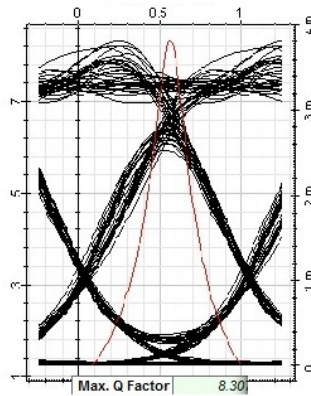
Figura 3.33 – Respuesta del sistema a 40Gbps por canal (Incluido procesamiento en OADMs)



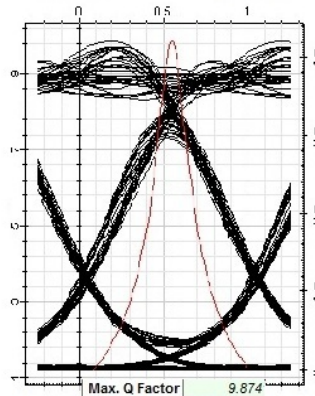
Respuesta de la λ_1 en Colón a 40 Gbps



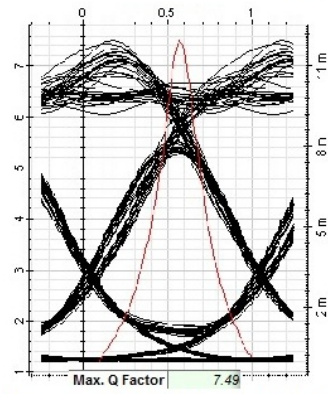
Respuesta de la λ_6 en Colón a 40 Gbps



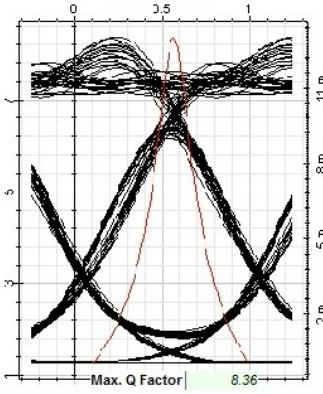
Respuesta de λ_7 en Guabito (40Gbps)



Respuesta de λ_{11} en Guabito (40Gbps)



Respuesta de λ_{12} en Versalles (40Gbps)



Respuesta de λ_{16} en Versalles (40Gbps)

En la figura 3.33 se muestran los resultados, los factores de calidad y los BER apropiados para que este diseño pueda ser implementado en la práctica. El espectro obtenido a la salida del nodo de Versalles (figura 3.21) y el diagrama de ojo de Versalles (Figura 3.22) muestran que la dispersión cromática causara por el desplazamiento de la señal sobre la fibra y el procesamiento óptico limitan la velocidad del sistema. La respuesta se puede mejorar considerablemente aumentando el espaciamento entre las longitudes de onda, gracias a la disminución de los efectos de dispersión cromática y FWM.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a la gran cantidad de parámetros involucrados, interrelaciones y el carácter dinámico del camino de migración, es imperativo el uso de una herramienta de planeación que ayude a analizar los diferentes escenarios y el impacto de las decisiones. Cada decisión a tomar requiere consideraciones estratégicas en con respecto al mercado de la región, sin embargo se hará más sencillo en la medida en que exista gran cantidad de información proporcionada, capacidad de financiación y economías de escala en el país.

Con el trabajo se estableció un camino de migración con los pasos importantes como el análisis del contexto, la evaluación de negocio, la demanda de tráfico proyectado y el diseño de la solución; etapas que en un escenario competitivo y acompañados de una fuerte estrategia comercial son una contribución en la toma de decisiones de expansión de la compañía.

Durante el desarrollo del proyecto se logró entender el complejo funcionamiento de un operador de telecomunicaciones, cristalizar la teoría a través de la construcción de los diseños y las simulaciones. Al iniciar el proceso existían muchas dudas conceptuales, metodológicas y técnicas que se fueron solucionando con el avance del proyecto a través de visitas técnicas a varias empresas del sector, entrevistas a los expertos y la continua consulta de libros y artículos.

Se construyó un modelo simplificado de la red óptica a partir del estudio de la topología de la red de EMCALI Telecomunicaciones y la identificación de los nodos principales como puntos neurálgicos por el volumen tráfico que cursa a través de ellos. El estudio inicial contribuye en la definición de las características técnicas de cada nodo y de los enlaces de fibra óptica que los une. Éste modelo simplificado permitió ser el punto de referencia para establecer el camino de migración en el estrato de transporte hacia una AON.

Para alcanzar los objetivos de simulación del proyecto se efectuó una amplia exploración de software de simulación que permitiera obtener resultados concluyentes. Se realizaron simulaciones con GNS3, Optsim (RSoft), MetroWand (RSoft) y Aurora 2008, pero definitivamente los mejores resultados se lograron con la versión de evaluación de Optisystem 11 que por su facilidad de manejo, entorno gráfico y coherencia de resultados permitió finalizar éste proyecto.

En el proceso de simulación de los OADMs se identificó la importancia de calibrar apropiadamente la potencia de los tributarios ópticos cuidando que a la salida de cada equipo los niveles de todas las portadoras sean iguales, de no ser así se generan interferencias en canales ópticos adyacentes, disminuyendo considerablemente el factor de calidad Q y aumentando la tasa de errores. En los equipos comerciales sucede igual, a través del software del fabricante se calibran las potencias de los canales y su respectiva sensibilidad, además se utilizan atenuadores fijos y variables que permiten realizar el respectivo ajuste de potencia de las longitudes de onda que se extraen y se suben en los OADMs.

De los resultados obtenidos en los capítulos II y III se concluye que para redes metropolitanas como la de EMCALI se debe aplicar el modelo GMPLS por las características asociadas a los bajos costos de implementación, operación y mantenimiento asociadas al CAPEX y OPEX. Se identificó que es una práctica común en la mayoría de operadores de redes similares migrar el tráfico tradicional SDH hacia metro Ethernet, MPLS y paralelamente adaptar la infraestructura para instalar equipos completamente ópticos (OADMs y

ROADMs) que soporten capa de control GMPLS. Por lo anterior la investigación se orientó a alcanzar los objetivos prestando menor importancia al modelo ASON/ASTN debido a que se aplica en redes de otro contexto como las Long Haul y Ultra Long Haul.

Para que el operador convierta su red en AON se recomienda la implementación de la tecnología DWDM en el núcleo y CWDM en los nodos de acceso, siendo éstos últimos de fabricación más sencilla y económica por tener espaciamiento entre canales de 500 GHz, la dispersión cromática es casi imperceptible, se pueden utilizar fibras G.652 a distancias superiores a los 50 kms y con ello atender las poblaciones cercanas a la zona urbana de Cali sin requerir amplificadores.

Se recomienda realizar una planificación periódica (Cada dos años) que involucre los aspectos técnicos y de negocios para ajustarse al mercado, para garantizar la adaptación de servicios a la cultura del país, la rápida promoción en el mercado y la compatibilidad de los equipos de la premisa del usuario con las nuevas aplicaciones y explotar el potencial de negocio.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Berthold, Joseph. Saleh, Adel. Blair, Loudon. "Optical Networking: Past, Present, and Future". Lightwave Technology Journal. EEUU, Mayo 2008. Vol. 26, No 9 pag. 1104 -1118.
- [2] Revista Dinero Abril 2010, «Del telégrafo a la convergencia,» 30 Abril 2010. [En línea]. Available: <http://www.dinero.com/Imprimir.aspx?IdItem=95103> . [Último acceso: Noviembre 2014].
- [3] Tomkos, Azodolmolky, Sole'-Pareta, Careglio, and Palkopoulou. "A Tutorial on the Flexible Optical Networking Paradigm: State of the Art, Trends, and Research Challenges". Proceedings of the IEEE | Vol. 102, No. 9, September 2014.
- [4] Verbrugge, S.; Casier, K.; Mas Machuca, C. "Business models and their costs for next generation access optical networks" 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Pages: 1 - 4, 2012.
- [5] ITU-D, "Telecom Network planning for evolving Network architectures", Reference Manual, Genova - Italia. 2007.
- [6] Sami Uskela, "Key Concepts for Evolution Toward Beyond 3G Networks, IEEE Wireless Communications, Feb, 2003.
- [7] Shuai Zhang, Shufen Zhang, Xuebin Chen. "Cloud Computing Research and Development Trend" Second International Conference on Future Networks 2010
- [8] interacting with Service-Oriented Architecture (SOA)
- [9] Smart Objects as building blocks for the internet of things
- [10] Alsaih, A.M.; Almughales, A.A.; "Next Generation Network design and capacity dimensioning", 2010 International Conference on Educational and Network Technology (ICENT), Page(s):561 – 566, June 2010.
- [11] Nayak, T., Sivarajan, K.N., "A new approach to dimensioning optical networks"; IEEE Journal on Selected Areas in Communications; Volume:20, Issue: 1, Jan 2002.
- [12] Orłowski, Sebastian; "Optimal Design of Survivable Multi-layer Telecommunication Networks" PhD Thesis. Universidad de Berlin, Berlin 2009.
- [13] ITU-D, "Best Practices for implementing NGN in Asia and Pacific Region - Case Study: India, Philippines and Sri Lanka". June 2012.
- [14] UIT- D; Klein, Guillermo; "Estudio sobre la aplicación de modelos de costos en América Latina y el Caribe", Buenos Aires, Argentina, junio 2007.
- [15] CRC; "Documento Técnico: IMPLEMENTACIÓN DE SUBSIDIOS PARA LA PROMOCION DEL ACCESO A INTERNET" Documento oficial de la Comisión de Regulación de Comunicaciones, Colombia; Agosto de 2011.
- [16] Wanyi G.; Yunfeng S.; " Planning of optical networks in China", Broadband Optical Networks and Technologies: An Emerging Reality/Optical MEMS/Smart Pixels/Organic Optics and Optoelectronics. 1998 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings.
- [17] Schupke, D.A.; Kronberger, C.; "Multiperiod planning for optical networks". 2010 14th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS), 2010.
- [18] C. Meusburger, D.A. Schupke, and J. Eberspächer, "Multiperiod Planning for Optical Networks - Approaches Based on Cost Optimization and Limited Budget", IEEE ICC, 2008.
- [19] N. Geary et al., "Analysis of optimisation issues in multi-period DWDM network planning", IEEE INFOCOM, 2001.
- [20] Al-Sadoun, T.A. "The road to all-optical networks". 5th IEEE GCC Conference & Exhibition, 2009.
- [21] Carroll, Martin; Roesse, Josef; Ohara, Takuya; "The operator's view of OTN Evolution". IEEE Communications Magazine, September 2010.

- [22] Winzer, P.J. ; Bell Labs., Alcatel-Lucent, Holmdel, NJ, USA. "Challenges and evolution of optical transport networks", 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2010.
- [23] Bonaventura, G.; Jones, G.; Trowbridge, S.; "Optical transport network evolution: hot standardization topics in ITU-T including standards coordination aspects". IEEE Communications Magazine, October 2008.
- [24] Bitar, N. "Transport network evolution: From TDM to packet". Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference. March 2011.
- [25] Ciccarella, G. Forcina, A. ; Pirro, M. "International Voice Services: Platform Evolution and Management Achievements" Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008.
- [26] Sabella, Roberto. "Network Architecture Evolution: towards "All-IP"". Conference on Next Generation Internet Networks, 3rd EuroNGI. Conference Publications. 2007.
- [27] Fujitsu. "The key benefits of OTN Networks". 2010. Consultado en línea sept 2012: <http://www.fujitsu.com/downloads/TEL/fnc/whitepapers/OTNNetworkBenefitwp.pdf> [Última visita noviembre 2013].
- [28] Jarray, A. Jaumard, B. ; Houle, A. C. "Reducing the CAPEX and OPEX Costs of Optical Backbone Networks", IEEE International Conference on Communications (ICC), 2010.
- [29] Iselt, A. ;Kirstadter, A. ; Chahine, R. "Bandwidth trading-a business case for ASON". 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. 13-16 June 2004. Page(s): 63 – 68.
- [30] Podhradsky, P. "Migration Scenarios and Convregence processes towards NGN", Internaciona Symposium Electronics in Marine. 2004. p39.
- [31] Courcy, Chris de. Franx, Wouter. Hammer, Manfred. "Overlay NGN Migration Aproach to Deliver Multimedia Services". Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2004, p.39.
- [32] ITU T. "Optical fibers, cables and systems 2009". Consultado en línea: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf. [Última visita noviembre 2013].
- [33] ITU "The optical world 2011", Consultado en línea: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000130001PDFE.pdf. [Última visita noviembre 2013].
- [34] Recomendación UIT – T G.8081.
- [35] R. Ridha, S. Leeson, M. Machuca. "Control and Management Issues in All-Optical Networks". Journal of Networks, vol. 5, no. 2, february 2010.
- [36] D. Saha, B. Rajagopalan, and G. Bernstein, "The Optical Network Control Plane: State of the Standards and Deployment", IEEE Optical Communications, vol. 1, no. 3, August 2003.
- [37] US White house – Bradband Report. "Four Years of broadband growth" 2013. Consultado en línea febrero 11 de 2016: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/broadband_report_final.pdf
- [38] Leiva, A. ; Mas Machuca, C. ; Beghelli, A. ; Olivares, R. "Migration Cost Analysis for Upgrading WDM Networks". Communications Magazine, IEEE (Volume:51 , Issue: 11), November 2013.
- [39] Jongtae S.; Chang Y.; Lee S.;"Overview of ITU-T NGN QoS Control"; Electronics and Telecommunications Research Institute. IEEE Communications Magazine; Volume:45, Issue: 9. 2007.
- [40] Eurescom, Project P709, "Planning of Optical Network", Deliverable 3, Optical Network Planning, Volume 1 of 9: Main Report, March 2000.
- [41] Ling Jin Ping Pan, Chun Ying, Jinhua Liu, Qiming Tian, "Rapid Service Creation Environment for Service Delivery Platform based on Service TemplatesIBM China Research Laboratory. International Symposium on Integrated Network Management, 2009.
- [42] Detlef S. "Forecasting the success of telecommunication services in the presence of network effects". Information Economics and Policy,2000.
- [43] Alzate, M.; Peña N.; "Modelos de Tráfico en Análisis y Control de Redes de Comunicaciones". Revista INGENIERIA, Universidad Distrital, 2007.
- [44] Roy, R. Cuda, D. ; Mukherjee, B. "Traffic Growth and Network Engineering in Optical Mesh Networks".. 34th European Conference on Optical Communication, 2008. ECOC 2008.

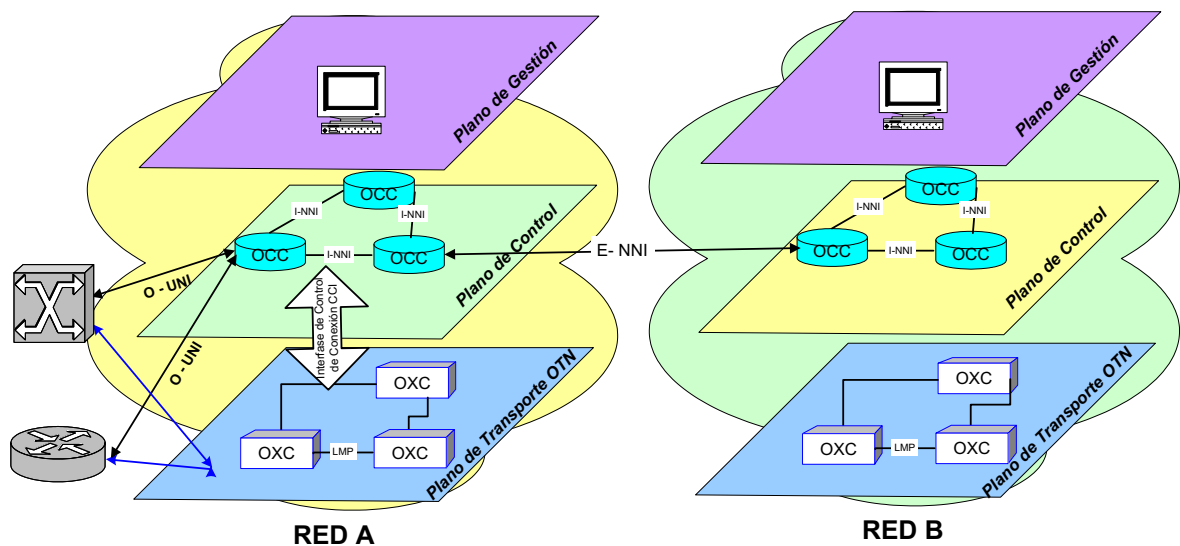
- [45] Recomendación UIT – T G.680. Disponible en internet: http://www.itu.int/rec/T-REC-G.8080/_page.print [Última visita noviembre 2013].
- [46] Consultado en línea: <http://theconversation.edu.au/the-internet-is-sapping-the-worlds-energy-so-lets-improve-it-9335>. [Última visita noviembre 2013].
- [47] A. Leiva L., C. Mas Machuca and A. Beghelli Z. "Upgrading cost modelling of capacity-exhausted static WDM networks" Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012 16th International , Issue Date: 17-20 April 2012.
- [48] VNI Forecast Highlights. Consultado en línea: http://www.cisco.com/web/solutions/sp/vni/vni_forecast_highlights/index.html#~Region
- [49] Weipeng WANG "A Demand-pull Model of Support System for Spare Parts: Based on System Dynamics" 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)2011 IEEE, May 2011.
- [50] Angerhofer Bernhard; Angelides Marios;"System dynamics modelling in supply chain management: research review" Proceedings.Simulation Conference, 2000.
- [51] CRC, "Información del Mercado". Consultado en línea <http://www.crc.com.co/index.php?idcategoria=46257>.
- [52] MinTIC, "Informes del sector". Consultado en línea: <http://www.mintic.gov.co/index.php/cifras>
- [53] DANE Comunicado de Prensa Consultado en línea: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ipc/cp_ipc_dic14.pdf
- [54] Jaramillo M.; Solano E.; "Modelo de negocio para EMCALI.E.I.C.E. Telecomunicaciones para fomentar los servicios de TI en beneficio de las PYMES en Cali". Trabajo de grado; Maestría en Gestión de Informática y Telecomunicaciones; Facultad de Ingeniería; Universidad ICESI; Cali; 2011.
- [55] COLOMBIA, Cali en cifras 2014, Alcaldía de Cali, Departamento Administrativo de 2011. Disponible en internet: http://planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali_en_Cifras/Caliencifras2014.pdf [Última visita noviembre 2015].
- [56] Roy, R. Cuda, D. ; Mukherjee, B. "Traffic Growth and Network Engineering in Optical Mesh Networks".. 34th European Conference on Optical Communication, 2008. ECOC 2008.
- [57] Desurvire, E. "Capacity Demand and Technology Challenges for Lightwave Systems in the Next Two Decades". Journal of Lightwave Technology. Dec. 2006.
- [58] Página oficial de Open Sim MPLS. Disponible en línea: <http://www.manolodominguez.com/projects/opensimimpls/>
- [59] Huidobro, José. Millán, Ramón. "Tutoriales MPLS". Disponible en línea: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/mppls.php#conceptompls>
- [60] Hesham A. B., Sahbudin S. "Simulation of 1.25 Gb/s Downstream Transmission Performance of GPON-FTTx" Photon2010 International Conference on ics (ICP), 2010
- [61] Ralph Martinez, Kevin McNeill, Wenji Wu, Peng Y. Choo "Modeling and Simulation of Optical Networks Using a Virtual GMPLS-Based Optical Switching Router")IEEE 2003
- [62] Agrawal G, "Fiber -Optic Communication Systems",Fourth edition, Wiley Publications, 2010, pp. 55-67.
- [63] V. Alwayn, Optical Network Design and Implementation: Cisco Press, 2004.
- [64] Dr.Salah Elfaki,Dr.Ibrahim Khider,Mohamed Omer,Fatima Almomen,Alaa Abdulllah, "Evaluation of Bit Error Rate (BER) in WLAN IEEE 802.11a with Radio over Fiber (RoF) downlink system"
- [65] Karady, G.G. Baozhuang Shi ; Qi Huang ; Srinivasan, D. ; Tuominen, M.W. "Experimental investigation of the aging process on ADSS optical fiber cables ".IEEE Power General Meeting Engineering Society, 2003.
- [66] Leiva López, Ariel. Zamora Farías, Hugo. "Vida útil de fibras ópticas en cables". Universidad Católica de Valparaíso. Universidad de Santiago de Chile. 2003
- [67] Chraplyvy, A.R. "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities". Journal of Lightwave Technology. Volume: 8, Issue: 10. Page(s): 1548 – 1557. 1990.
- [68] Krzysztof Borzycki, "Temperature Dependence of PMD in Optical Fibres and Cables" National Institute of Telecommunications, Szachowa, ICTON 2005.

- [69] Agrawal G, "Nonlinear Fiber Optics and its Applications in Optical Signal Processing", University of Rochester, 2007, pp. 1-44.
- [70] Toledo, Alejandro. Agredo, Juan Pablo. Ordoñez, Henry. "Análisis del Desempeño de Redes WDM Frente a Variaciones en los Parámetros de Transmisión y su Incidencia en los Efectos No Lineales". 2012.
- [71] A. Ruiz, F. Melo, Alejandro Toledo, "Análisis de Desempeño de redes WDM Comerciales con Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática" 2012.
- [72] B. Xu, "Study of Fiber Nonlinear Effects on Fiber Optic Communication Systems". Ph.D. thesis, University of Virginia, Virginia, USA, 2003.
- [73] Ghazel, C. ; Saidane, L." Migration from Traditional Networks to Converged Next Generation Networks Architecture with Guaranteed Quality of Service". International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, 2008. ICHIT '08. Page(s): 417 – 424.
- [74] Iselt, A. ;Kirstadter, A. ; Chahine, R. "Bandwidth trading-a business case for ASON". 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. 13-16 June 2004. Page(s): 63 – 68.
- [75] Carena, A. Curri, V. Poggiolini, P. Forghieri, F. "Optical vs. electronic chromatic dispersion compensation in WDM coherent PM-QPSK systems at 111 Gbit/s". Conference on Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008.
- [76] Cali en cifras 2011
- [77] Cali en cifras 2013
- [78] Cali cómo vamos
- [79] Índice de precios 2015 DANE

ANEXO A: EL MODELO ASON /ASTN

La finalidad del plano de control en la ASTN es facilitar la configuración rápida y eficaz de las conexiones en el plano de transporte, reconfigurar conexiones ya establecidas y realizar la función de restauración. Según UIT – T G. 8080 el plano de control debe ser lo suficientemente genérico para soportar tecnologías diferentes, es decir, un empaquetamiento diferente de los componentes del plano de control.

Figura A.1 – Planos funcionales de una red ASON multi operador

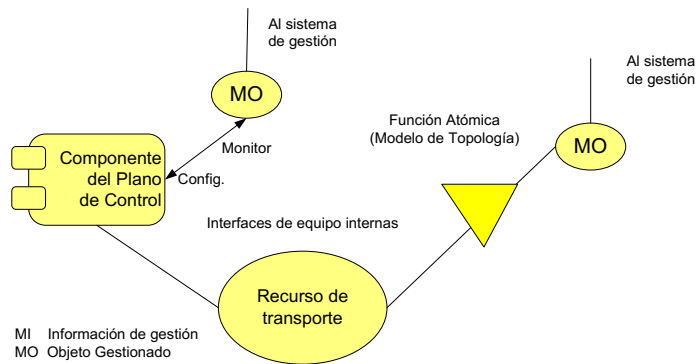


PLANOS FUNCIONALES

El plano de control realiza el control de llamada y el control de conexión. Las funciones del plano de control ASON están automatizadas, basado en la inteligencia de red que incluyen el descubrimiento automático, enrutamiento y de señalización. El plano de gestión realiza funciones de gestión para el plano de transporte, el plano de control y el sistema como un todo, así como la coordinación de todos los planos (ver figura 1.7).

Aunque cada plano es autónomo, se producen algunas interacciones porque operan en un recurso común subyacente (ver figura A.1). Los recursos en el plano de transporte se representan por unas entidades en el plano de control según la Rec. G.805 y las entidades que representan dichos recursos en el plano de gestión se describen en la Rec. M 3100.

Figura A.2 – Interacciones del plano de gestión/transporte con recursos de transporte



Fuente: [91]

El plano de gestión opera según las condiciones de los recursos de transporte, lo que refleja una visión de gestión externa del equipo. Los objetos gestionados (MO) interactúan con el modelo funcional, según las funciones atómicas definidas en la Rec. G.805, a través de las interfaces de información de gestión. Tanto los objetos gestionados y las interfaces de información de gestión están contenidas físicamente dentro del recurso de transporte. La operación del plano de control es autónoma a la operación del plano de gestión, y viceversa, es decir los dos planos no son conscientes de la existencia del otro, y ven solamente el comportamiento de los recursos. La información presentada al plano de control es similar a la presentada para el plano de gestión.

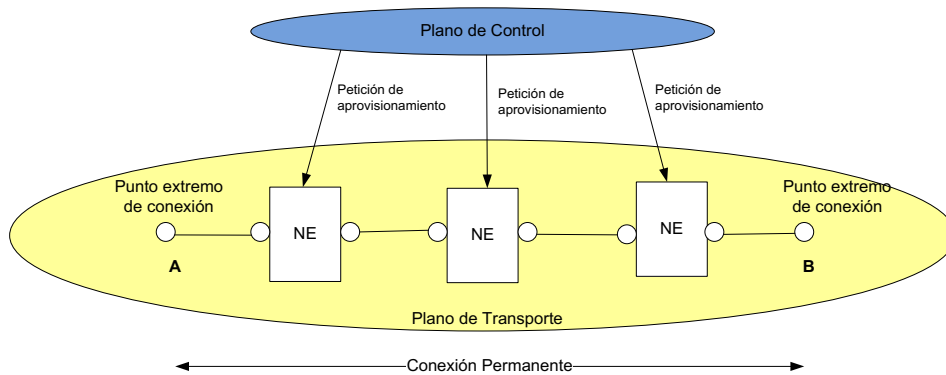
Todos los componentes del plano de control utilizan un conjunto de interfaces para el monitoreo y el establecimiento de políticas empleadas por un sistema de gestión que interactúa con los componentes mediante una operación en el modelo de información. Este modelo se encuentra físicamente en cada componente de control.

SERVICIOS DE CONEXIÓN EN ASON

Los servicios se clasifican en conexión permanente (PC), conexión conmutada (SC) y conexión lógica permanente (SPC).

La conexión permanente (PC) se configura ya sea por el sistema de gestión o por intervención manual y también se conoce como una conexión de aprovisionamiento. Este tipo de conexión no requiere ninguna intervención del plano de control y no implica enrutamiento automático o de señalización. Por lo general, esta es una conexión estática que dura un tiempo relativamente largo (meses o años) (ver figura A.3).

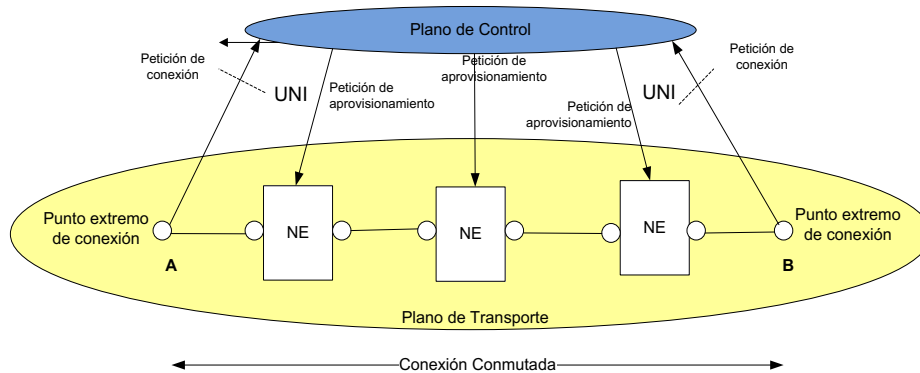
Figura A.3– Conexión permanente de A a B.



Fuente: [91]

La conexión conmutada (SC) se establece por demanda en puntos finales mediante el uso de enrutamiento y capacidades de señalización del plano de control. La conexión conmutada requiere una interfaz de usuario de la red de señalización (UNI) y su configuración puede ser responsabilidad del usuario final (el cliente) (ver figura A.4).

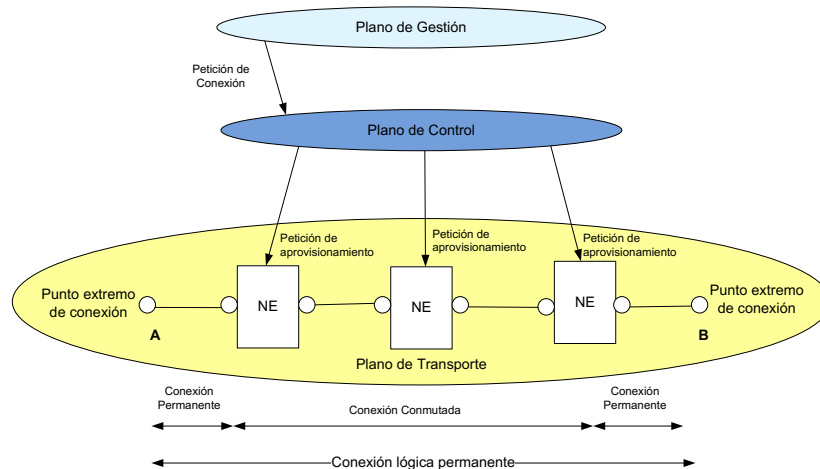
Figura A.4 – Conexión conmutada de A a B.



Fuente: [91]

La conexión lógica permanente (SPC) se establece especificando dos conexiones permanentes en el extremo de la red y el establecimiento de una conexión conmutada entre las conexiones permanentes dentro de la red. El establecimiento de la conexión correspondiente se conoce como una conexión híbrida. En este caso no se necesita UNI (ver figura A.5).

Figura A.5 – Conexión lógica permanente



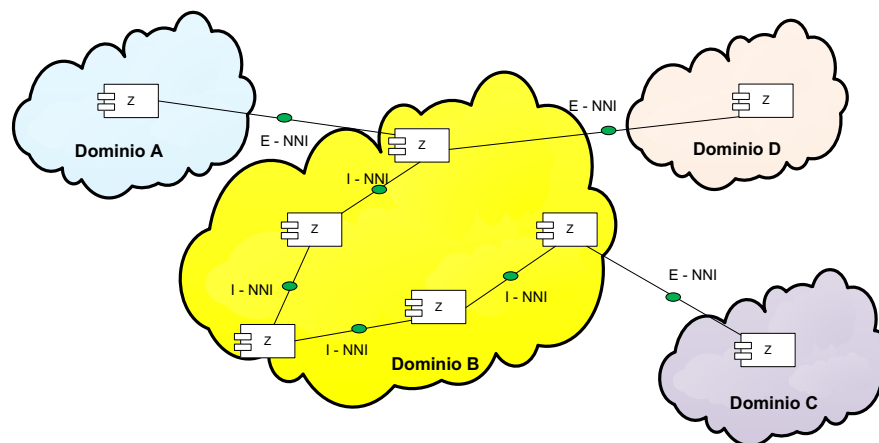
Fuente: [91]

La conexión permanente es establecida por el operador desde el plano de gestión y equivale a una línea alquilada tradicional o “clear channel”. Las conexiones conmutadas requieren del plano de control, se configuran en pocos segundos y se utilizan para alquilar servicios de banda ancha. Las conexiones lógicas permanentes se activan desde el plano de gestión, pero se configuran desde el plano de control, tienen características mejoradas de ingeniería de tráfico y de restablecimiento dinámico de conexiones fallidas.

DOMINIOS E INTERFACES DEL MODELO

Según la Rec. G.8080, la interconexión entre dominios, áreas de enrutamiento y entre dispositivos de control se describe en términos de puntos de referencia. Estos puntos de referencia determinan la interconexión dentro y fuera del dominio intercambiando información a través de interfaces abstractas que pueden ser multiplexadas por una sola interfaz física. La UNI es el punto de referencia entre el usuario y el proveedor, la E - NNI es el punto de referencia entre dominios diferentes que soporta establecimiento de conexión multi dominios y la conexión entre dominios internos utiliza la interfaz I - NNI (Ver figura A.6).

Figura A.6 – Relación entre dominios



Fuente: [91]

FUNCIONES DEL PLANO DE CONTROL

Para ofrecer funciones características de las ASON/ASTN se deben utilizar varios mecanismos de descubrimiento, localización, rutas, señalización y sistemas de protección y restauración:

Descubrimiento:

El descubrimiento automático elimina la necesidad de actividad de configuración explícita. Los siguientes tres grupos de funciones de localización se pueden distinguir:

- **El descubrimiento de nodos vecinos:** es responsable de determinar el estado de los enlaces locales que se conectan a los nodos vecinos. Se utiliza para detectar y mantener las adyacencias del nodo y es esencial para realizar el seguimiento de la conectividad entre dispositivos adyacentes. Sin esta función, sería necesario configurar manualmente la información de interconexión en los sistemas de gestión o en cada uno de los dispositivos de la red. Se distinguen tres casos: i) Descubrimiento de los medios físicos de adyacencia, ii) Descubrimiento de la capa de adyacencia, y iii) El establecimiento de control de entidad de adyacencia lógica. Los procesos de descubrimiento de nodos vecinos implican el intercambio de mensajes que contengan atributos de identidad. La información de capacidad de servicio está contenida en el mensaje de acuse de recibo o también existe el caso en que ambos extremos envían sus atributos de identidad (Rec. UIT –T G.7714/Y.1705 – Técnicas generalizadas de autodescubrimiento).
- **El descubrimiento de recursos:** tiene un alcance más amplio que el descubrimiento de nodos vecinos. Se le permite a cada nodo descubrir la topología de red y recursos. Algunos detalles de la topología completa se pueden ocultar a los nodos ubicados en otros dominios de la red. Este tipo de descubrimiento determina qué recursos están disponibles, cuál es la capacidad de los distintos elementos de la red, si los recursos están protegidos y detecta errores de configuración.
- **El descubrimiento de servicios:** es responsable de verificar e intercambiar la capacidad de prestación de un servicio de red. Puede incluir la clase de servicio (CoS), grado de servicio (GoS), capacidad de adaptación flexible en cada extremo de la conexión, y los algoritmos de enrutamiento que utilizan.

Enrutamiento

Se utiliza para seleccionar las rutas para el establecimiento de conexiones a través de la red. Aunque se pueden adoptar protocolos de enrutamiento IP, **la tecnología óptica es en esencia analógica y por lo tanto, las degradaciones de la transmisión acumulados a lo largo de los caminos ópticos tienen que ser tomadas en el cálculo de la ruta**. Otra limitación que influye en los mecanismos de enrutamiento ASON, es el hecho de que los ISPs no permiten a otros operadores la visibilidad de su red interna y debido a la escala de las redes consideradas los protocolos de enrutamiento deben reducir al mínimo posible la información global que requieren (Rec. UIT-T G.7715/Y.1706 - Arquitectura y requisitos de enrutamiento en ASON).

El modelo ASON soporta enrutamiento jerárquico, enrutamiento basado en la fuente y paso a paso, obteniendo una distribución característica entre los nodos y sus relaciones mutuas. En el primer caso, los controladores de conexión están relacionados entre sí de manera jerárquica. Cada subred sólo conoce su propia topología pero no tiene conocimiento de la topología de otras subredes en cualquier nivel jerárquico. La selección de ruta se inicia en la parte superior de la jerarquía y se define una secuencia de subredes en un nivel inferior a través del cual se puede encontrar un camino entre el nodo origen y el nodo destino. El proceso continúa de la misma manera en todos los niveles. El enrutamiento basado en el origen es el resultado de la unión de una conexión distribuida y controladores de ruta. La ruta es seleccionada por el controlador de conexión inicialmente en el área de enrutamiento. El controlador de conexión contiene un controlador de enrutamiento que proporciona las rutas dentro del dominio de su responsabilidad. El enrutamiento paso a paso requiere menos información de enrutamiento en los nodos que los métodos anteriores y la selección de las rutas se realiza en cada nodo para obtener el siguiente enlace en la ruta hacia el destino.

La Señalización

La señalización implica el transporte de mensajes de control entre todas las entidades que se comunican a través del plano de control de la red. Los protocolos de señalización se utilizan para crear, mantener, restaurar, y liberar las conexiones. Lo que se busca es permitir un aprovisionamiento rápido y una rápida recuperación ante fallas. De acuerdo con la Rec. UIT –T G.807, la red de señalización en ASTN debe basarse en la señalización de canal común que implica la separación de la red de señalización de la red de transporte. Tal solución permite la escalabilidad, alto grado de resiliencia (resistencia ante fallos), eficiencia de enlaces de señalización, flexibilidad en el tamaño de los mensajes.

En la Rec. UIT-T. G.7713 / Y.1704 se especifica las operaciones de establecimiento de llamada y la liberación. Se describe el intercambio de señalización que permite el soporte para la fuente de jerárquica, y el encaminamiento paso a paso. Proporcionan los mecanismos de señalización y especificaciones de protocolo basado en PNNI/Q.2931, GMPLS RSVP-TE, y GMPLS CR-LDP. El Transporte de mensajes de señalización se realiza a través de una red de comunicación de datos (DCN), tal como se describe en la Recomendación UIT-T G.7712/Y.1703.

La detección automática y enrutamiento, con el apoyo de sistemas de señalización, se refiere a veces como la autogestión, ya que liberan el sistema de gestión de tareas que consumen tiempo con actualizaciones manuales de los cambios de topología y la selección de ruta.

Llamada y control de conexión

La Llamada y el control de conexión están separados en la arquitectura de ASON. Se define llamada a una asociación entre los puntos finales que admite una instancia de servicio, mientras que una conexión es una concatenación de conexiones de enlace y de subred que permite el transporte de información. Una llamada puede incorporar muchas conexiones subyacentes. Los beneficios de esta separación incluyen la posibilidad de prestar servicios ópticos con ancho de banda bajo demanda programada, diversos aprovisionamientos de circuitos, entre otros. La separación del control de conexión y la llamada también simplifica la restauración después de un fallo. En tal caso, la llamada se puede mantener (es decir, no se libera), mientras que los procedimientos de restauración están en curso.

El control de llamada debe ser compatible con la coordinación de las conexiones en una llamada multi-conexión y la coordinación de las partes en una llamada multiconferencia. Es igualmente responsable de la negociación de sesiones de extremo a extremo, el control de admisión de llamadas, y el mantenimiento del estado de la llamada.

El control de conexión es responsable del control global de las conexiones individuales, incluyendo la configuración y los procedimientos de liberación y el mantenimiento del estado de las conexiones. La conexión de control implica el control de admisión de conexiones, proceso que determina si hay recursos suficientes para admitir o mantener una conexión (relacionado con la re-negociación de recursos durante una llamada).

Mecanismos de conservación

La confiabilidad en ASON se logra mediante el uso de varios esquemas de supervivencia. La supervivencia es la capacidad de la red para continuar su funcionamiento bajo condiciones adversas y fallos. La supervivencia se realiza con mecanismos de protección o restauración. La protección se basa en la sustitución de un recurso que haya fallado (por ejemplo, un enlace o una ruta) con una pre-asignado de recursos en espera. La restauración, es el cambio de ruta utilizando la capacidad disponible. Los mecanismos de protección se completan en menos de un milisegundo, mientras que la restauración puede tomar hasta varios segundos. Ambos mecanismos mantienen la clase de servicio (CoS) solicitada por el cliente.

La conservación en ASON involucra los tres planos funcionales. En el caso de protección plano de transporte, la configuración de la protección es la responsabilidad del plano de gestión. Sin embargo, el plano de transporte debe informar al plano de control sobre todos los fallos de los recursos de transporte, así como las adiciones o eliminaciones. En el caso de la protección del plano de control, se crea una conexión de trabajo y una conexión de protección. Para este tipo de protección sólo la fuente y los controladores de destino de conexión están involucrados.

La restauración del plano de control se basa en el desvío de llamadas con capacidad de reserva. Tal servicio de cambio de ruta se realiza según el dominio de cambio de ruta, es decir, la operación de cambio de ruta se lleva a cabo entre los extremos del dominio de re enrutamiento. Lo anterior no excluye las solicitudes de servicio de re enrutamiento de extremo a extremo. Se distinguen servicios de re enrutamiento duros y blandos. El primero es un mecanismo de recuperación de errores y está siempre activo en caso de fallas. El segundo cambia la ruta asociada con operaciones que se activan generalmente desde el plano de gestión de: optimización de ruta, mantenimiento de red, operaciones planificadas de ingeniería. Con el soft routing la ruta de la conexión original se elimina después de que se crea la conexión de desvío, mientras que en el hard routing la conexión original se libera antes de la creación de la nueva ruta.

ANEXO B: EL MODELO GMPLS

GMPLS es la última etapa de desarrollo que la ingeniería de tráfico inicio con ATM, MPLS y MALS que busca dar características de redes de conmutación de circuitos a las redes de conmutación de paquetes. GMPLS nace con el RFC 3945 en 2004 con el objeto de asignar tráfico IP directamente en la capa óptica, reducir la complejidad de los sistemas y darles flexibilidad IP.

Es un modelo que puede trabajar con enrutadores IP, conmutadores ATM, conectores cruzados digitales (DXC) y conectores cruzados ópticos (OXC), entre otros. Para lograrlo, extiende las funcionalidades de MPLS y añade otras nuevas con mecanismos de etiquetas generalizadas y la utilización de G-LSP que involucra los protocolos de enrutamiento y señalización para la distribución de etiquetas, ingeniería de tráfico y restauración de enlaces. De manera que controla la señalización y el enrutamiento desde el plano de control utilizando reglas de gestión de enlace LMP (Link Management Protocol) [29].

LA HERENCIA DE MPLS

La arquitectura MPLS se describe en el RFC 3031 de 2001, extendiendo las capacidades de señalización y de enrutamiento IP existentes lo que reduce el tiempo de adaptación y comercialización. MPLS nace como una tecnología orientada a la conexión para trabajar en redes IP (no orientadas a la conexión).

MPLS requiere la encapsulación de paquetes IP en paquetes etiquetados. La realización de la etiqueta depende de la tecnología de enlace en uso. Por ejemplo, en las redes ATM se utilizan como etiquetas el identificador de canal virtual (VCI) y el identificador de ruta virtual (VPI).

La tecnología funciona de la siguiente manera, se añade una cabecera MPLS al paquete IP que se utiliza como etiqueta. Los paquetes etiquetados se transmiten a lo largo de una conexión virtual llamada ruta de conmutación de etiquetas (LSP). Los enrutadores MPLS son llamados LSRs (Enrutadores de conmutación de etiquetas). Los LSRs en el borde de un dominio MPLS se conocen como LER (ruteador de etiquetas), son capaces de crear, modificar, desviar y eliminar LSP. Los LSRs intermedios dentro de un dominio MPLS no examinan la cabecera IP durante la expedición sino que reenvían los paquetes IP de acuerdo a las reglas de intercambio de etiquetas. Con el intercambio de etiquetas, el LSR identifica cada etiqueta particular según el puerto de entrada y ubica el puerto y la etiqueta de salida. Los LSRs de frontera (LER) establecen el LSP mediante la configuración de cada LSR intermedio para realizar intercambio de etiqueta correctamente con el puerto de entrada y la etiqueta del paquete IP para determinar el puerto y la etiqueta de salida.

El plano de control MPLS proporciona características favorables a la creación de redes convergentes multiservicios y elimina las capas redundantes mediante la incorporación de funciones similares a las que ofrecen ATM y SONET/SDH:

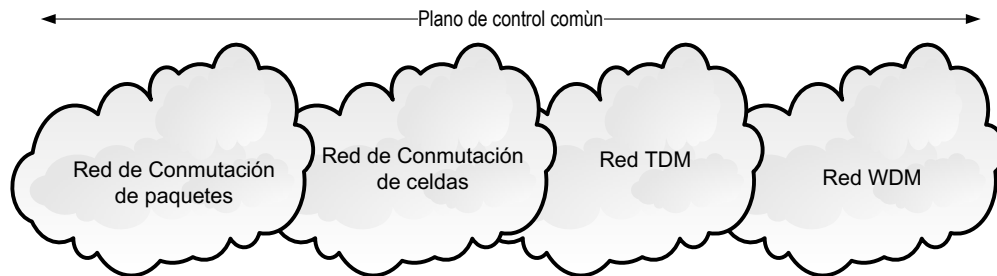
- Soporta la reserva de recursos, el enrutamiento explícito y el enrutamiento basado en restricciones. El enrutamiento basado en restricciones se utiliza para ingeniería de tráfico (TE) y el redireccionamiento rápido (FRR).
- IP / MPLS con la ingeniería de tráfico desplazó a ATM e igualmente está desplazando a SONET / SDH con sus características de protección y restauración.
- MPLS ofrece la posibilidad de apilar las etiquetas, lo que permite tener un paquete IP marcado con una, dos, o más etiquetas, frente a las dos etiquetas (VCI, VPI) en redes ATM. La capacidad de apilamiento de etiquetas permite construir jerarquías arbitrarias dando más posibilidades a la gestión de tráfico en la red.

¿Qué problemas tiene MPLS?

Los LSPs son unidireccionales, para establecer un LSP bidireccional se requieren dos LSP en contra sentido e independientes; lo que impide al plano de control establecer conexiones bidireccionales en una sola petición, sobrecargando la red con información de control y retardos de configuración.

Otro problema es que el ancho de banda de protección no puede ser utilizado por tráfico de menor prioridad durante el funcionamiento libre de fallos de la red, que podría liberarse en el caso de fallos en la red para transportare el tráfico de mayor prioridad. Como resultado, el ancho de protección no se utiliza durante el funcionamiento libre de fallos.

Figura B.1 – Plano de control común en una red óptica multi - tecnología



Por último la arquitectura MPLS está diseñada para dispositivos que realizan la conmutación de paquetes, sin embargo, las redes de conmutación óptica tiene técnicas de multiplexación diferente y en un enlace extremo a extremo como el que muestra la figura puede comprender redes de conmutación de paquetes de tamaño variable, de tamaño fijo, de conmutación de celdas, con tecnologías TDM y WDM (ver figura B.1).

LA TECNOLOGÍA GMPLS

GMPLS difiere de MPLS en que soporta múltiples tipos de conmutación, además de conmutación de paquetes GMPLS también soporta conmutación TDM, lambda, y puertos de fibra. Para cubrir las limitaciones de MPLS en el dominio eléctrico y óptico, se crearon nuevas formas de etiqueta denominadas etiquetas generalizadas.

Una etiqueta generalizada contiene información suficiente para permitir que el nodo de recepción realice una conexión cruzada, independientemente del tipo de tecnología, permitiendo la representación de paquetes de datos, intervalos de tiempo, longitudes de onda o puertos de fibras.

La lógica detrás de GMPLS es definir un plano de control común a las diversas tecnologías de red (IP, ATM, SONET / SDH, TDM y WDM) y añadir inteligencia a la red óptica. Tradicionalmente, cada tecnología específica tiene su propio conjunto de protocolos de control, lo que resulta en redes complejas superpuestas que constan de múltiples capas. El objeto de GMPLS es lograr interconexión sin interrupciones a través de diferentes tecnologías de red y el establecimiento y liberación de conexión extremo a extremo a través de redes heterogéneas.

SEPARACIÓN DEL PLANO DE CONTROL Y EL DE DATOS

En un entorno de conmutación de paquetes, los mensajes de plano de control se envían utilizando los mismos enlaces de los datos en este caso los dos planos se consideran coincidentes. En el caso de las redes de transporte los nodos de red pueden renviar grandes volúmenes de datos a gran velocidad debido a que se realiza la conmutación ranuras de tiempo, longitudes de onda y fibras sin el reconocimiento de paquetes

individuales. Lo que significa que los mensajes del plano de control no pueden ser entregados a través de los mismos canales que el tráfico de datos.

En algunos casos un canal de "datos" se dedica para la entrega del tráfico de control - por ejemplo, un enlace WDM, o un intervalo de tiempo en un enlace de TDM. En otros casos, el tráfico de control utiliza enlaces separados o redes separadas.

La separación de los dos planos impone grandes desafíos a los protocolos GMPLS. Por ejemplo, la identificación de los enlaces de datos ya no está implícita en los mensajes de señalización. Son necesarias técnicas para verificar la conectividad de los enlaces de datos. Deben añadirse mecanismos de señalización para permitir la gestión de los fallos del plano de datos. Si algún controlador es notificado por un componente de hardware del plano de datos sobre un fallo, debe enviar una notificación apropiada al nodo responsable de la recuperación del servicio. También debe ser posible instalar y cancelar servicios evitando la generación de alarmas (alarm free), de modo que no se generen falsas alarmas.

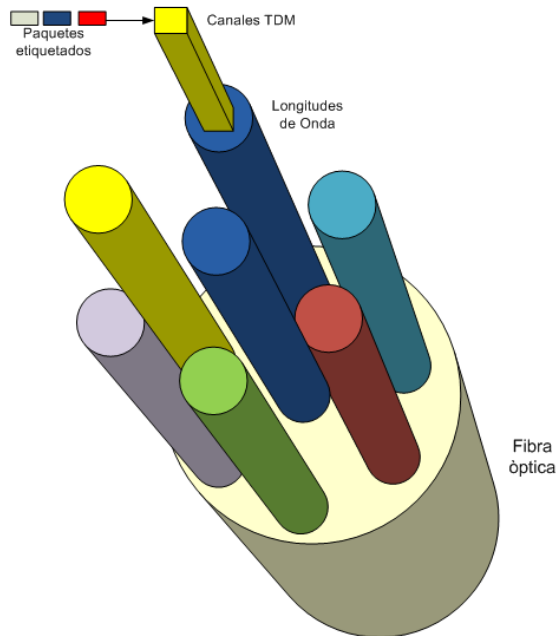
El resultado de la separación de los dos planos es que los fallos en uno o más controladores o en las conexiones del plano de control no significan que haya algún problema en la entrega del tráfico de datos. Los canales de datos, parcialmente controlados, pueden seguir funcionando correctamente de manera indefinida.

JERARQUÍAS DE ENTUNELAMIENTO

El entunelamiento de LSPs jerárquico es un concepto MPLS relacionado con pilas de etiquetas que se podía utilizar únicamente en redes de conmutación de paquetes. En entornos diferentes, donde la etiqueta es directamente asociada al recurso físico, no era posible producir una pila de etiquetas.

En GMPLS el concepto de LSPs jerárquico tiene un significado diferente debido a que se debe hacer tratamiento de una variedad de tipos de conmutación (paquete, TDM, lambda, entre otros), existe una jerarquía natural de conmutación basada en la granularidad. El LSP y los recursos físicos pueden estar anidados según esta jerarquía. Como se muestra en la Figura, las lambdas pueden estar anidadas dentro de una fibra, las ranuras de tiempo dentro de una lambda, y los paquetes dentro de un intervalo de tiempo. Esta jerarquía permite la agregación de túneles con ingeniería de tráfico escalable, y un uso más eficiente del ancho de banda que facilita la integración de diferentes tipos de conmutación proporcionando conectividad de extremo a extremo (ver figura B.2).

Figura B.2 – Jerarquía de conmutación en GMPLS



SEÑALIZACIÓN EN GMPLS

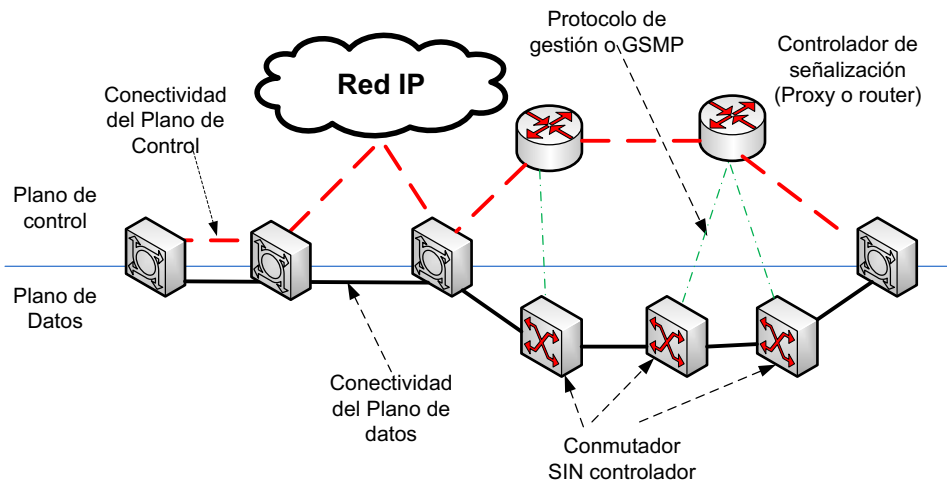
La señalización es el proceso de intercambio de mensajes dentro del plano de control para configurar, mantener, modificar y cancelar rutas del plano de datos. En el contexto GMPLS, estas rutas de datos se conocen como LSP. Los mensajes de señalización son intercambiados entre los componentes de software llamados controladores de señalización, responsables de la gestión de los componentes del plano de datos.

En GMPLS los conmutadores del plano de datos se llaman Label Switching Routers (LSRs) y aunque el controlador dependiendo del diseño puede encontrarse dentro del conmutador, la arquitectura GMPLS soporta las dos opciones de ubicación del controlador: i) Puede ubicarse físicamente separado del conmutador de manera que se pueden controlar uno o varios conmutadores con un dispositivo físico ii) Algunos conmutadores contienen el controlador de manera interna (Ver figura B.3). La señalización se realiza a través de canales de control que pueden ser físicos o lógicos.

En la figura 1.15 se muestran los controladores de señalización unidos por un canal de control conocido como adyacente (a pesar de que podrían no estar físicamente adyacentes), una vez que se comunican usando el protocolo de señalización, establecen una adyacencia de señalización.

Puede darse el caso en que los canales de control utilicen el canal de datos entre LSRs; los mensajes de señalización se mezclan con los datos, y se define como señalización en banda. En redes ópticas es inusual mezclar el control de tráfico con los datos, pues requeriría que cada conmutador examine los datos y extraiga los mensajes de señalización para enviarlos al controlador. Esta operación requiere equipos costosos y es poco práctico para los dispositivos ópticos (como PXC y OXC), por el contrario, un mecanismo común es utilizar un canal de datos específico para el tráfico de señalización (señalización fuera-de-banda); puede ser una longitud de onda o un intervalo de tiempo específico, conocido como canal de supervisión óptico (OSC). El OSC se ubica en cada conmutador su tráfico se entrega al controlador de señalización, de manera que los mensajes de señalización no se mezclan con los datos.

Figura B.3 – Configuraciones posibles de controladores de señalización y conmutadores



Otra opción de conectividad para el canal de control es mediante la utilización de diversos medios físicos (Fibra, cobre, radio, etc) de forma paralela a la línea de datos siguiendo un camino físico completamente diferente e independiente de la ruta de datos. Estos mecanismos de control de canales diferentes se pueden mezclar, y ofrecer alta flexibilidad y resiliencia a GMPLS. Dos grandes beneficios del canal de control fuera de banda son un canal de control que solo se puede utilizar para administrar más de un canal de datos en paralelo, y que el canal de control se puede proteger ante fallos dentro del plano de control.

Originalmente se habían especificado dos protocolos de señalización en GMPLS (RSVP-TE y CR-LDP), pero las últimas modificaciones de la IETF han reconocido que sólo es necesario un protocolo de señalización (Ver RFC 3468). El RFC 3468 se concentra en los mensajes y las características de RSVP-TE.

Sesión en RSVP

En RSVP, una sesión es la agrupación de los flujos de tráfico a un destino en particular. La sesión se identifica por una dirección de IP (IPv4 o IPv6) de destino y un identificador del puerto al que debe entregar los datos. La característica importante de la sesión es que todo el tráfico fluye compartiendo la sesión puede también compartir recursos en la red. Por lo tanto, permite que múltiples fuentes que utilicen la misma aplicación inicien tráfico en una misma sesión.

RSVP-TE introdujo el concepto de túnel MPLS. Un túnel MPLS tiene una entrada y una salida y la inserción de datos en el túnel garantiza su entrega a la salida. En ingeniería de tráfico, el túnel proporciona un bloque de construcción básico, ya que a las aplicaciones sólo les interesa la entrega de los datos de extremo a extremo, y se deja en manos de la red la gestión del túnel con los recursos que estén disponibles. Cada túnel se conoce por su destino y un identificador de túnel de 16-bit (que sustituye el ID de puerto), que distingue varios túneles que se ejecutan al mismo destino. Los tres elementos que identifican la sesión se combinan dentro de un único objeto del protocolo RSVP-TE, el objeto de sesión, y la inclusión de este objeto en un mensaje RSVP-TE indica a qué sesión se aplica.

En GMPLS el objetivo es ofrecer un servicio extremo a extremo, lo que se considera como un túnel. Sin embargo, una sesión no es suficiente para entregar los datos: Se requiere un LSP para transferir los datos. Cada servicio está soportado por uno o más LSP. Los mismos LSPs tienen propiedades de túneles (es decir, mediante el etiquetado de los datos y enviarlos de una interfaz específica en el nodo de origen, se han seleccionado un LSP, y en consecuencia el destino) y se refiere a veces como túneles LSP.

Un LSP es un concepto de los dos planos, el de control y el de datos. En el plano de datos un LSP es una ruta de transmisión estricta definida por {interfaz entrada, etiqueta entrante} a {interfaz de salida, etiqueta de salida} y se puede establecer a través de señalización o por gestión (configuración del conmutador). En el plano de control, un LSP se establece por el protocolo de señalización para la gestión del LSP en el plano de datos, es decir, el LSP del plano de datos se establece y mantiene por mensajes del plano de control.

Rutas LSP

Un LSP es un camino formada a partir de la interconexión de etiquetas (recursos) en una serie de enlaces del plano de datos. La ruta LSP puede seleccionarse de tres formas, dependiendo de los requisitos de la aplicación que establece el LSP, y de las capacidades de la red:

- La ruta completamente abierta: El operador especifica el destino, y la ruta se selecciona salto a salto; en cada LSR se elige el mejor siguiente salto hacia el destino elegido. Esta técnica no utiliza la tabla de enrutamiento (no es un encaminamiento IP), sino que utiliza la base de datos de Ingeniería del Tráfico (TED) que contiene información específica sobre el plano de datos.
- La ruta completamente especificada por el operador: Si el operador conoce el estado de la red y desea dejar un LSP a lo largo de una ruta específica; puede suministrar una ruta explícita para el plano de control.
- La ruta seleccionada por el plano de control: Se basa en restricciones del cálculo de la trayectoria (como OSPF), el plano de control selecciona una ruta para un LSP a través de la red, teniendo en cuenta una serie de requisitos de banda, tipo de servicio, y enlaces específicos y los LSRs que deben ser incluidos en la ruta. El plano de control toma estas restricciones y realiza el cálculo.

Etiquetas y recursos:

Un LSP se configura utilizando el intercambio de etiquetas en el plano de control. El LSR debe saber cómo etiquetar los datos para enviarlos hacia otro LSR de manera que sepa en qué LSP están fluyendo los datos. El modo de distribución de etiquetas de los LSP en GMPLS se hace por demanda; un LSR envía la solicitud de un LSP al destino especificado en el objeto "Sesión", y el LSR destino responde diciendo que etiqueta debe ser utilizada para el transportar de los datos si el LSP se establece con éxito.

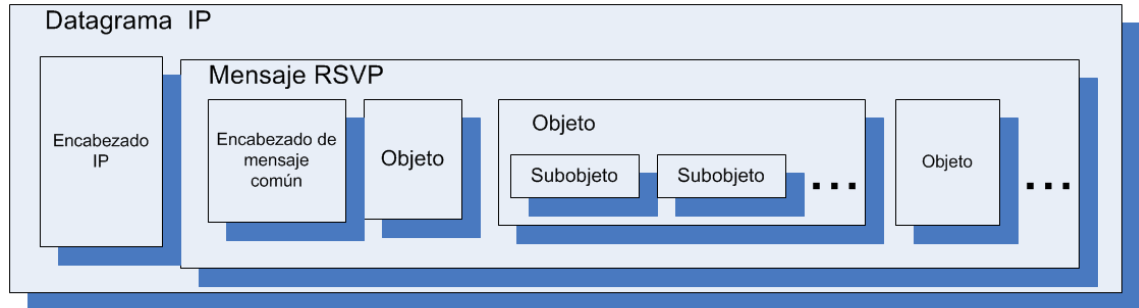
En redes que no son de conmutación de paquetes, las etiquetas están directamente asociadas a los recursos, cuando una etiqueta se asigna, no es simplemente una etiqueta arbitraria que identifica un LSP en el plano de datos, sino también un recurso físico de hardware (una ranura de tiempo, una longitud de onda, o una fibra). Por lo tanto, el plano de control debe comunicar qué tipo de LSP se requiere, qué recursos deben ser asignados, y que tipo de etiqueta utilizar. En GMPLS, la etiqueta se solicita mediante el objeto "Generalized Label Request". Esto permite especificar los tres parámetros de entrada para el LSP:

- El tipo de codificación LSP: Indica el formato de los datos que se empaquetan dentro de la LSP (paquetes IP, Ethernet, SONET SDH, Digital Wrapper, y Lambda).
- El PID Generalizado (G-PID): identifica la carga útil. El G-PID solo se utiliza como salida de los LSR y permite saber si se termina con éxito el LSP, es decir, si es capaz de procesar la señal que recibe.
- El Tipo de conmutación (indica la etiqueta que se asigna). El campo indica qué tipo de conmutación se debe realizar en el LSP cuando los datos son recibidos por el LSR. Los de este campo son: PSC (Packet Switch Capable), L2SC (Layer-2 Switch Capable), TDM (Time-Division Multiplex-Capable), LSC (Lambda-Switch Capable), o FSC (Fiber-Switch Capable).

Cada mensaje RSVP-TE está construido según una plantilla común. El mensaje (en el datagrama IP) comienza con una cabecera de mensaje. Esta cabecera es común a todos los mensajes de señalización e identifica el tipo de mensaje y la longitud del mensaje. El encabezado del mensaje común también incluye una suma de

verificación para detectar cualquier error en el mensaje. Después de la cabecera, van los mensajes de señalización que se construyen a partir de objetos. Cada objeto está codificado en una forma estándar con la tripleta Variable, Tipo, Longitud (VTL). Cada objeto se utiliza para codificar un conjunto específico de información (parámetros de ruta LSP, parámetros de tráfico y ancho de banda para el LSP), y la naturaleza de la información que se indica mediante el tipo de campo en el objeto. La figura muestra un mensaje RSVP-TE dentro de un datagrama IP (ver figura B.4).

Figura B.4 – Estructura de un mensaje RSVP – TE transportado en un datagrama IP.



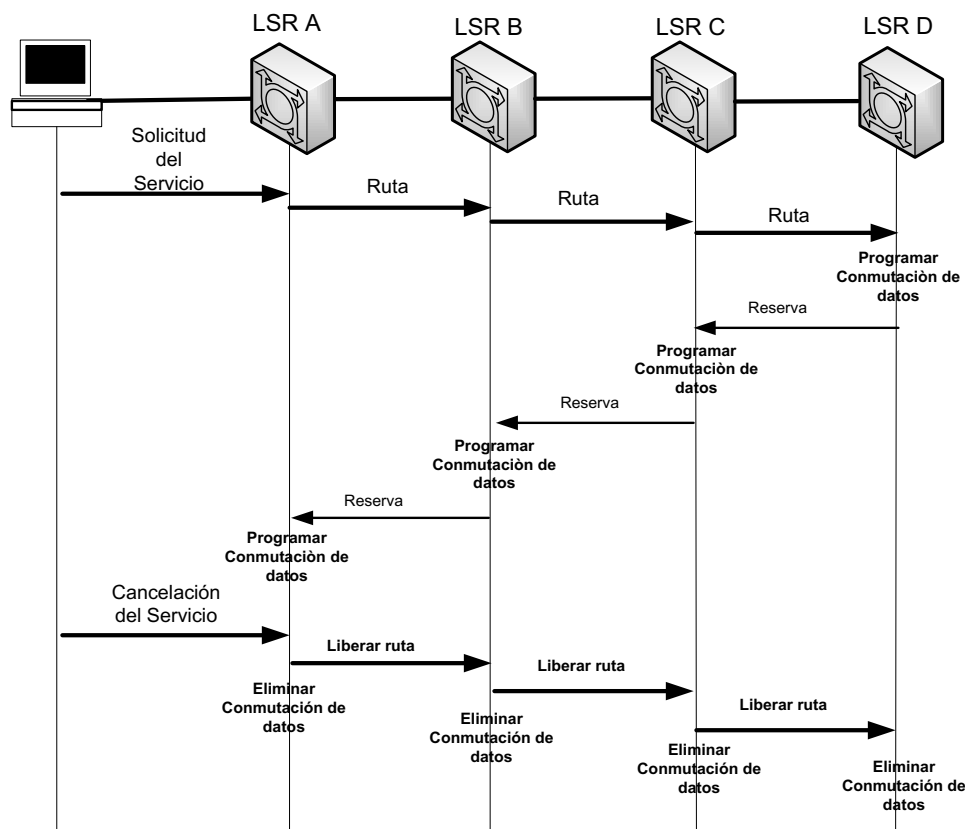
Establecimiento del LSP

El establecimiento del LSP lo inicia el LSR de entrada que envía un mensaje de configuración LSP al siguiente salto, el camino se determina con el enrutamiento explícito del LSP o calculando el siguiente salto hacia el destino. La petición de establecimiento de LSP lleva un identificador de sesión padre (objeto "Session") y un identificador de LSP ("Sender-Template"), así como los parámetros que describen el LSP solicitada (Label Request, Sender TSpec-, y Explicit Route Objets).

El LSP se crea un vez haya sido aceptado por el LSR destino que envía un mensaje de aceptación entregando la etiqueta que debe utilizar para identificar el tráfico (objeto "Label") y confirma la reserva de recursos (objeto "FlowSpec").

El mecanismo descrito se muestra en la Figura B.5: La configuración LSP se renvia salto a salto hasta que llega a la salida. En cada LSR los parámetros de tráfico se renvían para asegurar el LSP, Cuando la configuración LSP llegue a la salida, se crea el LSP y la respuesta de aceptación se devuelve salto a salto hasta la entrada. En cada LSR la etiqueta indica que recursos ser reservan y se programa (crossconnected) la conmutación en el plano de datos y renvia la etiqueta al siguiente LSR. Cuando se establece y acepta el LSP por la entrada, interconecta sus recursos para comenzar la transmisión de datos.

Figura B.5 – Intercambio de mensajes para el establecimiento y liberación de un LSP



ENRUTAMIENTO EN GMPLS

El enrutamiento en GMPLS hace referencia a la distribución de información que se utilizará para el cálculo de la trayectoria o el LSP dentro de la red. La distribución de la información de enrutamiento se basa en extensiones de protocolos de enrutamiento IP y hay dos protocolos de enrutamiento IP que interactúan de una manera escalable dentro de un área (OSPF e IS-IS), ambos definidos por el IETF.

En el caso de las redes IP, el enrutamiento determina el siguiente salto de un paquete IP en el camino más corto hacia su destino, la decisión se toma en cada enrutador basada en la información ubicada en una tabla de enrutamiento. Cada enrutador es responsable de distribuir ésta información con base en el estado de los enlaces activos y el costo de la transmisión de datos en cada enlace. La información la distribuyen los protocolos a todos los enrutadores del área, cada protocolo utiliza un algoritmo para determinar la ruta más corta hacia un destino y menor costo; lo que significa que la suma de los costos de todos los vínculos con el destino se reduce al mínimo. En realidad cada enrutador sólo se preocupa por el siguiente salto porque sabe que el próximo enrutador aplicará el mismo concepto.

Con ingeniería de tráfico se coloca el tráfico en enlaces seleccionados y con trayectorias pre-calculadas dentro de la red buscando evitar la congestión y elegir enlaces que proporcionen la calidad de servicio deseada. Una vez se conoce la trayectoria de un LSP los protocolos de señalización aseguran que el LSP se establezca y se cumpla exitosamente.

Para establecer un LSP a través de una red de transporte con éxito, no es suficiente conocer el ancho de banda disponible en cada uno de los nodos de la red, también debe conocer las capacidades de conmutación de los enlaces en cada LSR. Cada LSR puede ser capaz de conmutar los datos que llegan en un enlace en una o más

formas, dependiendo de las habilidades del LSR. De manera que los enrutadores deben también anunciar las capacidades de conmutación en cada enlace.

Por otra parte, las redes de transporte pueden contar con la habilidad de proteger el tráfico individual de cada enlace para que en caso de un fallo físico exista una conexión paralela sobre la que se pueda transferir el tráfico. La conmutación a la conexión de protección se realiza mediante los protocolos GMPLS o también en la misma capa de transporte sin utilizar recursos de otras capas, proporcionando así un mecanismo rápido y robusto para la protección del tráfico. Las propiedades de protección de los enlaces TE Se deben difundir para que la información esté actualizada en una TED (base de datos de ingeniería de tráfico). Esto permite calcular ruta y seleccionar los caminos con capacidad de protección.