

**PROPUESTA PARA UN OPERADOR NACIONAL:
MIGRACIÓN DE UNA RED ATM A UNA RED IP/MPLS**



**MARIA LUCÍA MUÑOZ GRASS
GUSTAVO ADOLFO CARDONA KAFRUNI**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2004**

**PROPUESTA PARA UN OPERADOR NACIONAL:
MIGRACIÓN DE UNA RED ATM A UNA RED IP/MPLS**



**MARIA LUCÍA MUÑOZ GRASS
GUSTAVO ADOLFO CARDONA KAFRUNI**

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director

Msc. JOSÉ GIOVANNY LÓPEZ PERAFÁN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2004**

*A nuestras familias
por el amor, la comprensión y el apoyo
que siempre nos han brindado.
Por su confianza
en nuestra realización como profesionales.*

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan especiales agradecimientos a:

El ingeniero José Joaquín Navarro Tobón, SE Cisco Systems Colombia/Ecuador, por su colaboración en la realización de este proyecto y el préstamo de los laboratorios de Cisco Systems de la ciudad de Bogotá.

El ingeniero Oscar J. Calderón Cortés, docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, por sus invaluable orientaciones y recomendaciones durante la realización de este proyecto.

El ingeniero Martín Gregorio González Serrano, Jefe de Mantenimiento de Red de Colombia Telecomunicaciones – TELECOM, por su constante apoyo e inapreciables aportes de conocimiento.

El ingeniero Gustavo Adolfo Castellanos, Ingeniero de Nortel Networks, por sus inestimables explicaciones tecnológicas que ampliaron enormemente el conocimiento de los autores y permitieron profundizar en el desarrollo de la investigación.

El ingeniero Manuel Fernando Gómez, Ingeniero de Expansión de Red de Emtelco S.A. por sus comentarios y oportunas respuestas, importantes para la elaboración del proyecto.

Los operadores nacionales de servicios de telecomunicaciones: Emtelco S.A., Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá – ETB, Telefónica Data Center – TDC y Colombia Telecomunicaciones – TELECOM, por proporcionar información vital para el estudio realizado.

**PROPUESTA PARA UN OPERADOR NACIONAL:
MIGRACIÓN DE UNA RED ATM A UNA RED IP/MPLS**

MARIA LUCIA MUÑOZ GRASS

malucia@unicauca.edu.co

GUSTAVO ADOLFO CARDONA KAFRUNI

guscardona@unicauca.edu.co

ABSTRACT

Las redes actuales de los operadores nacionales de servicios de valor agregado se basan en la tecnología ATM. Los nuevos servicios IP que comienza a demandar el mercado nacional de las telecomunicaciones exigen mayores características de desempeño, eficiencia y escalabilidad, que las redes de los operadores no están en condiciones de soportar. MPLS es una tecnología que surge para solucionar los problemas de las redes IP y su integración con las redes ATM, a través del paradigma de conmutación de etiquetas de las tecnologías de capa 2 y la característica de enrutamiento de la capa de red. Existen tres modelos básicos para la implementación de la tecnología MPLS sobre las redes ATM: Modelo Superpuesto, Modelo "Ships in the Night" y Modelo de Convergencia Multiservicio. Para seleccionar el mejor modelo de acuerdo con las características, necesidades y limitantes de las redes actuales de los operadores, se diseñaron redes de prueba para ser evaluadas a través de equipos de laboratorio. La comparación entre cada uno de estos modelos de implementación fue regida por criterios de evaluación cuantitativos y cualitativos que permitieron esclarecer el diseño de red más adecuado. La implementación del modelo elegido debe seguir un proceso de migración paulatino que facilite al operador la continua prestación de sus servicios y evite poner en riesgo la inversión realizada. La nueva red multiservicio debe estar acompañada de un portafolio de nuevos servicios IP que permita al operador marcar una diferencia en el mercado nacional de las telecomunicaciones y contribuir al desarrollo social, tecnológico y económico de Colombia.

**PROPOSAL FOR A NATIONAL OPERATOR:
MIGRATION FROM AN ATM NETWORK TO AN IP/MPLS NETWORK**

MARIA LUCIA MUÑOZ GRASS

malucia@unicauca.edu.co

GUSTAVO ADOLFO CARDONA KAFRUNI

guscardona@unicauca.edu.co

ABSTRACT

The current networks of the national operators of added value services are based on the ATM technology. The new IP services that the national market begins to demand need better characteristics of performance, efficiency and scalability, that the operators networks can not support. MPLS is a technology that appears to solve the problems of the IP networks and its integration with ATM, through the paradigm of the label switching of layer 2 technologies and the routing function of the network layer. There are three basic models to implement MPLS over ATM networks: Overlay, "Ships in the Night" and Multiservice Convergence. For the selection of the best model based in the characteristics, necessities and limitations of the current networks of the operators, test networks have been designed to be evaluated by laboratory equipment. To compare each of these models there were defined qualitative and quantitative criterions, that helped to find the appropriate network design. The implementation of the selected model should follow a gradual migration process that facilitates the continuous offer of the current services and avoid to put in risk the investment. The new multiservice network should be accompanied by a portfolio of new IP services that allows the operator to make a difference in the national telecommunications market and contribute to the social, technological and economic development in Colombia.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MERCADO DE LAS TELECOMUNICACIONES EN COLOMBIA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS OPERADORES NACIONALES.....	3
1.1 LOS SERVICIOS DE VALOR AGREGADO EN COLOMBIA.....	3
1.2 TENDENCIAS DEL MERCADO.....	5
1.2.1 Telefonía IP.....	6
1.2.2 Redes Privadas Virtuales.....	6
1.2.3 Redes de área local inalámbrica.....	7
1.2.4 Banda ancha.....	7
1.3 ESTUDIO A PRINCIPALES OPERADORES NACIONALES.....	8
1.3.1 TELEFÓNICA DATA COLOMBIA (TDC).....	8
1.3.2 EMTELCO S.A. - EPM.....	10
1.3.3 EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES DE BOGOTÁ.....	12
1.3.4 COLOMBIA TELECOMUNICACIONES S.A. - TELECOM.....	15
1.4 ANÁLISIS DE LAS REDES NACIONALES.....	18
1.5 MODELO DE RED DE OPERADOR NACIONAL - MRON.....	19
2. ESCENARIOS DE INTEROPERABILIDAD ENTRE REDES ATM Y MPLS	22
2.1 MODELO DE IP SOBRE ATM.....	24
2.1.1 Retardo de paquetes IP en una red ATM.....	24
2.1.2 Sobre encabezado de las celdas ATM.....	25
2.1.3 Inestabilidad de las rutas.....	27
2.1.4 Capacidad de las interfaces ATM.....	28
2.2 FUNDAMENTOS DE MPLS.....	28
2.2.1 Componentes de un sistema MPLS.....	29
2.2.2 Arquitectura de MPLS.....	30
2.2.3 Formato de la pila de etiquetas.....	33
2.2.4 Operaciones sobre las etiquetas.....	35
2.2.5 Asignación y distribución de etiquetas.....	36
2.2.6 Modo de retención de etiquetas.....	38
2.2.7 Protocolos de distribución de etiquetas.....	39
2.3 APLICACIONES DE MPLS.....	41
2.3.1 Clase de Servicio.....	41
2.3.2 Ingeniería de Tráfico.....	41
2.3.3 Redes Privadas Virtuales.....	42
2.4 MODELOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MPLS.....	43
2.4.1 Modelo Superpuesto (<i>Overlay</i>).....	43
2.4.2 Modelo "Barcos en la Noche" (<i>Ships in the Night</i>).....	46
2.4.3 Modelo de Convergencia Multiservicio.....	48
3. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MPLS SOBRE LA RED DEL OPERADOR NACIONAL.....	51
3.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	51
3.1.1 Criterios cuantitativos.....	51

3.1.2	Criterios cualitativos	55
3.2	GENERACIÓN DE TRÁFICO Y HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN	56
3.3	MRON PARA LABORATORIO Y PRUEBAS DE MPLS	59
3.3.1	Modelo IP/ATM.....	60
3.3.2	Modelo Superpuesto	62
3.3.3	Modelo " <i>Ships in the Night</i> "	65
3.3.4	Modelo de Convergencia Multiservicio	67
3.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS MPLS	70
3.4.1	Análisis de criterios cuantitativos.....	70
3.4.2	Análisis de criterios cualitativos.....	76
4.	PROCESO DE MIGRACIÓN Y PROPUESTA DE SERVICIOS PARA EL OPERADOR NACIONAL.....	80
4.1	PROCESO DE MIGRACIÓN DEL MRON.....	80
4.2	PROPUESTA DE NUEVOS SERVICIOS PARA EL MRON-MS.....	85
4.2.1	VPNs de capa 2	86
4.2.2	VPNs IP de MPLS.....	88
5.	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES.....	99
	ACRÓNIMOS.....	100
	BIBLIOGRAFÍA.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Banda ancha en Colombia (Junio-Diciembre 2003)	5
Figura 1.2. Cobertura de la red de TDC	10
Figura 1.3. Cobertura de la red Multinet de EMTELCO S.A.	11
Figura 1.4. Red de transmisión y cobertura de ETB	14
Figura 1.5. Cobertura de Colombia Telecomunicaciones.....	16
Figura 1.6. Estructura de protocolos de una red de operador nacional	18
Figura 1.7. Modelo de Red de Operador Nacional	21
Figura 2.1. Modelo IP sobre ATM clásico	25
Figura 2.2. Modelo MPLS sobre ATM.....	25
Figura 2.3. Encapsulado de paquetes IP sobre celdas ATM	26
Figura 2.4. Componentes de un sistema MPLS.....	29
Figura 2.5. Ejemplo de una red MPLS	30
Figura 2.6. Arquitectura de un nodo MPLS	31
Figura 2.7. Arquitectura de un LER	33
Figura 2.8. Formato de la etiqueta de MPLS	34
Figura 2.9. Posición de la cabecera MPLS.....	35
Figura 2.10. Concepto de <i>upstream</i> y <i>downstream</i>	37
Figura 2.11. Método de distribución de etiquetas <i>downstream on demand</i>	38
Figura 2.12. Método de distribución de etiquetas <i>unsolicited downstream</i>	38
Figura 2.13. VPNs de MPLS	43
Figura 2.14. Modelo Superpuesto.....	44
Figura 2.15. Núcleo de red ATM rodeado por enrutadores IP/MPLS.....	44
Figura 2.16. LERs interconectados mediante PVCs a través de un núcleo ATM	45
Figura 2.17. Modelo IP+ATM superpuesto	46
Figura 2.18. Modelo IP+ATM integrado	47
Figura 2.19. Modelo " <i>Ships in the Night</i> ".....	48
Figura 2.20. Modelo de Convergencia Multiservicio.....	48
Figura 2.21. Modelo de referencia de PWE3.....	50
Figura 3.1. Tiempo de procesamiento de un paquete en un nodo.....	53
Figura 3.2. Función de densidad $f(x)$ y distribución $F(x)$ de Pareto	58
Figura 3.3. MRON versión laboratorio	59
Figura 3.4. Modelo IP/ATM versión laboratorio.....	61
Figura 3.5. Modelo Superpuesto (físico) versión laboratorio.....	63
Figura 3.6. Modelo Superpuesto (lógico) versión laboratorio.....	63
Figura 3.7. Modelo " <i>Ships in the Night</i> " versión laboratorio	66
Figura 3.8. Modelo de Convergencia Multiservicio (físico) versión laboratorio.....	68
Figura 3.9. Modelo de Convergencia Multiservicio (lógico) versión laboratorio.....	69
Figura 3.10. Retardo promedio para flujo Constante a) UDP y b) TCP.....	71
Figura 3.11. <i>Jitter</i> promedio para flujo Constante a) UDP y b) TCP.....	72
Figura 3.12. Retardo promedio para flujo de Pareto a) UDP y b) TCP.....	73
Figura 3.13. <i>Jitter</i> promedio para flujo de Pareto a) UDP y b) TCP.....	74
Figura 3.14. Paquetes perdidos para flujo de Pareto UDP.....	74
Figura 4.1. Modelo de Red de Operador Nacional (MRON)	80

Figura 4.2. Nuevo núcleo de red IP/MPLS paralelo a la red ATM actual	81
Figura 4.3. Migración de los clientes IP hacia el nuevo núcleo de red.....	82
Figura 4.4. Nuevas redes de acceso de banda ancha	83
Figura 4.5. Migración de los servicios heredados de capa 2	83
Figura 4.6. Modelo de red definitivo	84
Figura 4.7. Modelo de Red de Operador Nacional Multiservicio (MRON-MS)	85
Figura 4.8. VPNs/ <i>interworking</i> capa 2 sobre MRON versión laboratorio	87
Figura 4.9. VPNs IP MPLS sobre MRON versión laboratorio	88
Figura 4.10. Tabla de enrutamiento global del enrutador collab-7507a	89
Figura 4.11. Tabla de enrutamiento virtual para la VPN <i>fiet</i> en collab-7507a	90
Figura 4.12. Servicios administrados a través del <i>Data Center</i>	91
Figura 4.13. Servicios administrados de voz.....	92
Figura 4.14. Servicios administrados de seguridad	93
Figura 4.15. Servicios administrados de contenido (<i>colocation</i>)	94
Figura 4.16. Servicios administrados de contenido (<i>hosting</i>)	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición de los ingresos estimados del sector	4
Tabla 3.1. Parámetros mínimos para servicios de telecomunicaciones (ITU-T)	55
Tabla 3.2. Base de información de etiquetas de collab-7200j – MPLS modo trama	64
Tabla 3.3. Base de información de etiquetas de collab-7200j – MPLS modo celda	67
Tabla 3.4. Resultados de los criterios cuantitativos	71
Tabla 3.5. Resultados del análisis de criterios cuantitativos	75
Tabla 3.6. Resumen del análisis de los criterios cualitativos	78

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Herramientas de evaluación y generación de tráfico de red

Anexo B. Configuración detallada del Modelo de Convergencia Multiservicio

INTRODUCCIÓN

La Era de la información ha contribuido enormemente al desarrollo de las tecnologías de telecomunicaciones, proporcionando nuevas soluciones para mejores y más variados servicios acorde con las exigencias del mercado. Actualmente, los estudios de mercado han concluido que dichas exigencias se han enfocado hacia las innumerables ventajas que ofrecen los servicios IP de banda ancha, los cuales requieren una infraestructura de red adecuada para su correcto funcionamiento.

Organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: *International Telecommunications Union*), el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y la IETF (*Internet Engineering Task Force*), desarrollan estudios de investigación acerca de nuevas tecnologías y protocolos de red que permitan la prestación de nuevos servicios y brinden mayor confiabilidad, eficiencia, rendimiento y rentabilidad para los operadores. Estos estudios se basan en las características de red de grandes operadores internacionales, las cuales se componen de un gran número de equipos, enlaces de muy alta capacidad y un considerable número de clientes. Desafortunadamente, estos estudios no se adaptan a las características actuales de los operadores nacionales, las cuales guardan muy poca relación con las redes de los grandes operadores internacionales.

Los operadores colombianos de servicios de valor agregado poseen una infraestructura de red con características limitadas para la prestación de los nuevos servicios IP de banda ancha que comienza a demandar el mercado nacional. Por lo tanto, es necesario estudiar nuevas tecnologías de red y su conveniencia sobre las redes de los operadores nacionales buscando crecer competitivamente a nivel nacional e internacional.

Este proyecto realiza un estudio de la tecnología de Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo (MPLS: *Multiprotocol Label Switching*) y sus diferentes formas de implementación sobre redes de Modo de Transferencia Asíncrona (ATM: *Asynchronous Transfer Mode*). Adicionalmente, estudia las características, necesidades y limitaciones

de los operadores nacionales para finalmente proponer un proceso de migración de la red actual hacia una red multiservicio basada en MPLS.

La existencia de redes multiservicio en Colombia abre la posibilidad de generar nuevas empresas proveedoras y/o desarrolladoras de servicios que permitan aportar al crecimiento económico del país y que contribuyan a mejorar el estilo de vida de la sociedad.

El enfoque principal de este proyecto es ofrecer al operador nacional un estudio de la tecnología MPLS y su implementación sobre un modelo de red ATM con características funcionales similares a las de los operadores de servicios de valor agregado en Colombia. El estudio contiene también una propuesta de nuevos servicios que le permite al operador aprovechar al máximo las funcionalidades de la nueva red y obtener beneficios económicos y comerciales.

1. MERCADO DE LAS TELECOMUNICACIONES EN COLOMBIA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS OPERADORES NACIONALES

En los últimos años el mercado mundial de las telecomunicaciones ha tenido un gran crecimiento, apareciendo nuevos y mejores servicios acorde a las necesidades de los clientes. Estos servicios han sido clasificados en grupos de acuerdo a sus características, funcionalidades, necesidades, impacto y prioridad, entre otras. Entre este tipo de servicios se encuentran la telefonía fija, que abarca local y larga distancia, la telefonía móvil en donde se encuentra el servicio móvil celular y los Servicios de Comunicación Personal (PCS: *Personal Communications Services*), y los servicios de valor agregado, objeto de este estudio.

La alta demanda de servicios de datos con valor agregado ha cambiado el balance en la canasta de servicios del sector de telecomunicaciones, dejando de lado la preponderancia del servicio de voz como principal producto. Sin embargo, el servicio de voz todavía representa una considerable parte de los ingresos del sector de las telecomunicaciones, ingresos que han servido para que las empresas del sector realicen importantes inversiones en infraestructura para la prestación de nuevos servicios de valor agregado, acorde con la tendencia del mercado.

1.1 LOS SERVICIOS DE VALOR AGREGADO EN COLOMBIA

El mercado de las telecomunicaciones en Colombia cambia al ritmo que impone el mercado internacional. Los usuarios han migrado a ser clientes con necesidades de calidad, tecnología y nuevas aplicaciones, comparables a las de un usuario en Europa o Norteamérica. Los operadores de telecomunicaciones nacionales ofrecen servicios con múltiples opciones de pago y enmarcados en un ambiente comercial caracterizado por la competencia y la creciente sustitución de los servicios tradicionales de telefonía fija por los móviles y de datos.

En Colombia, los servicios de valor agregado están definidos en el decreto 1794 de 1991, el cual los describe como: "... *aquellos servicios que proporcionan la capacidad*

completa para el envío e intercambio de información, agregando otras facilidades al servicio soporte o satisfaciendo necesidades específicas de telecomunicaciones. Estos servicios hacen uso de los servicios básicos, telemáticos, de difusión o cualquier otra combinación de éstos, bien sea a través de una red operada por otro o una red propia de telecomunicaciones...".

Los servicios de valor agregado en el país se ofrecen en un ambiente altamente competitivo del cual hacen parte operadores que brindan prioritariamente servicios de telefonía local y larga distancia, telefonía móvil celular y *trunking* digital, quienes son muy activos en el mercado de la transmisión de datos.

En comparación con otros servicios ofrecidos actualmente por los operadores nacionales, los servicios de valor agregado no representan el mayor porcentaje de ingresos, pero sí un mercado con alto crecimiento a futuro. Como se puede observar en la Tabla 1.1, la telefonía local que incluye rural y extendida, es el servicio que mayores ingresos aporta al sector de las telecomunicaciones, seguido de la telefonía móvil con un alto incremento en el año 2003 gracias a la entrada de PCS a través del operador Colombia Móvil. Los servicios de valor agregado mantienen un porcentaje de crecimiento aproximadamente constante, lo que representa un mercado de inversión segura para los operadores.

Ingresos	2000	2001	2002	2003
Telefonía local	\$2.830	\$3.553	\$3.802	\$3.791
Telefonía móvil	\$826	\$1.072	\$1.585	\$2.319
Telefonía de larga distancia	\$1.408	\$1.584	\$1.519	\$1.499
Valor agregado	\$263	\$371	\$415	\$670
Otros	\$1.418	\$1.916	\$2.088	\$2.356
Total	\$6.766	\$8.496	\$9.409	\$10.637

Tabla 1.1. Composición de los ingresos estimados del sector¹

¹ Datos en \$Col miles de millones corrientes. Tomado del documento "Informe Sectorial de Telecomunicaciones". Comisión de Regulación de Telecomunicaciones. Bogotá D.C. Julio 2004.

1.2 TENDENCIAS DEL MERCADO

En los últimos años la crisis económica y socio-política que sufre la mayoría de los países latinoamericanos, entre ellos Colombia, ha tenido como consecuencia un lento desarrollo en el área de las telecomunicaciones y muy pocos avances en la prestación de nuevos servicios de valor agregado, a diferencia de grandes potencias del mundo como Estados Unidos y la Unión Europea.

Adicionalmente, el mercado colombiano de las telecomunicaciones se ha comportado tímidamente frente a los nuevos desarrollos ofrecidos por los operadores de servicios de valor agregado. Sin embargo, en los últimos años se ha empezado a observar una aceptación de servicios de banda ancha en el mercado corporativo (ver Figura 1.1) y un deseo de renovación tecnológica, exigido por sus propios clientes y por buscar una diferenciación en el servicio a través de la tecnología.

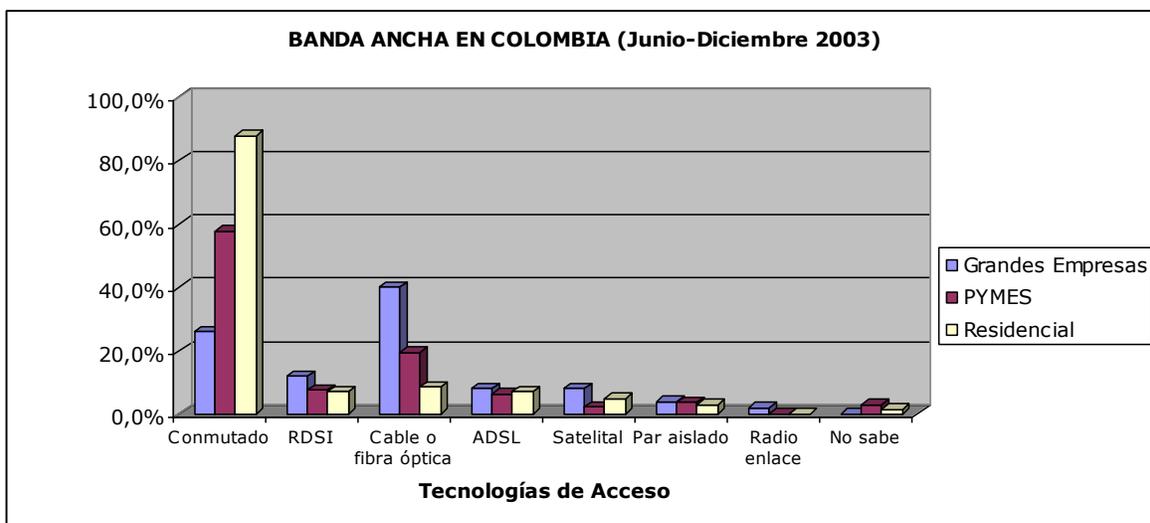


Figura 1.1. Banda ancha en Colombia (Junio-Diciembre 2003)²

El mercado colombiano de servicios de valor agregado está concentrado básicamente en tres sectores: *financiero, salud y telecomunicaciones*, por lo que deben diseñarse estrategias de mercado para ofrecer nuevos servicios de valor agregado a estos sectores.

² Tomado del documento "Análisis del mercado servicios de banda ancha en Colombia". *Pyramid Research* y el Centro de Investigación de las Telecomunicaciones (CINTEL). Febrero 2004.

A través de estudios al mercado nacional e internacional de las telecomunicaciones, y de acuerdo con la situación actual de los operadores colombianos de servicios de valor agregado, la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT) ha proyectado una caída significativa de la participación de los ingresos generados por servicios básicos de conectividad, tomando mayor relevancia otros servicios de valor agregado como centros de datos de Internet (IDC: *Internet Data Center*), telefonía IP, redes privadas virtuales (VPN: *Virtual Private Network*), redes de área local inalámbricas (WLAN: *Wireless Local Area Network*) y banda ancha.

Para identificar mejor las oportunidades de negocio que pueden llegar a generar cada uno de estos servicios dentro del mercado de las telecomunicaciones colombianas, se describen los posibles escenarios en los cuales se proyectan.

1.2.1 Telefonía IP

La telefonía IP constituye una solución de comunicaciones donde el soporte a través del cual se transmite la información es un enlace IP. Este enlace se puede establecer utilizando una red pública como Internet o una red privada. La telefonía IP permite la prestación de servicios masivos como llamadas PC a PC, PC a teléfono, tarjeta prepago para telefonía local y/o de larga distancia, voz sobre ADSL (VoADSL: *Voice over ADSL*) y voz sobre cable módem (VoCable: *Voice over Cable Modem*), corporativos (*trunking* IP, VPNs IP e IP *Centrex*) y otras aplicaciones adicionales como mensajería unificada, videoconferencia, *Web Chat*, multimedia, etc.

El mayor impacto de la telefonía IP en Colombia se dará en soluciones corporativas, sobre todo en sectores multinacionales o empresas con múltiples sitios para quienes la solución de telefonía IP reportará grandes beneficios.

Para que sea posible una migración hacia telefonía IP, se considera necesario que los operadores que cuentan con un núcleo ATM actualicen sus redes a IP, con el fin de ofrecer soluciones de convergencia más rentables.

1.2.2 Redes Privadas Virtuales

Actualmente se prestan servicios de VPN a través de infraestructuras convencionales como ATM o *Frame Relay*. Con el auge del protocolo IP aparece el concepto de VPN IP,

que es una configuración construida sobre una red de transmisión de paquetes para comunicar entre sí dos o más nodos en un entorno de red de área extensa (WAN: *Wide Area Network*) con excelentes condiciones de seguridad y privacidad. Existen básicamente dos tipos de VPNs IP de acuerdo al nivel de privacidad y seguridad que ofrecen, así: VPNs de MPLS sobre la red de un proveedor y VPNs de IPsec³ sobre la red pública.

En Colombia, las soluciones de VPNs IP reemplazarán gradualmente a las VPNs convencionales, aunque éstas coexistirán por un tiempo prolongado por la gran infraestructura heredada que poseen los operadores actuales.

Las soluciones de VPNs IP se constituirán en el principal motor del concepto de convergencia de redes de voz, video y datos. La actualización de la plataforma de los proveedores será un factor determinante en la disponibilidad de estas soluciones, pero los altos costos de despliegue de plataformas de nueva generación como MPLS, harán que el proceso sea más lento en Colombia que en otros mercados.

1.2.3 Redes de área local inalámbrica

Se espera que las soluciones WLAN aparezcan en Colombia como un valor agregado en los servicios corporativos para asegurar la movilidad de ciertos usuarios. Sin embargo, contrario a lo que sucede en mercados de alto desarrollo tecnológico, las soluciones inalámbricas estarán muy lejos de alcanzar un elevado nivel de masificación en Colombia. En cambio, estas tecnologías se mantendrán en ciertos segmentos corporativos, apareciendo como viables en industrias que requieran movilidad como el transporte, la logística y la manufactura, además del negocio del turismo y las convenciones de negocios.

1.2.4 Banda ancha

La tecnología de línea de abonado digital asíncrona (ADSL: *Asynchronous Digital Subscriber Line*) se está consolidando como la tecnología de mayor impacto en el

3 Protocolo de seguridad de IP (IPsec: *IP security*). Conjunto de protocolos desarrollados por la IETF para soportar un intercambio seguro de paquetes en el nivel IP. RFC 2401 “*Security Architecture for the Internet Protocol*”. IETF.

mercado de banda ancha en Colombia, compitiendo e incluso amenazando el posicionamiento del cable módem.

El acceso de banda ancha representa uno de los principales focos de concentración para los principales operadores en Colombia, presentando un impacto considerable en el mercado a corto plazo. De hecho, el acceso de banda ancha aparece como el primer eslabón de la cadena tecnológica evolutiva, para dar lugar luego a soluciones de VPN y finalmente a soluciones de convergencia con aplicaciones integradas de voz, video y datos para el mercado corporativo y masivo.

1.3 ESTUDIO A PRINCIPALES OPERADORES NACIONALES

Con el objetivo de identificar las capacidades y limitaciones que tienen actualmente los operadores nacionales para la prestación de los nuevos servicios de valor agregado, es necesario investigar y estudiar las principales características de las redes de telecomunicaciones nacionales.

De acuerdo con el documento "El Sector de las Telecomunicaciones en Colombia 1998-2001" de la CRT, en el mercado de servicios de valor agregado las empresas más representativas entre los operadores especializados son TELMEX antes AT&T LA, Telefónica Data Colombia y EMTELCO S.A. A través de un estudio a las redes de algunos de estos operadores es posible determinar, de manera general, las tecnologías que utilizan y los servicios que ofrecen.

1.3.1 TELEFÓNICA DATA COLOMBIA (TDC)

Telefónica Data Colombia, filial del Grupo Telefónica, es una empresa líder en la prestación de servicios globales de telecomunicaciones para empresas. Ofrece los servicios de transferencia de datos e Internet, servicios internacionales usando las plataformas *Frame Relay* y ATM, servicios de hospedaje (*hosting*), y servicios de consultoría y *outsourcing* de telecomunicaciones.

Infraestructura de red

Telefónica Data Colombia cuenta con una gran integración y vanguardia tecnológica: *Frame Relay*, ATM e IP. El núcleo de la red se constituye por equipos *Nortel Networks* distribuidos en las principales ciudades del país. Maneja protocolos *Frame Relay*, ATM y

permite la conectividad de servicios IP. La red de borde funciona como plataforma de agregación, entregando el tráfico sobre el núcleo multiservicio y está compuesto por equipos *Nortel* y *Newbridge* que manejan protocolos *Frame Relay* y *Clear Channel*.

Telefónica Data Colombia tiene proyectado para el primer semestre del 2005 evolucionar su red a IP/MPLS, buscando la integración del núcleo y el borde para ofrecer principalmente servicios de VPNs IP.

Cobertura de la red

La red actual de Telefónica Data Colombia presenta cobertura en 20 departamentos del territorio nacional abarcando las principales ciudades, así: Antioquia (Medellín), Atlántico (Barranquilla), Bolívar (Cartagena), Boyacá (Duitama, Tunja, Paipa y Tibasosa), Caldas (Manizales), Cauca (Popayán), Cesar (Valledupar), Córdoba (Montería), Cundinamarca (Bogotá, Zipaquirá), Huila (Neiva), Magdalena (Santa Marta), Meta (Villavicencio), Nariño (Pasto), Norte Santander (Cúcuta, Barrancabermeja), Quindío (Armenia), Risaralda (Pereira), Santander (Bucaramanga), Sucre (Sincelejo), Tolima (Ibagué) y Valle del Cauca (Buga, Buenaventura, Cali, Cartago, Palmira, Tulúa). Lo anterior se observa en la Figura 1.2, donde se muestran las troncales, representadas en color azul, que comunican los nodos de las ciudades principales y los enlaces secundarios representados en color rojo.

Tecnologías de acceso

Telefónica Data Colombia ofrece diversas tecnologías de acceso brindando versatilidad y flexibilidad, como conexiones en fibra óptica, líneas de abonado digital (xDSL: *Digital Subscriber Line*), sistemas de distribución local multipunto (LMDS: *Local Multipoint Distribution System*), radio, acceso múltiple por división de código (CDMA: *Code Division Multiple Access*) e IP inalámbrico.

Servicios ofrecidos

A través de su red, Telefónica ofrece una gran variedad de servicios dentro de los que se destacan servicios de conectividad como *InterLan*, *clear channel* y tecnologías de último kilómetro, servicios internacionales como *Frame Relay*, servicios de Internet y servicios satelitales.



Figura 1.2. Cobertura de la red de TDC

1.3.2 EMTELCO S.A. - EPM

EMTELCO S.A. es una empresa de telecomunicaciones perteneciente al Grupo Empresarial Empresas Públicas de Medellín (EPM), que provee soluciones integrales en redes de transmisión de datos, voz, video y valor agregado. Cuenta con una red denominada Multinet, una red pública de datos soportada en un tejido de banda ancha, que permite integrar todo el flujo de información generado por sistemas de datos, voz y video simultáneamente, con valor agregado, seguridad y privacidad, permitiendo tener enlaces inter-empresariales con entidades de diversos sectores de la economía a través de la misma red.

Infraestructura de red

La red Multinet se basa en *switches* multiservicio de tecnología ATM del fabricante *Nortel Networks*, presentando capacidad de conmutación automática y manual, basándose en el criterio de redundancia de hardware y procesamiento de información.

Cobertura de la red

Como se observa en la Figura 1.3, EMTELCO S.A. tiene cubrimiento en las principales ciudades del país: Bogotá, Medellín, Cali, Manizales, Pereira, Armenia, Ibagué, Bucaramanga, Barranquilla, Cartagena, Villavicencio, resaltadas en violeta por ser nodos principales; en Pasto, Tunja, Santa Marta, Cúcuta, Neiva, resaltadas en rosado por ser nodos secundarios; y en Palmira, Montería, Girardot, Valledupar, Popayán y Sincelejo, resaltadas en verde. En las ciudades donde no se tiene presencia directa, se cuenta con soluciones terrestres y satelitales mediante terceros operadores.

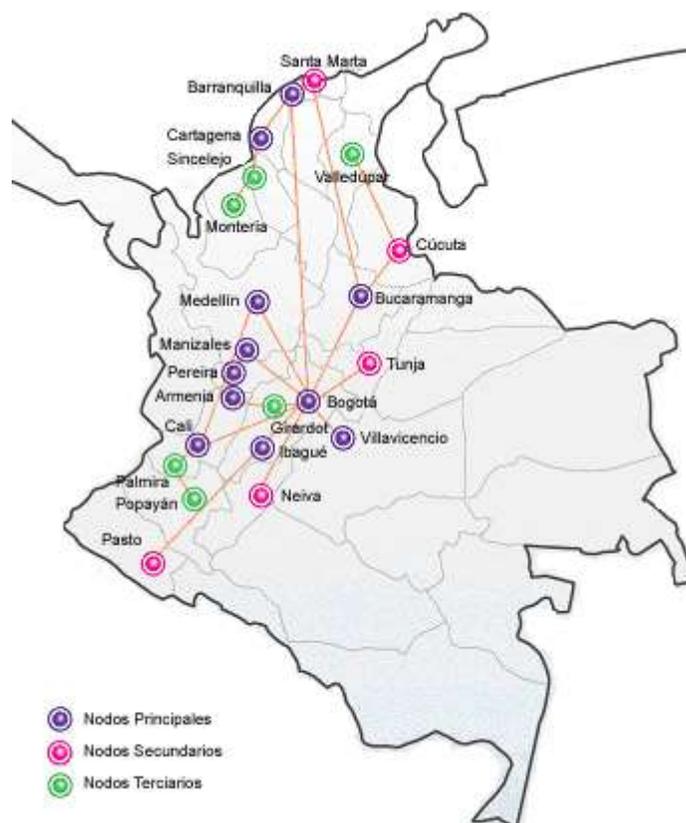


Figura 1.3. Cobertura de la red Multinet de EMTELCO S.A.

Tecnologías de acceso

Entre las tecnologías de acceso de la red Multinet se encuentran:

- *Frame Relay*
- Protocolos heredados como X.25
- Servicios transparentes de datos de bit (BTDS: *Bit Transparent Data Service*) y servicios transparentes de datos de HDLC (HTDS: *HDLC Transparent Data Service*)
- ADSL
- DSL simétrico de alta velocidad de datos (G.SHDSL)
- Acceso conmutado

Servicios ofrecidos

Sobre las tecnologías de acceso y soportados en la infraestructura de transporte (celdas y paquetes) ofrecida por la red, se prestan los siguientes servicios:

- Enlaces dedicados de datos y accesos dedicados a Internet.
- Voz sobre *Frame Relay*, voz sobre IP y video.
- Servicios IP como contrafuegos (*Firewall*), gestión de ancho de banda (*Traffic Shaping*), traducción de direcciones de red (NAT: *Network Address Translation*) y VPNs IP sobre IPsec, controlados desde el núcleo de la red en el punto de conexión hacia Internet.

Por su parte, EPM como operador de telefonía local y extendida, ofrece a través de la red Multinet/EPM un portafolio de servicios que incluye transmisión de voz, datos e imágenes, telefonía inalámbrica rural, Internet, buscapersonas, larga distancia nacional e internacional, red inteligente, televisión por suscripción y telefonía pública con tarjeta inteligente.

Además de los operadores especializados de valor agregado como TELMEX, Telefónica Data Colombia y EMTELCO S.A., este servicio también es prestado por operadores de telefonía conmutada local y larga distancia. Entre los más destacados del mercado se encuentran ETB y COLOMBIA TELECOMUNICACIONES.

1.3.3 EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES DE BOGOTÁ

La Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá (ETB) es una empresa suscrita al sector público que ofrece servicios de comunicaciones en las principales ciudades del país. Con el tiempo se ha consolidado como una empresa colombiana líder en el sector de la telefonía local y larga distancia e Internet.

Infraestructura de red

ETB ha desarrollado una red multiservicio de gran capacidad. El núcleo de la red está conformado por *switches* ATM, los cuales ofrecen alta disponibilidad y desempeño por su redundancia en tarjetas procesadoras, fuentes, puertos y tarjetas de troncales. Éstos están interconectados por enlaces sobre fibra óptica propios, con posibilidad de crecimiento de acuerdo a las necesidades; todo esto con el fin de garantizar los niveles de servicio requeridos.

En la red de borde se tienen *switches* ATM – *Frame Relay* – IP comunicados entre sí a través de enlaces de la red de transmisión para complementar la cobertura en toda Colombia. La red de microondas está formada por plataformas en arquitectura de jerarquía digital síncrona (SDH: *Synchronous Digital Hierarchy*) y jerarquía digital plesiócrona (PDH: *Plesiochronous Digital Hierarchy*) que conforman una red de respaldo para todo el país.

Finalmente, ETB cuenta con capacidad propia en los cables submarinos Maya y Panamericano y capacidad arrendada en Arcos, para conexión a Internet a través del proveedor *Sprint* en Estados Unidos.

Cobertura de la red

ETB cuenta con una red de transmisión conformada por un núcleo de red propio en fibra óptica, microondas y cables submarinos, como se muestra en la Figura 1.4.

La red de ETB tiene cobertura en las ciudades de San Andrés, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena, Tolú, Sincelejo, Montería, Barrancabermeja, San Gil, Bucaramanga, Cúcuta, Medellín, Quibdó, Manizales, Pereira, Armenia, Tulúa, Buenaventura, Buga, Palmira, Cali, Neiva, Popayán, Pasto, Mocoa, Leticia, Duitama, Sogamoso, Zipa, Tunja Yopal, Bogotá, Girardot, Villavicencio, Fusa, Ibagué y Neiva.

La interconexión entre los nodos se realiza a través de un anillo de fibra óptica con capacidad de 2,5 Gbps (STM-16: *Synchronous Transport Module 16*) que une las ciudades de Medellín, Cali, Popayán, Neiva, Ibagué y Bogotá, de los cuales tiene asignado específicamente un STM-1 para el tráfico de datos. Adicionalmente al servicio de datos, se le asigna una capacidad de 1xSTM-1 en el tramo que une las principales ciudades del Eje Cafetero: Armenia, Pereira y Manizales.

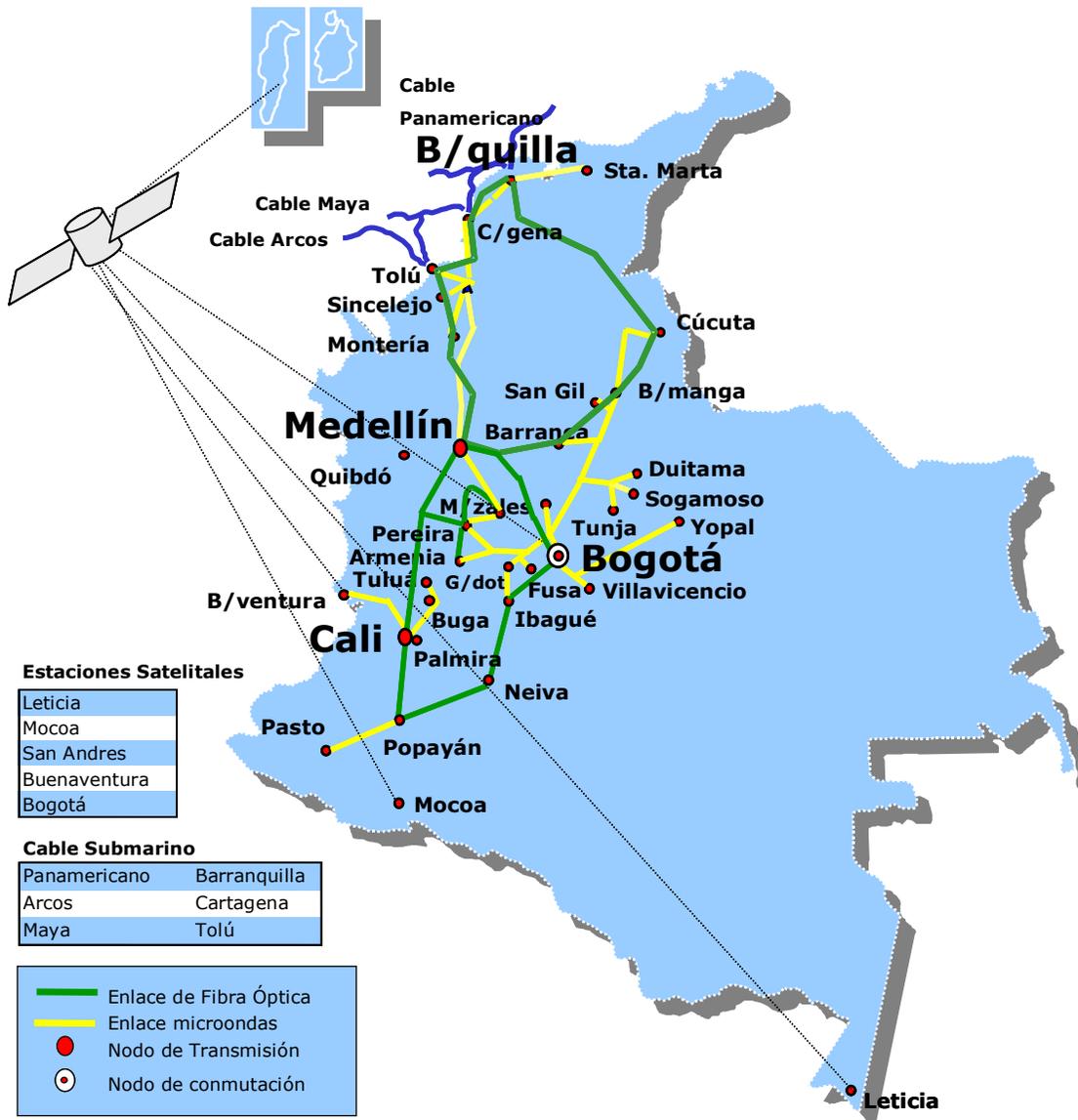


Figura 1.4. Red de transmisión y cobertura de ETB

Por otro lado, la red de microondas propia permite a ETB poseer una de las redes de mayor cobertura, confiabilidad y desempeño, garantizando una redundancia total en el núcleo y en la red de acceso. Ésta se extiende a las regiones Nor-Occidente, Oriente, zona Villavicencio, Región Cafetera y Sur-Occidente de Colombia.

Tecnologías de acceso

Con el fin de ofrecer una gran variedad de servicios, ETB posee varios tipos de acceso dentro de los que se destacan:

- Línea telefónica
- Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) básico y primario
- PBX
- Enlace E1 (2048 Kbps)
- *Frame Relay*
- Servicio portador
- Servicio de Acceso Remoto

Servicios ofrecidos

ETB ha segmentado el mercado básicamente en cuatro sectores para la prestación de los servicios: hogar, micro empresas, pequeñas y medianas empresas (PYMES) y grandes empresas. Los principales servicios ofrecidos son: telefonía local, larga distancia, transmisión de datos, Internet conmutado, Internet banda ancha, Internet dedicado, proveedor virtual de servicio de Internet (VISP: *Virtual Internet Service Provider*), *co-location*, *hosting*, videoconferencia, red privada virtual y centros de contacto.

1.3.4 COLOMBIA TELECOMUNICACIONES S.A. – TELECOM

Colombia Telecomunicaciones es una empresa de servicios públicos domiciliarios, organizada como una sociedad por acciones 100% estatal, adscrita al Ministerio de Comunicaciones. Es la empresa con mayor cobertura a nivel nacional y la red terrestre más grande de Colombia, con el mayor porcentaje en la prestación del servicio de telefonía fija, local y larga distancia.

Infraestructura de red

Colombia Telecomunicaciones tiene una red basada en *Frame Relay* con un núcleo ATM, el cual cuenta con tres plataformas de equipos: *Newbridge*, *Passport* de *Nortel* e *IDNX*. En este momento se encuentra unificando la red de transporte ATM con equipos *Newbridge* y en la red de acceso se están implementando tecnologías xDSL. Posee una red de fibra óptica con más de cuatro mil kilómetros de longitud en el país, una red de microondas con más de 900 estaciones repetidoras, conexión a los sistemas de cable submarino y una red satelital para llegar a los lugares más remotos de Colombia.

Actualmente se implementa la red de proveedor de servicio de Internet (ISP: *Internet Service Provider*) sobre MPLS.

Cobertura de la red

La red de Colombia Telecomunicaciones cubre el 80% del territorio nacional, presentando mayor cobertura en el centro del país, región Pacífica, región Andina, Meta, Casanare, Caquetá y San Andrés Islas. Opera el servicio de comunicaciones en 21 capitales de departamento, 940 municipios del país y más de 5000 localidades. La Figura 1.5 muestra la cobertura general de la red de Colombia Telecomunicaciones.



Figura 1.5. Cobertura de Colombia Telecomunicaciones

Colombia Telecomunicaciones tiene una red troncal basada en fibra óptica con una red de respaldo en radios microondas, cobertura local en 13 ciudades capitales con red de cobre propia y una red satelital con estaciones terminales de pequeña abertura (VSAT: *Very Small Aperture Terminals*).

Tecnologías de acceso

En la mayor parte del territorio nacional, Colombia Telecomunicaciones cuenta con una red de acceso sobre cobre con tecnología G.SHDSL. Para algunas regiones de difícil acceso geográfico, el acceso se hace a través de enlaces microondas *spread spectrum* en la banda libre de 5,8 GHz o bandas licenciadas. En algunos casos críticos se utiliza una red satelital VSAT *Direct Away*.

Los servicios de transmisión de datos son ofrecidos sobre los siguientes tipos de enlaces:

- Enlaces digitales dedicados con canales transparentes
- Enlaces digitales dedicados *Frame Relay*
- Enlaces digitales dedicados ATM
- Enlaces RDSI
- Enlaces VSAT para aplicaciones nacionales e internacionales
- Enlaces dedicados analógicos
- Canales semi-permanentes
- Conexiones satelitales y sistemas de microondas digitales y analógicos.
- Enlaces internacionales a través de cables submarinos, conexiones satelitales y sistemas de microondas digitales y analógicos

Servicios ofrecidos

La empresa Colombia Telecomunicaciones está organizada en tres unidades de negocio: telefonía local, larga distancia, y grandes clientes y valor agregado. Ofrece una gran variedad de servicios tanto para usuarios residenciales como para el sector empresarial, entre los que se encuentran: telefonía local y larga distancia, Internet (dedicado y conmutado), transmisión de datos y servicios prepago.

Colombia Telecomunicaciones ofrece algunos servicios adicionales como:

- Soporte de otros protocolos.
- Enlaces locales y de último kilómetro en cualquier ciudad de Colombia.
- Arrendamiento de capacidad satelital, utilizando estaciones terrenas de propiedad del cliente.
- Suministro de equipos de comunicaciones.
- Soporte técnico especializado.

1.4 ANÁLISIS DE LAS REDES NACIONALES

Al estudiar la información de las redes de los operadores nacionales más relevantes, es posible entender por qué la prestación de los nuevos servicios basados en IP está tan poco desarrollada. La gran mayoría de operadores de servicios de valor agregado en Colombia poseen actualmente una infraestructura de red basada en ATM con diferentes tipos de acceso como *Frame Relay*, ATM, xDSL, entre otros. Una mejor descripción se muestra en la Figura 1.6, donde se observa la distribución de protocolos y tecnologías en los diferentes puntos de la red.

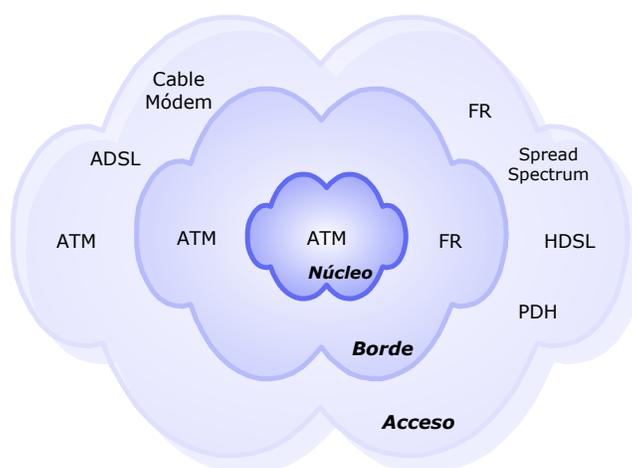


Figura 1.6. Estructura de protocolos de una red de operador nacional

En la parte más externa de la figura se ubica la *red de acceso*, en la cual se distinguen los protocolos o tecnologías bajo las cuales el operador llega hasta las premisas del cliente. La parte media identifica la *red de borde o distribución*, cuya función de agregación se encarga de recibir los diferentes accesos de la red, concentrarlos y entregarlos al núcleo de la red, que se encarga finalmente de transportar la información por la red a altas velocidades.

El principal servicio ofrecido y que representa el mayor porcentaje de ingresos es la conectividad basada en protocolos de capa 2 (*ATM*, *Frame Relay*), en donde se interconectan varias sedes de una compañía ubicadas en diferentes lugares de la ciudad o del país. Desafortunadamente, en estos tipos de redes se dificulta brindar servicios en los que se requiera analizar los datos de niveles superiores, como es el caso de IP.

Actualmente, el mercado está siendo saturado por diferentes operadores que ofrecen el servicio de conectividad. La diferencia principal entre operadores la deben empezar a marcar los servicios de valor agregado que se ofrezcan sobre esta conectividad. Para poder llegar a ofrecer los servicios que indican las tendencias del mercado, los operadores deben migrar sus redes ATM a redes IP multiservicio que brinden rapidez, confiabilidad, calidad de servicio, ingeniería de tráfico y alta seguridad de la información. Para este fin se debe pensar en un modelo IP/ATM o una tecnología como MPLS que permita suplir estas necesidades.

Cabe resaltar que el proceso de migración de una red hacia una nueva tecnología debe ser paulatino, con el fin de no poner en riesgo las inversiones que realice el operador y proporcionar a los clientes de servicios heredados la continua prestación del servicio, manteniendo el perfecto funcionamiento de la red existente. En el caso de los operadores nacionales quienes tienen limitaciones económicas para el crecimiento de sus redes, se debe aprovechar al máximo la infraestructura existente, reutilizando la mayor cantidad de equipos posible. En definitiva, la manera como se implemente alguna nueva tecnología o se evolucione a un nuevo modelo de red debe respetar principalmente los servicios ofrecidos a los clientes actuales, la infraestructura disponible y el presupuesto moderado con el que cuentan la gran mayoría de operadores colombianos.

1.5 MODELO DE RED DE OPERADOR NACIONAL - MRON

A través del estudio a las redes de los operadores, se observa un gran número de características comunes que pueden agruparse para formar un modelo de red generalizado del operador nacional de servicios de valor agregado. Dicho modelo tiene como principal intención brindar una visión general de la red de un operador colombiano, sobre la cual sea posible desarrollar pruebas con diferentes tecnologías y cuyos resultados permitan establecer la mejor de ellas. En este caso en particular, a través del modelo de red general de un operador nacional, se desea establecer la mejor tecnología de migración para que la red actual de los operadores soporte con mayor facilidad la prestación de nuevos servicios IP de valor agregado. En adelante este modelo se denominará *Modelo de Red de Operador Nacional (MRON)*.

Para la creación del MRON, es necesario identificar ciertos aspectos claves a partir del análisis de las redes de los operadores, como se muestra a continuación.

- **Identificación de los principales puntos de presencia**

Con base en la información proporcionada por los operadores y según la distribución geográfica del sector corporativo y gubernamental al que sirven principalmente las empresas especializadas en la prestación de los servicios de valor agregado, éstas se ubican básicamente en las ciudades con mayor concentración empresarial, industrial y comercial. Las ciudades más importantes (nodos principales) son Barranquilla, Medellín, Manizales, Cali, Bogotá y Bucaramanga, las cuales forman el núcleo de la red. Las ciudades consideradas de importancia media (nodos secundarios) dependen del nodo principal más cercano para su interconexión con el núcleo, formando así la red de borde.

- **Tecnología de los equipos de red**

Los nodos principales corresponden a *switches* multiservicio ATM de alta velocidad de conmutación y los nodos secundarios a *switches* ATM y enrutadores *Frame Relay*, de acuerdo con las características de las redes de los operadores nacionales.

- **Medios físicos y capacidades de interconexión entre nodos de red**

Los nodos principales de la red se interconectan a través de fibra óptica formando un anillo con capacidad nxSTM-1 hasta STM-16. Los nodos secundarios pueden conectarse a los nodos principales a través de fibra óptica o enlaces microondas, con capacidades nxE1 hasta STM-1.

Seguidamente, una vez identificados los principales puntos de presencia, la tecnología y medios de transmisión utilizados por los principales operadores, se define el *Modelo de Red de Operador Nacional* (MRON) mostrado claramente en la Figura 1.7.

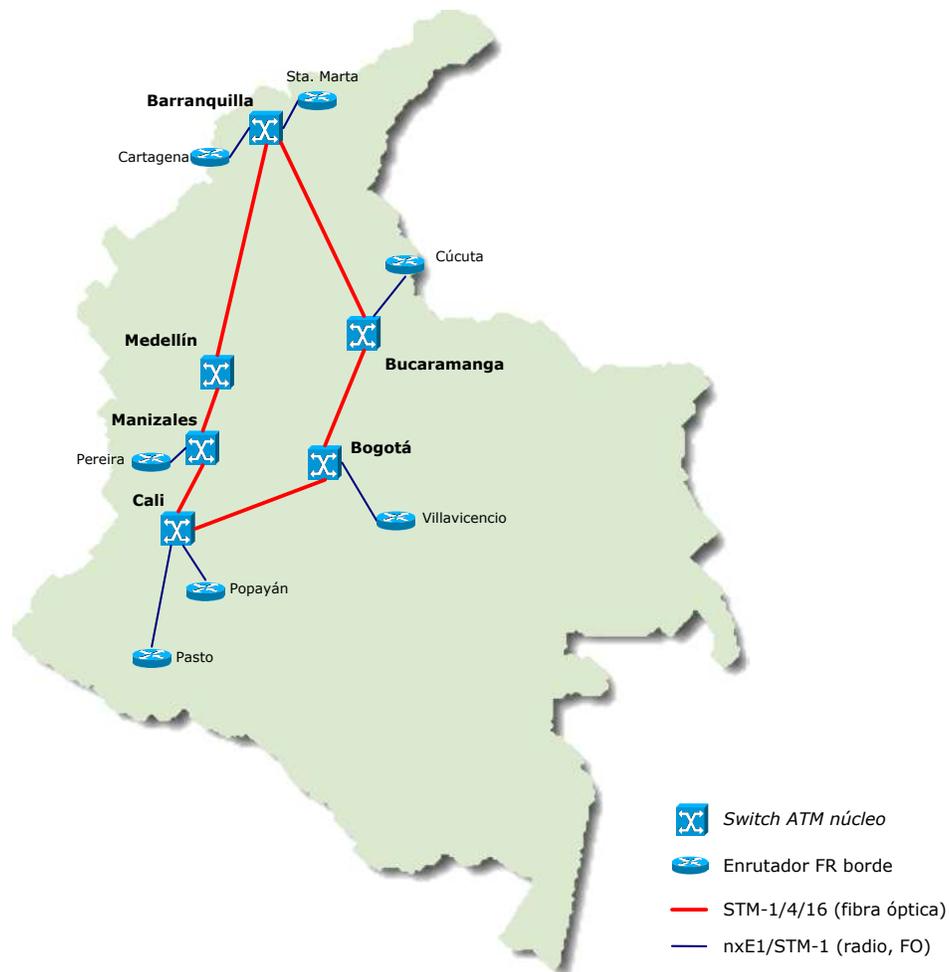


Figura 1.7. Modelo de Red de Operador Nacional

Resumiendo, a través del estudio a los operadores de telecomunicaciones más relevantes a nivel nacional y de acuerdo a sus características comunes, surge el MRON como un modelo de red estándar que sirve como red de prueba para evaluar diferentes tecnologías de nueva generación que puedan llegar a ser utilizadas por los operadores. Como consecuencia, el operador podrá basarse en los resultados obtenidos sobre el MRON y estimar la conveniencia de dicha tecnología para su red. En este proyecto se estudiará el efecto de la tecnología MPLS sobre la red del operador nacional como solución a los principales problemas que presenta la prestación de servicios IP sobre la red ATM.

2. ESCENARIOS DE INTEROPERABILIDAD ENTRE REDES ATM Y MPLS

A pesar de que el protocolo IP está siendo utilizado por la gran mayoría de proveedores para la implementación y prestación de servicios, las redes IP puras presentan una serie de inconvenientes que limitan su desempeño. Como consecuencia, los organismos de estandarización y varios fabricantes de dispositivos estudian a fondo el problema, buscando soluciones que permitan optimizar las redes basadas en paquetes.

Normalmente, un enrutador tradicional analiza la dirección IP de destino de cada paquete contenida en la cabecera del mismo, a medida que éste se desplaza desde su origen hasta su destino final. El enrutador analiza la dirección IP de destino de forma independiente en cada salto de la red. Los protocolos de enrutamiento dinámico o la configuración estática son los encargados de construir la base de datos (*tabla de enrutamiento*) necesaria para determinar cuál es el siguiente salto para la dirección IP de destino que están analizando.

Existe una serie de mecanismos básicos de envío IP que afectan la escalabilidad y flexibilidad de las redes tradicionales de transporte de paquetes basadas en IP. Dichos mecanismos y algunas posibles soluciones a varios de ellos son descritos a continuación.

- **Servicios de paquetes diferenciados**

El envío convencional de paquetes IP emplea sólo la dirección de destino contenida en la cabecera de capa de red para tomar la decisión de envío. Esta decisión también debería basarse en otros factores como el puerto por donde se recibió el paquete, la calidad de servicio requerida, etc., permitiendo a los paquetes destinados a una misma red IP tomar rutas alternas en lugar de la ruta determinada por el protocolo de enrutamiento de capa 3.

El paradigma de decisión salto a salto utilizado actualmente y que está basado únicamente en la dirección IP de destino es una limitante para obtener un mejor

desempeño en la red y restringe la implantación de nuevos servicios debido a sus altas exigencias en cuanto a eficiencia, utilización de ancho de banda y retardo, entre otros.

Aunque existen ciertas técnicas de decisión que intervienen en el proceso de enrutamiento como el enrutamiento basado en políticas (PBR: *Policy-based Routing*), su utilización en enrutadores reduce enormemente el rendimiento debido a la alta carga de procesamiento, dando como resultado un diseño de red poco escalable.

- **Envío y control independientes**

Con el envío convencional de paquetes IP, cualquier cambio en la información que controla el envío de paquetes se comunica a todos los dispositivos dentro del dominio de enrutamiento. Este cambio siempre implica un período de convergencia dentro del algoritmo de envío.

Una solución a este problema es un mecanismo que permita cambiar la forma en que se envían los paquetes, sin afectar a los otros dispositivos de la red. Los dispositivos de envío (enrutadores) no deben limitarse a la información de la cabecera IP para enviar el paquete, sino contar con un identificador corto adicional de longitud fija que pueda indicar el comportamiento de envío deseado.

Con el envío de paquetes realizándose sobre la base de un identificador corto adicional, cualquier cambio en el proceso de decisión puede comunicarse a los otros dispositivos a través de la distribución de nuevos identificadores. Debido a que estos dispositivos envían tráfico basándose en un pequeño identificador adjunto, los cambios deben producirse sin que tenga ningún impacto sobre los dispositivos que realizan el envío de paquetes.

- **Propagación de información de enrutamiento exterior**

El envío convencional de paquetes en una red IP requiere que se publique la información de enrutamiento externa en todos los dispositivos de enrutamiento intermedios. Esto es necesario para que los paquetes puedan ser enrutados por todos los dispositivos basados en la dirección de destino almacenada en la cabecera de la capa de red del paquete.

Este método tiene implicaciones de escalabilidad en términos de propagación de rutas, uso de memoria y utilización de CPU de los enrutadores de la red, y no es una función

realmente necesaria si lo único que se desea es enviar un paquete desde uno de los extremos de la red a otro.

Se requiere entonces un mecanismo que permita a los dispositivos de enrutamiento interno "conmutar" los paquetes a través de la red desde un enrutador de entrada hacia un enrutador de salida, sin tener que analizar la dirección de destino de la capa de red en cada salto.

2.1 MODELO DE IP SOBRE ATM

Teniendo en cuenta que el futuro del mercado de servicios de valor agregado son los servicios basados en IP, y que las redes de los operadores nacionales están soportadas principalmente en *switches* multiservicio ATM, una primera solución para ofrecer este tipo de servicios sobre esta infraestructura sería un modelo de IP sobre ATM (IP/ATM).

Desafortunadamente, aunque ATM es ideal para el transporte de voz, no es una buena opción para el transporte de tráfico IP, y aunque el modelo de IP/ATM puede considerarse una solución temporal si lo que se busca es la prestación de servicios IP sobre una infraestructura ATM existente, no debería considerarse una solución definitiva por la serie de inconvenientes que presenta y que a largo plazo impactan negativamente el desempeño de la red.

Para conocer más a fondo los problemas que presenta el modelo IP/ATM en una red, a continuación se describen los principales inconvenientes, teniendo en cuenta que para cada uno de ellos existen soluciones parciales que podrían minimizar los problemas ocasionados, pero que aumentarían la complejidad de administración y gestión de la misma.

2.1.1 Retardo de paquetes IP en una red ATM

Dependiendo de la forma como los paquetes IP se transporten sobre la red ATM, el tiempo de propagación varía significativamente. El método más sencillo es interconectar enrutadores IP externos mediante circuitos virtuales permanentes (PVC: *Permanent Virtual Circuit*), como se muestra en la Figura 2.1. Desafortunadamente este proceso requiere que los paquetes sean enrutados en cada nodo de la red, lo que

incrementa significativamente el tiempo de propagación y los paquetes siguen las rutas definidas por los PVCs, no por la topología de la red.

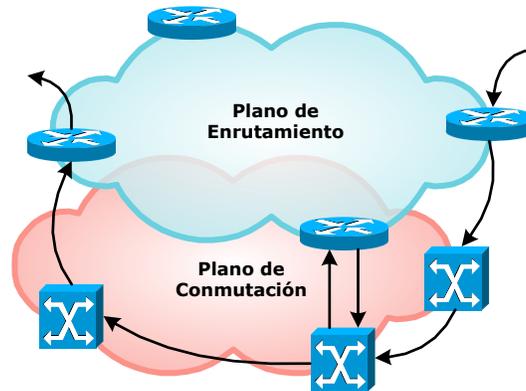


Figura 2.1. Modelo IP sobre ATM clásico

Para evitar esto, existen diversas soluciones como la emulación de redes de área local (LANE: *LAN Emulation*), multiprotocolo sobre ATM (MPOA: *Multiprotocol over ATM*) y finalmente MPLS que se observa en la Figura 2.2.

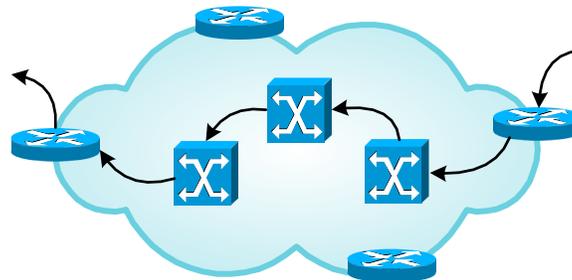


Figura 2.2. Modelo MPLS sobre ATM

Mediante la utilización de MPOA y MPLS, los paquetes son enrutados únicamente en el borde de la red y conmutados en el núcleo, disminuyendo notablemente el tiempo de propagación del paquete a través de la red.

2.1.2 Sobre encabezado de las celdas ATM

En una red ATM el tráfico IP genera un sobre encabezado significativo debido al tamaño fijo y reducido de las celdas ATM. Las celdas ATM tienen un tamaño de 53

bytes, 48 de los cuales se utilizan para datos y 5 para encabezados, así que la eficiencia de una celda para el transporte de datos es:

$$Eficiencia_celda = \frac{Dato}{Total} = \frac{48}{53} = 0,9056 \approx 90,56\%$$

Dependiendo de la aplicación, el tamaño medio para un paquete IP varía entre 100 bytes y 1500 bytes. Aplicaciones de voz sobre IP (VoIP: *Voice over IP*) utilizan paquetes pequeños alrededor de los 100 bytes, mientras que la transferencia de archivos usualmente tiene el máximo tamaño posible, que de acuerdo con la máxima unidad de transferencia (MTU: *Maximum Transfer Unit*) de Ethernet es 1500 bytes.

El encapsulado de paquetes IP sobre celdas ATM tiene una pérdida adicional de eficiencia debido a que parte de la última celda debe enviarse con información de relleno para completar los 48 bytes y finalmente transmitir la celda. Lo anterior se observa en la Figura 2.3.

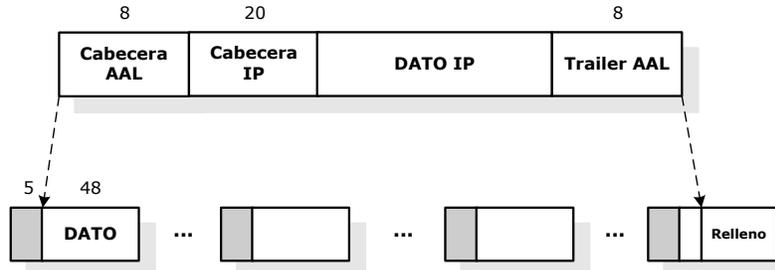


Figura 2.3. Encapsulado de paquetes IP sobre celdas ATM

Utilizando un valor promedio de 500 bytes para la MTU, la eficiencia del encapsulado de paquetes IP sobre celdas ATM es:

$$Eficiencia_encapsulada = \frac{MTU}{\left(\frac{MTU}{48} + 1\right) * 48} = \frac{500}{\left(\frac{500}{48} + 1\right) * 48} = 0,9467 \approx 94,67\%$$

De esta forma, la eficiencia total del transporte de paquetes IP sobre celdas ATM es:

$$Eficiencia = Eficiencia_celda * Eficiencia_encapsulada = 0,9056 * 0,9467 = 0,8573 \approx 85\%$$

Este valor depende del tamaño de la MTU y varía entre el 80% y el 90%. No se consideran los encabezados del nivel de adaptación de ATM (AAL: *ATM Adaptation Layer*) debido a que éstos existen en cualquier encapsulado de capa 2.

Otro factor importante en el transporte de IP sobre ATM es la pérdida de celdas por congestión en la red. El descarte de una celda de un segmento del protocolo de control de transmisión (TCP: *Transmisión Control Protocol*) por congestión en un *switch* ocasiona la pérdida de todo el paquete y por lo tanto debe ser retransmitido. Esto se conoce como el problema de fragmentación de TCP sobre redes ATM. Si se pierde una celda, el paquete IP también se pierde, pero el resto de las celdas del paquete son transportadas al destino y después de esto, el paquete reensamblado es descartado.

El modelo IP/ATM hace una utilización ineficiente del ancho de banda de la red debido al sobre encabezado de las celdas ATM para el transporte de tráfico basado en tramas como IP. Esta situación se vuelve más crítica en el núcleo de la red donde la pérdida de un porcentaje considerable de ancho de banda representa grandes sumas de dinero para el proveedor de servicios debido a los altos costos de los equipos y las interfaces físicas de alta velocidad.

2.1.3 Inestabilidad de las rutas

Tanto el nivel ATM como el nivel IP tienen funcionalidades de enrutamiento, lo que genera un gran problema si ocurre una falla en algún enlace. Por una parte, el protocolo de enrutamiento IP comenzará a intercambiar información de enrutamiento y establecer nuevos trayectos para los paquetes. Sin embargo, al mismo tiempo el protocolo interno entre nodos (PNNI: *Private Network to Network Interface*) del nivel ATM reestablecerá nuevos trayectos para las celdas. Una vez se establezcan los nuevos trayectos para las celdas, el nivel de enrutamiento IP deberá recalcularse la información de enrutamiento.

Para evitar esta situación, se recomienda deshabilitar los protocolos de enrutamiento IP y utilizar rutas estáticas. Mediante la utilización de rutas estáticas, una falla en un enlace no ocasionará problemas en la red porque el protocolo PNNI de ATM establecerá nuevos trayectos para los PVCs. Desafortunadamente, para redes grandes esta

solución requiere la utilización de muchas rutas estáticas y PVCs, complicando la tarea de gestión y administración.

2.1.4 Capacidad de las interfaces ATM

Las interfaces físicas ATM presentan una limitación de crecimiento a capacidades de 2,5 Gbps (STM-16) en adelante, ya que el proceso de segmentación y reensamblado (SAR: *Segmentation and Reassembly*) de unidades de datos de protocolo (PDU: *Protocol Data Unit*) comienza a presentar complicaciones, pues requieren procesadores de gran capacidad para manejar grandes volúmenes de información a tan altas velocidades. Estos procesadores incrementan los costos finales de las interfaces y no justifica su implementación cuando existen otras tecnologías que utilizan interfaces de mayor capacidad a costos más bajos.

Basados en los problemas del protocolo IP y del modelo de IP/ATM, algunos proveedores han propuesto soluciones que buscan integrar la velocidad de la conmutación de capa 2 con el enrutamiento de capa 3, mediante la adición al paquete IP de un nuevo identificador de longitud fija llamado etiqueta. Fue así como apareció la tecnología de *Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo (MPLS)*, que ha evolucionado de numerosas tecnologías propietarias de conmutación de etiquetas como el *Tag Switching* de Cisco, *Aggregate Route-Based IP Switching (ARIS)* de IBM, *Cell-Switched Router (CSR)* de Toshiba, *IP Switching* de Ipsilon y *IP Navigator* de Lucent.

2.2 FUNDAMENTOS DE MPLS

La *Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo* es una tecnología emergente destinada a encauzar muchos de los actuales retos que plantea el envío de paquetes en el entorno actual de *internetworking*. Los miembros de la comunidad IETF han realizado un gran esfuerzo para presentar un conjunto de normas al mercado y evolucionar las ideas de diferentes proveedores e individuos en el área de conmutación de etiquetas. El documento IETF *draft-ietf-mpls-framework* contiene el marco de esta iniciativa y describe el objetivo principal de la siguiente manera:

“El objetivo principal del grupo de trabajo MPLS es la estandarización de una tecnología base que integre el paradigma de intercambio de etiquetas con el enrutamiento de capa de red. Esta tecnología base (intercambio de etiquetas)

se espera que mejore la relación precio/rendimiento del enrutamiento de capa de red, mejorando la escalabilidad de la capa de red y proporcionando mayor flexibilidad en la entrega de los (nuevos) servicios de enrutamiento (permitiendo que se sumen nuevos servicios de enrutamiento sin un cambio en el paradigma de envío).”

2.2.1 Componentes de un sistema MPLS

MPLS se basa en los conceptos de *enrutador de conmutación de etiquetas* (LSR: *Label Switch Router*), *trayecto conmutado por etiquetas* (LSP: *Label-switched Path*) y *paquetes etiquetados*. En la forma más simple, MPLS es el concepto de LSRs enviando paquetes etiquetados a través de LSPs, así como se muestra en la Figura 2.4.

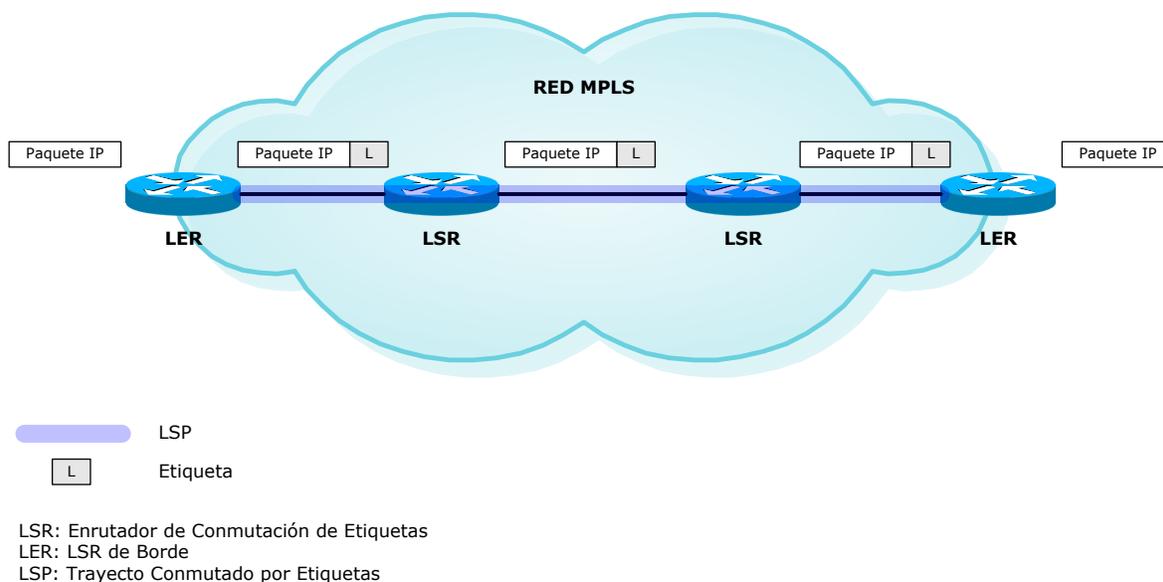


Figura 2.4. Componentes de un sistema MPLS

Todo enrutador o *switch* que implemente procedimientos de distribución de etiquetas y que pueda enviar paquetes basado en etiquetas se denomina *Enrutador de Conmutación de Etiquetas* (LSR). Todo LSR que tenga equipos vecinos que no sean MPLS se considera un LSR de borde (LER: *Label Edge Router*). Una etiqueta equivale a un identificador corto de longitud fija que se agrega a los paquetes para su transporte a través de la red.

La Figura 2.5 es un ejemplo en el cual se muestran los pasos que se siguen en una red MPLS para el transporte de un paquete de un punto de entrada, en este caso Barranquilla, a un punto de salida en la ciudad de Popayán, por ejemplo a la Universidad del Cauca.

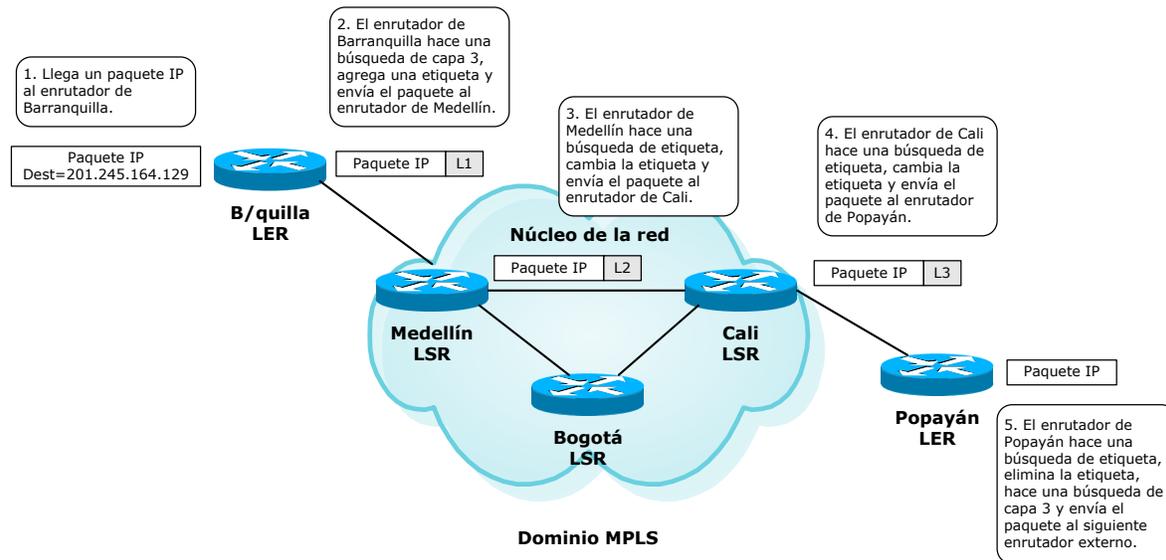


Figura 2.5. Ejemplo de una red MPLS

El LER de entrada (Barranquilla) es el encargado de recibir el paquete IP no etiquetado, adicionar una etiqueta (L1) y enviarlo al siguiente LSR (Medellín) en el trayecto. Todo LSR intermedio (Medellín y Cali) debe recibir el paquete etiquetado, hacer una búsqueda de etiqueta, conmutar la etiqueta y enviar el paquete al LER de salida (Popayán). El LER de salida recibe el paquete etiquetado, elimina la etiqueta y envía el paquete IP original a su destino fuera de la red MPLS.

Todos los paquetes ingresan a la red MPLS a través de un LSR de entrada y salen de la red por un LSR de salida. Este mecanismo crea lo que se conoce como *Trayecto Conmutado por Etiquetas (LSP)*, que esencialmente describe el conjunto de LSRs a través del cual debe pasar un paquete etiquetado para llegar al LSR de salida.

2.2.2 Arquitectura de MPLS

La arquitectura de MPLS describe los mecanismos para realizar la conmutación de etiquetas, que combina los beneficios del envío de paquetes basados en la

conmutación de capa 2 con los beneficios del enrutamiento de capa 3. Al igual que las redes de capa 2 (*Frame Relay* o ATM), MPLS asigna etiquetas a los paquetes para su transporte a través de la red. El mecanismo de envío a través de la red es el intercambio de etiquetas, en cuyas unidades de datos (por ejemplo, un paquete o una celda) se transporta una etiqueta corta de longitud fija, que indica a los nodos de conmutación que existen a lo largo de la ruta la forma como se deben procesar y enviar los datos.

La arquitectura de MPLS se divide en dos componentes: un *componente de envío* (también denominado *plano de datos*) y un *componente de control* (llamado también *plano de control*). El *componente de envío* emplea una base de datos de envío de etiquetas para ejecutar el envío de paquetes de datos, basándose en las etiquetas transportadas por los paquetes. El *componente de control* es el responsable de la creación y mantenimiento de las etiquetas que se envían entre un grupo de conmutadores interconectados entre sí. La Figura 2.6 muestra la arquitectura básica de un nodo MPLS.

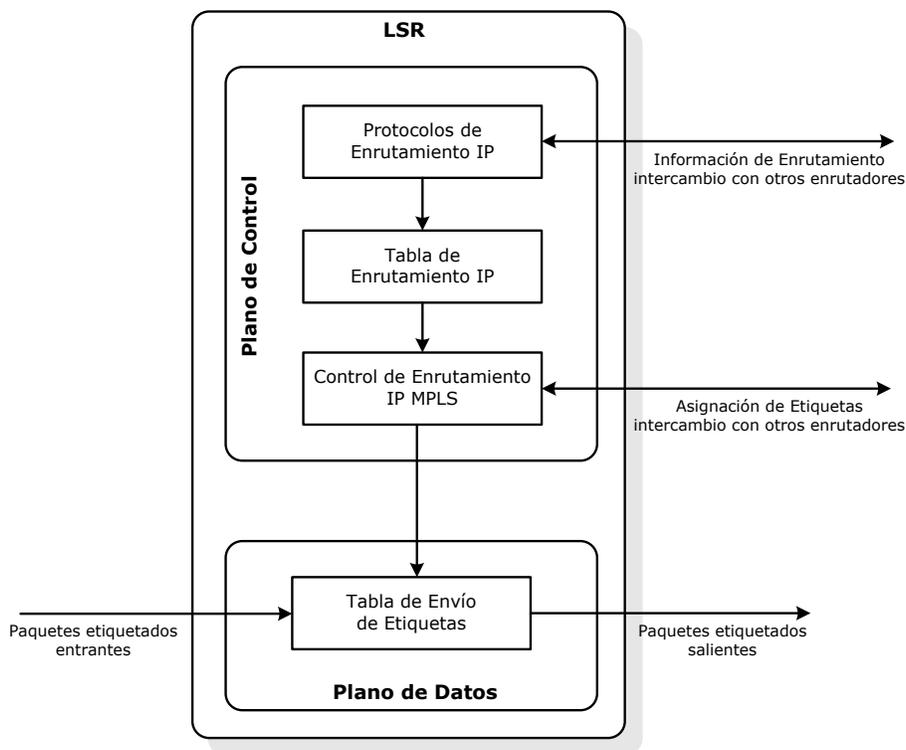


Figura 2.6. Arquitectura de un nodo MPLS

Cada nodo MPLS debe estar ejecutando uno o más protocolos de enrutamiento IP (o confiar en un enrutamiento estático) para intercambiar la información de enrutamiento con otros nodos MPLS de la red. En este sentido, cada nodo MPLS es un enrutador IP en el plano de control.

Al igual que en los enrutadores tradicionales, los protocolos de enrutamiento IP alimentan la *tabla de enrutamiento*. En un nodo MPLS, la tabla de enrutamiento IP se emplea para la asignación de etiquetas, que son intercambiadas por los nodos MPLS adyacentes para las subredes individuales almacenadas en ella a través de un *protocolo de distribución de etiquetas*.

El proceso de control de enrutamiento MPLS utiliza las etiquetas intercambiadas entre nodos MPLS adyacentes para construir la *tabla de envío de etiquetas*, que es la base de datos del *plano de envío* empleada para enviar los paquetes etiquetados a través de la red MPLS.

Cada LSR mantiene dos tablas que almacenan información relacionada con el componente de envío de MPLS. La primera, conocida como *Base de Información de Etiquetas* (LIB: *Label Information Base*), mantiene todas las etiquetas asignadas por el LSR y las asignaciones de estas etiquetas a las etiquetas recibidas de cualquiera de los vecinos. Estas asignaciones de etiquetas se distribuyen mediante el empleo de *protocolos de distribución de etiquetas*.

La segunda tabla, conocida como *Base de Información de Envío de Etiquetas* (LFIB: *Label Forwarding Information Base*), se utiliza durante el envío de paquetes y almacena sólo las etiquetas que en ese momento está utilizando el componente de envío de MPLS.

Los LERs emplean la tabla de envío IP tradicional, con información adicional de etiquetado, para etiquetar paquetes IP o para eliminar las etiquetas de los paquetes etiquetados antes de enviarlos a nodos que no son MPLS. En la Figura 2.7 se observa la arquitectura de un LER.

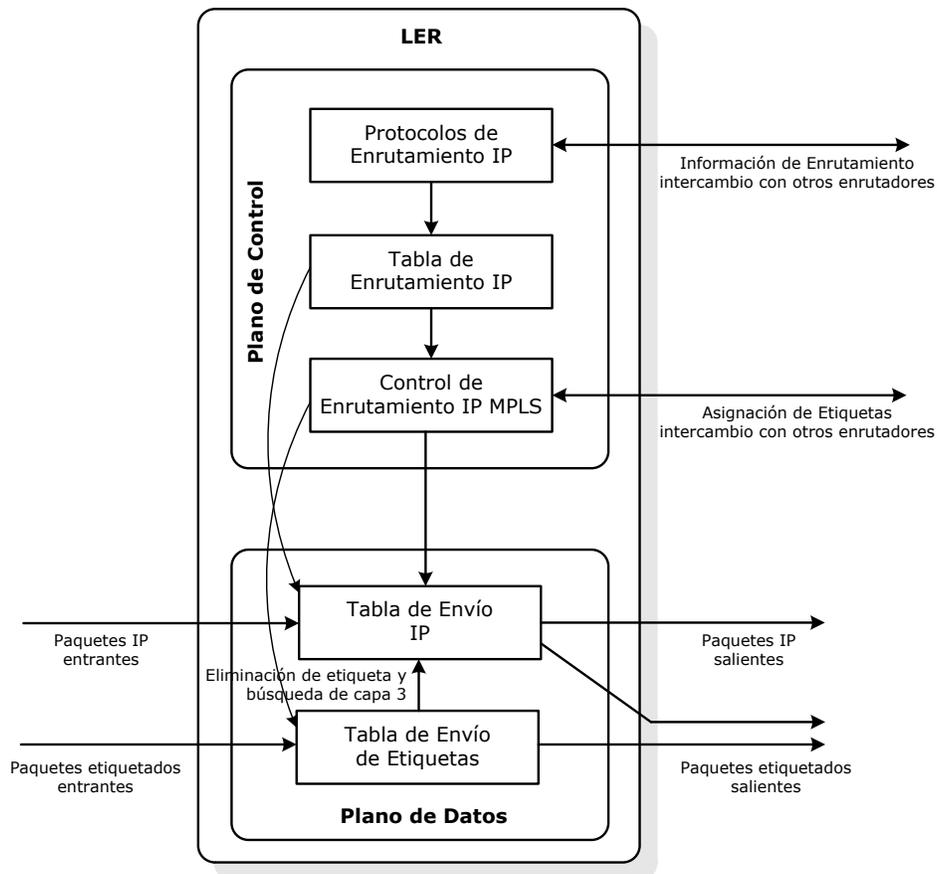


Figura 2.7. Arquitectura de un LER

La tabla de envío IP se construye sobre la base de la tabla de enrutamiento IP y se amplía con información de etiquetado. Los paquetes IP entrantes se pueden enviar como paquetes IP puros hacia nodos que no son MPLS, o pueden ser etiquetados y enviarse a otros nodos MPLS. Los paquetes etiquetados entrantes se pueden enviar directamente a otros nodos MPLS. En los paquetes etiquetados destinados a nodos que no son MPLS, se elimina la etiqueta y se realiza una búsqueda de capa 3 (envío IP) para encontrar el destino.

2.2.3 Formato de la pila de etiquetas

La pila de etiquetas de MPLS (MPLS *label stack*) está compuesta por cuatro (4) bytes, como se muestra en la Figura 2.8.

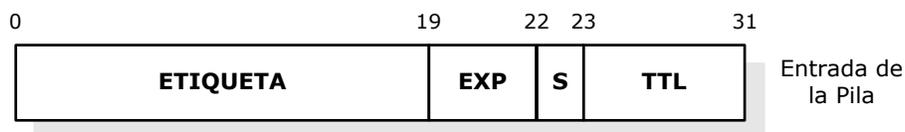


Figura 2.8. Formato de la etiqueta de MPLS

- **Etiqueta:** Campo de veinte (20) bits en el cual se almacena el valor de etiqueta. Con este número de bits pueden existir más de un millón de etiquetas.
- **Experimental (EXP):** Campo de tres (3) bits utilizado para hacer un mapeo del tipo de servicio (ToS: *Type of Service*) del paquete IP estándar para el manejo de clase de servicio (CoS: *Class of Service*) en MPLS.
- **S:** Las etiquetas de MPLS pueden ser apiladas una encima de otras. El bit S o bit de pila (*stack*) es utilizado para indicar el fondo de la pila. Un uno (1) en este bit indica el fondo o última etiqueta de la pila.
- **TTL:** Campo utilizado para evitar la formación de *loops* en la red. El campo *tiempo de vida* (TTL: *Time to Live*) del paquete IP es decrementado en uno al ingresar a la red MPLS y luego copiado al campo TTL de la etiqueta MPLS. Al salir de la red MPLS, el valor del campo TTL de la etiqueta MPLS es copiado nuevamente al campo TTL del paquete IP. Si este campo tiene un valor de cero (0), el paquete es descartado. El campo TTL tiene una longitud de 8 bits.

La etiqueta de MPLS se ubica entre la cabecera de capa 2 y la cabecera de capa 3, razón por la cual algunas veces es llamada *shim header*. La Figura 2.9 muestra la posición de la etiqueta MPLS para diferentes tipos de encapsulado, observándose que ésta permanece constante.

Debido a que la etiqueta de MPLS se ubica antes de la cabecera de capa 3 (utilizada para el proceso de enrutamiento), el enrutador la observa primero y puede, por tanto, “enrutar” paquetes basado en ella. Se afirma que en MPLS el tráfico IP es conmutado en lugar de ser enrutado.

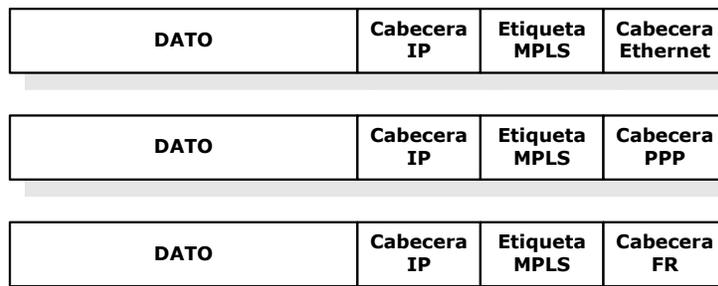


Figura 2.9. Posición de la cabecera MPLS

2.2.4 Operaciones sobre las etiquetas

Cada uno de los LSRs de un LSP deben ejecutar una serie de operaciones sobre las etiquetas para poder transportar los paquetes de un extremo a otro de la red.

- Operación de Asignación (*Push*): Es el acto de agregar una etiqueta a un paquete en el punto de entrada del dominio MPLS. Esta función es realizada únicamente por dispositivos LERs.
- Operación de Apilado (*Stacking*): Esta función es propia de los LERs y consiste en la adición de una o varias etiquetas al paquete entrante conformando lo que se conoce como pila de etiquetas. La pila de etiquetas permite la implementación de una serie de aplicaciones adicionales como *redes privadas virtuales* (VPNs).
- Operación de Retiro (*Pop*): Es la acción de eliminar la última etiqueta (etiqueta superior) de un paquete en el punto de salida antes de que se envíe a un vecino que está fuera del dominio MPLS. La función *pop* es realizada únicamente por equipos LER.
- Operación de Intercambio (*Swap*): Función realizada por los LSRs y consiste en intercambiar la etiqueta superior de un paquete por otra, de acuerdo con la tabla de envío de etiquetas generada por el plano de control.
- Operación de Combinación (*Label Merge*): Capacidad que tiene un LSR para recibir dos paquetes de diferentes interfaces, y/o con diferentes etiquetas, y enviar ambos paquetes a través de la misma interfaz de salida con la misma etiqueta. Una vez los paquetes son transmitidos, se elimina la información que indica que arribaron por diferentes interfaces o con diferentes etiquetas.

2.2.5 Asignación y distribución de etiquetas

Para realizar la función de adición de una etiqueta (*push*), un LER debe comprender cuál es la cabecera del paquete y qué etiqueta, o pila de etiquetas, se deben asignar. La elección del siguiente salto para el paquete IP es una combinación de dos funciones. La primera función separa el conjunto de paquetes posibles en un conjunto de prefijos de destino IP. La segunda función efectúa la asignación de cada prefijo de destino IP a una dirección IP de siguiente salto.

En la arquitectura MPLS, los resultados de la primera función se conocen como *Clases Equivalentes de Envío* (FEC: *Forwarding Equivalence Class*), que corresponden a grupos de paquetes IP que se envían de la misma forma, por la misma ruta y con igual tratamiento. Una FEC podría corresponder a una subred de destino IP, pero también podría corresponder a cualquier clase de tráfico que el LER considere significativo. Por ejemplo, todo tráfico multimedia hacia cierto destino o todo tráfico con un cierto valor de precedencia IP podrían constituir una FEC.

Con el envío IP convencional, el procesamiento de paquetes se efectúa en cada salto de la red. Cuando se introduce MPLS, se asigna un paquete a una FEC una sola vez, y esto tiene lugar en el dispositivo de borde a medida que el paquete entra a la red. La FEC a la que se asigna el paquete se codifica entonces como una etiqueta.

Cuando se envía un paquete al siguiente salto, se añade la etiqueta al final del paquete IP, de modo que el siguiente dispositivo en la ruta del paquete pueda enviarlo basado en la etiqueta codificada en lugar de tener que hacer un análisis de la cabecera de capa 3, conformando un LSP.

La creación del LSP es un esquema orientado a la conexión debido a que la ruta se establece antes que se presente cualquier flujo de tráfico. Sin embargo, el establecimiento de esta conexión se basa en información topológica más que en la necesidad de un flujo de tráfico. Esto significa que la ruta se crea independientemente de la existencia de tráfico.

Para comprender claramente los métodos de asignación y distribución de etiquetas en la arquitectura MPLS, debe comprenderse el concepto de *flujo descendente* (*downstream*) y *flujo ascendente* (*upstream*).

En la Figura 2.10 existen tres enrutadores R1, R2 y R3. El enrutador R1 anuncia la subred 201.245.164.0/24 que será aprendida por R2. Seguidamente R3 aprenderá la ruta de R2. El tráfico dirigido a la subred anunciada finalmente llegará a R1 (la fuente original de la ruta). Los términos *upstream* y *downstream* se definen con relación al flujo de los paquetes de usuario y no al flujo de actualizaciones de rutas. Por ejemplo, el tráfico destinado a la subred 201.245.164.0/24 fluye de los enrutadores *upstream* (R2 y R3) hacia el enrutador *downstream* (R1).

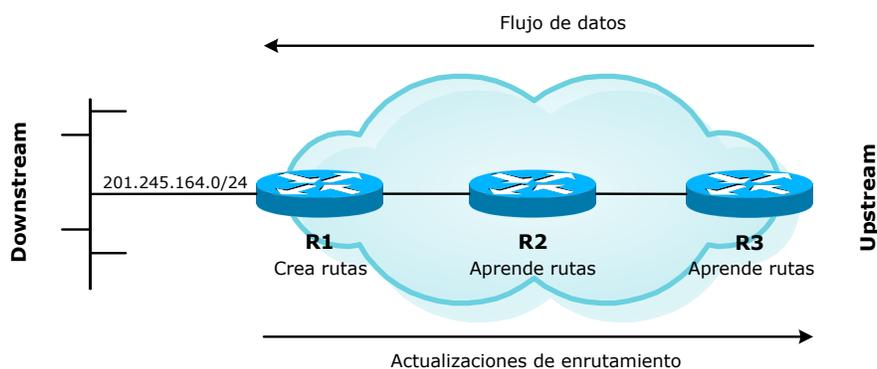


Figura 2.10. Concepto de *upstream* y *downstream*

Existen básicamente dos modos empleados por los LSRs para la asignación de etiquetas: *control independiente* y *control ordenado*. Además, existen dos métodos para la distribución de etiquetas en un dominio MPLS: *downstream on demand* y *unsolicited downstream*.

Control Independiente

Cuando aparece una nueva FEC en un LSR, se le asigna una etiqueta inmediatamente y ésta puede ser anunciada a sus vecinos en cualquier momento. Debido a que el LSR *downstream* no debe esperar por una etiqueta, es posible que el LSR *upstream* conmute etiquetas sin que exista un LSP completo. El control independiente permite la velocidad más alta de establecimiento de un LSP y es el método de control utilizado por los enrutadores.

Control Ordenado

El control ordenado ocurre cuando un LSR *upstream* debe esperar a la recepción de una etiqueta por parte de su LSR *downstream*. El control ordenado toma más tiempo

para establecer un LSP y es utilizado por los *switches* ATM que tienen la funcionalidad de MPLS habilitada.

Downstream on demand

El método de distribución *downstream on demand* ocurre cuando un LSR *upstream*, utilizando un mensaje de *Solicitud de Etiqueta*, pide una etiqueta a su vecino *downstream*, como se muestra en la Figura 2.11.

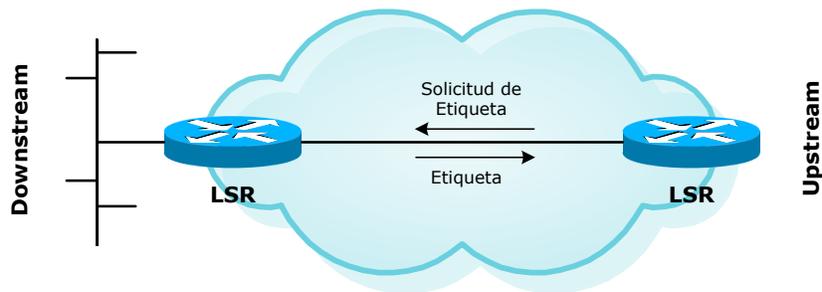


Figura 2.11. Método de distribución de etiquetas *downstream on demand*

Unsolicited downstream

Este método ocurre cuando un LSR *downstream* anuncia etiquetas a sus vecinos de manera automática, sin la necesidad de un mensaje de solicitud de etiqueta. Este método se observa en la Figura 2.12.

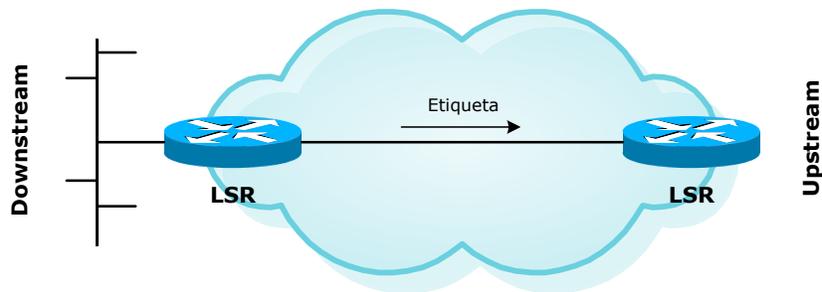


Figura 2.12. Método de distribución de etiquetas *unsolicited downstream*

2.2.6 Modo de retención de etiquetas

Para explicar el modo de retención de etiquetas de un LSR, supóngase que un LSR *upstream* ha recibido una asignación de etiquetas para una FEC en particular por parte

de un LSR *downstream*, inclusive sin que el LSR *downstream* sea el siguiente salto para esa FEC.

El LSR *upstream* puede aceptar o descartar dicha asignación. Si el LSR acepta la asignación y la agrega a su base de información de etiquetas, podría comenzar a utilizarla en el momento en que el LSR *downstream* se convierta en su siguiente salto para la FEC en cuestión. Si por el contrario, el LSR descarta la asignación y más adelante el LSR *downstream* se convierte en su siguiente salto, se deberá obtener nuevamente la asignación de etiquetas.

Si un LSR soporta *modo liberal de retención de etiquetas*, éste mantiene las asignaciones entre una etiqueta y una FEC recibidas de LSRs que no son su siguiente salto para esa FEC. Si por el contrario, un LSR soporta *modo conservativo de retención de etiquetas*, éste descarta tales asignaciones.

El modo liberal de retención de etiquetas permite una adaptación más rápida a los cambios de enrutamiento, pero el modo conservativo requiere que el LSR almacene un menor número de etiquetas.

2.2.7 Protocolos de distribución de etiquetas

Los protocolos de distribución de etiquetas definen un conjunto de procedimientos y mensajes mediante los cuales un LSR informa a otro la asignación de etiquetas que ha realizado.

- **Protocolo de Distribución de Etiquetas**

Un LSR utiliza el *Protocolo de Distribución de Etiquetas* (LDP: *Label Distribution Protocol*) para establecer LSPs a través de una red mediante el mapeo directo de información de enrutamiento de la capa de red a rutas conmutadas de la capa de enlace. Estos LSPs deben terminar en un vecino directamente conectado o en un nodo de egreso de la red, permitiendo la conmutación a través de todos los nodos intermedios. Se asocia una FEC con cada LSP creado, especificando cuáles paquetes deben ser mapeados a ese LSP.

Dos LSRs que utilicen LDP para intercambiar información de mapeo de etiquetas son conocidos como pares LDP y establecen una sesión LDP entre ellos. Las sesiones

establecidas son bidireccionales, lo que indica que cada par aprende sobre el mapeo de etiquetas del otro. Con el fin de garantizar confiabilidad, las sesiones se establecen sobre el protocolo de transporte TCP.

- **LDP basado en Restricciones**

El *Protocolo de Distribución de Etiquetas basado en Restricciones* (CR-LDP: *Constraint-based Label Distribution Protocol*) provee extensiones al protocolo LDP para soportar requerimientos explícitos de establecimiento de LSPs de enrutamiento y reserva de recursos a través de éstos. La capacidad de establecer una ruta explícita para ser utilizada en el establecimiento de un LSP permite al operador de red o al sistema de gestión establecer LSPs sin la necesidad de seguir un trayecto definido por el protocolo de enrutamiento. La habilidad de asociar recursos a un LSP permite canalizar el tráfico a través de la infraestructura de red para ofrecer servicios con ingeniería de tráfico o redes privadas virtuales.

- **Protocolo de Reserva de Recursos con extensiones de Ingeniería de Tráfico**

El *Protocolo de Reserva de Recursos con extensiones de Ingeniería de Tráfico* (RSVP-TE: *Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering extensions*) provee extensiones al protocolo RSVP base para soportar requerimientos explícitos de establecimiento de LSPs de enrutamiento. RSVP, por sí solo, define mecanismos para la asignación de recursos de red a los trayectos definidos por el protocolo de enrutamiento.

RSVP-TE define una sesión como un flujo de datos con un destino y protocolo de nivel de transporte particulares. Sin embargo, cuando se combinan RSVP y MPLS, un flujo o sesión puede ser definido con mayor flexibilidad y generalidad. El nodo de ingreso de un LSP utiliza un número de métodos para determinar cuáles paquetes son asignados a una etiqueta particular. Una vez se ha asignado una etiqueta a un conjunto de paquetes, ésta define efectivamente el flujo a través del LSP. Este LSP se conoce como un túnel LSP porque el tráfico que fluye a través de éste es transparente para los nodos intermedios a través del trayecto conmutado por etiquetas.

En algunas aplicaciones es muy útil asociar un conjunto de túneles LSP, como durante operaciones de reenrutamiento (*reroute*) o para enviar troncales de tráfico a través de múltiples trayectos. En la aplicación de ingeniería de tráfico, dichos conjuntos son llamados túneles de ingeniería de tráfico (túneles TE).

2.3 APLICACIONES DE MPLS

La potencialidad de MPLS consiste en que ha dado origen a una serie de aplicaciones como ingeniería de tráfico, manejo de clase de servicio y redes privadas virtuales (VPNs), así como se describe a continuación.

2.3.1 Clase de Servicio

La característica de *Clase de Servicio* (CoS: *Class of Service*) de MPLS permite ofrecer tipos de servicio diferenciados a través de la red. Los servicios diferenciados satisfacen una serie de requerimientos mediante la asignación del tipo de servicio particular especificado en la información de CoS de cada paquete. El tipo de servicio puede ser especificado de diferentes formas, utilizando por ejemplo la configuración del bit de precedencia IP (*IP precedence*) en paquetes IP.

Para ofrecer servicios diferenciados, la característica de CoS de MPLS proporciona clasificación de paquetes, eliminación de congestión y administración de congestión.

La clasificación de paquetes IP estándar es realizada por un LER en el borde de la red. El campo Experimental (EXP) de la pila de etiquetas de MPLS es utilizado para almacenar la información de calidad de servicio que es utilizada por los LSRs para el manejo de los paquetes a través del LSP.

2.3.2 Ingeniería de Tráfico

El objetivo básico de la ingeniería de tráfico (TE: *Traffic Engineering*) es adaptar los flujos de tráfico a los recursos físicos de la red, equilibrando de forma óptima su utilización, de manera que no haya algunos que estén sobre utilizados con cuellos de botella, mientras otros puedan estar subutilizados.

La ingeniería de tráfico de MPLS combina las capacidades de ingeniería de tráfico de las tecnologías de capa 2 (ATM y *Frame Relay*) con la flexibilidad y diferenciación de clase de servicio de IP. La ingeniería de tráfico de MPLS permite la creación de LSPs a través de la red para el envío de diferente tipo de tráfico, además de balanceo de carga en enlaces de costo desigual y la utilización de rutas diferentes a las determinadas por los protocolos de enrutamiento.

Los LSPs de ingeniería de tráfico de MPLS (también denominados *túneles de ingeniería de tráfico*) permiten al extremo del túnel controlar la ruta que toma el tráfico hacia un destino en particular. Este método es mucho más flexible que el envío de tráfico basado únicamente en la dirección de destino, ya que permite tener en cuenta la disponibilidad de recursos como ancho de banda, retardo de los enlaces y prioridad, entre otros.

Los túneles de ingeniería de tráfico de MPLS se implementan mediante la utilización de la pila de etiquetas de MPLS y son unidireccionales, por lo que deben crearse dos túneles para que se pueda presentar un flujo de tráfico bidireccional entre dos puntos de la red.

2.3.3 Redes Privadas Virtuales

Una red privada virtual (VPN: *Virtual Private Network*) se define como una red en donde la conectividad del cliente entre varios sitios se realiza a través de una infraestructura pública con las mismas políticas de acceso y seguridad que una red privada.

Las VPNs de MPLS brindan la misma privacidad y seguridad que las VPNs tradicionales, además de superar algunas de sus limitaciones como altos costos y complejidad. Adicionalmente, ofrecen otras ventajas como el soporte de duplicidad de direccionamiento y diversos tipos de topologías como intranets, extranets y *hub-and-spoke*. La Figura 2.13 muestra el esquema básico de un servicio de VPNs en una red MPLS.

Algunas de las ventajas de las VPNs de MPLS son:

- Evitan la complejidad de la creación de túneles IP o PVCs de ATM.
- La provisión del servicio es sencilla, debido a que una nueva conexión afecta únicamente al enrutador directamente involucrado.
- Tienen mayores opciones de crecimiento modular.
- Permiten mantener garantías de calidad de servicio extremo a extremo, pudiendo separar flujos de tráfico por aplicaciones en diferentes clases.
- Permiten aprovechar las posibilidades de ingeniería de tráfico para poder garantizar los parámetros críticos y la respuesta global de la red (ancho de banda, retardo, *jitter*, etc.).

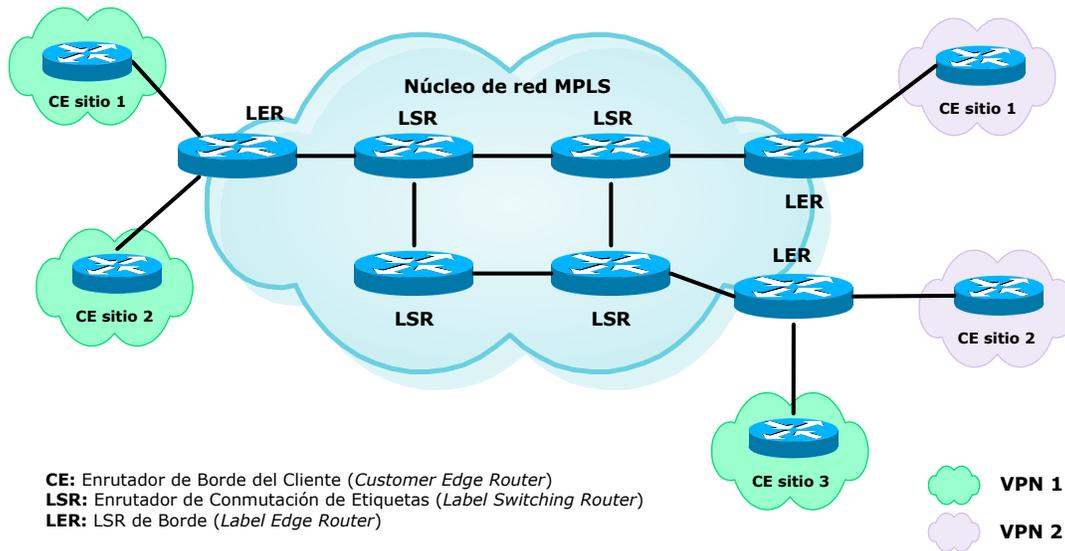


Figura 2.13. VPNs de MPLS

2.4 MODELOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MPLS

Teniendo en cuenta las bondades que ofrece una tecnología en evolución constante como MPLS, fabricantes interesados y varios organismos de estandarización internacionales han propuesto una serie de modelos para la implementación de MPLS basados en las características de grandes operadores mundiales. Los modelos de mayor relevancia se resumen a continuación.

2.4.1 Modelo Superpuesto (*Overlay*)

El modelo *Superpuesto* propone crear una red de borde basada en enrutadores IP/MPLS, que se comunican entre si a través de un núcleo ATM mediante trayectos virtuales (VP: *Virtual Paths*), como se observa en la Figura 2.14.

En algunas circunstancias, como durante un proceso de transición a un entorno IP+ATM MPLS completo, o si los *switches* ATM no soportan MPLS, puede ser deseable ejecutar MPLS en modo trama a través de circuitos virtuales de ATM.

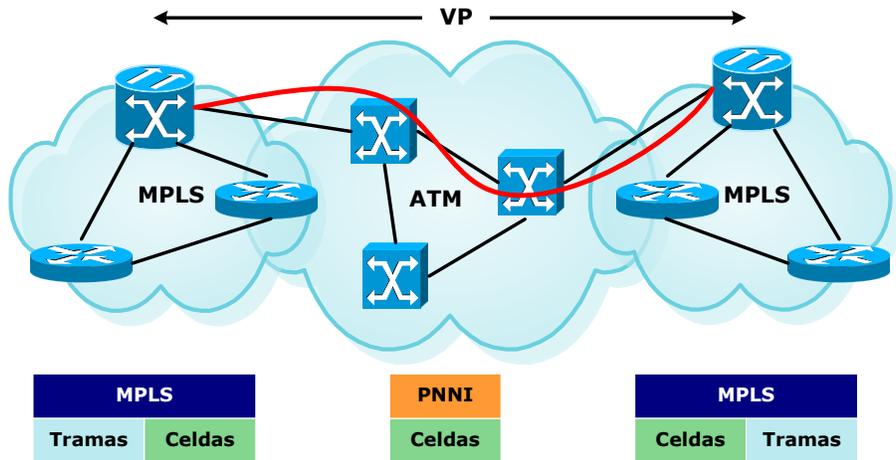


Figura 2.14. Modelo Superpuesto

En MPLS modo trama, los enrutadores (LERs) están conectados directamente a través de interfaces modo trama como las interfaces de protocolo punto a punto (PPP: *Point-to-Point Protocol*). Los enrutadores con MPLS modo trama habilitado utilizan paquetes IP puros para intercambiar información de control como la asignación de etiquetas y actualizaciones de la tabla de enrutamiento.

Los *switches* ATM no tienen ninguna interfaz directa para utilizar en el intercambio de comunicación del plano de control basado en IP, así que deben configurarse circuitos virtuales (VC: *Virtual Circuit*) entre los LERs. La Figura 2.15 muestra una red formada por un núcleo de *switches* ATM rodeados por enrutadores IP/MPLS.

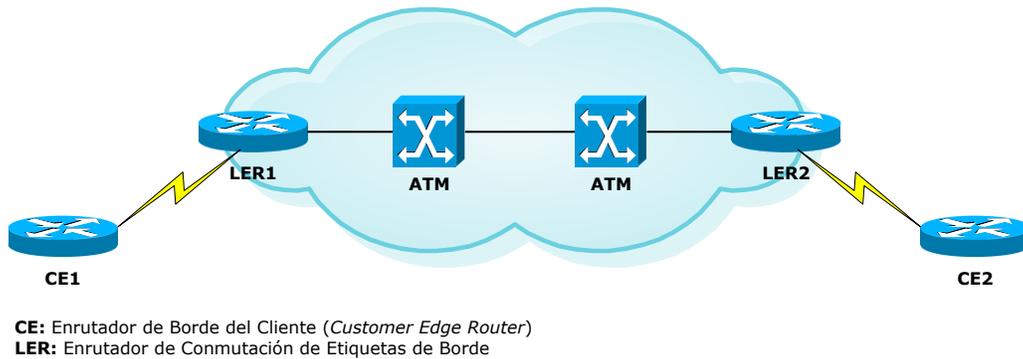


Figura 2.15. Núcleo de red ATM rodeado por enrutadores IP/MPLS

Debido a que el tráfico del plano de control debe estar basado en paquetes IP no etiquetados, en la figura anterior deben implementarse PVCs entre los LERs, como se muestra en la Figura 2.16.

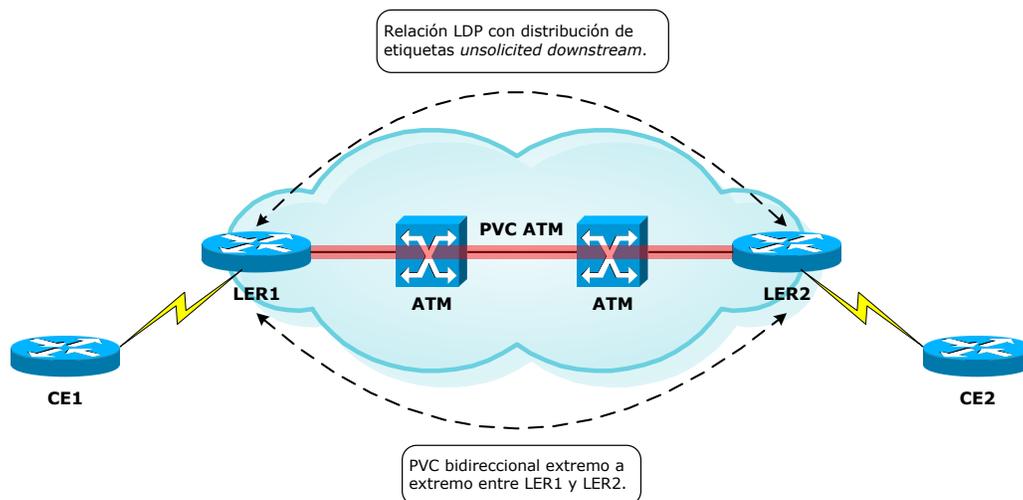


Figura 2.16. LERs interconectados mediante PVCs a través de un núcleo ATM

En la red anterior LER1 y LER2 son enrutadores MPLS con interfaces ATM, es decir, son *LERs ATM*. Los *switches* ATM utilizan mapeos de los identificadores de trayectos virtuales y los identificadores de circuitos virtuales (VPI/VCI: *Virtual Path Identifier/Virtual Circuit Identifier*) para crear el PVC y no examinan los paquetes que están transportando, únicamente conmutan las celdas basados en los valores de VPI/VCI.

Los enrutadores siendo dispositivos IP, simplemente ubican los paquetes en el PVC y la red ATM se encarga de transportarlos hasta su destino. LER1 y LER2, conectados a través de un PVC, intercambian información del plano de control MPLS a través de paquetes IP puros. En este tipo de conectividad, el esquema de asignación de etiquetas utiliza *modo independiente* y la distribución de etiquetas es *unsolicited downstream*.

Este método de implementación de MPLS presenta los mismos problemas de escalabilidad del modelo superpuesto de IP sobre ATM. Para obtener una máxima redundancia y enrutamiento óptimo, deben crearse circuitos virtuales entre todos los LERs ATM, resultando en una malla completa de topologías superpuestas. A pesar de

los problemas de escalabilidad, ésta es la única forma de implementar MPLS si no se tienen *switches* con capacidades de MPLS en el núcleo de la red.

2.4.2 Modelo “Barcos en la Noche” (*Ships in the Night*)

Hasta el momento, los protocolos de enrutamiento IP siempre se han ejecutado sobre protocolos de capa 2 como ATM o *Frame Relay*, sin ninguna integración real. Esta configuración crea un modelo de red superpuesto que no es escalable ni administrable, como se muestra en la Figura 2.17.

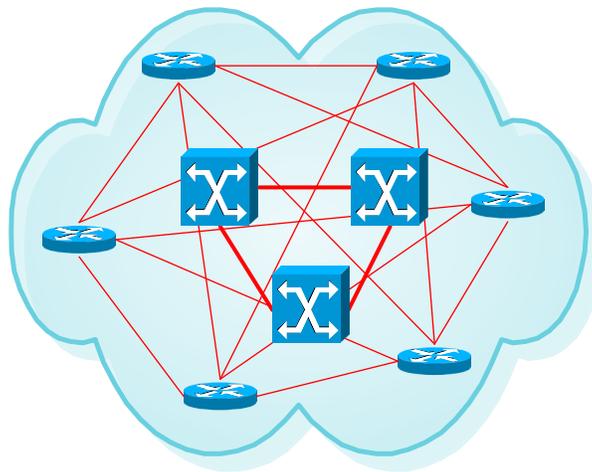


Figura 2.17. Modelo IP+ATM superpuesto

MPLS soluciona el problema de la configuración en malla completa eliminando el concepto de nube ATM; los enlaces ATM son tratados como enlaces IP y cada *switch* ATM puede convertirse en un nodo de enrutamiento IP, como se muestra en la Figura 2.18.

Implementando la inteligencia IP en los *switches* ATM se resuelve el problema de escalabilidad, eliminando la superposición de enlaces IP en ATM y haciendo un mapeo uno a uno entre ellos. Esta verdadera integración de las capas, conocida como MPLS modo celda, ofrece un modelo de conmutación/enrutamiento distribuido, que toma ventaja de las capacidades ofrecidas en cada nivel.

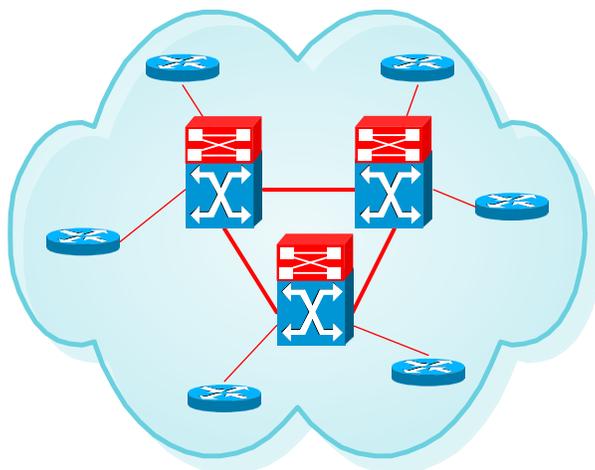


Figura 2.18. Modelo IP+ATM integrado

En el modelo "*Ships in the Night*" los *switches* ATM del núcleo de la red continúan operando conforme al ATM Forum y los estándares ITU-T, mientras que también ejecutan MPLS en forma paralela. En otras palabras, aplicaciones de red como PNNI pueden seguir operando independientemente de la aplicación MPLS que ofrece servicios enrutados.

Los trayectos virtuales en los *switches* multiservicio se dividen entre los servicios MPLS y los servicios ATM. No existe una interacción directa entre PNNI y MPLS excepto que comparten los recursos del *switch* ATM y el ancho de banda de los enlaces.

El modelo "*Ships in the Night*" es utilizado como un mecanismo de transición mientras se migra el plano de control ATM de la red a MPLS. Las redes conservan inicialmente ATM para transportar el tráfico sensible al retardo como voz y video, y para conectar nodos que no soportan MPLS, mientras se implementa MPLS para el transporte de datos.

El modelo propuesto busca implementar una red MPLS de borde, adicionando en los *switches* ATM del núcleo de la red la funcionalidad de MPLS. De esta manera, el núcleo tiene la posibilidad de ejecutar de manera transparente y simultánea la señalización MPLS y los tradicionales protocolos de señalización ATM como PNNI. La Figura 2.19 muestra el modelo propuesto.

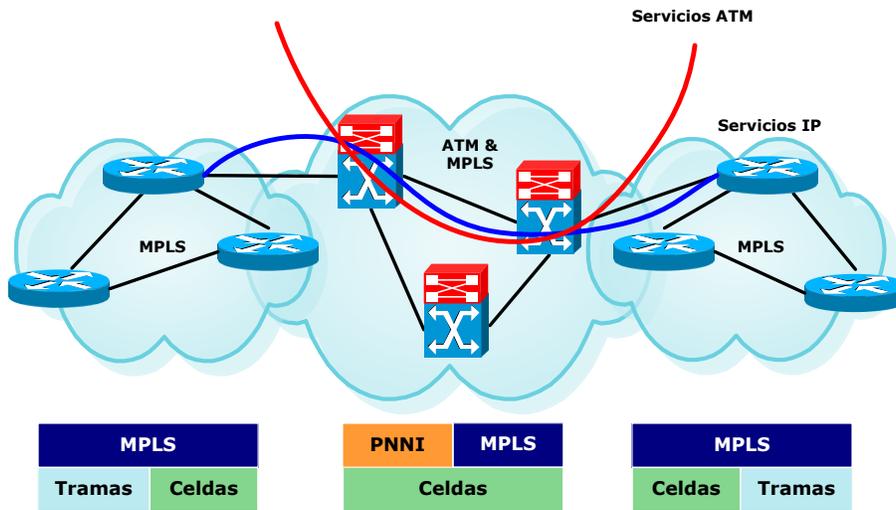


Figura 2.19. Modelo "Ships in the Night"

Este modelo busca ofrecer nuevos servicios IP de manera fácil y ágil conservando la infraestructura ATM, manteniendo activos los servicios que se prestan en la actualidad y evitando los problemas de escalabilidad del modelo superpuesto.

2.4.3 Modelo de Convergencia Multiservicio

El modelo de *Convergencia Multiservicio* propone crear un nuevo núcleo de red basado en enrutadores IP/MPLS, desplazando los *switches* ATM a la red de borde, como se muestra en la Figura 2.20.

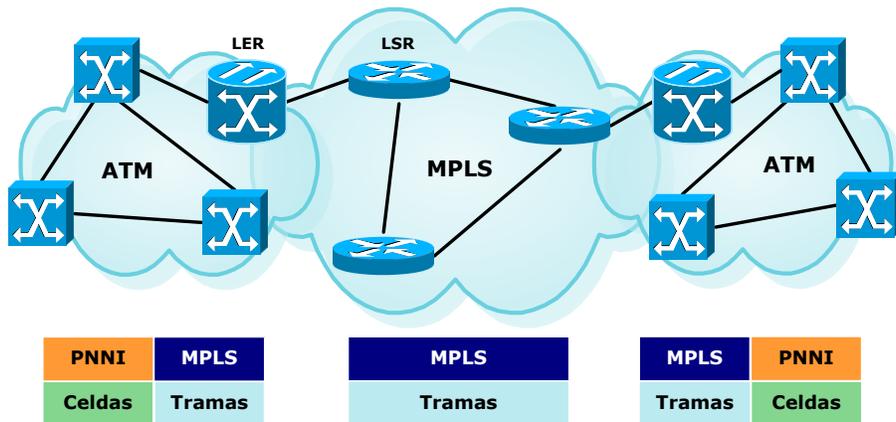


Figura 2.20. Modelo de Convergencia Multiservicio

Con esta red se facilita la prestación de nuevos servicios IP al comportarse el núcleo como una red de capa 3, independiente de la tecnología de capa 2 que utilice el cliente y otros equipos de la red. Adicionalmente, el transporte a altas velocidades en el núcleo de la red es realizado por enrutadores IP mediante la tecnología MPLS, en lugar de hacerlo mediante *switches* ATM. Esto mejora el desempeño de la red ya que se eliminan las limitaciones que producía el transporte de IP sobre ATM en el núcleo de la red.

La nueva red también permite la prestación de los servicios de conectividad de capa 2 que se ofrecen en la actualidad (*ATM* y *Frame Relay*). Para soportar estos servicios legados sobre una infraestructura de capa 3, MPLS permite el transporte transparente de tráfico de capa 2 como Ethernet, ATM, *Frame Relay* y PPP, a través de la tecnología de *emulación de pseudo-wires de borde a borde (PWE3 - pseudo wire emulation edge-to-edge)* que debe ser implementada en los equipos LER. Este mecanismo permite ofrecer servicios de capa 2 sobre una infraestructura de red de capa 3 ofreciendo líneas dedicadas virtuales con las funcionalidades de calidad de servicio e ingeniería de tráfico de MPLS.

La Figura 2.21 muestra el modelo de referencia de PWE3. En ella se observa que los dos enrutadores de borde del proveedor PE1 y PE2 (PE: *Provider Edge Router*) deben establecer uno o más PWs para permitir la creación de un servicio emulado extremo a extremo entre los enrutadores de borde del cliente CE1 y CE2 (CE: *Customer Edge Router*) a través de túneles de la *red conmutada de paquetes (PSN: Packet Switched Network)*. Desde la perspectiva del cliente, el PW se comporta como un enlace o circuito dedicado.

Actualmente diferentes fabricantes y organismos de estandarización han propuesto varios métodos para el encapsulado y transporte de PDUs de protocolos de capa 2 sobre MPLS, además de funciones de *interworking* que permiten la traducción entre diferentes tipos de encapsulado de capa 2. Estos métodos están siendo estudiados por la IETF, pero hasta el momento no existe una estandarización.

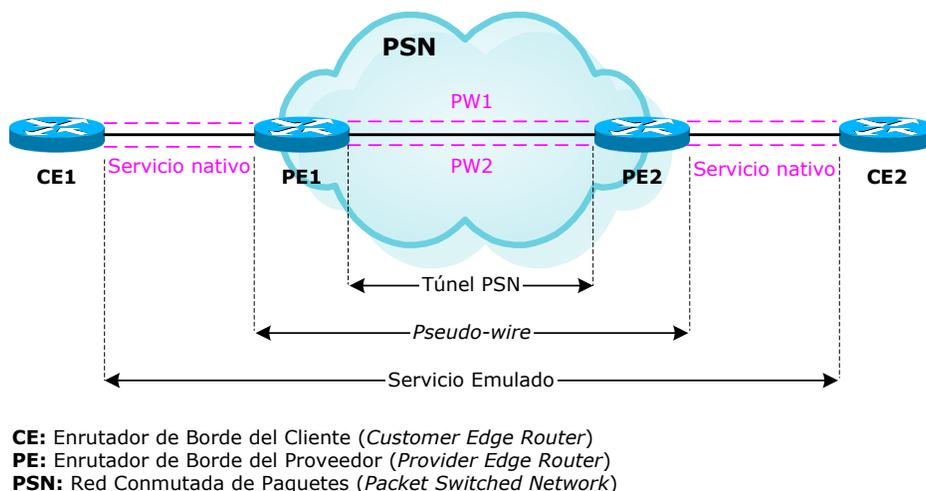


Figura 2.21. Modelo de referencia de PWE3

A través de la función de *interworking* es posible conectar enlaces de capa 2 de un tipo de protocolo con cualquier otro protocolo de capa 2, por ejemplo, en un enlace punto a punto un cliente podrá tener un enlace *Frame Relay* en una oficina y un enlace Ethernet en la otra y las dos oficinas se interconectarán de forma transparente. La red MPLS se encarga de transformar el paquete de un tipo de protocolo a otro, manteniendo de forma congruente las características y siendo esto transparente para los equipos de los usuarios.

La falta de estandarización se ha convertido en una limitante de la interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. Se espera que para el año 2005 aparezcan estándares al respecto que permitan integrar las redes de capa 2 como G.SHDSL, MetroEthernet, ATM/FR y su interoperabilidad a través de MPLS.

Observación a los modelos de implementación de MPLS

Cada uno de los modelos de implementación de MPLS tiene ventajas y desventajas para el operador de red. Para comprobar la viabilidad de la implementación de los modelos, se debe realizar un estudio a sus principales características a través del análisis de criterios de evaluación que permitan determinar el modelo más conveniente para un operador nacional de servicios de valor agregado de acuerdo con las características de sus redes.

3. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MPLS SOBRE LA RED DEL OPERADOR NACIONAL

Con el fin de seleccionar el modelo de implementación de MPLS más acertado de acuerdo a las necesidades del operador nacional de servicios de valor agregado, se han definido criterios de evaluación cuantitativos y cualitativos que permiten valorar el comportamiento de los modelos descritos. Para este proyecto, la empresa *Cisco Systems de Colombia* ha proporcionado un laboratorio de redes en la ciudad de Bogotá para la realización de las pruebas de evaluación.

3.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

En el momento de estudiar una red de telecomunicaciones se deben considerar criterios que permitan valorar diferentes fenómenos que ocurren en la red y diversos parámetros que permitan medir su eficiencia y desempeño. Para ello, se definieron tres criterios cuantitativos que pueden ser medidos en un momento dado para observar el comportamiento de la red, y cuatro criterios cualitativos que corresponden a apreciaciones importantes que permiten comprobar la eficiencia, escalabilidad, robustez y facilidad en su configuración. A continuación se explican los criterios seleccionados para evaluar los modelos de implementación de MPLS sobre la red estándar del operador nacional.

3.1.1 Criterios cuantitativos

Existen diferentes fenómenos que afectan la calidad de la red y los servicios, como: pérdida de paquetes, retardo promedio y *jitter*, denominados *criterios cuantitativos*. Estos parámetros pueden ser medidos a través de herramientas hardware o software. En el caso particular se utilizaron herramientas software disponibles en Internet.

De acuerdo con la recomendación Y.1561 *Parámetros de Desempeño y Disponibilidad de redes MPLS* de la ITU-T, para este proyecto se definieron los siguientes parámetros de desempeño de una red de telecomunicaciones.

- **Retardo promedio**

El retardo corresponde al tiempo total que transcurre desde la transmisión de un paquete en el sitio de origen hasta su recepción en el sitio de destino. Este tiempo puede medirse en un solo sentido (*one-way delay*) o en el trayecto completo (*round-trip time*).

Para calcular el retardo de un paquete en una red deben tenerse en cuenta tres factores básicos: *tiempo de propagación*, *tiempo de transmisión* y *tiempo de procesamiento*, así:

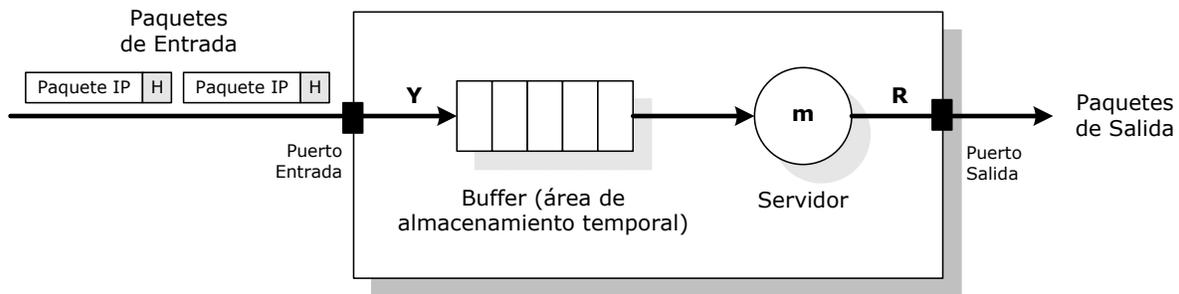
$$Retardo(T) = T_{PROPAGACIÓN} + T_{TRANSMISIÓN} + T_{PROCESAMIENTO}$$

El tiempo de propagación ($T_{PROPAGACIÓN}$) corresponde al tiempo que se demora la señal viajando a través del medio de transmisión (cobre, fibra, radio). Normalmente se considera que la señal viaja a una velocidad de 2×10^8 metros/segundo.

El tiempo de transmisión ($T_{TRANSMISIÓN}$) depende de la capacidad del enlace y del tamaño del paquete transmitido. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{TRANSMISIÓN} = \frac{\text{Tamaño paquete (K)}}{\text{Capacidad enlace (R)}}$$

Finalmente, el tiempo de procesamiento ($T_{PROCESAMIENTO}$) corresponde al tiempo que el paquete permanece en cada dispositivo (nodo) desde que llega a un puerto de entrada hasta que se entrega a un puerto de salida para dirigirlo hacia el siguiente nodo. El tiempo de procesamiento comprende el tiempo de permanencia del paquete en cola (buffer) y el tiempo que se demora el equipo (módulo servidor) en atenderlo aplicando alguna política de servicio, para enviarlo al puerto de salida correspondiente, como se muestra en la Figura 3.1.



Y: Tasa promedio de llegada de paquetes (paquetes/s)
m: Tasa de servicio (paquetes/s)
R: Capacidad del enlace de salida (bps)

Figura 3.1. Tiempo de procesamiento de un paquete en un nodo

El $T_{PROCESAMIENTO}$ se calcula mediante la ecuación:

$$T_{PROCESAMIENTO}(seg) = \frac{1}{m - Y}$$

donde,

$m = \frac{R(bps)}{K(bits/paquete)}$: corresponde a la tasa de servicio

Y: es la tasa promedio de llegada de paquetes al nodo

R: capacidad del enlace de salida

K: tamaño del paquete transmitido (bits/paquete)

El retardo promedio determina el desempeño de una red y corresponde al valor medio del retardo de todos los paquetes de un flujo de datos. Un valor alto de retardo en una red puede ocasionar problemas para la prestación de servicios con alto grado de sensibilidad como voz y video.

Posibles causas:

- Grandes distancias (tiempo de propagación de la señal).
- Enlaces de baja capacidad.
- Largas colas en dispositivos como *switches* o enrutadores.
- Envío de paquetes a baja velocidad.
- Aplicación de políticas de calidad de servicio.
- Utilización de *Firewalls*.

- **Jitter promedio**

El *jitter* se define como la variación abrupta e indeseada en el tiempo de llegada entre paquetes de un flujo de datos sobre una red. Se calcula como la diferencia entre el retardo de un paquete y el retardo del paquete previo. El *jitter* promedio corresponde al valor medio obtenido entre el *jitter* de cada uno de los paquetes.

Este fenómeno es ocasionado por congestión en la red, cambios en las rutas o variaciones en la temporización y puede ocasionar efectos no deseados en comunicaciones de audio y video, o la pérdida de datos. Por esta razón, se convierte en un parámetro importante de evaluación en una red de telecomunicaciones.

Posibles causas:

- Retardo en el acceso al medio.
- Cambios en la topología de capa 2.
- Cambios de enrutamiento.
- Procesamiento adicional por paquete.
- Colas de tráfico.
- Balanceo de carga entre múltiples enlaces, cuando son utilizados para políticas de QoS.
- Fragmentación IP (imposibilidad de reensamblar el paquete aunque todos sus fragmentos se encuentren en recepción).
- Utilización de *Firewalls*.
- Intercepción de paquetes con propósitos de estudio del tráfico o captura de información.

- **Porcentaje de paquetes perdidos**

El factor de pérdida de paquetes consiste en la desaparición de uno o varios paquetes que han sido transmitidos o debían ser transmitidos en un flujo de datos. El porcentaje de paquetes perdidos en una red permite identificar problemas en el proceso de recepción de paquetes o en la capacidad de enlaces y equipos.

Posibles causas:

- Ruido en la línea de transmisión.
- Cables o conectores defectuosos.
- Colisiones en medios compartidos.
- Inestabilidad en la sincronización.

- Fallas de hardware.
- Tiempos de convergencia de los protocolos de enrutamiento.
- Mal reensamblaje de paquetes por parte de herramientas software.

Los valores de los criterios de evaluación medidos sobre cada uno de los modelos de implementación de MPLS deben ser comparados con los valores típicos para la prestación de diferentes tipos de servicios sobre redes de telecomunicaciones, establecidos por organismos de estandarización como ITU-T. Estos límites están descritos en las recomendaciones Y.1540, Y.1541 y G.114 de la ITU-T y se presentan en la Tabla 3.1.

PARÁMETRO	VALOR TÍPICO
Retardo Promedio	100 ms
Variación del Retardo (<i>Jitter</i>)	50 ms
Pérdida de Paquetes	1×10^{-3} (0,1%)

Tabla 3.1. Parámetros mínimos para servicios de telecomunicaciones (ITU-T)

3.1.2 Criterios cualitativos

Los *criterios cualitativos* están dados por aspectos que permiten determinar características adicionales de la red como eficiencia, capacidad de crecimiento, tipo de topología, tolerancia a fallas y facilidad de configuración, operación y mantenimiento. La calificación de estos criterios estará dada por el estudio teórico de cada uno de los modelos y la experiencia obtenida durante la realización de las pruebas en el laboratorio.

- **Escalabilidad en la capacidad de las interfaces del núcleo de red**

Debido a los altos requerimientos en ancho de banda de los nuevos servicios IP y al incremento de su demanda, es necesario que la red del operador tenga la posibilidad de crecer en capacidad de procesamiento y velocidad de sus interfaces. Este crecimiento afecta principalmente al núcleo, pues es allí donde confluye todo el tráfico de la red. Por esto, se considera necesario evaluar la capacidad de crecimiento de la velocidad de las interfaces físicas de los equipos del núcleo para los diferentes modelos de implementación de MPLS.

- **Uso efectivo del ancho de banda del núcleo de red**

Con el fin de realizar un máximo aprovechamiento del ancho de banda de una red, se deben utilizar tecnologías que eviten el consumo excesivo de ancho de banda por sobre encabezados. Es por esto que se debe analizar la tecnología empleada en el núcleo de red para cada uno de los modelos de implementación de MPLS, con el fin de determinar qué modelo realiza un mayor aprovechamiento del ancho de banda disponible.

- **Topología de red IP simple**

Una de las ventajas que debe ofrecer una red al operador de servicios, es la posibilidad de configurar una topología de red IP simple, que evite la necesidad de crear múltiples conexiones entre los nodos, además de adyacencias de enrutamiento entre todos los enrutadores. Esto permite evaluar la complejidad de una red y por tanto su facilidad de configuración, operación y mantenimiento para la prestación de servicios IP.

- **Menor tiempo de convergencia ante fallas en un enlace**

Un parámetro importante al evaluar la eficiencia de una red es el tiempo de recuperación ante fallas en un enlace o en un nodo. En el funcionamiento de MPLS existen modos de asignación, distribución y retención de etiquetas que cuentan con características que mejoran el tiempo de convergencia o la carga de procesamiento de los equipos. A través del análisis de dichas características, se evalúa el menor tiempo de convergencia ante fallas entre los modelos de implementación de MPLS.

3.2 GENERACIÓN DE TRÁFICO Y HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN

Para la realización de pruebas de laboratorio es necesario generar tráfico de datos que simule la carga de información real en una red. Para esta tarea se deben tener en cuenta parámetros como el tipo de protocolo de transporte (protocolo de control de transmisión TCP: *Transmission Control Protocol* o protocolo de datagramas de usuario UDP: *User Datagram Protocol*), tamaño del paquete y tiempo entre transmisión de paquetes (*Inter-Departure Time*). Estos dos últimos parámetros se pueden variar de acuerdo a distribuciones probabilísticas, dependiendo del tipo de tráfico que se desee generar (datos, voz o aplicaciones multimedia).

Considerando los tipos de tráfico más comunes en una red de telecomunicaciones, las pruebas de laboratorio se realizan generando tráfico de voz y tráfico de datos de

Internet, con protocolos de transporte TCP y UDP. El tamaño del paquete se mantiene constante mientras se varía el tiempo entre transmisión de paquetes.

Debido a que la transmisión de voz y las aplicaciones multimedia generan un flujo continuo de bits, se puede simular a través de una distribución constante que mantiene un tiempo fijo entre la transmisión de paquetes.

La simulación del tráfico de Internet ha sido motivo de investigación debido a su comportamiento variable y su dependencia del tipo de aplicación. Estos estudios han llevado a concluir que su comportamiento presenta un fenómeno matemático llamado *auto-similitud*, que desde el punto de vista de la ingeniería significa que el tráfico presenta propiedades estadísticas similares en un rango de escalas de tiempo: milisegundos, segundos, minutos, horas, inclusive días o semanas. Cuando el tráfico tiene un gran rango de dependencia, se puede describir en términos matemáticos por medio de una distribución *heavy-tailed*.

Una distribución se considera *heavy-tailed* si:

$$P[X < x] \approx x^{-\alpha} \quad \text{cuando } x \text{ tiende a infinito y } 0 < \alpha < 2$$

Una de las distribuciones *heavy-tailed* más simples y que mejor representa el comportamiento del tráfico de datos en una red es la distribución de *Pareto*.

Distribución de Pareto:

Sea x una variable aleatoria con función de distribución de Pareto, la cual para este proyecto se asume como el tiempo entre paquetes (en milisegundos). Su función de densidad está dada por la ecuación:

$$f(x) = \frac{a * b^a}{x^{a+1}}, \text{ para } x \geq b, a > 0$$

donde,

b : se denomina factor de escala y representa el valor mínimo que puede tomar la variable x , es decir, el tiempo mínimo entre paquetes.

α : corresponde al factor de forma de la función e incide sobre la distribución de probabilidades para diferentes valores de x . Entre mayor sea el valor de α , la función $f(x)$ se aproxima más rápido a cero, lo que implica una concentración mayor de probabilidades para los valores de x cercanos a b . En relación con el tráfico de datos, entre mayor sea el parámetro α , tendrá mayor probabilidad de ocurrencia un menor tiempo entre paquetes, siendo como mínimo un tiempo equivalente a b .

La función de probabilidad está dada por:

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - \left(\frac{b}{x}\right)^\alpha$$

En la Figura 3.2 se observa la gráfica para la función de densidad y la función de probabilidad de la distribución de Pareto.

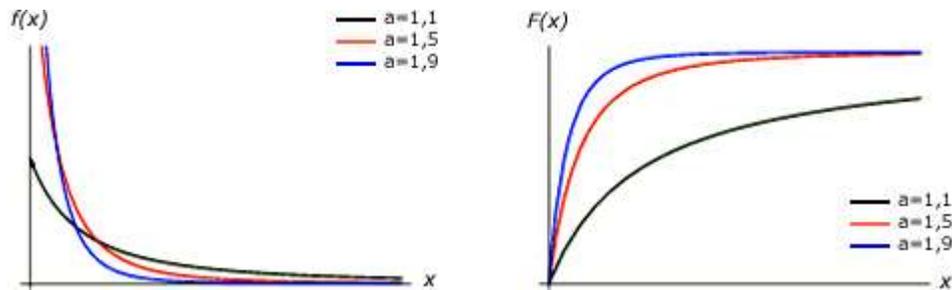


Figura 3.2. Función de densidad $f(x)$ y distribución $F(x)$ de Pareto

El valor esperado $E(x)$ y la varianza $V(x)$ de la distribución de Pareto son:

$$E(x) = \mu = \frac{ab}{a-1} \quad \text{que corresponde al tiempo promedio entre paquetes}$$

$$V(x) = \sigma^2 = \frac{ab^2}{(a-1)^2 * (a-2)} \quad \text{que se relaciona con el rango de valores de } x$$

Para simular tráfico *auto-similar*, se considera $1 < \alpha < 2$.

Para la realización de las pruebas se utilizaron dos herramientas software: el D-ITG (*Generador de Tráfico Distribuido de Internet*)⁴ que utiliza, entre muchas otras, la distribución de Pareto para la generación de tráfico UDP y TCP. Durante la utilización de esta herramienta, los parámetros α y β de la distribución de Pareto tomaron los valores de 1,5 y 2 respectivamente, cumpliendo con los límites definidos para esta distribución. La otra herramienta corresponde al analizador de paquetes *ANALYZER*, que requiere la librería de captura de paquetes para Windows *WINPCAP* y permite graficar el tráfico que cursa a través de una interfaz, tomando como único parámetro de entrada el tiempo entre muestras, que para este proyecto se tomó de un segundo.

En el Anexo A: *Herramientas de evaluación y generación de tráfico de red* se explica con mayor profundidad el funcionamiento de estas herramientas.

3.3 MRON PARA LABORATORIO Y PRUEBAS DE MPLS

Dado que la red objeto de este proyecto es la red del operador nacional generalizada a través del MRON, es necesario diseñar las pruebas de laboratorio sobre ella. Sin embargo, debido a sus dimensiones se crea una versión reducida para laboratorio que mantiene las mismas características del MRON original. El MRON versión laboratorio se muestra en la Figura 3.3.

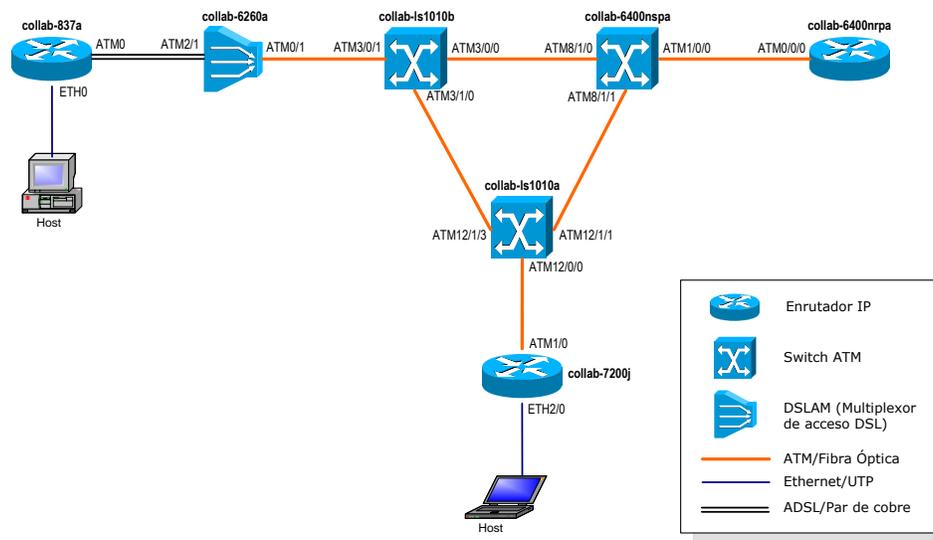


Figura 3.3. MRON versión laboratorio

⁴ Università' degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Informatica e Sistemistica

La nomenclatura utilizada en los diagramas para las interfaces físicas de cada uno de los equipos de laboratorio varía ligeramente, pero mantiene una estructura similar:

Interfaz [ATM|ETH|FE|GE] [slot]/[tarjeta]/[puerto].[subinterfaz]

En ciertos casos pueden omitirse algunos de los parámetros (slot, tarjeta, puerto) de acuerdo al tamaño del equipo y la disposición de sus interfaces. El último parámetro se emplea cuando se definen subinterfaces lógicas dentro de una interfaz física. Algunos ejemplos que pueden encontrarse en los diagramas son:

<i>ETH 0, ATM 0</i>	Representa el número del puerto
<i>ATM 0/1, ETH 2/0, GE 1/0, FE 6/0</i>	Representa slot/puerto
<i>ATM 8/1/0</i>	Representa tarjeta/slot/puerto
<i>ATM 3/0/0.1, FE 6/0.2, GE 1/0.3</i>	Representa tarjeta/slot/puerto/subinterfaz

A continuación se explican las pruebas realizadas con cada uno de los modelos de implementación de MPLS. Teniendo en cuenta la importancia de evaluar el comportamiento del modelo de IP/ATM, se inició el proceso de pruebas implementando este modelo sobre el MRON versión laboratorio para incluir sus resultados en el análisis de cada modelo.

3.3.1 Modelo IP/ATM

La implementación del modelo IP/ATM se formula a partir del modelo original del MRON versión laboratorio, ya que en este caso el operador no requiere ningún equipo adicional para ofrecer servicios IP sobre su red ATM existente.

Para la implementación de este modelo se requiere la configuración de PVCs entre cada uno de los enrutadores de la red de borde a través de la red ATM, creando una malla completa de conexiones punto a punto entre ellos con direccionamiento IP perteneciente a la misma subred.

Como se observa en la Figura 3.4, las conexiones punto a punto entre el enrutador ADSL del cliente (collab-837a) y cada enrutador de agregación (collab-7200j y collab-6400nrpa) se realizan a través de PVCs, cada uno con una dirección IP perteneciente a

una subred con el destino. Los *switches* ATM del núcleo de la red (collab-ls1010b, collab-6400nsipa y collab-ls1010a) se encargan de la conmutación de estos PVCs para conectarlos con el enrutador de destino. En la gráfica, cada conexión punto a punto de los PVCs se identifica con un color diferente (azul, violeta y verde).

En las redes de los clientes se utilizó un tipo de direccionamiento privado (10.8.X.0/24) y para el anuncio de estas redes se utilizaron rutas estáticas en los enrutadores de la red de borde.

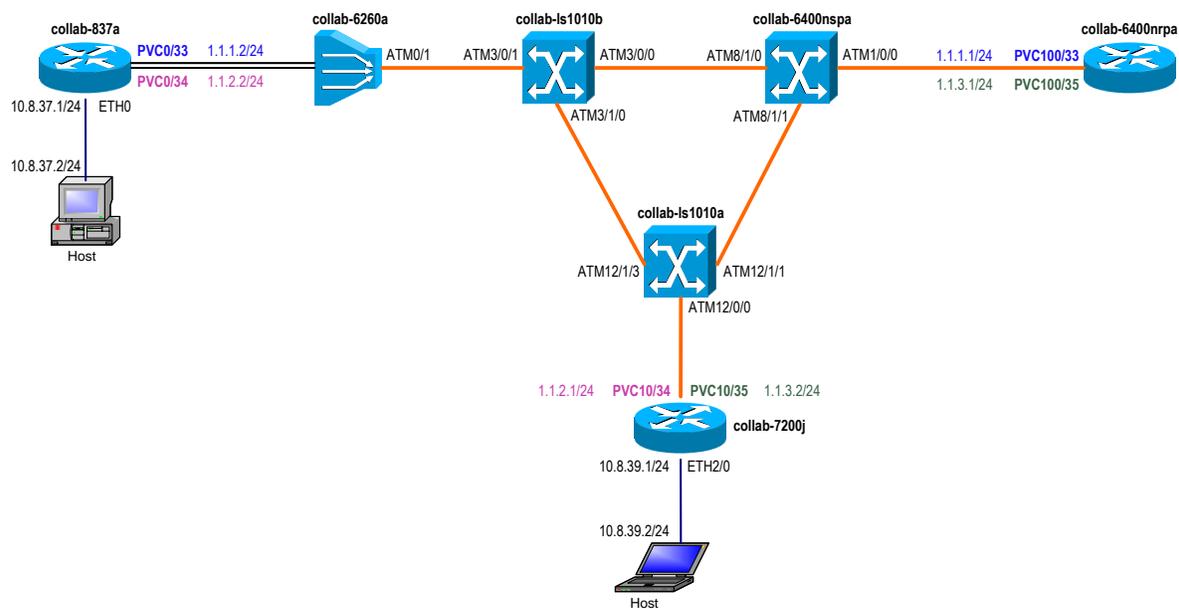


Figura 3.4. Modelo IP/ATM versión laboratorio

- **Observaciones**

Se considera una ventaja el hecho de no requerir inversión adicional en equipos ni modificaciones en la red para ofrecer servicios IP básicos sobre la infraestructura ATM existente. Sin embargo, a medida que crece la demanda de servicios IP y éstos incrementan sus requerimientos de ancho de banda, el modelo presenta serios problemas de escalabilidad, como se mencionó en el segundo capítulo de este documento.

La implementación del modelo IP/ATM presenta un alto grado de complejidad en la configuración, debido a la necesidad de establecer manualmente una malla completa de PVCs, al igual que adyacencias de enrutamiento entre todos los enrutadores de la

red de borde. A medida que crece el número de estos enrutadores la administración y gestión de la red se hacen inmanejables.

En un modelo IP/ATM la prestación de servicios IP tiene la limitación de no soportar duplicidad de direccionamiento IP de los clientes por tratarse de un solo contexto de enrutamiento en toda la red. La prestación de servicios de capa 2 no presenta ningún inconveniente ya que el proveedor de servicios no interviene en el direccionamiento ni en el enrutamiento del cliente.

3.3.2 Modelo Superpuesto

Entre los equipos de la red de un operador nacional es posible encontrar algunos con capacidad de soportar características de MPLS, aunque la gran mayoría no cuenta con esta característica. Este modelo representa dicha situación. El multiplexor de acceso DSL (DSLAM: *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) collab-6260a no tiene la capacidad de soportar la implementación de MPLS modo trama, por lo que fue necesario agregar un nuevo equipo entre éste y el *switch* ATM del núcleo de la red (collab-ls1010b).

Debido a la falta de interfaces físicas ópticas STM-1 disponibles en el laboratorio, se utilizó una única conexión física entre el nuevo enrutador (collab-7507a) y el *switch* ATM collab-ls1010b, como se muestra en la Figura 3.5.

Mediante una configuración adecuada de PVCs se creó una topología lógica en la cual se ubica el nuevo enrutador entre el DSLAM y el *switch* ATM del núcleo, como se muestra en la Figura 3.6.

Para lograr esto se creó un PVC entre el DSLAM y el enrutador (collab-7507a) a través del *switch* ATM del núcleo de red. Adicionalmente, se creó otro PVC entre el enrutador y el *switch* ATM. De esta forma se obtuvo la configuración deseada para el modelo Superpuesto.

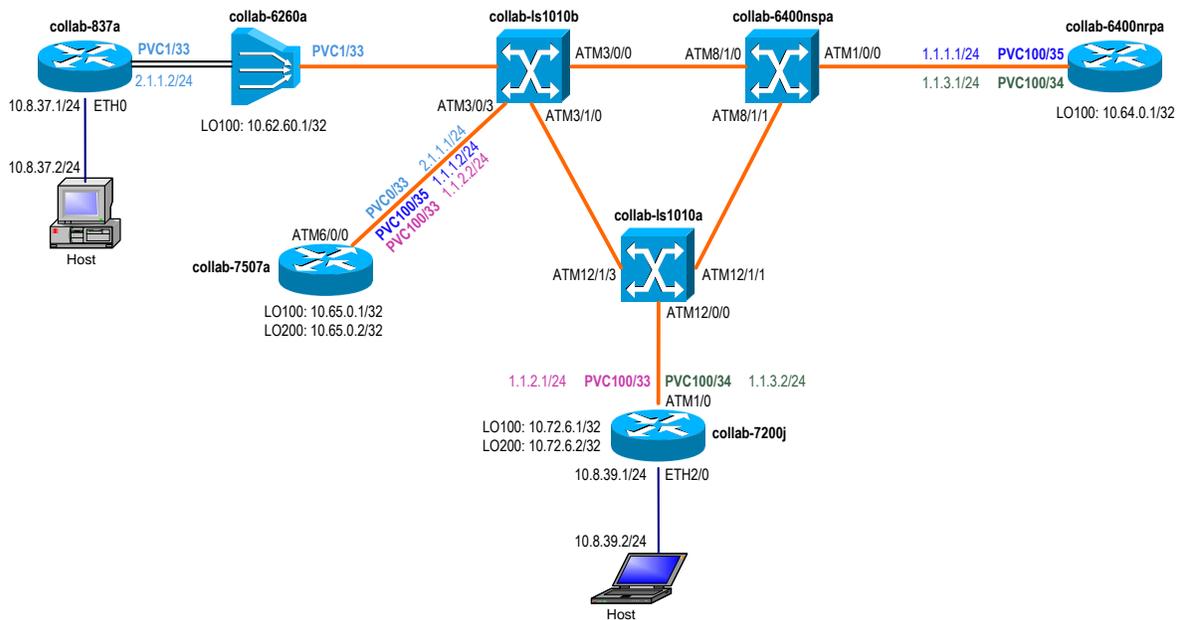


Figura 3.5. Modelo Superpuerto (físico) versión laboratorio

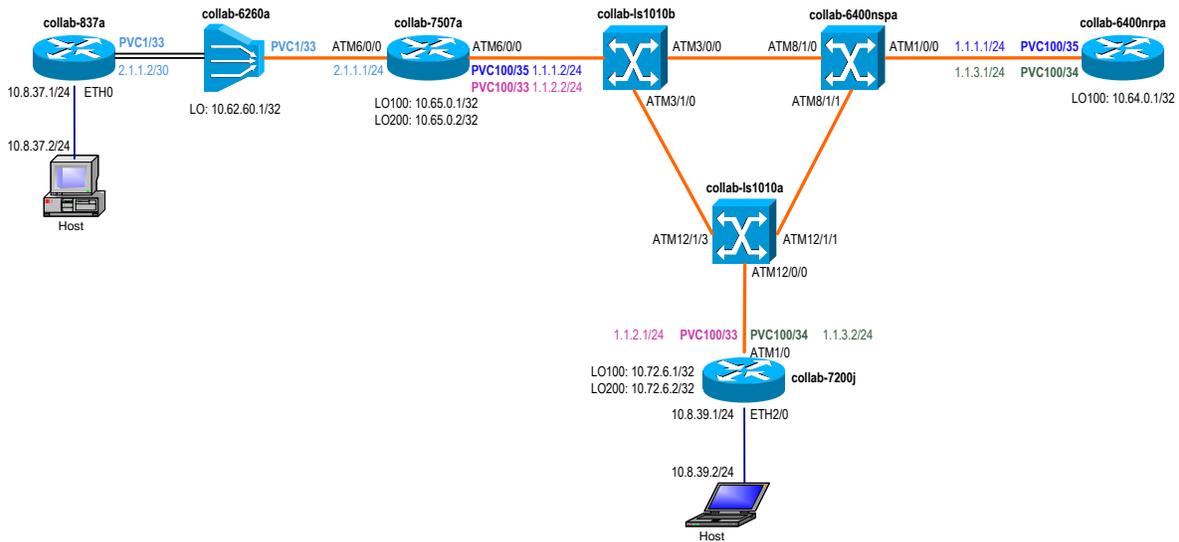


Figura 3.6. Modelo Superpuerto (lógico) versión laboratorio

En este caso, el PVC creado en el enrutador del cliente ADSL (collab-837a) es transportado por el DSLAM (collab-6260a) hasta el nuevo enrutador de la red de borde, en donde finaliza y se analiza la información a nivel de IP. Para la conexión de los tres enrutadores de borde también es necesario configurar PVCs entre cada uno de ellos a través de los switches ATM del núcleo de red, definiendo una red punto a punto entre ellos, similar al modelo anterior.

Inicialmente se trabajó bajo un escenario IP puro, configurando el protocolo de enrutamiento OSPF (*Open Shortest Path First*) entre los enrutadores de la red de borde y asegurando conexión entre los equipos de cliente. Posteriormente se habilitó la característica de MPLS modo trama y el protocolo de distribución de etiquetas LDP en los tres enrutadores de la red de borde (collab-7507a, collab-7200j y collab-6400nrpa). Para verificar el correcto funcionamiento se analizaron las LIBs de cada enrutador, en donde se observa la asignación de diferentes etiquetas para cada subred anunciada. Adicionalmente se comprobó la conectividad extremo a extremo mediante el comando *ping*.

En la Tabla 3.2 se observa el comportamiento de la asignación de etiquetas del enrutador collab-7200j en el modelo Superpuesto. La primera columna muestra las etiquetas con las que un paquete etiquetado entrante puede llegar al enrutador. La segunda columna corresponde a la operación que el enrutador debe ejecutar sobre la etiqueta superior de la pila de etiquetas del paquete entrante. Cuando el enrutador es el penúltimo del trayecto hacia la red de destino (tercera columna), le corresponde realizar la función *Pop Tag* que consiste en retirar la etiqueta superior de la pila de etiquetas del paquete y enviarlo a la red de destino a través de la interfaz de salida correspondiente (cuarta columna). Este proceso se denomina *Penultimate Hop-Poping*. En el caso en que el enrutador deba ejecutar una conmutación de etiquetas, en la segunda columna se lista la etiqueta por la cual debe ser cambiada la etiqueta superior del paquete etiquetado entrante.

Etiqueta Local	Etiqueta Saliente	Prefijo o Id de Túnel	Interfaz de Salida	Siguiente Salto
16	PopTag	1.1.1.0/24	ATM1/0.34	point2point
	PopTag	1.1.1.0/24	ATM1/0.33	point2point
17	PopTag	10.64.0.1/32	ATM1/0.34	point2point
19	PopTag	10.65.0.1/32	ATM1/0.33	point2point
20	PopTag	10.65.0.2/32	ATM1/0.33	point2point
21	17	10.8.37.0/24	ATM1/0.33	point2point

Tabla 3.2. Base de información de etiquetas de collab-7200j – MPLS modo trama

En este modelo el grupo de paquetes etiquetados que tienen en común el enrutador de siguiente salto (etiquetas 19, 20, 21 de la Tabla 3.2), son enviados por el mismo PVC a través de la subinterfaz asociada (para el caso ATM1/0.33).

- **Observaciones**

Para implementar MPLS en la red existente de un operador, es posible aprovechar algunos equipos actuales que se les puede activar esta característica. En otros casos se requiere la adquisición de nuevos equipos con características superiores, capaces de soportar todas las bondades adicionales que ofrece la tecnología MPLS.

Este modelo mantiene los problemas de escalabilidad del modelo IP/ATM debido a que la conexión entre los enrutadores se hace a través de enlaces punto a punto y la adición de un nuevo enrutador a la red presenta un alto grado de complejidad de configuración. Estas conexiones entre enrutadores se realizan a través de un único PVC, lo que permite que todo el tráfico, sin importar de qué tipo, sea enviado por dicho PVC. Lo anterior implica que en el caso de este modelo, en donde MPLS se ejecuta únicamente en los enrutadores de la red de borde, todos los paquetes etiquetados son enviados a través del mismo PVC de conexión.

La adición de MPLS a la red permite la prestación de nuevos servicios IP como VPNs de capa 3, con las cuales es posible crear diferentes contextos de enrutamiento permitiendo soportar duplicidad de direccionamiento de los clientes.

3.3.3 Modelo “*Ships in the Night*”

En la configuración de este modelo no fue necesaria la adición de un enrutador entre el DSLAM y el *switch* ATM del núcleo de red debido a que el DSLAM (collab-6260a) soportaba la característica de MPLS en modo celda.

Debido a que este modelo se basa en el funcionamiento de MPLS en modo celda, en donde la etiqueta MPLS es mapeada a un VPI/VCI para ser entendida y conmutada por los *switches* ATM, se requería que estos equipos contaran con la característica de MPLS. Para ello se utiliza en la mayoría de los casos controladores de conmutación de etiquetas (LSC: *Label Switching Controller*) instalados en los *switches* ATM. Sin embargo, para la implementación de este modelo se presentó el inconveniente de no contar en el laboratorio con estos controladores y por lo tanto no era posible habilitar la característica de MPLS en los *switches* ATM.

Partiendo del principio de funcionamiento de MPLS modo celda, es decir, de la conmutación de VPI/VCI como etiqueta del paquete fragmentado en celdas, se establecieron VPs entre los enrutadores de la red de borde, configurados en MPLS modo celda, a través de los *switches* ATM del núcleo de la red. De esta manera, los VPI/VCI que se asignaran a cada FEC pertenecerían a dicho VP.

La diferencia entre utilizar MPLS modo celda en su concepto original y utilizar el modelo de configuración de VPs radica en el proceso de asignación de VPI/VCI, pues en el primer caso se utiliza un protocolo de distribución de etiquetas de MPLS como LDP, mientras que en el segundo se utilizan los protocolos de señalización de ATM. El diagrama de la red puede observarse en la Figura 3.7.

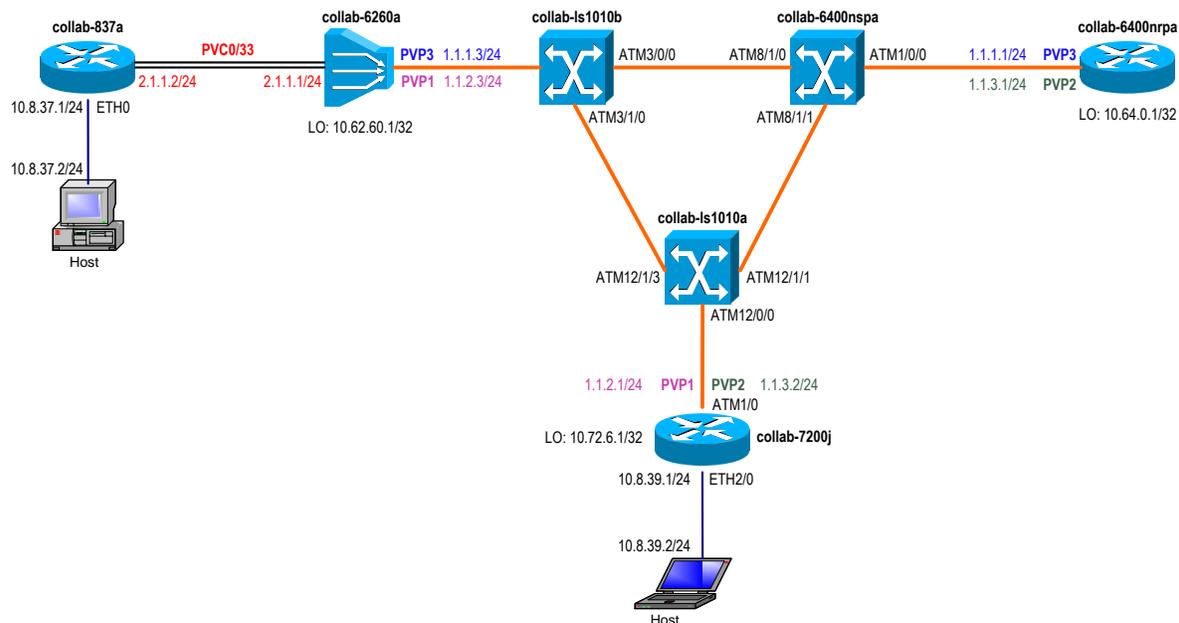


Figura 3.7. Modelo "Ships in the Night" versión laboratorio

Después de crear los trayectos virtuales permanentes (PVP: *Permanent Virtual Path*) entre cada uno de los enrutadores de la red de borde, se configuró el protocolo de enrutamiento OSPF entre ellos y se verificó la conectividad IP a través del comando *ping*. Seguidamente se habilitó MPLS modo celda y LDP en cada enrutador, comprobando el correcto funcionamiento mediante el análisis de las tablas de etiquetas en cada uno.

En la Tabla 3.3 se observa la asignación de etiquetas que realiza el enrutador collab-7200j. Se muestra cómo la etiqueta saliente corresponde a un VPI/VCI diferente por cada paquete etiquetado entrante. Debido al funcionamiento de MPLS modo celda, se observa que contrario al modelo anterior, este modelo realiza una mayor utilización de recursos VPI/VCI de las interfaces ATM.

Etiqueta Local	Etiqueta Saliente	Prefijo o Id de Túnel	Interfaz de Salida	Siguiente Salto
18	2/33	10.64.0.1/32	ATM1/0.2	point2point
20	1/33	10.62.60.1/32	ATM1/0.1	point2point
22	1/37	1.1.1.0/24	ATM1/0.1	point2point
	2/35	1.1.1.0/24	ATM1/0.2	point2point
23	1/38	2.1.1.0/24	ATM1/0.1	point2point

Tabla 3.3. Base de información de etiquetas de collab-7200j – MPLS modo celda

- **Observaciones**

Este modelo integra las tecnologías IP y ATM a través de MPLS, brindando un mecanismo de prestación de servicios ATM tradicionales y nuevos servicios IP, transportados simultáneamente sobre la red ATM.

Comparado con el modelo anterior, se elimina la necesidad de configurar una malla completa de PVCs y adyacencias de enrutamiento, ya que los equipos ATM comienzan a hacer parte de la red IP. Al adicionar un nuevo enrutador a la red, únicamente se debe crear una conexión directa entre éste y algún *switch* ATM del núcleo.

No obstante, debido a la mayor utilización de VPIs/VCIIs que realiza MPLS en modo celda, puede llegar a generar grandes problemas de escalabilidad en la red en el momento en que el número de etiquetas asignadas se acerque al número de VPIs/VCIIs soportados por cada interfaz.

3.3.4 Modelo de Convergencia Multiservicio

Para la implementación de este modelo fue necesario adicionar enrutadores que no se encontraban en el modelo de red original. Los enrutadores debían contar con características de MPLS para conformar el nuevo núcleo de red del modelo de Convergencia Multiservicio. Uno de los enrutadores elegidos (collab-7200vxx) únicamente poseía una interfaz GigaEthernet, por lo que fue necesario configurar redes

de área local virtuales (VLAN: *Virtual Local Area Network*) para simular conexiones punto a punto entre los tres enrutadores que conforman el núcleo de la red, como se muestra en la Figura 3.8.

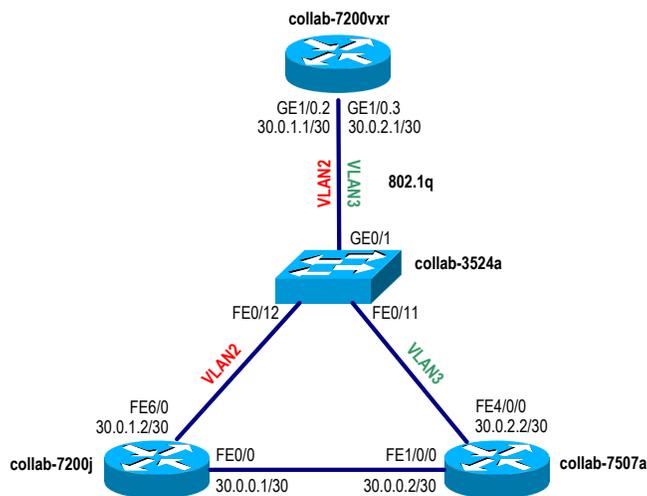


Figura 3.8. Modelo de Convergencia Multiservicio (físico) versión laboratorio

La representación lógica del modelo se muestra en la Figura 3.9: un núcleo de red basado en enrutadores IP/MPLS y los *switches* ATM existentes desplazados hacia la red de borde. La red de acceso ADSL representada por el DSLAM se mantuvo operativa para la conexión de los clientes.

El PVC creado en el cliente ADSL es conmutado por el DSLAM y por el *switch* ATM (collab-ls1010b) hasta el enrutador del núcleo (collab-7200j). En este punto se termina el PVC de ATM y se analiza el paquete IP para ser enrutado al siguiente nodo.

Después de configurar los PVCs entre los enrutadores de la red de borde y los enrutadores del núcleo de la red, se configuraron conexiones punto a punto entre estos últimos a través de interfaces FastEthernet. Seguidamente se configuró el protocolo de enrutamiento OSPF y se verificó que las redes de los clientes fueran anunciadas. Finalmente se configuró MPLS en los enrutadores del núcleo y se verificó conectividad extremo a extremo entre los clientes.

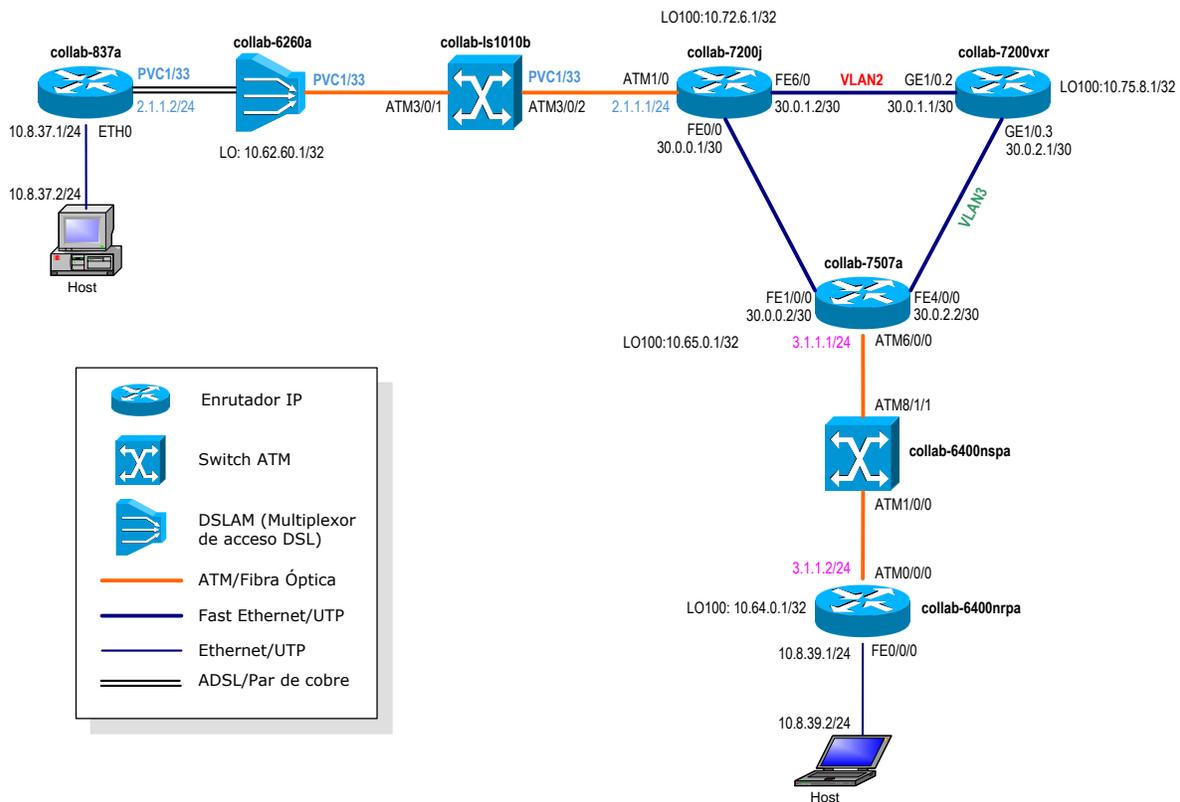


Figura 3.9. Modelo de Convergencia Multiservicio (lógico) versión laboratorio

Debe notarse que debido a limitaciones del laboratorio el nuevo núcleo de la red se interconectó a 100 Mbps (FastEthernet), por lo que las medidas de retardo en la red serán mayores que las obtenidas con los otros modelos. En una red real operativa, el núcleo de red es normalmente implementado con interfaces de paquetes sobre tecnologías ópticas sincrónicas como SONET o SDH denominadas interfaces POS (*Packet over Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*) con capacidad de 622 Mbps, GigaEthernet o superiores.

- **Observaciones**

El nuevo núcleo de red basado en enrutadores IP/MPLS facilita la prestación de servicios IP debido a la simplificación de la topología de red IP. Además, soporta los servicios tradicionales de capa 2 a través de la característica de emulación de *pseudo-wires*.

Al igual que en el modelo Superpuesto, mediante la implementación de VPNs de capa 3 es posible soportar duplicidad de direccionamiento de los clientes y, por tanto, ofrecer servicios IP de manera más sencilla.

Actualmente, diversos fabricantes y organismos de estandarización se encuentran desarrollando diferentes propuestas que permitan definir y estandarizar una arquitectura de red para el transporte de tráfico punto a punto de capas 1 y 2 sobre una red de paquetes. El objetivo principal de estas propuestas es definir un método de encapsulado y establecimiento de *pseudo-wires* a través de una red MPLS. Hasta el momento se han desarrollado una serie de documentos en revisión (*drafts*) que definen esquemas de encapsulado para tráfico Ethernet, *Frame Relay*, ATM y SONET/SDH (*Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*).

3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS MPLS

Después de haber realizado las pruebas de laboratorio y medido los parámetros cuantitativos que conforman los criterios de evaluación de la red, es necesario comparar los resultados obtenidos con el fin de identificar el modelo con el mejor comportamiento. A través de la experiencia en la implementación de los diferentes modelos MPLS, es posible calificar los criterios cualitativos en cada uno de ellos. El análisis a los resultados se presenta a continuación.

3.4.1 Análisis de criterios cuantitativos

En la Tabla 3.4 se consignan los resultados de cada uno de los modelos ante diferentes tipos de tráfico (voz y datos).

MODELO	DISTRIBUCIÓN DE TRÁFICO	Retardo Promedio (ms)	Jitter Promedio (ms)	Paquetes Perdidos (%)
IP/ATM	Constante (UDP)	20,351963	1,396569	0,00%
	Constante (TCP)	20,348897	2,312749	0,00%
	Pareto (UDP)	19,656942	7,853462	1,11%
	Pareto (TCP)	20,215957	6,800141	0,00%
Superpuesto	Constante (UDP)	29,496326	6,276415	0,00%
	Constante (TCP)	29,504785	1,637914	0,00%
	Pareto (UDP)	28,819276	8,789963	50,67%
	Pareto (TCP)	29,371040	6,369096	0,00%

Ships in the Night	Constante (UDP)	25,704592	4,273798	0,00%
	Constante (TCP)	25,715467	29,410206	0,00%
	Pareto (UDP)	25,318346	4,992353	2,08%
	Pareto (TCP)	25,567325	6,395624	0,00%
Convergencia Multiservicio	Constante (UDP)	34,677505	2,063809	0,00%
	Constante (TCP)	34,695918	36,793970	0,00%
	Pareto (UDP)	34,552265	6,076588	0,00%
	Pareto (TCP)	34,552265	6,076588	0,00%

Tabla 3.4. Resultados de los criterios cuantitativos

Con el fin de facilitar el análisis se grafican los datos obtenidos de los tipos de tráfico para los diferentes modelos de red. A continuación se analizan los resultados y se realizan algunas observaciones sobre el comportamiento obtenido.

A. Tráfico UDP y TCP con distribución Constante

- **Retardo promedio**

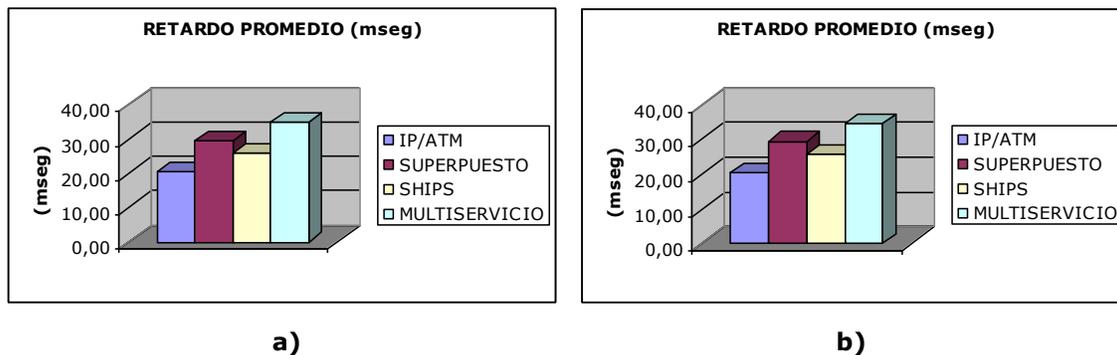


Figura 3.10. Retardo promedio para flujo Constante a) UDP y b) TCP

En las gráficas anteriores se observa que el modelo IP/ATM presenta el menor tiempo de retardo promedio para el flujo de datos. El modelo Superpuesto presenta un mayor retardo debido principalmente a la adición de un nuevo equipo y al procesamiento adicional que deben realizar los enrutadores de borde con la implementación de MPLS, como ejecutar el protocolo de distribución, la asignación y el análisis de las etiquetas.

Aunque el modelo "Ships in the Night" presenta mayor retardo que el modelo de IP/ATM por las características de MPLS, es menor en comparación con los otros dos modelos debido principalmente a que no adiciona nuevos equipos para la implementación del modelo.

Finalmente, el modelo de Convergencia Multiservicio presenta el mayor tiempo promedio de retardo debido a la adición de nuevos equipos y a la disminución en la capacidad de las troncales del núcleo de red de STM-1 (155,52 Mbps) a FastEthernet (100 Mbps).

Como se ha mencionado anteriormente, MPLS es una tecnología para el núcleo de la red que mejora el desempeño de los LSRs al disminuir el procesamiento que deben realizar, ya que pueden conmutar (capa 2) paquetes IP en lugar de enrutarlos (capa 3). Sin embargo, el desempeño de los LERs se reduce debido a la necesidad de realizar tareas adicionales como la identificación de la FEC correspondiente, asignación de la etiqueta, adición de la etiqueta y transmisión del paquete. Para este proyecto, en el cual se utilizó siempre un modelo de tres equipos, no es posible observar la ventaja que MPLS le brinda a los LSRs puesto que cada equipo utilizado tiene como función ser LER y LSR al mismo tiempo, lo que provoca un aumento en el procesamiento y en el retardo promedio extremo a extremo. Es por esta razón que la implementación de MPLS en cada uno de los modelos aumenta el retardo promedio en general y no es posible observar en los resultados las bondades que brinda MPLS a éste respecto.

No obstante, el valor máximo de retardo promedio obtenido es de aproximadamente 40 ms, valor por debajo del establecido por ITU-T para servicios de alta calidad.

- **Jitter promedio**

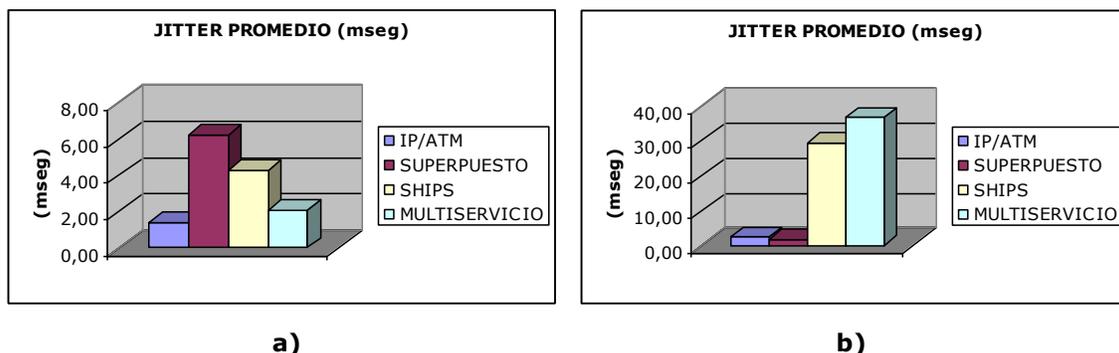


Figura 3.11. Jitter promedio para flujo Constante a) UDP y b) TCP

Para tráfico constante UDP los modelos IP/ATM y de Convergencia Multiservicio presentan los menores valores de *jitter* promedio, mientras que el modelo Superpuesto

presenta el mayor valor debido principalmente a la forma como son transportados los paquetes etiquetados por un solo PVC entre los enrutadores de borde.

En el caso del tráfico TCP, los modelos "Ships in the Night" y de Convergencia Multiservicio son los mayores afectados por el fenómeno de *jitter* promedio. Un desmejoramiento de este factor para tráfico constante TCP puede ser ocasionado debido al procesamiento que demandan este tipo de paquetes y la carga adicional de los mensajes ACK de respuesta.

Sin embargo, se observa que los valores obtenidos se encuentran por debajo de los mínimos establecidos por ITU-T.

- **Paquetes perdidos**

Durante las pruebas con flujo constante de tráfico tanto UDP como TCP no se presentaron pérdidas de paquetes. Esto demuestra un buen comportamiento de todos los modelos ante tráfico de flujos homogéneos, lo que permite una prestación de servicios de voz y video con altos índices de calidad.

B. Tráfico UDP y TCP con distribución de Pareto

- **Retardo promedio**

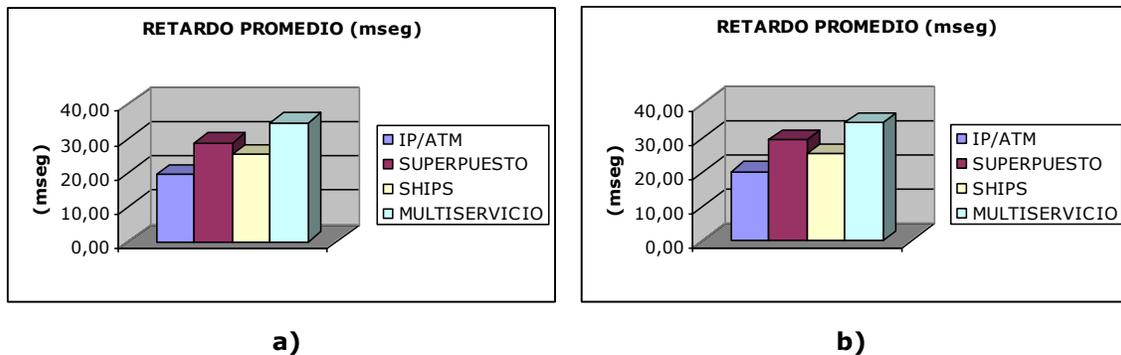


Figura 3.12. Retardo promedio para flujo de Pareto a) UDP y b) TCP

El retardo promedio de los flujos de tráfico de Internet UDP y TCP simulados bajo la distribución de Pareto presentan el mismo comportamiento que los flujos de tráfico constante analizados anteriormente. La justificación a este comportamiento es la misma que para el caso anterior.

- **Jitter promedio**

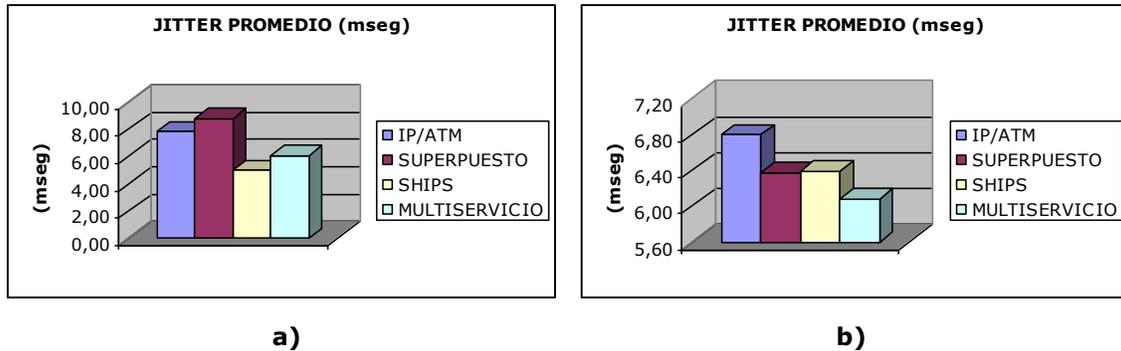


Figura 3.13. Jitter promedio para flujo de Pareto a) UDP y b) TCP

El tráfico UDP con distribución de Pareto presenta un aumento en los tiempos de *jitter* promedio debido esencialmente a la heterogeneidad del tráfico simulado. El modelo de Convergencia Multiservicio muestra el mejor comportamiento con valores por debajo de los 6 ms.

Por el contrario, el tráfico TCP presentó una disminución notable de *jitter* promedio bajo los modelos "Ships in the Night" y de Convergencia Multiservicio, lo que implica un mejor comportamiento ante la transmisión orientada a la conexión del tráfico de datos.

- **Paquetes perdidos**

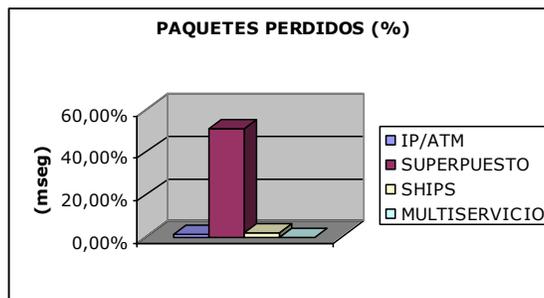


Figura 3.14. Paquetes perdidos para flujo de Pareto UDP

El tráfico UDP con distribución de Pareto fue el único que generó pérdida de paquetes en casi todos los modelos. El modelo Superpuesto fue el mayormente afectado con un 50% de paquetes perdidos, inadmisibles para la prestación de cualquier tipo de servicio. El único modelo que no presentó pérdida de paquetes fue el de Convergencia

Multiservicio, lo que se debe a que consta de un núcleo de red basado en paquetes y no en celdas como los demás y por lo tanto se adapta mejor a la transmisión de flujos paquetizados.

CONCLUSIÓN

Los resultados del análisis anterior se resumen en la Tabla 3.5. En ella se señalan los parámetros de red que más afectan a cada modelo según los resultados y se hace una pequeña observación sobre los valores obtenidos.

MODELO	Retardo Promedio	Jitter Promedio	Paquetes Perdidos	OBSERVACIONES
IP/ATM			✘	<ul style="list-style-type: none"> Menor valor de retardo promedio. Jitter máximo de aprox. 8 ms. 1% de pérdida de paquetes.
Superpuesto	✘		✘	<ul style="list-style-type: none"> Retardo mayor que IP/ATM por adición de un nuevo equipo. Jitter máximo de aprox. 10ms. 50% de pérdida de paquetes.
"Ships in the Night"		✘	✘	<ul style="list-style-type: none"> Retardo promedio mayor que IP/ATM pero menor que los otros modelos. Jitter máximo de aprox. 29ms. 2% de pérdida de paquetes.
Convergencia Multiservicio	✘ (*)	✘		<ul style="list-style-type: none"> Mayor retardo promedio por adición de un equipo y disminución de capacidad en el núcleo de red. Jitter máximo de aprox. 36ms. No presenta pérdida de paquetes para ningún tráfico.

Tabla 3.5. Resultados del análisis de criterios cuantitativos

(*)Se debe tener en cuenta que el núcleo de red del modelo de Convergencia Multiservicio no se encontraba en las mismas condiciones de capacidad de los otros modelos debido a la falta de interfaces físicas en el laboratorio. Por lo tanto, aunque obtuvo el mayor retardo promedio se puede considerar que bajo igualdad de condiciones presentaría un comportamiento similar o mejor.

Al observar los resultados del modelo IP/ATM se encuentra que el comportamiento de cada uno de los parámetros medidos fue mucho mejor en comparación al obtenido en cada uno de los modelos de implementación de MPLS. Sin embargo, aunque los tres modelos de implementación de MPLS se ven afectados por algunos de los parámetros medidos, el único que presenta valores muy por encima del rango permitido para ofrecer servicios de alta calidad es el modelo Superpuesto, el cual presenta un 50% de

pérdida de paquetes. Todos los demás resultados obtenidos de los modelos se encuentran dentro de los valores mínimos para servicios de telecomunicaciones establecidos por la ITU-T (ver Tabla 3.1).

Se concluye entonces que aparte del buen comportamiento del modelo IP/ATM, los modelos de implementación de MPLS "*Ships in the Night*" y Convergencia Multiservicio son los que muestran una mejor respuesta ante los criterios cuantitativos más comunes que afectan una red de telecomunicaciones. Es ahora necesario evaluar el comportamiento de los criterios cualitativos para definir un modelo de red óptimo para el operador nacional de servicios de valor agregado.

3.4.2 Análisis de criterios cualitativos

A través del proceso de estudio teórico y experimental sobre los diferentes modelos de implementación de MPLS, es posible calificar su comportamiento según los criterios cualitativos definidos anteriormente.

- **Escalabilidad en la capacidad de las interfaces del núcleo de red**

La tecnología ATM tiene limitaciones de crecimiento en la capacidad de sus interfaces físicas debido principalmente a que la función de segmentación y reensamblado se dificulta para velocidades mayores a STM-16 (2,5Gbps). En cambio, tecnologías basadas en tramas como POS o GigaEthernet permiten la utilización de interfaces de muy alta velocidad.

Por lo anterior, el modelo de implementación de MPLS que ofrece escalabilidad en la capacidad de las interfaces de los equipos del núcleo de red es el de Convergencia Multiservicio, al estar conformado por enrutadores IP/MPLS capaces de soportar interfaces basadas en tramas.

- **Uso efectivo del ancho de banda del núcleo de red**

Un modelo de transporte de IP sobre ATM hace una utilización ineficiente del ancho de banda de la red, debido básicamente al sobre encabezado excesivo de las celdas. Esta situación se vuelve más crítica en el núcleo de red por el alto volumen de tráfico que allí se maneja y el alto costo de interfaces físicas de alta velocidad. En contraste, las tecnologías de tramas consumen menos ancho de banda en encabezados por manejar

tramas de mayor tamaño que permiten transportar más información con menos encabezados.

En consecuencia, se observa que el modelo de Convergencia Multiservicio es el que mejor utilización de ancho de banda realiza en el núcleo de red, pues a diferencia de los otros dos modelos, implementa tecnologías basadas en tramas como POS o GigaEthernet en los equipos del núcleo.

- **Topología de red IP simple**

Una red que busque ofrecer servicios IP de manera eficiente debe poseer una topología de red IP simple, lo que implica eliminar la necesidad de una malla completa de conexiones entre los equipos IP y la creación de adyacencias de enrutamiento entre todos. Una topología de red IP simple facilita el proceso de configuración, operación y mantenimiento.

En el caso del modelo "*Ships in the Night*", se presenta una integración de los planos de control de los enrutadores IP de la red de borde y los *switches* ATM del núcleo al adicionar la funcionalidad de MPLS en ambos. Esto elimina la necesidad de crear la malla completa de conexiones que debía crearse en el modelo de IP/ATM y en el modelo Superpuesto, que limitaba considerablemente su escalabilidad. Por otro lado, el modelo de Convergencia Multiservicio también integra transparentemente los planos de control de los enrutadores IP/MPLS de la red de borde y los nuevos equipos del núcleo por tratarse también de enrutadores con capacidades de IP/MPLS.

- **Menor tiempo de convergencia ante fallas en un enlace**

Para la distribución de etiquetas los LSRs ATM soportan el modo *downstream on demand*, que implica esperar una solicitud por parte de su nodo de siguiente salto para poder enviarle una etiqueta. Adicionalmente, los LSRs ATM trabajan en modo conservador de retención de etiquetas, por lo que almacenan una sola etiqueta por cada FEC conocida. Lo anterior ocasiona que ante un fallo en la red y cambio del nodo de siguiente salto, deben generarse nuevas solicitudes para establecer un camino alternativo, ocasionando un tiempo de convergencia alto.

Por otra parte, los LSRs basados en tramas como los enrutadores IP/MPLS operan con *unsolicited downstream* y modo liberal de retención, lo que les permite enviar etiquetas sin esperar una solicitud previa, además de mantener en memoria múltiples

etiquetas por cada FEC conocida. Esto permite tener caminos de respaldo al conocer las etiquetas hacia otros nodos de siguiente salto y por lo tanto reduce notablemente el tiempo de convergencia comparado con el de los LSRs ATM.

En el caso del modelo IP/ATM, tanto el nivel ATM como el nivel IP tienen funcionalidades de enrutamiento, lo que genera un gran problema si ocurre una falla en algún enlace, como se mencionó en el capítulo 2.

De acuerdo con lo anterior, los modelos de implementación de MPLS que mejor tiempo de respuesta presentan ante fallas en la red son aquellos en los cuales la funcionalidad de MPLS se realiza sobre LSRs basados en tramas, como es el caso del modelo Superpuesto y el Convergencia Multiservicio.

CONCLUSIÓN

En la Tabla 3.6 se presenta un resumen del análisis de los criterios cualitativos sobre cada uno de los modelos de implementación MPLS. En la tabla se señalan los modelos que presentan una buena respuesta al criterio cualitativo bajo el cual se evalúan.

CRITERIOS	IP/ATM	Superpuesto	"Ships in the Night"	Convergencia Multiservicio
Escalabilidad en la capacidad de las interfaces del núcleo de red.				✓
Uso efectivo del ancho de banda del núcleo de red.				✓
Topología de red IP simple.			✓	✓
Menor tiempo de convergencia ante fallas en un enlace.		✓		✓

Tabla 3.6. Resumen del análisis de los criterios cualitativos

Debido a que el modelo IP/ATM no cumple bajo ninguna circunstancia con los criterios cualitativos definidos, los campos dentro de la tabla anterior se encuentran vacíos. Por el contrario, el modelo de Convergencia Multiservicio es el que mejor comportamiento muestra para cada uno de estos criterios.

En conclusión, al analizar los criterios cuantitativos y cualitativos se obtuvo que el modelo más idóneo para implementar la tecnología MPLS sobre las redes de los

operadores nacionales es el modelo de Convergencia Multiservicio. Para su implementación sobre la red del operador, es necesario entonces definir un proceso de migración que permita una transición suave desde la red actual hasta el modelo de red deseado, que respete principalmente los servicios ofrecidos a los clientes actuales, la infraestructura disponible y el presupuesto moderado con el cuentan los operadores. Además, el proceso de migración debe estar acompañado de un modelo de negocios formado por los servicios actuales y nuevos servicios IP, que permita aprovechar al máximo los nuevos recursos de red y aportarle al operador un rápido retorno de su inversión.

La configuración detallada del Modelo de Convergencia Multiservicio se presenta en el Anexo B: *Configuración detallada del Modelo de Convergencia Multiservicio*.

4. PROCESO DE MIGRACIÓN Y PROPUESTA DE SERVICIOS PARA EL OPERADOR NACIONAL

4.1 PROCESO DE MIGRACIÓN DEL MRON

Partiendo del *Modelo de Red de Operador Nacional (MRON)* definido en el primer capítulo de este documento (mostrado en la Figura 4.1), y teniendo en cuenta los resultados del estudio a los diferentes modelos de migración de MPLS realizado en el tercer capítulo, se debe plantear un modelo de transición progresivo hacia la implantación final del modelo de Convergencia Multiservicio en la red del operador nacional de servicios de valor agregado.

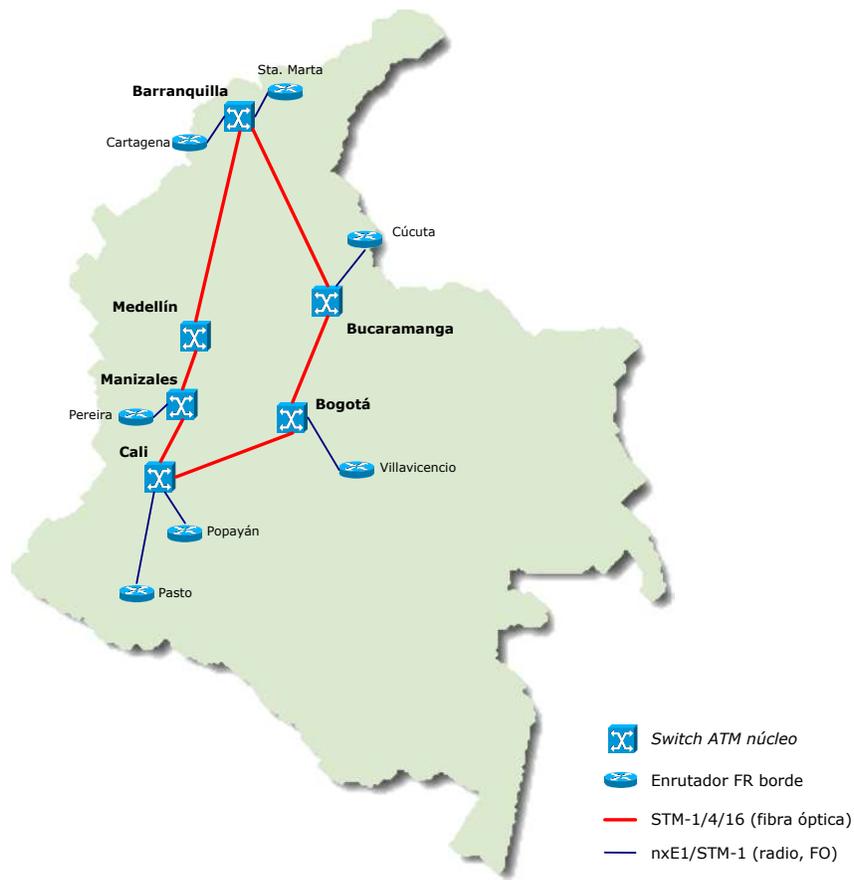


Figura 4.1. Modelo de Red de Operador Nacional (MRON)

El proceso de migración es definido de acuerdo con ciertos requerimientos de los operadores nacionales, quienes ofrecen en la actualidad una serie de servicios que deben ser mantenidos y desean que su funcionamiento no sea interrumpido durante el proceso, es decir, los clientes actuales no deben verse afectados por los cambios que se realicen en la red del operador. Adicionalmente, la mayoría de operadores nacionales esperan que la inversión hecha en la infraestructura actual siga siendo aprovechada, reutilizando al máximo los equipos de red.

De acuerdo con lo anterior, se define un proceso de transición en el cual se comienza con la implementación de un nuevo núcleo de red IP/MPLS paralelo al núcleo ATM actual, con presencia en los principales nodos nacionales como Bogotá, Medellín, Barranquilla y Cali, pues son las ciudades de mayor desarrollo comercial y empresarial que representan un alto porcentaje de clientes potenciales para los servicios IP. Los equipos del núcleo de red IP/MPLS estarán interconectados a través de la red de fibra óptica que posee el operador. Un ejemplo gráfico de este proceso se muestra en la Figura 4.2.

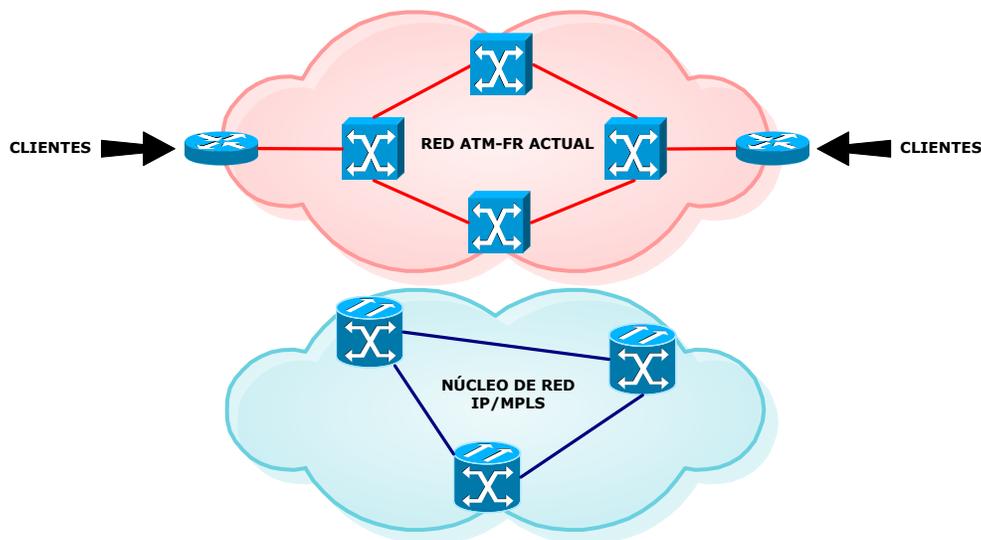


Figura 4.2. Nuevo núcleo de red IP/MPLS paralelo a la red ATM actual

Después de haber implementado el nuevo núcleo de red correctamente, es decir, una vez probada la configuración, el funcionamiento, la administración y la operación de los servicios sobre la red, se continúa con la migración paulatina de los clientes a los cuales se les presta actualmente servicios IP o se tiene proyectado ofrecer nuevos

servicios, hacia el nuevo núcleo IP/MPLS como se muestra en la Figura 4.3. Esto permite descongestionar la red ATM, evitando una inversión adicional en estos equipos para incrementar capacidad de la red.

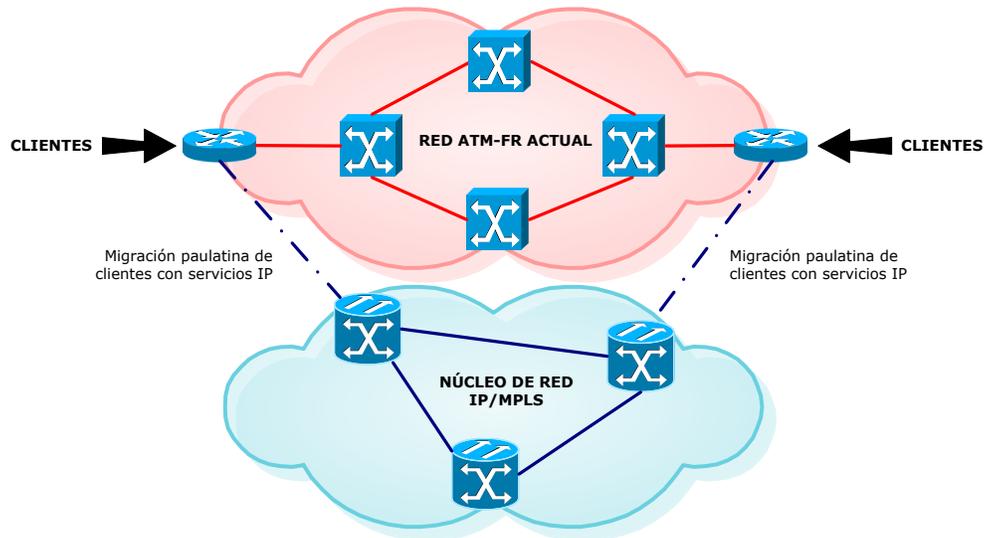


Figura 4.3. Migración de los clientes IP hacia el nuevo núcleo de red

El proceso de migración debe ir acompañado de un nuevo modelo de red de acceso de banda ancha con el fin de poder ofrecer a los clientes nuevos servicios IP con altos requerimientos de ancho de banda como VoIP, video sobre IP, televisión sobre IP, entre otros. Estas nuevas redes de acceso deben implementarse inicialmente en las ciudades principales y deben interconectarse directamente con el nuevo núcleo de red, como se muestra en la Figura 4.4. Posteriormente, y de acuerdo con las exigencias del mercado, deben ampliarse estas redes de acceso hacia otras ciudades donde se tengan clientes potenciales de servicios IP e inclusive puede servir para cubrir ciudades donde no se tenga presencia actual.

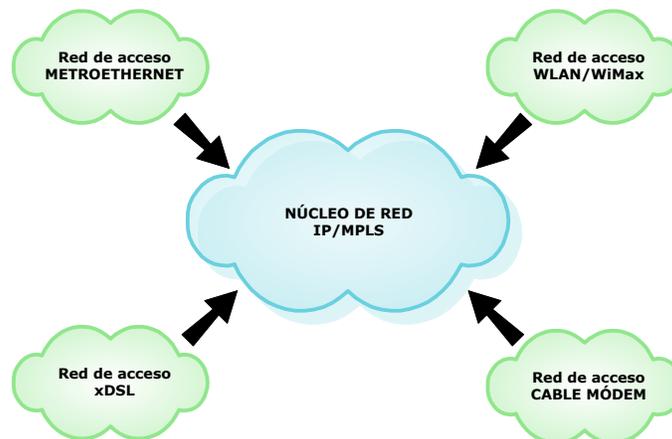


Figura 4.4. Nuevas redes de acceso de banda ancha

Una vez lograda una estabilidad en la red IP/MPLS, se comienzan a migrar los servicios heredados de capa 2 soportados por la red ATM hacia el nuevo núcleo de red mediante el servicio de VPNs de capa 2 (ver Figura 4.5), con el fin de unificar ambas redes y poder ofrecer servicios adicionales como *interworking*. Este proceso se realiza en caso tal que los clientes lo demanden o para mantener los servicios de capa 2 existentes.

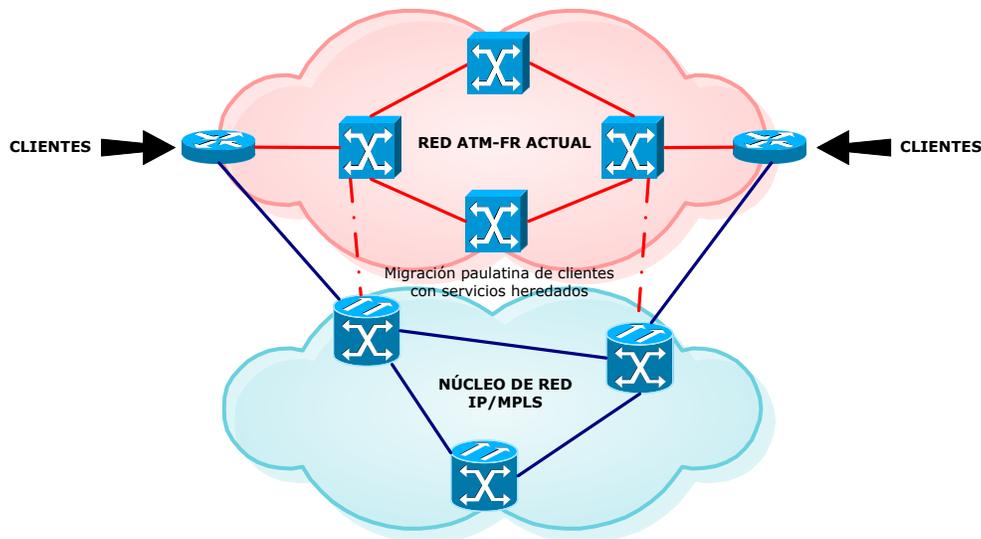


Figura 4.5. Migración de los servicios heredados de capa 2

El modelo de red definitivo estará formado por el nuevo núcleo de red basado en equipos IP/MPLS y una red de borde y acceso formada por *switches* ATM y enrutadores *Frame Relay+IP*, como se enseña en la Figura 4.6. Posteriormente se irán adicionando

las nuevas redes de acceso de banda ancha que serán implementadas gradualmente sobre el territorio nacional.

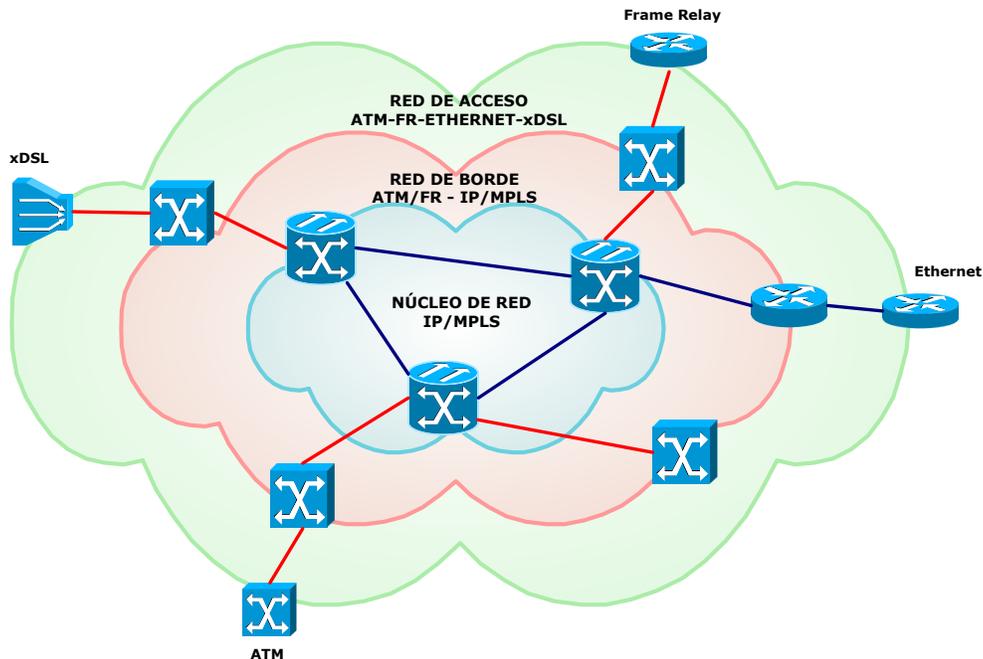


Figura 4.6. Modelo de red definitivo

Finalmente, aplicando el modelo anterior al MRON nacional se obtiene un *Modelo de Red de Operador Nacional Multiservicio (MRON-MS)*, mostrado en la Figura 4.7.

En el diagrama del MRON-MS se observan nodos secundarios como Santa Marta, Cartagena, Villavicencio, Popayán y Pasto, que poseen clientes IP. Estos nodos se conectan directamente a los nodos principales IP/MPLS de Barranquilla, Bogotá y Cali, facilitando la prestación de servicios IP y evitando las pérdidas por encapsulado sobre celdas ATM. Adicionalmente, los *switches* ATM que pertenecían al núcleo de red se conectan con el núcleo IP/MPLS a través de interfaces de celdas. El tráfico heredado de los *switches* ATM se encapsula sobre MPLS y se transporta sobre VPNs de capa 2 hacia otros puntos de la red.



Figura 4.7. Modelo de Red de Operador Nacional Multiservicio (MRON-MS)

Existirán casos como en la ciudad de Manizales y Pereira, en donde el tráfico IP debe seguir siendo transportado a través de enlaces ATM debido principalmente a que no es posible implementar equipos IP/MPLS en todos los nodos de la red. Estos enlaces ATM cumplirán la función de red de acceso para la nueva red IP/MPLS del núcleo.

4.2 PROPUESTA DE NUEVOS SERVICIOS PARA EL MRON-MS

Teniendo en cuenta las tendencias del mercado nacional e internacional de las telecomunicaciones estudiadas en el capítulo uno, se observa que los servicios de valor agregado que más relevancia tienen entre los servicios IP son el IDC, la telefonía IP, las redes privadas virtuales, las redes de área local inalámbricas y la banda ancha.

Para soportar los nuevos servicios IP, la tecnología MPLS brinda grandes ventajas de configuración e implementación a través de servicios de red como VPNs IP de MPLS y VPNs de capa 2. De acuerdo a lo anterior y aprovechando la infraestructura del modelo de red de Convergencia Multiservicio versión laboratorio estudiada en el capítulo 3, se diseñaron e implementaron los servicios de VPNs de capa 2 que permiten la realización de *interworking* entre diferentes tecnologías, y VPNs IP de MPLS que evitan la complejidad de la creación de túneles IP o PVCs de ATM, entre muchas otras ventajas.

4.2.1 VPNs de capa 2

Para la implementación del servicio de VPNs de capa 2 sobre la red de prueba primero se configuraron las características de IP y MPLS sobre el núcleo de la red, verificando la existencia de LSPs entre los enrutadores. Para este caso en particular, se trabajó con un cliente ADSL (collab-837a) conectado a través de ATM, un cliente Ethernet conectado a través de una VLAN en el *switch* collab-3524a y un cliente (10.8.39.2/24) conectado directamente a un puerto Ethernet del enrutador collab-6400nrpa de la red de borde. Después de configurar el modelo de Convergencia Multiservicio sobre el MRON, se procedió a configurar los PVCs para conectar cada uno de los clientes a la red. Seguidamente, se configuró la VLAN entre el *switch* Ethernet y el enrutador collab-7200vrx para la conexión del otro cliente. Posteriormente se creó sobre el LSP correspondiente un *pseudo-wire* para la interconexión del cliente ADSL y el cliente Ethernet 10.8.39.2 conectado al enrutador collab-6400nrpa, creando la VPN de capa 2. Se configuraron los dos equipos de cliente dentro de la misma subred (2.1.2.0/24) y se comprobó conectividad extremo a extremo mediante los comandos *ping* y *traceroute*.

Para probar la funcionalidad de *interworking* se realizó el mismo procedimiento anterior ahora para la creación de una VPN de capa 2 entre el cliente ADSL y el cliente VLAN. Se configuró entonces el *pseudo-wire* entre ambos clientes pertenecientes a la misma subred (2.1.1.0/24) y se verificó el correcto funcionamiento mediante los comandos *ping* y *traceroute*.

Para la configuración del *pseudo-wire* se requiere un identificador que representa la VPN de capa 2 y la dirección IP del enrutador de destino donde se encuentra conectado el otro cliente. Esta conexión se realiza desde la interfaz o subinterfaz asociada al primer cliente hasta el enrutador al cual pertenece el segundo cliente, utilizando como parámetro de conexión el identificador de la VPN. El mismo procedimiento se realiza en

sentido inverso. La funcionalidad de *interworking* de capa 2 sucede entonces cuando clientes con diferentes tecnologías pueden ser asociados a una misma VPN de capa 2.

En la Figura 4.8 se observa el diagrama de red utilizado para implementar las VPNs de capa 2 entre los clientes. En ella se identifica cada una de las VPNs creadas y el direccionamiento utilizado mediante un color diferente: la conexión entre el cliente ADSL y el cliente VLAN se representa con color azul mientras que la conexión entre el cliente ADSL y el cliente 10.8.39.2/24 con color violeta.

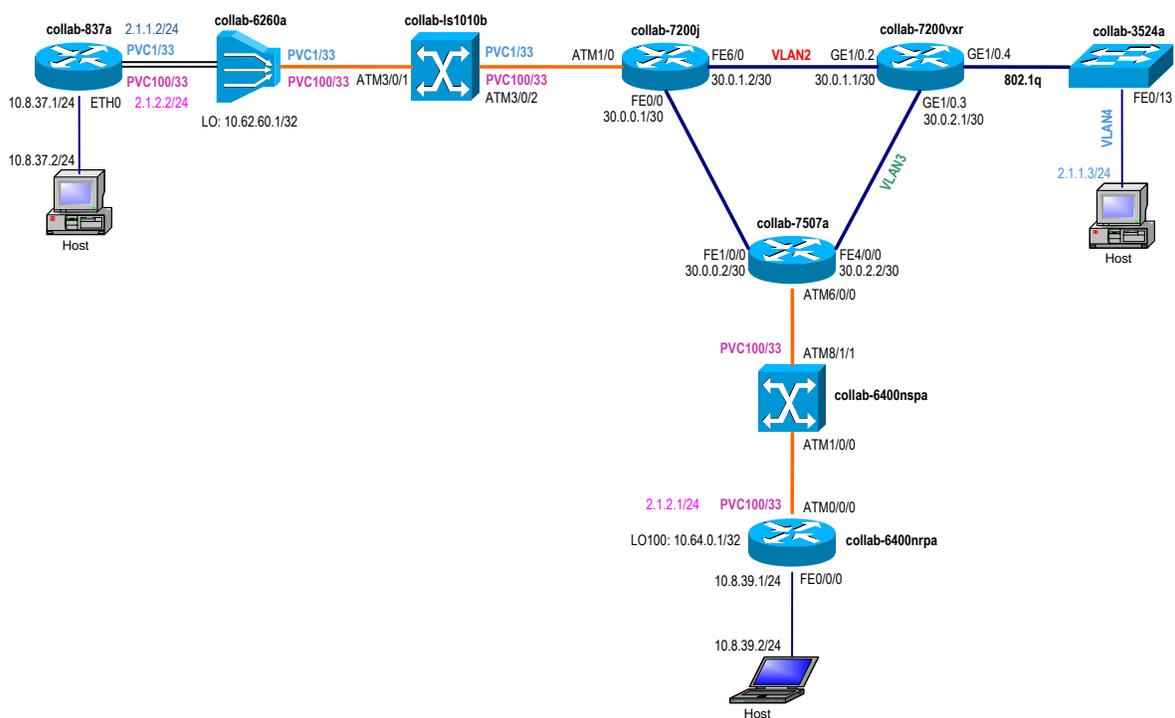


Figura 4.8. VPNs/interworking capa 2 sobre MRON versión laboratorio

Dentro de la nueva red del operador nacional el principal objetivo de la utilización de las VPNs de capa 2 es la funcionalidad de *interworking*, que permite ofrecer los servicios heredados a través del nuevo núcleo IP/MPLS de la red. Este servicio de red debe ir dirigido a clientes que no deseen que el operador intervenga en su enrutamiento IP y que quieran interconectar diferentes sedes de su compañía, sin importar la tecnología de capa 2 con la que se conectan a la red.

4.2.2 VPNs IP de MPLS⁵

Para la implementación de VPNs IP de MPLS sobre el modelo de Convergencia Multiservicio se utilizó un cliente (10.8.40.2) conectado directamente a un puerto Ethernet del enrutador collab-7200j del núcleo de red, y un cliente (10.8.39.2) con acceso Ethernet al equipo collab-6400nrpa, que se conecta al enrutador collab-7507a a través del *switch* collab-6400nspa mediante el PVC 100/33, como se muestra en la Figura 4.9.

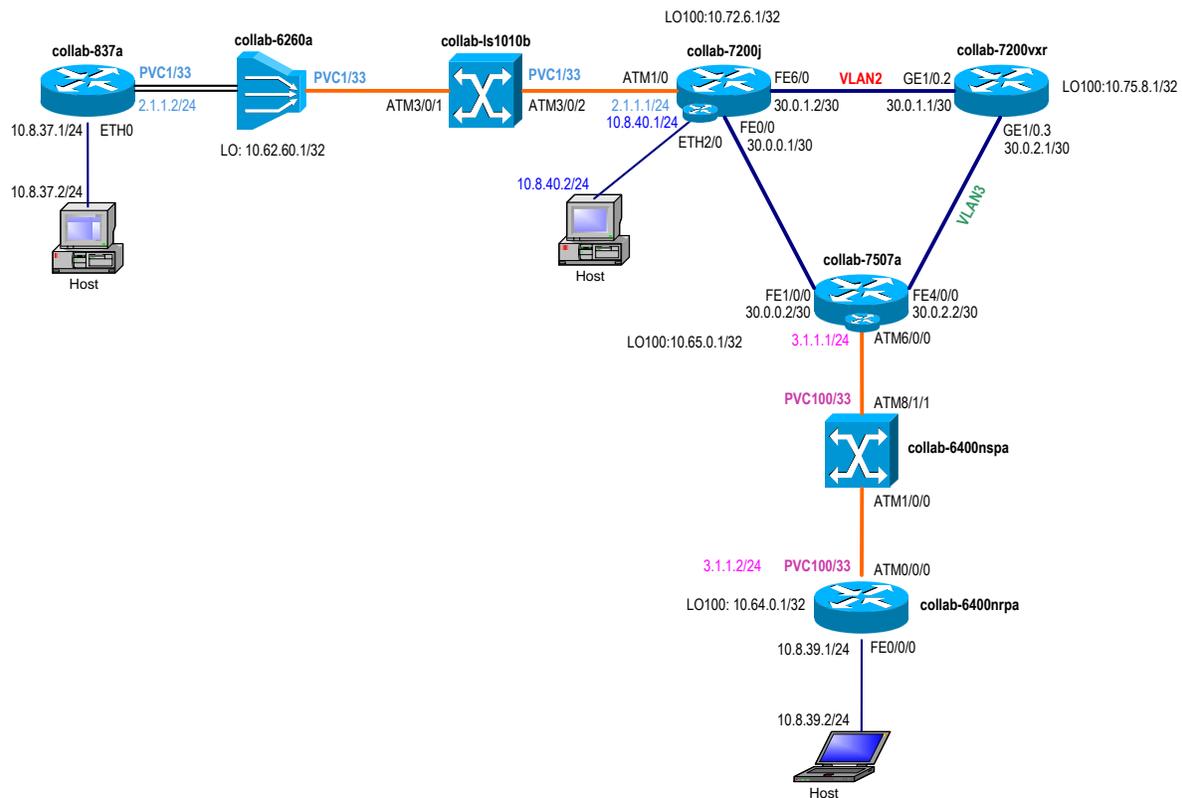


Figura 4.9. VPNs IP MPLS sobre MRON versión laboratorio

Cada equipo IP/MPLS del núcleo de red debe mantener una tabla de enrutamiento global y una *tabla de enrutamiento virtual* para cada VPN IP creada. Las rutas almacenadas en cada tabla de enrutamiento son distribuidas hacia otros enrutadores del núcleo mediante el protocolo de enrutamiento BGP (*Border Gateway Protocol*), pero únicamente son agregadas a las tablas de enrutamiento virtuales asociadas a la misma VPN.

⁵ Las VPNs IP de MPLS están basadas en el RFC 2547 “BGP/MPLS VPNs” de la IETF.

En la figura se observan dos enrutadores pequeños dentro de los enrutadores collab-7200j y collab-6400nrps, los cuales representan las tablas de enrutamiento virtuales asociadas a la VPN IP del cliente.

Para esta implementación se definió una tabla de enrutamiento virtual en el enrutador collab-7200j y el enrutador collab-7507a asociadas a la VPN *fiet*. Seguidamente se agregó cada cliente a la tabla de enrutamiento virtual correspondiente. La Figura 4.10 y Figura 4.11 muestran la tabla de enrutamiento global para el equipo collab-7507a y la tabla de enrutamiento virtual para la VPN *fiet*. La tabla de enrutamiento global almacena las rutas utilizadas por el enrutador para alcanzar los enrutadores de siguiente salto y no contiene las rutas de los clientes asociados a una VPN. Se resalta en amarillo la ruta hacia el enrutador collab-7200j aprendida durante el proceso de funcionamiento normal del modelo de Convergencia Multiservicio a través del protocolo de enrutamiento OSPF.

```
Collab-7507a#sh ip route
Codes: C - connected, S - static, I - IGRP, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2, E - EGP
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR

Gateway of last resort is not set

 10.0.0.0/32 is subnetted, 6 subnets
O   10.72.6.1 [110/2] via 30.0.0.1, 01:48:17, FastEthernet1/0/0
O   10.72.6.3 [110/2] via 30.0.0.1, 01:48:17, FastEthernet1/0/0
O   10.75.8.1 [110/2] via 30.0.2.1, 01:48:17, FastEthernet4/0/0
C   10.65.0.2 is directly connected, Loopback200
C   10.65.0.1 is directly connected, Loopback100
O   10.75.8.2 [110/2] via 30.0.2.1, 01:48:17, FastEthernet4/0/0
 30.0.0.0/30 is subnetted, 3 subnets
C   30.0.2.0 is directly connected, FastEthernet4/0/0
C   30.0.0.0 is directly connected, FastEthernet1/0/0
O   30.0.1.0 [110/2] via 30.0.2.1, 01:48:17, FastEthernet4/0/0
    [110/2] via 30.0.0.1, 01:48:17, FastEthernet1/0/0
```

Figura 4.10. Tabla de enrutamiento global del enrutador collab-7507a

La tabla de enrutamiento virtual contiene únicamente las rutas de los clientes asociados a la misma VPN aprendidas a través del protocolo de enrutamiento BGP.

```
Collab-7507a#sh ip route vrf fiet
Routing Table: fiet
Codes: C - connected, S - static, I - IGRP, R - RIP, M - mobile, B - BGP
D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2, E - EGP
i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
o - ODR

Gateway of last resort is not set

 3.0.0.0/24 is subnetted, 1 subnets
C    3.1.1.0 is directly connected, ATM6/0/0.33
 10.0.0.0/8 is variably subnetted, 3 subnets, 2 masks
S    10.8.39.0/24 [1/0] via 3.1.1.2
B    10.8.40.0/24 [200/0] via 10.72.6.1, 00:16:32
B    10.72.6.2/32 [200/0] via 10.72.6.1, 01:43:18
```

Figura 4.11. Tabla de enrutamiento virtual para la VPN *fiet* en collab-7507a

Finalmente, para probar la conectividad entre ambos clientes se utilizaron los comandos *ping* y *traceroute* dentro del contorno de enrutamiento de la VPN.

Una de las mayores aplicaciones de las VPNs IP de MPLS es la facilidad para la prestación de servicios administrados de valor agregado. Éstos son servicios ofrecidos al usuario que el operador se encarga de implementar, configurar, administrar y mantener. La administración de estos servicios requiere personal calificado que muchas empresas no disponen por no ser viable económicamente. Por lo tanto, la delegación del manejo de estos servicios al operador permite a los clientes incrementar la disponibilidad y eficiencia de sus servicios a un menor costo.

Para la prestación de los servicios administrados de valor agregado se propone al operador nacional la creación de un centro de servicios “*Data Center*”, en el cual converjan todos los nuevos servicios IP.

DATA CENTER

El centro de servicios “*Data Center*” permite ofrecer una variedad de servicios que cubren diferentes áreas importantes dentro de una organización, como lo son la seguridad en el transporte de los datos, comunicación de voz, acceso a Internet y servicios de contenido. Para la prestación de estos servicios basados en IP se utilizan VPNs IP de MPLS para facilitar la identificación e independencia de cada uno de los clientes.

En la Figura 4.12 se muestra la disposición de los servicios del *Data Center*, el cual deberá contar con una conexión a Internet con el fin de prestar este servicio de forma

adicional a los clientes y aprovechar al máximo los beneficios de los servicios propuestos.

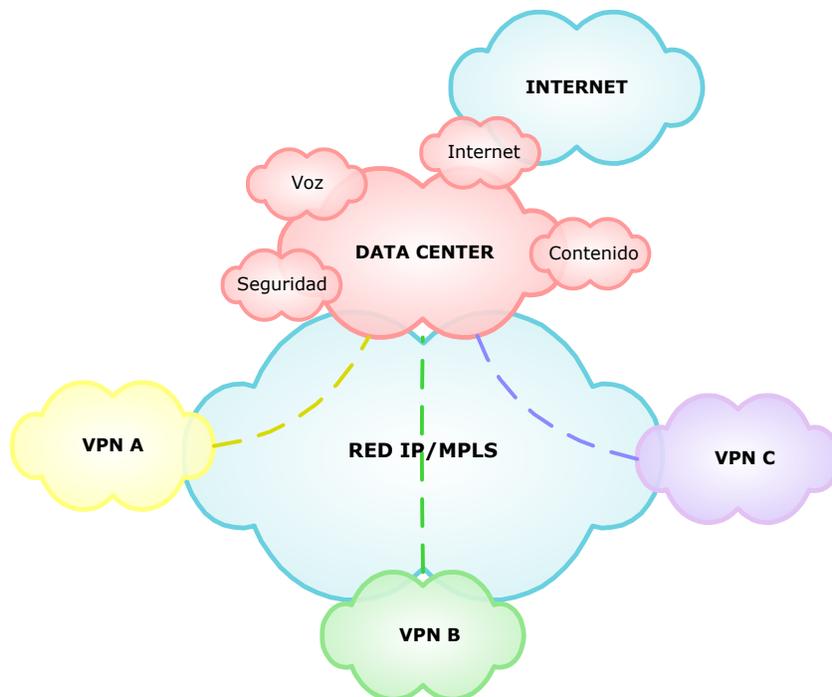


Figura 4.12. Servicios administrados a través del *Data Center*

Específicamente, los servicios propuestos para el *Data Center* son:

- **Servicios administrados de voz**

Este servicio consiste en ofrecer a los clientes el servicio de telefonía IP. Para ello, requiere equipos como servidores y *gateways* de voz hacia la red telefónica pública conmutada (PSTN: *Public Switched Telephone Network*), los cuales son dispuestos físicamente en el centro de servicios y son alcanzados por los clientes a través de VPNs IP de MPLS, como se observa en la Figura 4.13. Para garantizar el correcto funcionamiento de las comunicaciones de voz es importante un manejo adecuado de calidad de servicio (QoS) dentro de la red.

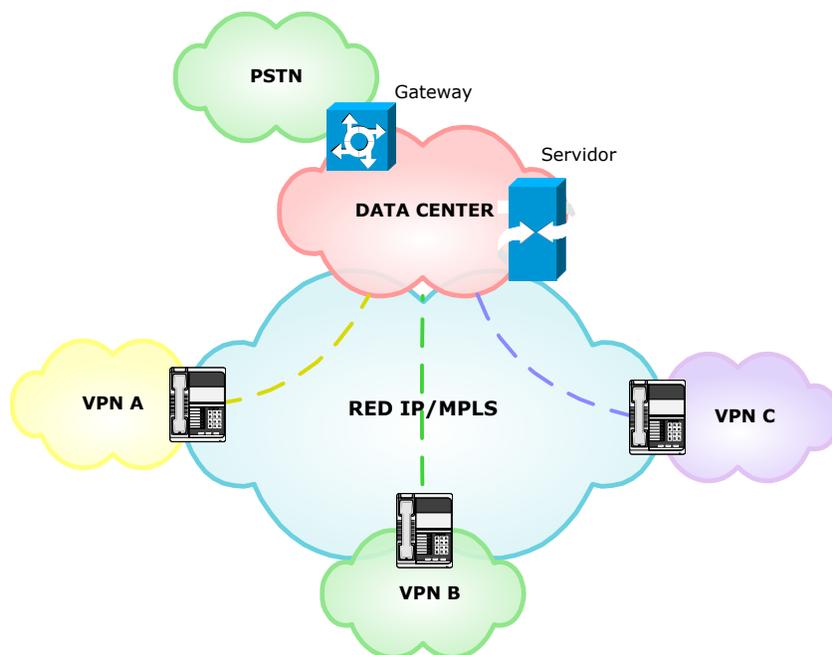


Figura 4.13. Servicios administrados de voz

- **Servicios administrados de seguridad**

Los servicios administrados de seguridad brindan mayor seguridad a las redes de los clientes en el momento de conectarse con otras redes, entre ellas Internet. Para esto, se ofrece el servicio de *Firewall Virtual*, en donde el operador posee un equipo centralizado de seguridad que es dividido lógicamente y permite a los clientes definir sus propias políticas de seguridad y administrar su propio *Firewall*, como si se tratara de un equipo dedicado. El servicio de *Firewall* puede complementarse con bloqueo de URLs, listas de acceso, detección de intrusos, proxy de autenticación, NAT, filtrado de contenido y herramientas para protección de virus.

Adicionalmente, con el fin de brindar acceso seguro a empleados que se encuentran por fuera de la empresa se diseña el servicio de *Acceso Remoto Seguro*. Un empleado de una compañía puede acceder a los recursos de su red conectándose con el *Data Center* a través de un túnel seguro de IPsec, el cual es controlado por un equipo concentrador y terminador de sesiones IPsec. Una vez autenticado su ingreso, se establece una conexión con la VPN de la empresa. La Figura 4.14 muestra la estructura del servicio administrado de seguridad.

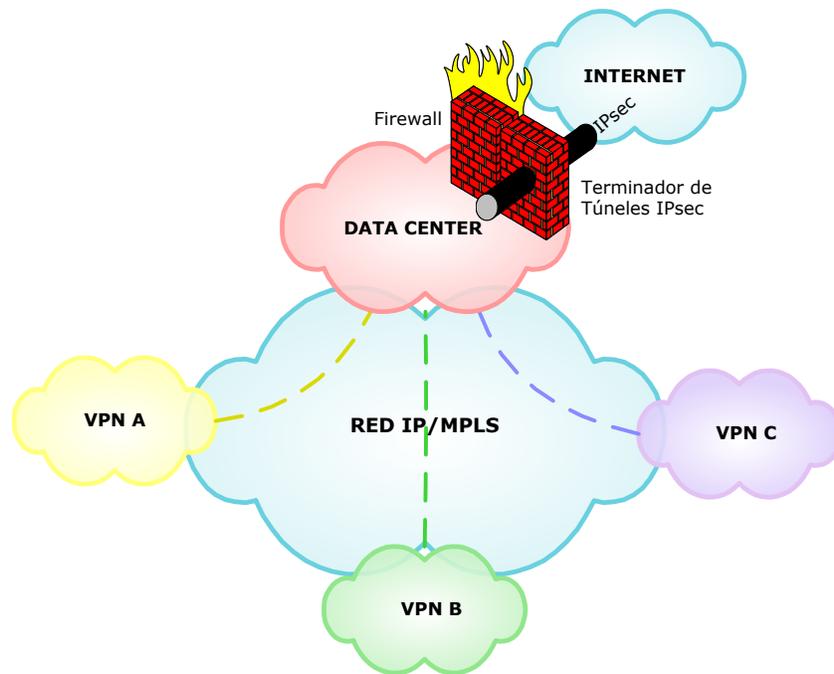


Figura 4.14. Servicios administrados de seguridad

- **Servicios administrados de contenido**

El *Data Center* debe cumplir con estándares de calidad tanto en equipamiento físico como en condiciones ambientales, estructurales y de seguridad, con el fin de difundir un alto grado de confiabilidad en los clientes. Adicionalmente, el personal técnico encargado debe estar altamente capacitado en el manejo de diversas plataformas hardware, sistemas operativos y una serie de aplicaciones de las cuales puedan hacer uso los clientes.

Los servicios administrados de contenido incluyen la administración de los servidores del cliente ubicados en las instalaciones del *Data Center* (*colocation*) y el hospedaje de servicios en servidores del operador (*hosting*), como se muestra en la Figura 4.15 y Figura 4.16.

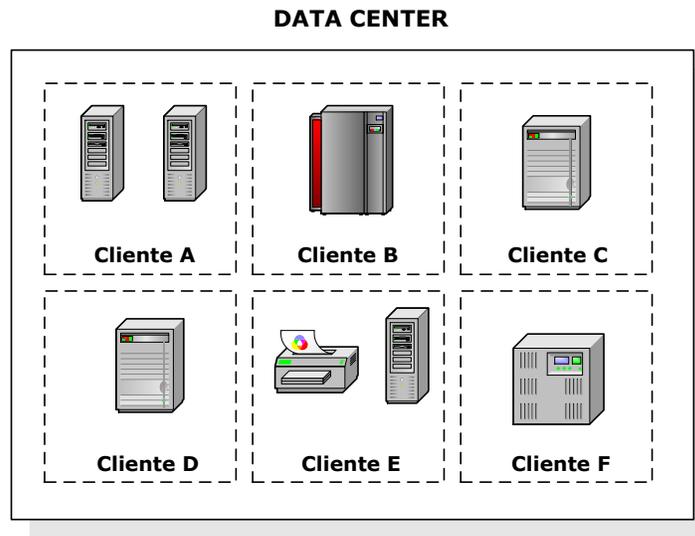


Figura 4.15. Servicios administrados de contenido (*colocation*)

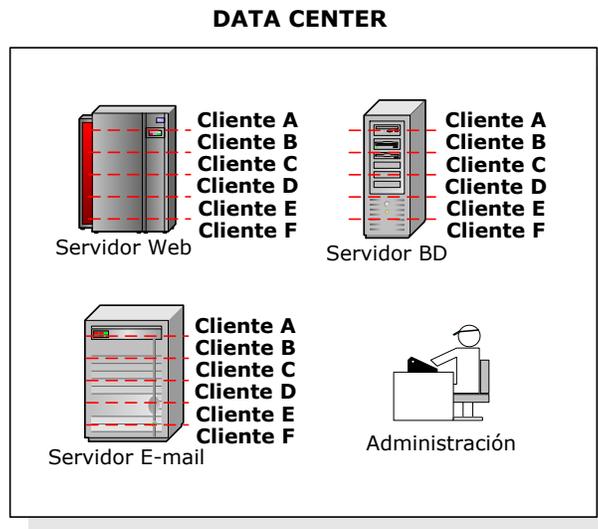


Figura 4.16. Servicios administrados de contenido (*hosting*)

Con base en los servicios que se plantean para el centro de servicios, es posible diseñar un amplio y variado portafolio de nuevos servicios IP que representarán para el operador la oportunidad de atraer más clientes y generar mayores utilidades. La prestación de estos servicios no sería posible sin la evolución de la red actual del operador, lo que justifica enormemente un proceso de migración de una red ATM a una red IP/MPLS.

Es importante tener en cuenta que en un proceso de globalización como el que vive actualmente el mercado de las telecomunicaciones, los operadores colombianos deben contar con un alto grado de competitividad frente a operadores internacionales, que sólo se logra a través de una consolidada infraestructura de red, un completo y diverso portafolio de servicios acorde con las exigencias de los usuarios, y un grupo de trabajo altamente capacitado.

El estudio realizado en la "Propuesta para un Operador Nacional: migración de una red ATM a una red IP/MPLS" ofrece al operador de servicios de valor agregado los parámetros de diseño a considerar en el proceso de migración de su red actual a una nueva red con múltiples beneficios. Además, pone a disposición del operador diferentes posibilidades de servicios IP que aprovechan la nueva infraestructura de red y amplían el mercado actual del operador. Lo anterior con el objetivo primordial de hacer de la infraestructura de los operadores colombianos redes de telecomunicaciones de alta calidad y competencia.

5. CONCLUSIONES

- A través del análisis al mercado de las telecomunicaciones nacionales y al estudio de los principales operadores colombianos de servicios de valor agregado, se ha descubierto una creciente necesidad de nuevos servicios de comunicación por parte de la sociedad, que desea disfrutar de las bondades tecnológicas con las que ya cuentan muchos otros países. Por esta razón, se concluye la necesidad de ofrecer al mercado nacional un mejor y más amplio portafolio de servicios de comunicaciones.
- Con base en el estudio de mercado proporcionado por la CRT, se concluye que el acceso de banda ancha es el primer eslabón de la cadena tecnológica evolutiva, para dar luego paso a soluciones de VPNs IP sobre las cuales se pueden ofrecer soluciones de convergencia con aplicaciones integradas de voz, video y datos para el mercado corporativo y masivo.
- A pesar de que ATM es una excelente tecnología para ofrecer servicios de voz, no es una buena opción para el transporte de tráfico de paquetes como IP, debido a que presenta una serie de limitaciones como la pérdida de ancho de banda por sobre encabezado, inestabilidad en las rutas y capacidad limitada de sus interfaces, que a largo plazo afectan el desempeño de la red.
- Los operadores nacionales de servicio de valor agregado han invertido en costosas infraestructuras ATM que para la prestación de los nuevos servicios IP no son la solución más eficiente. Por lo tanto, en este momento se observa la gran necesidad de migrar sus redes a una nueva tecnología que les permita ser más eficientes y brindar nuevos servicios que aumenten su competitividad.
- Al estudiar a fondo la tecnología de *Conmutación de Paquetes Multiprotocolo* (MPLS), se concluye que es una muy acertada solución que le permite a los operadores migrar sus redes actuales a redes IP multiservicio, debido a que

combina las ventajas de la conmutación de capa 2 con el enrutamiento de capa 3 y soluciona muchos de los inconvenientes de las redes IP puras y las redes IP/ATM.

- Dado que los estudios de las nuevas tecnologías de telecomunicaciones que realizan organismos internacionales de estandarización se basan en las características de red de grandes operadores mundiales de servicios de telecomunicaciones, es necesario realizar estudios como el presentado en este proyecto, en los cuales se analice el comportamiento de nuevas tecnologías bajo las características, necesidades y limitaciones de la sociedad y los operadores nacionales.
- La creación de un modelo estándar de red del operador nacional de servicios de valor agregado como el MRON, es de gran utilidad ya que reúne las principales características de las redes de los operadores nacionales de servicios y permite hacer un estudio preciso y acertado sobre la implantación de nuevas tecnologías.
- El éxito de un proceso de evaluación de una nueva tecnología depende principalmente de los criterios que se definan para valorar su eficiencia y desempeño. Es por esto que los criterios de evaluación seleccionados para comparar los modelos de implementación de MPLS fueron fundamentales para la escogencia del modelo más adecuado.
- De acuerdo con los criterios seleccionados en este proyecto para evaluar diferentes características de los modelos de implementación de MPLS planteados, fue posible determinar que el modelo de Convergencia Multiservicio es el que mayores beneficios y facilidades brinda al operador nacional de servicios. Además, cumple con los parámetros mínimos de calidad definidos por la ITU-T, es de fácil configuración y presenta alta escalabilidad.
- Por medio del modelo de migración paulatina de una red ATM a una red IP/MPLS planteado en este proyecto, el operador puede realizar una inversión progresiva acorde a su presupuesto de red, minimizando los riesgos que producen las grandes inversiones en un mercado cambiante como el de las telecomunicaciones.
- Debido a que el objetivo principal de la nueva infraestructura de red es ofrecer nuevos y mejores servicios, el proyecto plantea la creación de un centro de

servicios *Data Center* mediante el cual se prestan los nuevos servicios IP requeridos por el mercado. El *Data Center* hace uso de una de las ventajas principales de la tecnología MPLS como lo son las VPNs IP para facilitar la administración de los servicios.

- La existencia de redes multiservicio en Colombia abre la posibilidad de generar nuevas empresas proveedoras y/o desarrolladoras de servicios que permitan aportar al crecimiento económico del país y que contribuyan a mejorar el estilo de vida de la sociedad.
- Para analizar a profundidad una nueva tecnología de telecomunicaciones, se requiere un fuerte soporte teórico y matemático que permita comprender en detalle el comportamiento de la tecnología sobre una red de telecomunicaciones.
- El apoyo a proyectos académicos y de investigación en el área de las telecomunicaciones por parte de proveedores y fabricantes en cuanto a infraestructura de red, conocimiento y experiencia, es fundamental para la validación de resultados y aplicación de éstos en entornos reales de los operadores nacionales de servicios, buscando impulsar el desarrollo del sector de las telecomunicaciones en Colombia.
- A través de la realización de este proyecto se logró una base de conocimiento de la tecnología MPLS y algunas de sus aplicaciones como ingeniería de tráfico, calidad de servicio, VPNs IP y VPNs de capa 2. Adicionalmente, el desarrollo de un referente bibliográfico de esta tecnología y su aplicabilidad en Colombia es un gran logro al servicio de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

RECOMENDACIONES

- Con el fin de facilitar el estudio de nuevas tecnologías y su aplicación en el entorno nacional, la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones debe establecer vínculos con fabricantes de equipos de telecomunicaciones y empresas proveedores de servicios, que apoyen a los estudiantes en la realización de proyectos de investigación y desarrollo, cuyo objetivo principal sea el beneficio tecnológico y social de la comunidad.
- Debido a la falta de recursos de red para la realización de pruebas con diferentes tecnologías de telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, se recomienda emplear simuladores software con fines académicos e investigativos para docentes y estudiantes. Estas herramientas permiten modelar y simular redes, permitiendo diseñar y estudiar redes de comunicaciones, dispositivos, protocolos y aplicaciones de manera flexible y escalable.
- A pesar de que la tecnología MPLS se encuentra muy difundida actualmente y está siendo utilizada por muchos operadores a nivel mundial, aún se encuentra en proceso de estandarización en temas como *interworking* con tecnologías de capa 2 (ATM, *Frame Relay*, Ethernet, PPP), calidad de servicio (QoS), ingeniería de tráfico, balanceo de carga, entre otros. Esto se convierte en una oportunidad de investigación para el Departamento de Telecomunicaciones y una fuente para nuevos trabajos de grado.

ACRÓNIMOS

AAL	Nivel de Adaptación de ATM (<i>ATM Adaptation Layer</i>)
ADSL	Línea de Abonado Digital Asíncrona (<i>Asynchronous Digital Subscriber Line</i>)
ATM	Modo de Transferencia Asíncrona (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)
BGP	(<i>Border Gateway Protocol</i>)
BTDS	Servicio Transparente de Datos de Bit (<i>Bit Transparent Data Service</i>)
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>)
CE	Enrutador de Borde del Cliente (<i>Customer Edge Router</i>)
CoS	Clase de Servicio (<i>Class of Service</i>)
CPU	Unidad de Procesamiento Central (<i>Central Processing Unit</i>)
CR-LDP	Protocolo de Distribución de Etiquetas basado en Restricciones (<i>Constraint-based Label Distribution Protocol</i>)
CRT	Comisión de Regulación de Telecomunicaciones
DSLAM	Multiplexor de Acceso DSL (<i>DSL Access Multiplexer</i>)
ETB	Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá
FEC	Clase Equivalente de Envío (<i>Forwarding Equivalence Class</i>)
G.SHDSL	Línea de Abonado Digital Simétrica de Alta Velocidad de Datos (<i>Symmetric High-speed Digital Subscriber Line</i>)
HDLC	Control de Enlace de Datos de Alto Nivel (<i>High-level Data Link Control</i>)
HTDS	Servicio Transparente de Datos de HDLC (<i>HDLC Transparent Data Service</i>)
IDC	Centro de Datos de Internet (<i>Internet Data Center</i>)
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>)
IPsec	Protocolo de Seguridad de IP (<i>IP Security Protocol</i>)
ISP	Proveedor de Servicio de Internet (<i>Internet Service Provider</i>)
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunications Union</i>)
LANE	Emulación de Redes de Área Local (<i>Local Area Network Emulation</i>)
LDP	Protocolo de Distribución de Etiquetas (<i>Label Distribution Protocol</i>)
LER	Enrutador de Borde de Conmutación de Etiquetas (<i>Label Edge Router</i>)
LFIB	Base de Información de Envío de Etiquetas (<i>Label Forwarding Information Base</i>)
LIB	Base de Información de Etiquetas (<i>Label Information Base</i>)
LMDS	Sistema de Distribución Local Multipunto (<i>Local Multipoint Distribution System</i>)
LSC	Controlador de Conmutación de Etiquetas (<i>Label Switching Controller</i>)
LSP	Trayecto Conmutado por Etiquetas (<i>Label-switched Path</i>)
LSR	Enrutador de Conmutación de Etiquetas (<i>Label Switch Router</i>)
MPLS	Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo (<i>Multiprotocol Label Switching</i>)
MPOA	Multiprotocolo sobre ATM (<i>Multiprotocol over ATM</i>)
MRON	Modelo de Red de Operador Nacional
MTU	Unidad Máxima de Transferencia (<i>Maximum Transfer Unit</i>)

NAT	Traducción de Direcciones de Red (<i>Network Address Translation</i>)
OSPF	Abrir el camino más corto primero (<i>Open Shortest Path First</i>)
PBR	Enrutamiento basado en Políticas (<i>Policy-based Routing</i>)
PBX	Pequeña central telefónica (<i>Private Branch Exchange</i>)
PC	Computador Personal (<i>Personal Computer</i>)
PCS	Servicios de Comunicación Personal (<i>Personal Communications Services</i>)
PDH	Jerarquía Digital Plesiócrona (<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>)
PDU	Unidad de Datos del Protocolo (<i>Protocol Data Unit</i>)
PE	Enrutador de Borde del Proveedor (<i>Provider Edge Router</i>)
PNNI	Interfaz privada entre redes (<i>Private Network To Network Interface</i>)
POPs	Puntos de Presencia de Servicio (<i>Point of Presence</i>)
POS	Interfaz de paquetes sobre SONET/SDH (<i>Packet over SONET/SDH</i>)
PPP	Protocolo Punto a Punto (<i>Point-to-point Protocol</i>)
PSN	Red Conmutada de Paquetes (<i>Packet Switched Network</i>)
PSTN	Red Telefónica Pública Conmutada (<i>Public Switched Telephone Network</i>)
PVC	Circuito Virtual Permanente (<i>Permanent Virtual Circuit</i>)
PVP	Trayecto Virtual Permanente (<i>Permanent Virtual Path</i>)
PW	Pseudo-wire
PWE3	Emulación de Pseudo-wires de borde a borde (<i>Pseudo-wire emulation edge-to-edge</i>)
PYMES	Pequeñas y Medianas Empresas
QoS	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>)
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados (<i>Integrated Services Digital Network</i>)
RSVP-TE	Protocolo de Reserva de Recursos con extensiones de Ingeniería de Tráfico (<i>Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering extensions</i>)
SAR	Función de segmentación y reensamblado (<i>Segmentation and Reassembly Function</i>)
SDH	Jerarquía Digital Sincrónica (<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>)
SONET	Red Óptica Sincrónica (<i>Synchronous Optical Network</i>)
STM	Módulo de Transporte Sincrónico (<i>Synchronous Transport Module</i>)
TCP	Protocolo de Control de Transmisión (<i>Transmission Control Protocol</i>)
TE	Ingeniería de Tráfico (<i>Traffic Engineering</i>)
ToS	Tipo de Servicio (<i>Type of Service</i>)
TTL	Tiempo de Vida (<i>Time to Live</i>)
UDP	Protocolo de Datagramas de Usuario (<i>User Datagram Protocol</i>)
VC	Circuito Virtual (<i>Virtual Circuit</i>)
VISP	Proveedor Virtual de Servicio de Internet (<i>Virtual Internet Service Provider</i>)
VLAN	Red de Área Local Virtual (<i>Virtual Local Area Network</i>)
VoADSL	Voz sobre ADSL (<i>Voice over ADSL</i>)L
VoCable	Voz sobre Cable Módem (<i>Voice over Cable Modem</i>)
VoIP	Voz sobre IP (<i>Voice over IP</i>)
VP	Trayecto Virtual (<i>Virtual Path</i>)
VPI/VCI	Identificador de Trayecto Virtual/Identificador de Circuito Virtual (<i>Virtual Path Identifier/Virtual Circuit Identifier</i>)
VPN	Red Privada Virtual (<i>Virtual Private Network</i>)
VSAT	Estaciones terminales satelitales de pequeña abertura (<i>Very Small Aperture Terminals</i>)
WAN	Red de Área Extensa (<i>Wide Area Network</i>)
WLAN	Red de Área Local Inalámbrica (<i>Wireless Local Area Network</i>)
xDSL	Tecnologías de Línea de Abonado Digital (<i>Digital Subscriber Line</i>)

BIBLIOGRAFÍA

ATM FORUM. ATM-MPLS Network Interworking Version 1.0. Agosto 2001.

ITU-T. Recomendación Y.1411. Interfuncionamiento de redes con conmutación por etiquetas multiprotocolo y modo de transferencia asíncrono – Interfuncionamiento en el plano de usuario en modo célula. Febrero 2003.

ITU-T. Recomendación Y.1412. Interfuncionamiento de redes con conmutación por etiquetas multiprotocolo y modo de transferencia asíncrono – Interfuncionamiento en el plano de usuario en modo trama. Noviembre 2003.

ITU-T. Recomendación Y.1540. Servicio de comunicación de datos con protocolo Internet – Parámetros de calidad de funcionamiento relativos a la disponibilidad y la transferencia de paquetes del protocolo Internet. Diciembre 2002.

ITU-T. Recomendación Y.1541. Objetivos de calidad de funcionamiento de red para servicios basados en el protocolo Internet. Mayo 2002.

ITU-T. Recomendación Y.1561. Parámetros de Desempeño y Disponibilidad de redes MPLS. Mayo 2004.

ITU-T. Recomendación G.114. Tiempo de transmisión en un sentido. Mayo 2003.

ROSEN Eric. RFC 3031 IETF. Multiprotocol Label Switching Architecture. Enero 2001.

ROSEN Eric. RFC 2547 IETF. BGP/MPLS VPNs. Marzo 1999.

MARTINI Luca y ROSEN Eric. draft-ietf-pwe3-atm-encap-06 IETF. Encapsulation Methods for Transport of ATM Over IP and MPLS Networks. Julio 2004.

MINTA Adrian. Migration to Unified Infrastructure. Diciembre 2002.

COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE TELECOMUNICACIONES. Informe Sectorial de Telecomunicaciones. Bogotá D.C. Julio 2004.

PYRAMID RESEARCH y CINTEL. Análisis del mercado servicios de banda ancha en Colombia. Bogotá D.C. Diciembre 2003.