

ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRONICA

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA**

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA
VOZ Y DATOS PARA REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA
GENERACIÓN EN EL ECUADOR”**

ANA CRISTINA AYALA ABARCA

SANGOLQUI – ECUADOR

2011

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: “ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA VOZ Y DATOS PARA REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN EN EL ECUADOR”, ha sido realizado en su totalidad por la señorita Ana Cristina Ayala Abarca con C.I. 060390134-9, bajo nuestra dirección.

Ing. Román Lara
DIRECTOR

Ing. Rubén León
CODIRECTOR

RESUMEN

La evolución de la tecnología de las redes de telefonía celular ha desarrollado soluciones que ofrecen a los usuarios una interconexión no solo dedicada a la voz sino también al acceso de datos y con conexión a Internet. Tecnologías como 3G y la pronta evolución a LTE implican mayores velocidades de acceso y una dedicación exclusiva al tráfico de datos.

Con este antecedente el presente proyecto tiene como objetivo diseñar una red de transporte IP RAN para voz y datos en redes de cuarta generación en el país, puesto que la mayor demanda de prestación de servicios y ancho de banda producido por las aplicaciones que se pueden implementar en las nuevas redes móviles generan grandes desafíos para los operadores.

Los operadores móviles necesitan migrar sus redes de transporte o backhaul y el encontrar la mejor solución costo-efectivo para ésta transformación definitivamente se vuelve un reto.

En este escenario, la optimización de la red de transporte será de vital importancia para ellos, es por esto que la migración a una red de conmutación de paquetes es la clave para afrontar estos desafíos.

Con el diseño presentado para la implementación de la nueva red IP RAN se pretende soportar nuevos servicios, sin dejar de lado la flexibilidad necesaria para utilizando la infraestructura existente, se maneje tanto las redes de transporte legacy como redes ATM y SDH y las futuras redes.

Estos cambios del backhaul deberán ser capaces de asegurar banda ancha (100 Mbps x nodo) con capacidad suficiente para manejar el alto tráfico actual y su crecimiento a futuro.

DEDICATORIA

“La grandeza de un ideal no es alcanzarlo, sino luchar por él, alcanzarlo es sólo una recompensa.”

Juan José Medina

Después de tanto tiempo de estudio y dedicación he llegado a culminar una de las etapas más importantes de mi vida, nada de esto hubiese sido posible sin la ayuda de mis padres César y Fabiola, es por eso que les dedico el presente proyecto de tesis, pues son ellos quienes con su palabra y ejemplo han sabido guiar mi camino desde el día en que nací, forjándome como una mujer integra.

A mis hermanos Tavo, Cepe y Shaw, que día a día con su alegría y tolerancia se convirtieron en los cómplices perfectos y los amigos sinceros e incondicionales.

A mis abuelitos quienes siempre han estado pendientes de cada paso que doy, por el amor infinito que me han brindado.

Para ustedes y por ustedes

Ana Cristina

AGRADECIMIENTO

A mi Dios, principio y fin de mi vida, con él todo sin él nada, por llenarme de bendiciones cada día de mi vida.

A mi madre porque con su dedicación y tenacidad a sabido alentarme a cada instante convirtiéndose en mi mejor amiga y en mi modelo a seguir.

A mi padre que con su ejemplo me ha demostrado que con los pies en la tierra puedo pensar en el futuro para construirlo día a día con mi accionar.

A mis hermanos que ven en mi su ejemplo y a quienes no quiero defraudar jamás.

A mi director y codirector, ingenieros Román Lara y Rubén León, quienes con sus enseñanzas y apoyo me permitieron desarrollar con éxito el proyecto.

Al ingeniero Byron Ramos quien supo transmitirme su conocimiento, ayudándome así a la consecución de este objetivo.

A Diego por el apoyo, paciencia y amor incondicional durante este tiempo, porque sé que está a mi lado siempre.

A mis amigos de universidad, por esa amistad sincera que me brindaron porque en ellos pude encontrar seres humanos maravillosos que con lecciones de vida me han enseñado a crecer.

Y a todos y cada una de las personas que dejaron una huella en mi vida, pues de alguna manera contribuyeron en mi formación personal y profesional.

PRÓLOGO

Las necesidades de ancho de banda para transmisión de voz y datos se han incrementado en los últimos años exponencialmente en lo que a telefonía celular se refiere, incentivando el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías en lo que respecta a redes de transporte.

Por esta razón las redes de transporte de los operadores celulares deben migrar a nuevas tecnologías, que permitan el manejo del crecimiento del tráfico de datos manteniendo la rentabilidad para los operadores.

Es precisamente la migración a redes por conmutación de paquetes en el transporte donde se centra el objetivo de esta tesis, pues se pretende diseñar una red IP RAN que sea capaz de adaptarse al enorme crecimiento del ancho de banda sin que esto suponga un sobre costo para el operador.

CAPÍTULO 1: En el primer capítulo se presenta brevemente el proyecto a realizar, se definen los objetivos y se detalla el alcance de la tesis.

CAPÍTULO 2: En este capítulo se describe brevemente la historia de la telefonía celular en el país, así como también las funciones de los organismos encargados de regular las telecomunicaciones y de igual forma presenta las empresas de telefonía móvil que brindan servicios de voz y datos actualmente en el Ecuador y las bandas de frecuencias asignadas por el Ente Regulador a las mismas. Para comprender mejor las redes de transporte que han utilizado los operadores móviles se presenta una comparación entre las tecnologías y medios de transmisión.

CAPÍTULO 3: En el tercer capítulo se muestra el estudio del arte de la tecnología 4G, específicamente se centra la investigación alrededor de *Long Term Evolution* (LTE), según la

3GPP, mostrándose las principales características de modulación y demás propiedades de esta tecnología. Se describe también la arquitectura utilizada y los canales a través de los cuales se da la señalización, igualmente una breve reseña de la evolución de los diferentes estándares que definen a LTE. Además de una explicación de las posibles bandas en las que se podría desplegar esta tecnología en el país y los principales servicios que ofrece.

CAPÍTULO 4: Dada la importancia que representa el tráfico de datos en la actualidad, en este capítulo se muestra todas las características de la tecnología de conmutación de etiquetas *Multiprotocol Label Switching* (MPLS), los elementos que componen la red, protocolos que se utilizan y los beneficios que se obtienen al implementar una red IP con las características aquí descritas.

CAPÍTULO 5: Todo lo estudiado en los capítulos anteriores se aplica en este capítulo central de la tesis, empezando por puntualizar la situación actual de las redes de transporte utilizadas, las fases para la migración a una red ALL IP y hasta plantear el diseño descriptivo de una red *IP Radio Access Network* (IP RAN) que mejorará el transporte de voz y datos en las futuras redes de telefonía móvil. Se muestra también algunos modelos de equipos que se encuentran en el mercado y que servirían para implementar la red pues cumplen con las características antes descritas. Los tipos de sincronismos que se pueden utilizar para un funcionamiento adecuado de la red y las principales ventajas y desventajas que se obtendrían al implementar la misma, también son explicados en este capítulo.

CAPÍTULO 6: Es el último capítulo del documento, en él se presentan las conclusiones y recomendaciones extraídas después de estudiar todos los detalles para el diseño de la red de transporte IP RAN para voz y datos para redes de telefonía celular de cuarta generación en el Ecuador.

ANEXOS: En esta sección se presenta los datasheets de los equipos mostrados que servirían para la implementación de la red IP RAN.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	25
1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	25
1.1. Introducción	25
1.2. Alcance	27
1.3. Objetivos.....	27
1.3.1. General	28
1.3.2. Específicos	28
1.4. Organización del Proyecto de Graduación.....	28
CAPÍTULO II.....	30
2. LA TELEFONÍA MÓVIL EN EL ECUADOR	30
2.1. Introducción a las Telecomunicaciones en el Ecuador.....	30
2.2. Organismos de Control que rigen actualmente la Telefonía Celular en el Ecuador. 32	
2.2.1. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL).....	33
2.2.2. Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL).....	34
2.2.3. Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL).....	36
2.2.4. Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL).....	36
2.3. Leyes que rigen actualmente la Telefonía Celular en el Ecuador	37

2.3.1.	Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada	38
2.3.2.	Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada	39
2.4.	Empresas de Telefonía Celular en el Ecuador.....	40
2.4.1.	CONECCEL S.A.	40
2.4.2.	OTECCEL S.A.	41
2.4.3.	TELECSA S.A.	41
2.5.	Tecnologías utilizadas en las empresas de Telefonía Celular del país para el transporte de voz y datos.....	42
2.6.	Aporte de la Telefonía Celular en el crecimiento económico y tecnológico.....	43
CAPÍTULO III		44
3.	REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN	44
3.1.	Introducción	44
3.2.	LTE (<i>Long Term Evolution</i>)	46
3.3.	Esquema de Transmisión <i>Downlink</i> en LTE.....	48
3.3.1.	OFDMA	48
3.4.	Esquema de Transmisión <i>Uplink</i> en LTE	50
3.4.1.	SC- FDMA	50
3.5.	Antenas MIMO	51
3.6.	Arquitectura basada en 3GPP.....	53
3.6.1.	Capas de la Interfaz de Radio de E-UTRA.....	58
3.6.2.	Tipos de Canales	58
3.6.2.1.	Canales del Enlace Descendente:.....	59
3.6.2.2.	Canales del Enlace Ascendente:	62
3.7.	Estándares de LTE	63
3.7.1.	Realese 8	63

3.7.2.	Realse 9	65
3.7.3.	Realse 10	66
3.8.	Bandas de frecuencias y asignación de bandas de LTE	67
3.9.	Obstáculos de implementación de LTE en América Latina	69
3.10.	Servicios	70
CAPÍTULO IV.....		72
4.	TECNOLOGÍA IP/MPLS (MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING).....	72
4.1.	Introducción a la Tecnología MPLS	72
4.2.	Conceptos básicos de routing IP/MPLS.....	73
4.2.1.	Router	73
4.2.2.	Protocolos de Enrutamiento	74
4.2.2.1.	Tipos de protocolos de enrutamiento.....	74
4.3.	Etiquetas en MPLS	92
4.3.1.	Pila de Etiquetas	93
4.3.2.	Operaciones con etiquetas	94
4.3.3.	Intercambio de etiquetas (<i>Forwarding</i>).....	95
4.4.	Elementos de una red MPLS.....	96
4.4.1.	LSP (Label Switch Path)	100
4.5.	Estándares y Protocolos de la Tecnología MPLS	101
4.5.1.	LDP	102
4.5.2.	CR-LDP.....	103
4.5.3.	RSVP-TE.....	105
4.6.	Servicios de Red Privada Virtual (VPN).....	107
4.6.1.	VPLS (Capa 2)	109

4.6.2.	VPRN (Capa 3)	111
4.7.	Beneficios de Multiprotocol Label Switching.....	114
4.7.1.	Ingeniería de Tráfico	114
4.7.2.	Calidad de Servicio	115
4.7.3.	Transmisión jerárquica	116
4.7.4.	Escalabilidad de la red.....	117
4.7.5.	Seguridad.....	117
CAPÍTULO V	119
5.	DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA REDES DE CUARTA GENERACIÓN	119
5.1.	Situación actual de las redes de transporte tradicionales.....	119
5.2.	Microondas para Redes de Transporte de Nueva Generación.....	122
5.2.1.	RTN 605	123
5.2.2.	RTN 620.....	125
5.2.3.	RTN 910.....	127
5.2.4.	RTN 950.....	128
5.2.5.	MPR 9500	130
5.3.	Equipos multiservicios para Redes de Transporte de Nueva Generación	131
5.3.1.	Router SR 7750	132
5.3.2.	Router SAR 7705	133
5.4.	Etapas de migración de una red de transporte legacy a una red IP RAN	135
5.4.1.	Low RAN o Acceso	135
5.4.2.	Mid RAN o Agregación	136
5.4.3.	High RAN o Concentración	136
5.5.	Diseño descriptivo de una Red de Transporte IP RAN.....	137

5.5.1. Diseño Físico.....	138
5.5.2. Diseño Lógico	142
5.6. Tipos de Sincronismo de una red IP RAN	145
5.6.1. GPS	147
5.6.2. Synchronous Ethernet.....	149
5.6.3. IEEE 1588v2	150
5.6.4. Network Time Protocol (NTP).....	153
5.6.4.1. NTPv3 en IP RAN.....	154
5.7. Ventajas y desventajas del IP RAN	155
5.7.1. Ventajas de IP RAN	155
5.7.2. Desventajas de IP RAN	156
CAPÍTULO VI.....	157
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	157
6.1. Conclusiones	157
6.2. Recomendaciones	159
ANEXOS.....	161
Anexo 1:.....	162
Anexo 2:.....	165
Anexo 3:.....	168
Anexo 4:.....	171
Anexo 5:.....	174
Anexo 6:.....	180
Anexo 7:.....	193
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	200

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II: LA TELEFONÍA MÓVIL EN EL ECUADOR

Tabla 2. 1. Frecuencias asignadas a Conecel S.A.	40
Tabla 2. 2. Frecuencias asignadas a Otecel S.A.	41
Tabla 2. 3. Frecuencias asignadas a Telecsa S.A.	42
Tabla 2. 4. Evolución de la Tecnología celular en el Ecuador.	43

CAPÍTULO III: REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN

Tabla 3. 1. Especificaciones de Parámetros de LTE.	48
Tabla 3. 2. Comparación de parámetros clave entre LTE (3GPP Rel-8), IMT- <i>Advanced</i> y LTE- <i>Advanced</i> (3GPP Rel-10).....	67
Tabla 3. 3. Bandas de frecuencias definidas por 3GPP.	68
Tabla 3. 4. Comparación de las características de los servicios.....	71

CAPÍTULO IV: TECNOLOGÍA IP/MPLS (MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING)

Tabla 4. 1. Ejemplo de construcción de tabla de enrutamiento del protocolo RIP.	79
Tabla 4. 2. Ejemplo de tabla de enrutamiento del protocolo RIP en el siguiente salto.	80
Tabla 4. 3. Tabla comparativa entre vector distancia y estado de enlace.	91
Tabla 4. 4. Tabla comparativa entre protocolos de enrutamiento.	91

Tabla 4. 5. Comparación entre VPLS y VPRN.....	114
Tabla 4. 6. Tabla de valores de DSCP.....	116
Tabla 4. 7. Tabla de servicios correspondiente de CoS.....	116

CAPÍTULO V: DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA REDES DE CUARTA GENERACIÓN

Tabla 5. 1. Requerimientos de sincronismo de diferentes tecnologías.....	147
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II: LA TELEFONÍA MÓVIL EN EL ECUADOR

Figura 2. 1. Entes Reguladores de las telecomunicaciones en el Ecuador.	33
Figura 2. 2. Funciones del Ministerio de las Telecomunicaciones en el Ecuador.....	34
Figura 2. 3. Funciones del Consejo Nacional de las Telecomunicaciones en el Ecuador.....	35
Figura 2. 4. Funciones de la Secretaría Nacional de las Telecomunicaciones en el Ecuador. ...	36
Figura 2. 5. Funciones de la Superintendencia de Telecomunicaciones en el Ecuador.	37

CAPÍTULO III: REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN

Figura 3. 1. Evolución de Release de la 3GPP.	46
Figura 3. 2. Subcanalización en OFDMA.	49
Figura 3. 3. Representación del Esquema de Modulación OFDMA	49
Figura 3. 4. Representación de la Modulación SC-FDMA.	51
Figura 3. 5. Técnicas de múltiples antenas en LTE.....	53
Figura 3. 6. Evolución de las Arquitecturas de Red según los diferentes Release.	55
Figura 3. 7. Representación de la Arquitectura de LTE.	57
Figura 3. 8. Evolución de Velocidades de LTE.....	63
Figura 3. 9. Bandas de LTE en el Mundo.....	68

CAPÍTULO IV: TECNOLOGÍA IP/MPLS (MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING)

Figura 4. 1. Ubicación de MPLS en el modelo OSI.....	73
Figura 4. 2. Representación de una red.....	79
Figura 4. 3. Representación de una red con OSPF.....	87
Figura 4. 4. Grafo con el camino más corto aplicando Dijkstra.....	87
Figura 4. 5. Formato de la cabecera MPLS.....	93
Figura 4. 6. Pila de Etiquetas con funcionamiento LIFO.....	94
Figura 4. 7. Operación PUSH.....	94
Figura 4. 8. Operación SWAP.....	95
Figura 4. 9. Operación POP.....	95
Figura 4. 10. Tabla de envío utilizada en MPLS.....	96
Figura 4. 11. Intercambio de etiquetas en MPLS.....	96
Figura 4. 12. Elementos de la Red IP/MPLS.....	97
Figura 4. 13. Plano de Control y Datos en MPLS.....	99
Figura 4. 14. Esquema Funcional de MPLS.....	100
Figura 4. 15. Representación de un pseudowire.....	101
Figura 4. 16. Label Distribution Protocol LDP.....	103
Figura 4. 17. Protocolo CR-LDP.....	104
Figura 4. 18. Protocolo RSVP-TE.....	107
Figura 4. 19. Modelo de VPN.....	108
Figura 4. 20. VPLS desde perspectiva del usuario.....	109
Figura 4. 21. Modelo de una VPLS.....	110
Figura 4. 22. VPRN desde perspectiva del usuario.....	112

CAPÍTULO V: DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA REDES DE CUARTA GENERACIÓN

Figura 5. 1. Evolución de la Era de Datos.....	120
Figura 5. 2. Modulación adaptativa de Microondas IP.....	123
Figura 5. 3. Equipo RTN 605	124
Figura 5. 4. Equipo RTN 620.	125
Figura 5. 5. Equipo RTN 910.	127
Figura 5. 6. Equipo RTN 950.	128
Figura 5. 7. Equipo MPR 9500.....	130
Figura 5. 8. Router SR 7750 con diferentes slots.	132
Figura 5. 9. Router SAR 7705 con diferentes slots.	134
Figura 5. 10. Etapas de migración a una red IP RAN.	135
Figura 5. 11. Diseño físico descriptivo de una red IP RAN.	139
Figura 5. 12. Capacidad demanda utilizando agregación TDM.....	140
Figura 5. 13. Capacidad demanda utilizando agregación IP.	141
Figura 5. 14. Diseño lógico descriptivo de una red IP RAN.....	143
Figura 5. 15. Sincronización GPS en redes 4G.	148
Figura 5. 16. Sincronización Sync-E en redes 4G.....	149
Figura 5. 17. Sincronización IEEE 1588v2 en redes 4G.....	151

GLOSARIO

AS: siglas en inglés de Sistemas Autónomos, es un conjunto de redes y dispositivos que se encuentran administrados por una sola entidad que cuentan con una política común de definición de trayectorias para Internet.

ATM: *Asynchronous Transfer Mode*, es una tecnología de telecomunicación desarrollada para hacer frente a la gran demanda de capacidad de transmisión para servicios y aplicaciones.

Backhaul: También conocido como red de retorno permite una conexión de baja, media o alta velocidad que conecta a computadoras u otros equipos de telecomunicaciones encargados de hacer circular la información.

BGP: *Border Gateway Protocol*, protocolo mediante el cual se intercambia información de encaminamiento entre sistemas autónomos.

CAPEX: *Capital Expenditures* son los gastos de capital o inversiones de capital que crean beneficios, es utilizado por una compañía para adquirir o mejorar los activos fijos tales como equipamientos, propiedades o edificios industriales.

CDMA: Tecnología genérica que es un sistema de comunicaciones por radio celular digital que permite un elevado número de comunicaciones de voz o datos simultáneas compartiendo el mismo medio de comunicación.

CE: *Customer Edge Router*, es un router en las instalaciones del cliente que se conecta al borde de proveedor de servicios de la red IP / MPLS.

Celda o célula: Área de cobertura estipulada para receptores o transmisores que pertenecen a la misma estación base.

CIDR: *Classless Inter-Domain Routing*, permite identificar una dirección IP mediante dicha dirección, seguida de una barra y un número que identifica el número de unos en su máscara.

CONARTEL: Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión.

CONATEL: Consejo Nacional de Telecomunicaciones.

CoS: *Class of Service*.

CR-LDP: *Constraint-Based Routing Label Distribution Protocol*, protocolo de señalización desarrollado para soportar túneles.

DiffServ: *Differentiated Services*, modelo de Calidad de Servicio en Internet basado en Servicios Diferenciados.

E1: es un formato de transmisión digital, equivale a 2048 kilobits, formado por 30 canales de 64 kbps y 2 canales reservados para la señalización y sincronía.

EPC: *Evolved Packet Core*, es la red troncal de LTE.

Ethernet: Estándar de redes de área local con acceso al medio a través de CSMA/CD.

E-UTRAN: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*, es la red de acceso de LTE.

FDD: *Frequency Division Duplex* o Dúplex por división en frecuencia es una tecnología de radio que utiliza un espectro pareado. Se utiliza en sistemas de comunicaciones digitales.

FEC: *Forwarding Equivalence Class*, Conjunto de paquetes que comparten los mismos atributos.

Frame Relay: Técnica de comunicación mediante retransmisión de tramas para redes de circuito virtual. Consiste en una forma simplificada de tecnología de conmutación de paquetes que transmite una variedad de tamaños de tramas o marcos (*frames*) para datos, perfecto para la transmisión de grandes cantidades de datos.

GSM: *Global System for Mobile Communication*, es un sistema digital de telefonía móvil ampliamente usada en Europa. Ésta tecnología usa una variación de la tecnología TDMA.

Handover: Transición que se produce cuando pasamos de una célula a otra, es el responsable de mantener el servicio de manera constante y que la transferencia sea transparente al usuario.

HARQ: *Hybrid Automatic Repeat reQuest* es la combinación de códigos de corrección de errores (FEC) con un enfoque para manejar los errores de retransmisión llamado ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), utilizado prácticamente en todos los modernos sistemas de comunicación.

HSPA: *High-Speed Packet Access* es la combinación de tecnologías posteriores y complementarias a la tercera generación de telefonía móvil (3G), teóricamente admite velocidades de hasta 14,4 Mb/s en bajada y hasta 2 Mb/s en subida.

IETF: *Internet Engineering Task Force*, es una organización internacional abierta de normalización, que contribuye a la ingeniería de Internet.

Intelsat: Red de satélites de comunicaciones que cubre el mundo entero.

IntServ: *Integrated Services*, modelo de Calidad de Servicio basado en Servicios Integrados de Internet

IP: *Internet Protocol*, es un protocolo utilizado para enviar datos a través de una red.

IPv4: Versión 4 del protocolo IP, usa direcciones de 32 bits.

IPv6: Versión 6 del protocolo IP, usa direcciones de 128 bits.

IP RAN: *IP Radio Access Network*.

LDP: Protocolo utilizado para la distribución de etiquetas en MPLS.

LER: *Label Edge Router*, routers ubicados en el borde de la red MPLS para desempeñar las funciones tradicionales de encaminamiento y proporcionar conectividad a sus usuarios.

LFIB: *Label Forwarding Information Base*, es una tabla que almacena un LSR y es usada en el reenvío de paquetes etiquetados.

LIB: *Label Information Base*, es una tabla que guarda las etiquetas de los paquetes que se usan como índice para una asignación etiqueta/FEC.

LSP: *Label Switched Path*, define un camino a través de la red que todos los paquetes asignados a un FEC específico lo siguen.

LSR: *Label Switched Router Label*, router que puede enviar paquetes basados en un valor de etiqueta que está añadida al paquete.

LTE: *Long Term Evolution*, nuevo estándar de la norma 3GPP.

Métrica: Valor utilizado por los protocolos de enrutamiento para asignar costos a fin de alcanzar las redes remotas. La métrica se utiliza para determinar la mejor ruta cuando existen múltiples rutas hacia la misma red remota.

MIMO: *Multiple-Input Multiple-Output*, sirve para tomar ventaja del multiplexado y así incrementar el ancho de banda y el alcance de las conexiones inalámbricas.

MINTEL: Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información.

MPLS: *Multiprotocol Label Switching*, es una solución que integra el control del enrutamiento IP (capa 3) con la simplicidad de la conmutación de la capa 2.

NGN: *Next Generation Network* o Red de Nueva Generación, es una red basada en paquetes que puede proveer servicios de telecomunicaciones y que puede hacer uso de múltiples tecnologías de banda ancha con transporte de calidad de servicio y en la cual las funciones relativas al servicio son independientes de las tecnologías relativas al transporte

OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*.

OPEX: *Operational Expenditure* o gastos de operación.

PDH: *Plesiochronous Digital Hierarchy*, es una tecnología usada telefonía que permite enviar varios canales telefónicos sobre un mismo medio (cable coaxial, radio o microondas) usando técnicas de multiplexación por división de tiempo y equipos digitales de transmisión.

PE: *Provider Edge Router* es un router de borde del proveedor que tiene clientes conectados.

PSTN: *Public Switched Telephone Network* o red telefónica pública conmutada es una red de circuitos de telecomunicaciones interconectados mediante conmutadores proporcionados por los operadores de servicios de comunicaciones, es una red telefónica de abonados.

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*, es una técnica de modulación digital avanzada que transporta datos, mediante la modulación de la señal portadora de información tanto en amplitud como en fase.

QoS: *Quality of Service*, es una medida de desempeño que refleja la calidad de servicio y su disponibilidad.

QPSK: *Quadrature Phase Shift Keying*, es un método de modulación digital para datos. Se utiliza para codificar una señal y adaptarla al medio de transmisión.

RSVP: *Resource Reservation Protocol*, solicita recursos para flujos en una sola dirección (unidireccional).

RSVP-TE: RSVP con Ingeniería de Tráfico.

SAE: *System Architecture Evolution*, es la nueva arquitectura ha sido desarrollado para LTE a fin de proporcionar un nivel más alto de rendimiento.

SC-FDMA: *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*.

SDH: *Synchronous Digital Hierarchy*, es un sistema de transmisión digital de datos que utiliza fibra óptica, utilizado para redes de telecomunicaciones de alta velocidad y alta capacidad.

SENATEL: Secretaría Nacional de Telecomunicaciones.

Streaming: Tecnología utilizada para permitir la visualización y la audición de un archivo mientras se está descargando, a través de la construcción de un *buffer* por parte del cliente

SUPERTEL: Superintendencia de Telecomunicaciones.

T1: Línea de transmisión de 1,544 Mbps, formado por 24 canales de 64 kbps, estándar norteamericano.

TCP: *Transmission Control Protocol*, es un protocolo de transporte seguro usado en IP.

TDD: *Time Division Duplex* o Dúplex por división en el tiempo en español, es una tecnología de radio que utiliza un espectro no pareado.

TDMA: Tecnología inalámbrica de segunda generación, que distribuye las unidades de información en ranuras alternas de tiempo, dando acceso múltiple a un número reducido de frecuencias. TDMA permite dar servicios de alta calidad de voz y datos.

UDP: *User Datagram Protocol*, es un protocolo de transporte poco fiable usado en IP.

UE: *User Equipment* o equipo terminal utilizado por el usuario.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones es un organismo perteneciente a las Naciones Unidas dedicado a la normalización de las telecomunicaciones internacionales.

UMTS: *Universal Mobile Telecommunications System* o Servicios Universales de Telecomunicaciones Móviles es un sistema de telecomunicaciones de tercera generación basado en WCDMA.

VLSM: *Variable Length Subnet Masking* o máscara de subred de longitud variable es la técnica por la cual se diseña un esquema de direccionamiento usando varias máscaras en función de la cantidad de hosts, para evitar el agotamiento de direcciones IP.

VPLS: *Virtual Private LAN Service* es la tecnología de red para ofrecer servicios Ethernet basados en comunicaciones multipunto a multipunto sobre de redes IP/MPLS.

VPN: Tecnología de red que permite una extensión de la red local sobre una red pública o no controlada, como por ejemplo Internet.

VPRN: Tipo de VPN de capa 3 que permite la conexión de múltiples sitios de dominio enrutada sobre una red IP/MPLS administrada por un proveedor de servicios.

WCDMA: *Wideband Code Division Multiple Access*, en español Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha, es la tecnología de interfaz de aire en la que se basa la UMTS.

WI-FI: *Wireless Fidelity* es un conjunto de estándares para redes inalámbricas basado en las especificaciones IEEE 802.11, creado para redes locales inalámbricas, pero que también se utiliza para acceso a Internet.

WIMAX: *Worldwide Interoperability Microwave Access* es un protocolo de comunicaciones inalámbricas que permite acceso a la red de alta velocidad desde computadores, teléfonos y otros aparatos móviles a distancias mayores que otras tecnologías anteriores, como Bluetooth o WiFi.

CAPÍTULO I

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Introducción

El rápido incremento del tráfico de datos que han experimentado las redes celulares existentes, ha hecho que muchas de las redes de transporte (*backhaul*) sean pequeñas y el problema trascendental es que el tráfico sigue creciendo de forma acelerada y con una tendencia al alza, más aún con la existencia de las tecnologías de nueva generación (4G). Es por este motivo, que la migración a una red de transporte que permita manejar esta demanda de tráfico en redes móviles de manera adecuada será realmente trascendental.

En la actualidad, el medio de transporte en las redes de telefonía de 2G y 3G se basa en la multiplexación por división de tiempo (TDM) o en tecnología de jerarquía digital sincrónica (SDH), fundamentalmente orientada a conmutación por circuitos. Sin embargo las redes de cuarta generación requieren de un medio de transporte que optimice el ancho de banda, a un bajo costo, con alta flexibilidad [1], es decir orientada a conmutación por paquetes.

Con las tradicionales redes de transporte: SDH y PDH se deben implementar más conexiones físicas y lógicas a nivel de la RAN (*Radio Access Network*), a fin de satisfacer las necesidades de ancho de banda de los usuarios especialmente en la transmisión de datos, generando mayores gastos de capital en la red celular para el proveedor de servicio en lo que a CAPEX y OPEX se refiere y aumentando la probabilidad de errores al momento de la ampliación de dicho ancho de banda.

Las redes de 4G a diferencia de las redes 2G y 3G, presentan una concentración de servicios y control en la Radio Base, disminuyendo así el volumen de tráfico que se envía al nodo controlador; con esto las nuevas tecnologías requieren una conectividad completamente diferente a la que pueden proveer las redes de transporte *legacy*, para lograr esto se necesita una paquetización de la red en todo el *backhaul* o red de transporte.

La tecnología IP marca la diferencia al momento de transportar cualquier tipo de información, sin importar los medios que se utilicen ya sean cobre, fibra óptica, enlaces de microonda, enlaces satelitales, etc.

Debido a la alta flexibilidad que presenta la tecnología IP, los estándares 3GPP han tomado dicha tecnología IP, para que sea la encargada de que converjan a través de la red de transporte los servicios de voz datos y video.

El incremento del tráfico móvil de banda ancha es evidente, puesto que en América Latina existen aproximadamente 323 millones de usuarios de telefonía móvil. En Ecuador hay alrededor de 14 millones de usuarios con una penetración de mercado de del 97% y un ARPU alrededor de 12 dólares mensuales que varía del 2.7 al 7.9% [2]. Por lo expuesto en estas estadísticas se observa que los datos cada vez son más importantes; sin embargo, hoy en día, las operadoras deben a brindar mayor capacidad de servicio a un precio inferior, motivadas por la tendencia del mercado, con esto, los ingresos el operador tienen a disminuir y el migrar a una infraestructura IP podría ser la mejor solución.

En este marco, la migración del backhaul juega un papel importante pero evitando añadir líneas de E1s y STM1 físicamente sino tratando de mejorar la capacidad de la red existente para garantizar un servicio óptimo sin que esto suponga un sobre costo para el operador, ahorrando así tiempo y dinero (OPEX).

Por las razones expuestas anteriormente, el conocer y comprender el funcionamiento de una red de transporte flexible, como lo es el *backhaul* IP RAN, permitirá aportar a las empresas de telefonía móvil del país (Claro, Movistar, CNT-Alegro) con un estudio certero que les proporcione información para que empiecen a invertir en una red de transporte óptima y migrar su infraestructura para estar preparados para los servicios de voz y de datos innovadores que proporcionarán las redes de cuarta generación.

1.2. Alcance

Con el presente proyecto se pretende estudiar una red de transporte IP RAN en una red de Telefonía Celular de Cuarta Generación (LTE).

Se investigará sobre la situación de las Empresas de Telefonía Móvil que operan en el país, así como también los principales Entes Reguladores, para comprender el aporte a la tecnología del País.

Dentro del proyecto se realizará un estudio de las redes de cuarta generación para comprender los servicios que se puede ofrecer así como la arquitectura y estándares utilizados para la implementación de IP RAN.

Es necesario definir una arquitectura de red de transporte apropiada para soportar los nuevos servicios de la red de cuarta generación, por lo que se debe estudiar minuciosamente todos los elementos involucrados en el *backhaul* IP.

Con base en el análisis anterior, la red IP RAN debe permitir la prestación de una conexión fiable de servicios de voz y datos, por lo que se debe analizar detenidamente los protocolos que deben implementarse, para finalmente desarrollar un diseño descriptivo de una red de transporte IP RAN para una red de telefonía móvil 4G.

Para finalizar se pretende mostrar las ventajas y desventajas del IP RAN sobre redes de 4G así como también el aporte presentado a las empresas de telefonía celular.

1.3. Objetivos

A fin de cumplir con el alcance definido anteriormente, se han planteado los siguientes objetivos:

1.3.1. General

- Estudiar y diseñar una red de transporte IP RAN para voz y datos en Redes de Telefonía Celular de Cuarta Generación en el Ecuador.

1.3.2. Específicos

- Investigar el estado de las Empresas de Telefonía Móvil en el Ecuador.
- Estudiar el estado del arte de las redes de telefonía móvil de cuarta generación (LTE).
- Analizar la tecnología IP/MPLS y su contribución en el *backhaul* IP.
- Diseñar una red de transporte IP RAN para redes de telefonía de cuarta generación.
- Establecer los beneficios y desventajas que el IP RAN proporciona en redes de cuarta generación para las empresas que brindan el servicio de telefonía celular en el Ecuador.

1.4. Organización del Proyecto de Graduación

El proyecto se ha dividido en seis capítulos que facilitarán el estudio de los requisitos necesarios para el diseño de la red de transporte IP RAN, a continuación se detallan los temas tratados en cada sección.

CAPÍTULO 1: Brevemente descripción del proyecto a realizar, alcance y objetivos planteados.

CAPÍTULO 2: En este capítulo se describe la situación actual de las telecomunicaciones en el país, los entes reguladores y las empresas de telefonía celular en el país, además de un cuadro comparativo de las redes de transporte que han utilizado los operadores móviles.

CAPÍTULO 3: En el tercer capítulo se muestra el estudio del arte de la tecnología 4G, centrándose la investigación alrededor de *Long Term Evolution* (LTE), según la 3GPP, se describe las principales características de modulación y demás propiedades de esta tecnología. Además de una explicación de las posibles bandas en las que se podría desplegar esta tecnología en el país y los principales servicios que ofrece.

CAPÍTULO 4: Este capítulo muestra las características de la tecnología de conmutación de etiquetas *Multiprotocol Label Switching* (MPLS), los elementos que componen la red, protocolos que se utilizan y los beneficios que se obtienen al implementar una red IP/MPLS.

CAPÍTULO 5: El capítulo central de la tesis está definido por la situación actual de las redes de transporte utilizadas, las fases para la migración y el diseño descriptivo de una red *IP Radio Access Network* (IP RAN) que mejorará el transporte de voz y datos en las futuras redes de telefonía móvil también se detallan las principales ventajas y desventajas que se obtendrían al implementar esta red.

CAPÍTULO 6: Es el último capítulo del documento, se presentan las conclusiones y recomendaciones extraídas después de estudiar todos los detalles para el diseño de la red de transporte IP RAN para voz y datos para redes de telefonía celular de cuarta generación en el Ecuador.

ANEXOS: En esta sección se presenta los *datasheets* de los equipos mostrados que servirían para la implementación de la red IP RAN.

CAPÍTULO II

2. LA TELEFONÍA MÓVIL EN EL ECUADOR

2.1. Introducción a las Telecomunicaciones en el Ecuador

Las telecomunicaciones en el país inician a finales del siglo pasado con una comunicación telegráfica entre Quito y Guayaquil, por medio de alambre. En 1871 se realiza un convenio con la empresa *All American Cable and Radio* para proporcionar servicios de telegrafía internacional a través de cable submarino [3]. La Dirección de Telégrafos fue el primer organismo nacional que reguló las Telecomunicaciones.

En 1900 se crea la primera central manual de telefonía urbana en la ciudad de Quito, y 20 años después se interconecta inalámbricamente Quito y Guayaquil con el servicio de radiotelegrafía.

La empresa Radio Internacional del Ecuador, entidad estatal autónoma para servicios internacionales de telegrafía y telefonía, se crea en 1943 [4], sus servicios se brindaban en las ciudades de Quito, Guayaquil, Cuenca, Manta y Esmeraldas.

La telefonía automática, inicia en 1945 cuando el Gobierno contrata a L.M. Ericsson para instalar 3 centrales telefónicas urbanas en Quito, Guayaquil y Cuenca. La Empresa de Teléfonos de Quito (ETQ), instala y explota los servicios de telefonía en la capital, más tarde se inaugura en Cuenca la primera central telefónica automática urbana en el Ecuador, y para 1953, la Empresa de Teléfonos de Guayaquil (ETG), instala y explota la telefonía urbana en Guayaquil [3].

En 1958 al unirse la Dirección de Telégrafos y la empresa Radio Internacional del Ecuador, se crea la empresa de Radio Telégrafos y Teléfonos del Ecuador (ERTTE) [3]. Tras la reestructuración de dicha empresa se crea la Empresa Nacional de Telecomunicaciones (ENTEL) y se crea también el Consejo Nacional de Telecomunicaciones, encargado de coordinar las actividades de las telecomunicaciones en el país y de las tres empresas estatales (ENTEL-ETQ ETG).

En 1971 el Ecuador forma parte de INTELSAT y un año más tarde se integra a las comunicaciones vía satélite, cuando entró en operación la Estación Terrena instalada en Quito.

Un salto importante en las telecomunicaciones se dio el 16 de octubre de 1972 cuando por decreto supremo del Gobierno, se crea el Instituto Ecuatoriano de Telecomunicaciones (IETEL) [4], a fin de planificar, desarrollar, establecer, explotar, mantener, controlar y regular todos los sistemas de telecomunicaciones nacionales e internacionales, exceptuando únicamente los de las Fuerzas Armadas y la Policía.

Esta entidad se encargó del desarrollo exitoso de las comunicaciones en el país hasta 1992 cuando se publica la Ley Especial de Telecomunicaciones, con la que se crea la Empresa Estatal de Telecomunicaciones (EMETEL), en sustitución del IETEL, organismo público que cumplía el doble papel de operador y regulador, con el objetivo de explotar los servicios finales y portadores en régimen de exclusividad y por gestión directa del Estado [4].

Esta Ley separó los roles de operación y regulación con la creación de la Superintendencia de Telecomunicaciones, la reforma a la ley en 1995 creó además el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), para ejercer las funciones de administración y regulación de los servicios de telecomunicaciones en el país y la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (S.N.T.), que tiene, entre otras, las funciones de cumplir y hacer cumplir las resoluciones del CONATEL, así como ejercer la gestión y administración del espectro radioeléctrico, todos estos aspectos se detallaran más adelante [6].

En la telefonía fija, EMETEL fue dividida en Andinatel S.A. y Pacifictel S.A, estas empresas brindaban el servicio a las provincias del norte y sur y Galápagos respectivamente mientras que Etapa servía a la ciudad de Cuenca. El 30 de octubre del 2008 nace la Corporación Nacional de Telecomunicaciones, CNT S.A como resultado de la fusión de las

extintas Andinatel S.A. y Pacifictel S.A., brindando todos los servicios integrales de las nuevas tecnologías existentes [4].

La telefonía móvil, entra al mercado ecuatoriano en 1993 con la llegada de las empresas Conecel S.A. (Porta Cellular) y Otecel S.A. (Bellsouth en ese momento), manteniendo un duopolio del mercado hasta la actualidad, sin embargo en el año 2003 ingresa al mercado Telecsa (Alegro PCS), la misma que en agosto del 2010 se fusiona con la CNT. En el 2008 el Estado suscribió con Otecel (Movistar) y Conecel (Porta), nuevos contratos para brindar el Servicio Móvil Avanzado (SMA), durante los próximos 15 años [6].

El mercado de telefonía celular en el país ha sufrido un crecimiento explosivo desde el año 2003. Aunque existen varias razones para ello, el ingreso del tercer operador proporcionó mayor dinamismo al sector, obligando así a la reducción de tarifas y a la creación de nuevas estrategias comerciales por parte de los operadores dominantes. Aunque la migración hacia GSM en este mismo año fue otra de las causas por la que se masificó la telefonía celular.

2.2. Organismos de Control que rigen actualmente la Telefonía Celular en el Ecuador.

La telefonía celular en el país se encuentra regularizada por los siguientes organismos mostrados en la figura 2.1, los mismos que serán descritos a continuación:

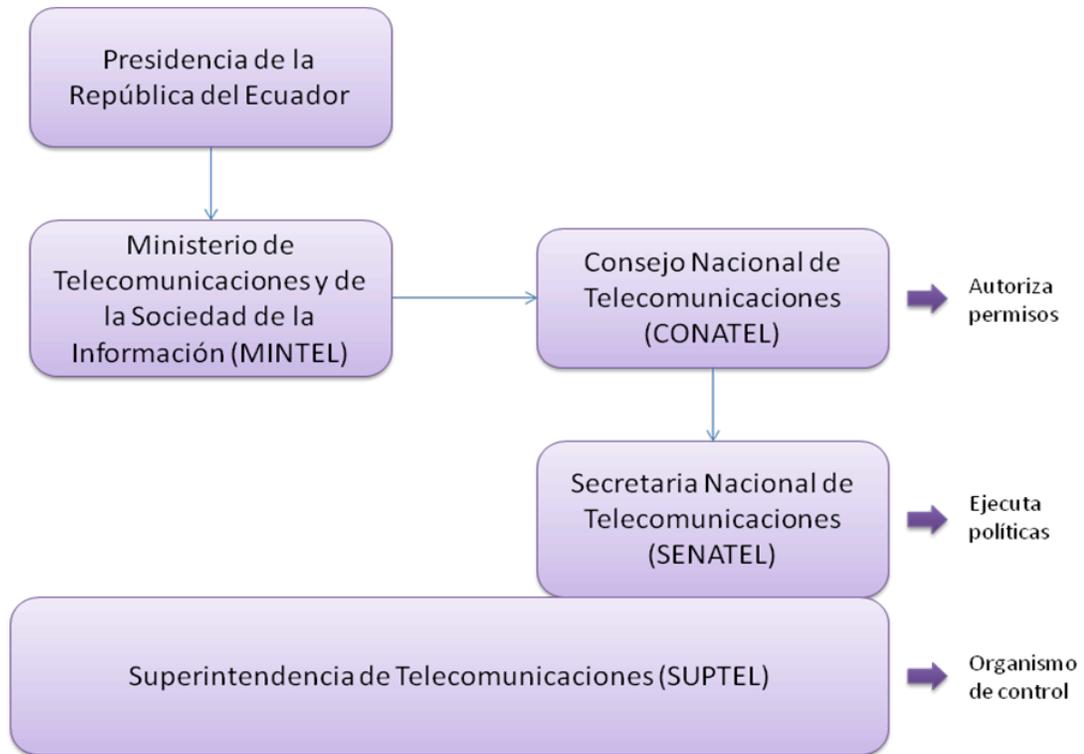


Figura 2. 1. Entes Reguladores de las telecomunicaciones en el Ecuador.

2.2.1. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL) [5]

Dicho Ministerio fue creado el 13 de agosto del 2009 mediante Decreto Ejecutivo del presidente Econ. Rafael Correa Delgado, a fin de garantizar la optimización del funcionamiento de las telecomunicaciones, asegurándose así el avance de la Sociedad de la Información y por lo tanto al buen vivir de la sociedad ecuatoriana.

Además con la creación del MINTEL se pretendía eliminar las atribuciones duplicadas entre los entes reguladores existentes como CONATEL, CONARTEL y SENATEL y así conseguir un desarrollo armónico; y una gestión y control eficiente de las Telecomunicaciones y el Espectro Radioeléctrico.

El MINTEL está regido por un Ministro, quien es el encargado de apoyar el proceso de mejoramiento de servicios que brindan las empresas de telecomunicaciones y promocionar la

Sociedad de la Información y del Conocimiento y las Tecnologías de la Información y Comunicación.

En la figura 2.2. se puede observar las funciones principales que tiene a cargo el Ministerio de Telecomunicaciones y la Sociedad de la Información.



Figura 2. 2. Funciones del Ministerio de las Telecomunicaciones en el Ecuador.

2.2.2. Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) [6]

Es el ente encargado de la administración y regulación de las Telecomunicaciones en el país y la administración de Telecomunicaciones del Ecuador ante la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En la UIT, el CONATEL puede representar en nombre del estado, el directorio de este cuerpo colegiado está integrado por:

- Un representante del Presidente de la República, quien lo presidirá, actualmente es el Ministro de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información.
- El representante de la Oficina de Planificación de la Presidencia de la República (Secretario Nacional de Planificación y Desarrollo).
- El Ministro de Educación o su delegado.
- El Secretario Nacional de Telecomunicaciones.
- El Superintendente de Telecomunicaciones.
- Un representante designado conjuntamente por las Cámaras de Producción.

En la figura 2.3 se muestran las funciones de este organismo.

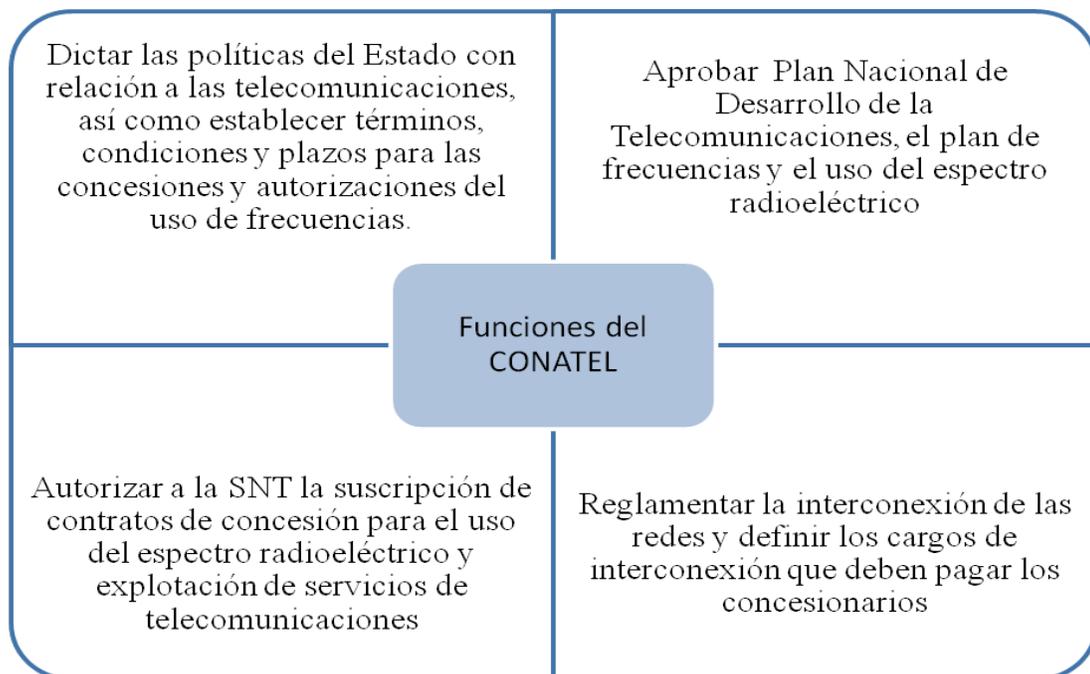


Figura 2. 3. Funciones del Consejo Nacional de las Telecomunicaciones en el Ecuador.

2.2.3. Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL) [6]

Creada para complementar desde el punto de vista técnico, las funciones regulatorias de CONATEL. Su responsabilidad principal es la elaboración de los estándares técnicos sobre los cuales CONATEL basa sus decisiones.

Es el organismo encargado de ejecutar las políticas, en la figura 2.4 se exponen las funciones de esta entidad.

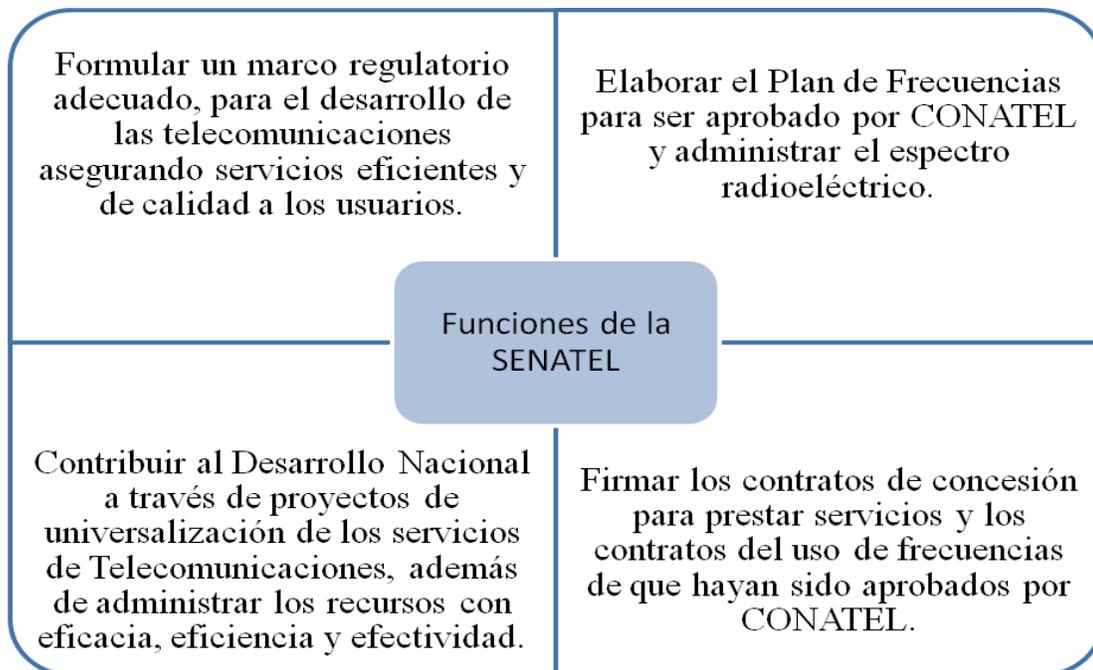


Figura 2. 4. Funciones de la Secretaría Nacional de las Telecomunicaciones en el Ecuador.

2.2.4. Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL) [7]

Es un organismo de control que supervisa y asegura que todas las leyes elaboradas por SENATEL y luego aprobadas por CONATEL sean implementadas y respetadas por todos los proveedores de servicios de Telecomunicaciones.

En la figura 2.5 se observa las funciones que desarrolla dicha entidad:

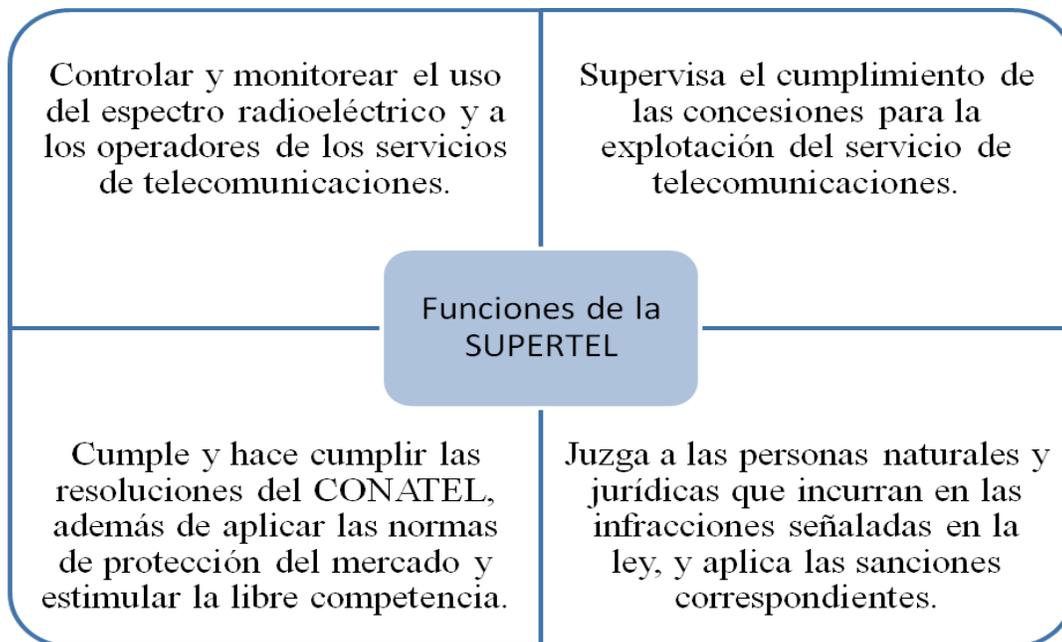


Figura 2. 5. Funciones de la Superintendencia de Telecomunicaciones en el Ecuador.

2.3. Leyes que rigen actualmente la Telefonía Celular en el Ecuador

El marco regulatorio del sector de las Telecomunicaciones en el Ecuador se rige en base a la Ley Especial de Telecomunicaciones de 1992 y luego reforzado por la Ley Reformatoria de la Ley Especial de Telecomunicaciones de 1995 [6].

Las Telecomunicaciones en el país se rigen por los siguientes principios reguladores:

- Régimen de libre competencia, con esto queda prohibido el monopolio de los servicios de telecomunicaciones, así como la competencia desleal, con lo cual se garantiza un servicio eficiente y de calidad.
- Fomentar la eficiencia, universalidad, accesibilidad, continuidad y calidad del servicio.

- Fomentar la participación del sector privado.
- Garantizar que todo ciudadano Ecuatoriano sea beneficiario de los adelantos tecnológicos en las Telecomunicaciones del país.
- La defensa de los derechos de los ciudadanos en todo momento.

Las normas que rigen específicamente la telefonía móvil son:

- Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones reformada.
- Reglamento para el Servicio de Telefonía Móvil Celular: Rige en los primeros contratos firmados en 1993 por Porta Cellular y Bellsouth, y permitía solamente el servicio de voz, envío de mensajes cortos y baja velocidad en la transmisión de datos.
- Reglamento para la prestación del Servicio Móvil Avanzado: Rige en los contratos firmados por CONECEL y OTECEL, en el 2008 y permite la convergencia servicios que se dan el Tecnología 3G y 4G, además de la transmisión, emisión y recepción de señales, escritos, imágenes
- Reglamento de Derechos de Concesión y Tarifas por el uso de frecuencias del Espectro Radioeléctrico.
- Plan Nacional de Frecuencias.

2.3.1. Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada [6]

Esta Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada fue modificada en 1995 sustituyendo a la Ley creada el 10 de agosto de 1992 y está vigente hasta la actualidad.

Tiene como objetivo reglamentar las telecomunicaciones en el país en lo referente a la instalación, operación, utilización y desarrollo de toda transmisión, emisión o recepción de

signos, señales, imágenes, sonidos e información de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos. Según la Ley los servicios abiertos a la correspondencia pública se pueden clasificar en:

- **Servicios finales de telecomunicaciones:** Son aquellos que proveen la capacidad completa para la comunicación entre usuarios, incluyendo las funciones del equipo terminal y además generalmente requieren elementos de conmutación.
- **Servicios portadores:** Son los servicios que proporcionan la capacidad necesaria para la transmisión de señales entre puntos de terminación de red definidos, pueden ser suministrados a través de redes públicas conmutadas o no conmutadas integradas por medios físicos, ópticos y electromagnéticos.

2.3.2. Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada [6]

El objetivo principal de este Reglamento establecer reglas y procedimientos generales para la planificación, regulación, gestión y control de la prestación de servicios de telecomunicaciones y la operación, instalación y explotación de toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, imágenes, datos y sonidos por cualquier medio.

Además en el Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones se definen los servicios de valor agregado, determinados como aquellos que utilizan servicios finales de telecomunicaciones e incorporan aplicaciones que permiten transformar el contenido de la información transmitida. También el Reglamento especifica aspectos en el ámbito de la libre competencia, el servicio universal, la interconexión y conexión, el operador dominante, entre otros.

2.4. Empresas de Telefonía Celular en el Ecuador

2.4.1. CONECEL S.A.

CONSORCIO ECUATORIANO DE TELECOMUNICACIONES S.A. se lo conocía comercialmente hasta hace poco como PORTA, en la actualidad CLARO, pertenece a la multinacional mexicana América Móvil y es la más importante operadora del país pues tiene la cantidad más grande de abonados alrededor de 9 millones, declarado en el mercado de las telecomunicaciones como Operador Dominante. Opera en el Ecuador desde 1993 y en la actualidad cubre más de 1200 poblaciones, 8.100 kilómetros de carreteras y caminos vecinales en las 4 regiones del país [8].

Las frecuencias asignadas a Conecel se encuentran tanto en la banda de 850 MHz y 1900 MHz y son las mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Frecuencias asignadas a Conecel S.A.

Bandas de frecuencias	Denominación
824 a 835 MHz. 845 a 846,5 MHz. 869 a 880 MHz. 890 a 891,5 MHz.	Banda A - A'
1885 a 1890 MHz. 1965 a 1970 MHz.	Banda E – E'

En agosto del 2008, esta empresa renueva el contrato de concesión para la prestación del Servicio Móvil Avanzado con el Estado Ecuatoriano. CLARO ofrece a sus clientes servicios basados en dos tecnologías, GSM / EGPRS y 3.5G (HSPA) con más de 2.000 estaciones radiobases.

2.4.2. OTECEL S.A.

Telefónica Móviles Ecuador empieza a operar en el país en octubre de 2004 tras adquirir el 100% de las acciones de OTECEL. S.A., concesionaria del servicio de telefonía móvil desde 1993 [9]. Comercialmente se la conoce como Movistar antes llamada Bellsouth, tiene asignada las bandas de frecuencias mostradas en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Frecuencias asignadas a Otecel S.A.

Bandas de frecuencias	Denominación
835 a 845 MHz. 846,5 a 849 MHz. 880 a 890 MHz. 891,5 a 894 MHz.	Banda B - B'
1865 a 1870 MHz. 1945 a 1950 MHz.	Banda D – D'

Movistar es la segunda mayor operadora de telefonía móvil del Ecuador con más de 3,8 millones de clientes. En noviembre del 2008, renovó el contrato de concesión para la prestación del Servicio Móvil Avanzado con el Estado Ecuatoriano.

2.4.3. TELECSA S.A.

Telecomunicaciones Móviles del Ecuador, Telecsa S.A., comercialmente conocida como Alegro PCS ingresa al mercado ecuatoriano en el año 2003 con una tecnología CDMA 1X (EV-DO), a fin de eliminar el duopolio existente por las empresas de telefonía móvil del

país, formada por 50% de Andinatel y 50% de Pacifictel; luego paso a ser propiedad única de Andinatel [10].

Con la llegada de este operador se logró reducir las tarifas, además implementó nuevos servicios que no existían hasta ese entonces en el Ecuador como fue NIU Internet inalámbrico a través de los terminales telefónicos.

En el 2007, llega a un convenio con Movistar a fin de que esta empresa le alquile sus antenas y puedan mejorar su red sin necesidad de un gasto significativo, sin embargo no pudo eliminar el duopolio del mercado. Alegro en agosto del 2010 se fusiona con la CNT, a fin de formar una sola empresa de telefonía fija y móvil, y convertirse en la empresa de Telecomunicaciones más grande en todo el país [11].

Las frecuencias asignadas por el Ente Regulador para este operador se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Frecuencias asignadas a Telecsa S.A.

Bandas de frecuencias	Denominación
1895 a 1910 MHz. 1975 a 1990 MHz.	Banda C - C'
1890 a 1895 MHz. 1970 a 1975 MHz.	Banda F – F'

2.5. Tecnologías utilizadas en las empresas de Telefonía Celular del país para el transporte de voz y datos.

Desde el ingreso de la telefonía móvil al Ecuador, las operadoras han implementado en sus redes diferentes tipos de tecnologías a fin de transmitir voz y datos, en la tabla 2.4 se muestra a detalle cada una de ellas, así como, el medio de transmisión de dicha tecnología.

Tabla 2. 4. Evolución de la Tecnología celular en el Ecuador.

OPERADORA	AÑO	TECNOLOGIA	MEDIO DE TRANSMISIÓN
Claro	1993	TDMA	PDH
	2003	GSM	PDH + SDH
	2009	UMTS	SDH
	Futuro	LTE	IP
Movistar	1997	TDMA	PDH
	2003	CDMA	PDH
	2006	GSM	PDH + SDH
	2010	UMTS	SDH
	Futuro	LTE	SDH + IP
Alegro	2003	CDMA	PDH
	Futuro	UMTS (*)	SDH
	Futuro	LTE	IP

(*) Alegro tiene un acuerdo comercial con Movistar para brindar el servicio.

2.6. Aporte de la Telefonía Celular en el crecimiento económico y tecnológico

En la actualidad el teléfono celular es un aparato indispensable e inseparable en la vida cotidiana. Por esta razón las ventajas que ofrecen son varias y se detallan a continuación:

- Permite la comunicación con una persona desde cualquier parte cuando se desea sin importar la ubicación y acortando grandes distancias.
- En el campo laboral ha incrementado la facilidad de concretar negocios en muchas de las ocasiones desde la comodidad del hogar, y a lo largo del país; gracias a los celulares los agricultores han logrado ingresar a grandes mercados ubicados en las ciudades más importantes.
- Las diversas aplicaciones con las que se dispone en el terminal móvil como transmisión de datos vía Internet, mp3, tele conferencia, transmisión de archivos fotográficos y videos, han ayudado a obtener información de cualquier acontecimiento a nivel mundial.

CAPÍTULO III

3. REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN

3.1. Introducción

Desde la aparición de la telefonía celular hace más de 30 años atrás, ésta se ha convertido en una tecnología de comunicación trascendental a nivel mundial, debido a su gran penetración. Por esta razón la evolución de la telefonía celular ha experimentado un crecimiento explosivo pasando por algunas generaciones, que ayudan a clasificar los avances tecnológicos.

En la primera generación, el terminal era usado solo para llamadas telefónicas, luego se añadió el envío de mensajes de texto, lo que forjó la evolución hacia la segunda generación, caracterizada por el incremento en la velocidad para transmitir datos y la conexión a Internet. La tercera generación (3G), permite resolver las falencias de la segunda generación aumentando la velocidad a un máximo de 4 Mbps [12], pero sigue habiendo un límite, es por eso que hoy en día se habla ya de la tan anhelada cuarta generación (4G).

Las actuales redes de telefonía celular de tercera generación se basan en la norma UMTS [12]. Sin embargo, estas redes aún tienen restricciones en lo que se refiere a la eficiencia de las rutas de transmisión de los datos, soporte de múltiples sistemas de radio de acceso, alto costo de operación y mantenimiento de la red. Por lo que la 4G pretende consolidar los sistemas para que el usuario tenga un servicio estable en cualquier parte del mundo con el mismo terminal móvil. Además de aumentar considerablemente la velocidad, lo que permitirá mayores servicios y facilidades.

La tecnología 4G fusiona algunas tecnologías y protocolos ya existentes obteniendo el rendimiento más alto de las mismas, está basada en conmutación de paquetes IP. Dichas redes poseen varias ventajas como servicios *Wireless* mucho más rápidos (100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo), alta calidad de imágenes en las videollamadas y servicios de transferencias, además de soportar servicios integrales y personalizados, suministrando estabilidad y calidad de servicio de extremo a extremo de la red [13].

La UIT-R establece algunos requerimientos mínimos para los servicios de 4G [14], es por esto que existen varias tecnologías que se perfilan con estos requisitos como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), y LTE (*Long Term Evolution*). Los requisitos planteados son:

- Alto grado de funcionabilidad y flexibilidad para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones a un costo eficiente a nivel mundial.
- Compatibilidad de servicios con las redes móviles y con las redes fijas.
- Capacidad de interconexión con otros sistemas de radio.
- Alta calidad en los servicios móviles.
- Aplicaciones, servicios y equipos amigables al usuario.
- Capacidad de conexión mundial (*roaming*).
- Altas velocidades de transmisión de datos para soportar servicios y aplicaciones avanzadas.
- Esquema de modulación OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*).
- Sistema de múltiples antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Sin embargo aunque las tecnologías antes mencionadas cumplen con las obligaciones exigidas por la UIT, y técnicamente son muy similares, en la forma de transmitir las señales y en las velocidades de transmisión, será tema de estudio de esta tesis la tecnología LTE como cuarta generación, puesto que tiene sus raíces en el sector de las

telecomunicaciones mientras que WiMAX las tiene en la industria de las tecnologías informáticas. Además de que LTE puede aprovechar perfectamente la infraestructura actual ya instalada por los operadores de comunicaciones móviles.

La 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), se encarga de globalizar los avances de la tecnología móvil en cuanto a aplicaciones, y es la que ha definido LTE [15], desarrollando este sistema que está definido en los diferentes *release* como se muestra en la figura 3.1.

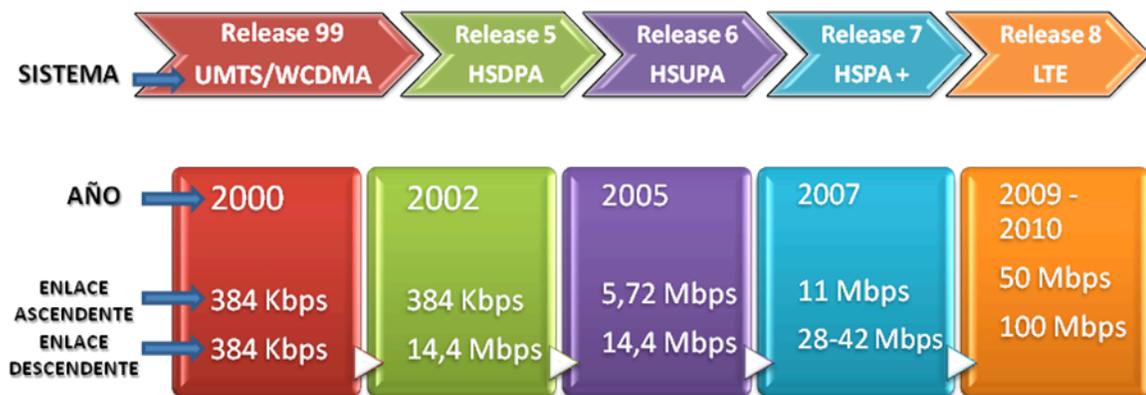


Figura 3. 1. Evolución de *Release* de la 3GPP.

En muchos de los países subdesarrollados apenas está llegando los servicios de 3G, pero se espera que LTE llegue en el 2020 a casi todos los países del mundo.

3.2. LTE (*Long Term Evolution*)

Long Term Evolution o Evolución a largo plazo, es una tecnología de nueva generación, es decir, 4G, que es una evolución mejorada de GSM y WCDMA/HSPA. Está definida por la organización 3GPP.

Long Term Evolution es una tecnología avanzada de comunicación móvil basada en WCDMA, el actual estándar 3G. Esto quiere decir, que la tecnología provee servicios móviles avanzados sin necesidad de construir infraestructura de red adicional. La primera

versión se estandarizó en la *Release 8*, y sus especificaciones se finalizaron y aprobaron en enero del 2008.

LTE utiliza diferentes modulaciones para los enlaces descendente (*downlink*) y ascendente (*uplink*), evita de manera eficiente el efecto de desvanecimiento multitrayecto, permite anchos de banda superiores a 5 MHz, nuevos esquemas de acceso múltiples en la interface de aire: OFDMA (División de Frecuencia Ortogonal de Acceso Múltiple) en *downlink* y SC-FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia con portadora única) en *uplink*, además usa esquemas de antenas MIMO.

Los requisitos de LTE [16] se pueden resumir en lo siguiente:

- Reducción de los retrasos: Menor tiempo en establecer la conexión, reduciendo así la latencia de transmisión;
- Aumento de las tasas de datos de los usuarios: Llegando a velocidades picos *downlink* y *uplink* de hasta 100Mbps y 50 Mbps respectivamente;
- Uniformidad de la prestación de servicios;
- Reducción del costo por bit, lo que implica mejorar la eficiencia espectral, es decir utilizar la mayor capacidad de la celda;
- Flexibilidad en la utilización del espectro: efectúa una planificación de frecuencia, asignando al usuario el canal que tenga mejores condiciones en ese momento;
- Arquitectura de red simplificada: Separación del plano de usuario y el plano de control por medio de interfaces abiertas;
- Movilidad sin límites, incluso entre diferentes tecnologías de acceso de radio: En lo posible el *handover* entre las celdas debe ser sin interrupciones, generando una transmisión fiable;
- Consumo mínimo de energía para el terminal móvil.

El diseño del sistema LTE abarca tanto la interfaz de radio y la arquitectura de red de radio, sin embargo la arquitectura de red total está siendo investigada en la 3GPP SAE, siglas en ingles de la Evolución de la Arquitectura de Sistema. En la tabla 3.1. se muestra un listado de los parámetros más importantes especificados por la 3GPP para LTE [15]:

Tabla 3. 1. Especificaciones de Parámetros de LTE.

PARÁMETRO	DETALLES
Pico de velocidad de descarga 64QAM (Mbps)	100 (SISO), 172 (2x2 MIMO), 326 (4x4 MIMO)
Pico velocidades de enlace ascendente (Mbps)	50 (QPSK), 57 (16QAM), 86 (64QAM)
Tipo de datos	Conmutación de paquetes de datos (voz y datos), no hay conmutación de circuitos.
Canal de anchos de banda (MHz.)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Sistemas Dúplex	FDD y TDD
Movilidad	0 - 15 km / h (optimizado), 15 a 120 km / h (alto rendimiento)
Latencia	Inactivo a activo inferior a 100 ms Pequeños paquetes ~ 10 ms
Eficiencia Espectral	Enlace descendente: 3-4 veces Rel. 6 HSDPA Enlace ascendente: 2-3 x Rel. 6 HSUPA
Acceder a los planos	OFDMA (enlace descendente) SC-FDMA (enlace ascendente)
Tipos de Modulación de Apoyo	QPSK, 16QAM, 64QAM (enlace ascendente y descendente)

3.3. Esquema de Transmisión *Downlink* en LTE

3.3.1. OFDMA

El esquema de transmisión *downlink* está basado en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) tradicional. El espectro disponible en este sistema OFDM está dividido en subportadoras, que son ortogonales entre sí, traslapadas para evitar que exista interferencia, pero son moduladas independientemente por una tasa mínima de flujo de datos. Cada flujo de datos, no necesariamente tienen que ser asignados al equipo terminal (UE). En OFDMA, los usuarios transmiten separados por tiempo y subcanales, lo

que permite acomodar varios usuarios en el mismo canal al mismo tiempo, como se muestra en la figura 3.2.

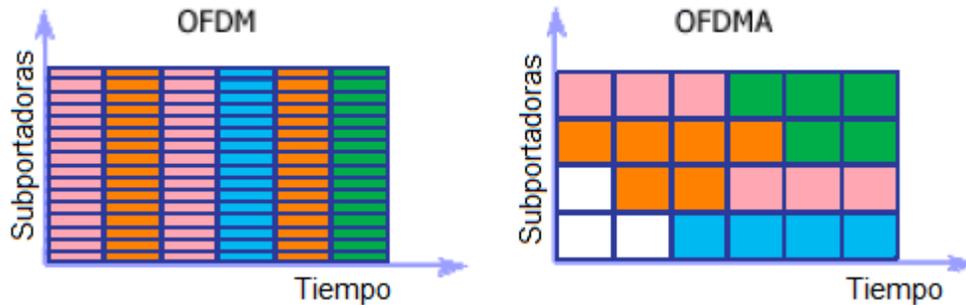


Figura 3. 2. Subcanalización en OFDMA.

La señal OFDM utilizada en LTE comprende un máximo de 2048 diferentes subportadoras separadas 15 kHz entre ellas.

La figura 3.3. muestra una representación de una señal de OFDMA, en esta se puede observar que los símbolos de datos son modulados independientemente y transmitidos sobre un número alto de subportadoras ortogonales mínimamente espaciadas. En *downlink* se pueden utilizar esquemas de modulación como QPSK, 16QAM, y 64QAM [16].

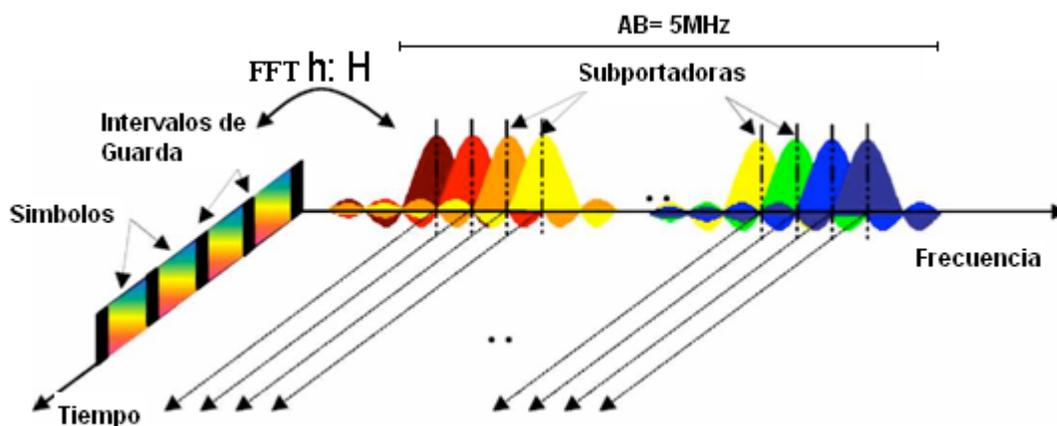


Figura 3. 3. Representación del Esquema de Modulación OFDMA

El intervalo de guardia sirve para evitar la interferencia ínter símbolo y es insertado antes de cada símbolo OFDMA.

Ventajas de OFDMA

- Robustez a la interferencia.
- Desvanecimiento multitrayecto.
- OFDMA puede ser utilizado en FDD y TDD.
- Proporciona acceso de dominio de frecuencia, permitiendo así mayor libertad al canal dependiente comparado con HSPA.
- Asignaciones de ancho de banda flexibles son fácilmente respaldadas por OFDMA.
- La transmisión *broadcast/multicast* es más sencilla utilizando OFDMA, ya que la misma información es transmitida por múltiples estaciones base.

3.4. Esquema de Transmisión *Uplink* en LTE

3.4.1. SC- FDMA

Las propiedades de OFDMA son negativas para el *Uplink*, ya que se produce el debilitamiento de la señal de promedio de relación de potencia pico (PAPR).

Así, en el LTE el esquema de transmisión *uplink* está basado SC- FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia con portadora única) también transmite datos a través de la interfaz de aire en muchas subportadoras. Al igual que en OFDMA, los transmisores en un sistema de SC-FDMA utiliza subportadoras ortogonales para transmitir los símbolos de la información [16]. Sin embargo, transmiten las subportadoras en forma secuencial y no en paralelo, como se observa en la figura 3.4. SC-FDMA facilita la tarea de mantener la transmisión de la señal del terminal móvil altamente eficiente debido a su amplificador de potencia.

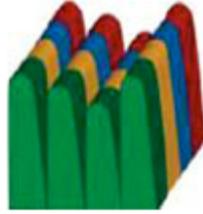


Figura 3. 4. Representación de la Modulación SC-FDMA.

El transmisor de un sistema de SC-FDMA convierte una señal de entrada binaria a una secuencia de subportadoras moduladas. Las operaciones de procesamiento de señales tienen mucho en común con los de OFDMA, donde la diferencia es el uso de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) en el transmisor SC-FDMA y la DFT inversa en el receptor SC-FDMA. Debido a esta diferencia importante SC-FDMA se refiere a veces como OFDMA DFT-propagación [16].

3.5. Antenas MIMO

MIMO (*Múltiple Input Múltiple Output*) es un conjunto de técnicas que utilizan múltiples antenas en comunicaciones inalámbricas. Esto supone añadir una dimensión espacial adicional que puede aprovechar la formación de canales estadísticamente independientes originados por el multitrayecto y mitigar el efecto del mismo, consiguiendo un incremento sustancial de la eficiencia espectral [17]. Esta tecnología proporciona a LTE, la capacidad de mejorar aún más su rendimiento de datos y la eficiencia espectral superando la obtenida con el uso de OFDM. Dependiendo del escenario las diversas técnicas MIMO varían su rendimiento.

Estas antenas inteligentes son adaptativas con inclinación eléctrica, ancho de haz y control de azimut que pueden seguir patrones de tráfico de variación relativamente lenta; además, pueden formar haces orientados a usuarios específicos o dirigir nulos para reducir la interferencia.

Las antenas MIMO incrementan sustancialmente la velocidad de transmisión para redes inalámbricas, aunque son sistemas mucho más complejos. Las tasas máximas para datos tienden a ser proporcionales al número de antenas de envío y recepción, de modo que

4X4 MIMO en teoría tiene una capacidad que es el doble de las tasas máximas para datos de los sistemas 2X2 MIMO.

Mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y el receptor, junto con algunos procesamientos de señales digitales complejos, la tecnología MIMO permite mejorar significativamente el rendimiento de procesamiento de datos disponibles en un canal determinado, lo que aumenta la capacidad de datos de un canal [16].

Los esquemas empleados en LTE varían entre el enlace ascendente y descendente. Para el enlace descendente, una configuración de dos antenas de transmisión en la estación base y dos antenas de recepción en el terminal móvil se utiliza como línea de base, aunque las configuraciones con cuatro antenas también se están considerando, en la actualidad.

Para el enlace ascendente desde el terminal móvil a la estación base, se utiliza un esquema llamado MU-MIMO (Multi-Usuario MIMO). En este método, a pesar de que la estación base requiere múltiples antenas, los móviles sólo tienen una antena de transmisión y esto reduce considerablemente el costo del móvil. En la operación, varios terminales móviles pueden transmitir simultáneamente en el mismo canal o canales, pero no causar interferencias entre sí porque los patrones piloto mutuamente ortogonales son utilizados.

A continuación se describen algunas características técnicas de MIMO [18] como:

- **Conformación del haz (*Beamforming*):** Se realiza una precodificación de los datos a transmitir con una información previa del canal, ajustando las ganancias y desfases de las señales transmitidas por cada antena. Consiguiendo así la máxima potencia posible al receptor con la mínima interferencia sobre otros receptores obteniendo así un aumento de la capacidad.
- **Diversidad de código (*Diversity coding*):** Utilizando técnicas de codificación de espaciado en el tiempo se transmite un *stream*, de esta manera se aprovecha el multitrayecto del canal y se aumenta la robustez de la transmisión. Se utiliza principalmente en *relays* (repetidores), que son elementos que juegan un importante papel en LTE-Advanced para mejorar la eficiencia de transmisión de energía.
- **Multiplexación espacial (*Spatial multiplexing*):** Divide un *stream* de alta tasa en varios *streams* de menor tasa, transmitidos por distintas antenas. Si el multitrayecto es suficiente las señales llegarán a cada antena con cierta firma espacial que el

receptor podrá separar y recuperar la señal de interés. El número de *streams* está limitado por la entidad que tiene menor número de antenas, multiplexación espacial es utilizado para aumentar la velocidad de datos.

- **Multi User-MIMO y Cooperative MIMO:** Permite que varios usuarios puedan utilizar colaborativamente alguno de los métodos anteriores para mejorar la eficiencia espectral. Por el momento LTE contempla el uso de una antena por usuario, utilizando MU-MIMO, para aumentar la capacidad de la celda, pero no se descarta el uso de múltiples antenas por usuario en un futuro.

Las técnicas MIMO detalladas se observan gráficamente en la figura 3.5.

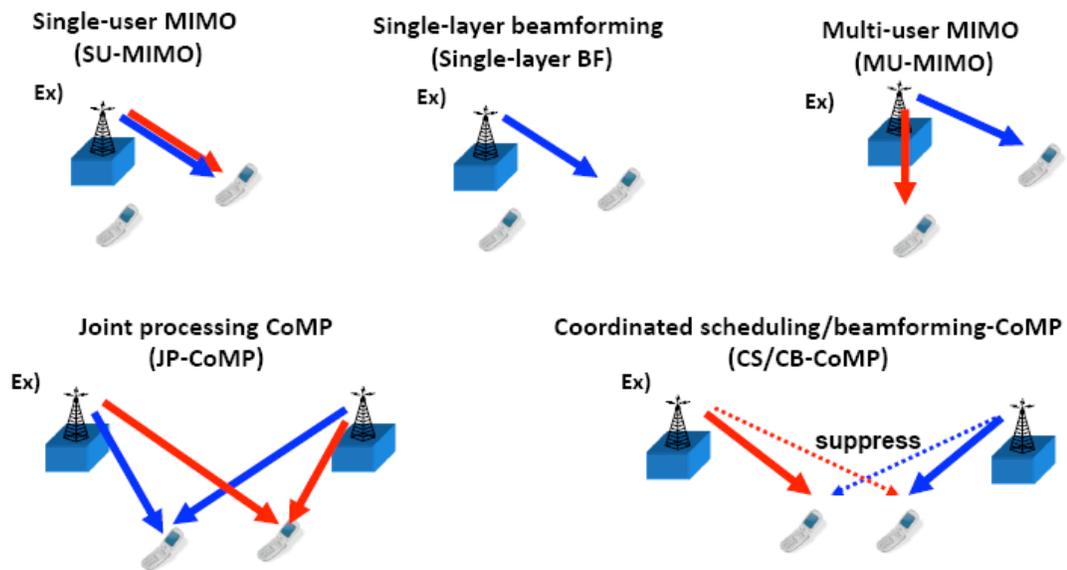


Figura 3. 5. Técnicas de múltiples antenas en LTE.

3.6. Arquitectura basada en 3GPP

La arquitectura del sistema es la descripción para la asignación de las funciones necesarias para interconectar los nodos lógicos y los requisitos de interfaces entre los nodos. En LTE, la arquitectura es también conocida como SAE (Evolución de la Arquitectura del Sistema), la cual fue desarrollada a fin de cumplir con todos los requisitos

de la tecnología LTE, además ofrece muchas ventajas sobre las topologías anteriores. Las principales ventajas [16] de esta arquitectura son:

- **Mayor capacidad de datos:** LTE ofrece tasas de transferencia de 100 Mbps, y el enfoque del uso del sistema de banda ancha móvil, será necesario para que la red sea capaz de manejar mayores demandas de tráfico de datos. Para ello es ineludible adoptar una arquitectura de sistema que se preste a los niveles de rallador en la transferencia de datos.
- **Toda la arquitectura IP:** Cuando el servicio 3G fue desarrollado por primera vez, la voz se llevó todavía como datos conmutados por circuito, desde entonces ha habido un movimiento incesante de datos IP. En consecuencia, el nuevo SAE, ha adoptado una configuración IP para todas las redes.
- **Reducción de la latencia:** Con el aumento de los niveles de interacción se requieren respuestas más rápidas, los nuevos conceptos de SAE se han desarrollado para asegurar que los niveles de latencia sean reducidos alrededor de 10 ms. Esto asegurará que las aplicaciones que utilizan LTE sean lo suficientemente sensible.
- **Reducción de OPEX y CAPEX:** Un elemento clave para cualquier operador es reducir los costos. Por tanto, es esencial que cualquier nuevo diseño reduzca tanto los gastos de capital (CAPEX) como los gastos operativos (OPEX). La nueva arquitectura plana utiliza sólo dos tipos de nodos. Además con esto se reduce el tiempo de instalación y puesta en marcha.

A la par de esta reducción, se busca que la arquitectura sea la más simple posible como se observa en la figura 3.6.

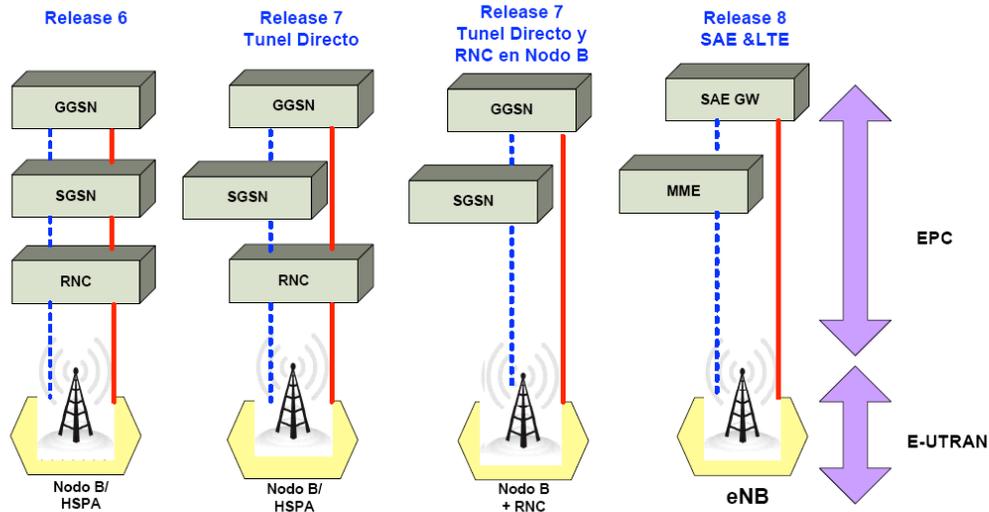


Figura 3. 6. Evolución de las Arquitecturas de Red según los diferentes *Release*.

LTE está compuesta por la E-UTRAN y el EPC. E-UTRAN consta de estaciones base llamadas eNBs, que proporcionan terminaciones hacia la UE en los usuarios y el plano de control. La arquitectura de los protocolos de Radio de E-UTRAN pretende ser simplificada y menos compleja. Los eNBs están interconectados entre sí y también están conectados con puertas de enlace (SAE Gateway) y entidades de gestión de la movilidad (Mobility Management Entity MMEs), ubicado en EPC [16] [17].

El *Evolved Packet Core (EPC)* es la columna vertebral que interconecta las tecnologías existentes a través de interfaces evolucionadas y entidades centrales.

La puerta de enlace llamada **SAE Gateway o Access Gateway (aGW)** está formada por dos entidades lógicas del plano de usuario el S-GW (*Serving-Gateway*) y el PDN-GW (*Packet Data Network-Gateway*), que sirven de interfaz entre la red de acceso y las diferentes redes de paquetes. El S-GW se encarga de las siguientes funciones:

- Interviene de forma activa en el proceso de movilidad cuando se produce un traspaso (*handover*) entre eNBs.
- Mediante el interfaz S4, basado en el protocolo GTP (*GPRS Tunneling Protocol*) es la entidad involucrada en el tráfico de usuario en caso de movilidad entre LTE y otra tecnología 3GPP.

- En caso de ser necesario disponer de información del tráfico de usuario ante un requerimiento legislativo, se encarga de replicar dicha información.

El **PDN-GW** se considera el punto de entrada/salida del tráfico hacia/desde el usuario, proporcionando conectividad hacia el resto de redes externas, facilitando la movilidad transparente y la continuidad en las sesiones de usuario cuando éste se desplaza entre redes de acceso tecnológicamente heterogéneas, es decir, desde una red 3GPP (GSM, WCDMA, HSPA) a otra red que no es 3GPP (WiMAX o Wi-Fi) [16] [17].

MME es una entidad del plano de control, que realiza la señalización, ya que por ella no transitan los paquetes de datos de los usuarios. Mediante la interfaz S3, se da el control de señalización para la movilidad con redes 3GPP e interactúa con el **HSS** (*Home Subscriber Server*), que es el encargado del proceso de autenticación de los usuarios. Los operadores pueden aumentar la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario, ya que es un elemento de red dedicado a la señalización y separado funcionalmente de los *gateways*. Además proporciona la conexión entre el eNBs y el EPC a través de una interfaz **S1**, mientras que para conectar los eNBs se utiliza la interfaz **X2** [16] [17].

En la siguiente lista se observa las funciones del **Nodo B mejorado o eNB**, que es el encargado de:

- Selección de la puerta de enlace (*SAE Gateway*) al momento de acceder a la red.
- Enrutamiento de datos entre la UE y la *Gateway* SAE.
- Enrutamiento al *SAE Gateway* durante la activación RRC.
- Arreglo y transmisión de los mensajes de *paging*.
- Arreglo y transmisión de los mensajes información del sistema en el canal de difusión BCCH.
- Asignación dinámica de recursos al móvil en los enlaces ascendente y descendente.
- Configuración de los parámetros eNB.

- Proveer la cabecera de compresión y cifrado de los flujos de datos de los usuarios.

En la figura 3.7 se observa una representación esquemática de la arquitectura LTE/SAE [16]:

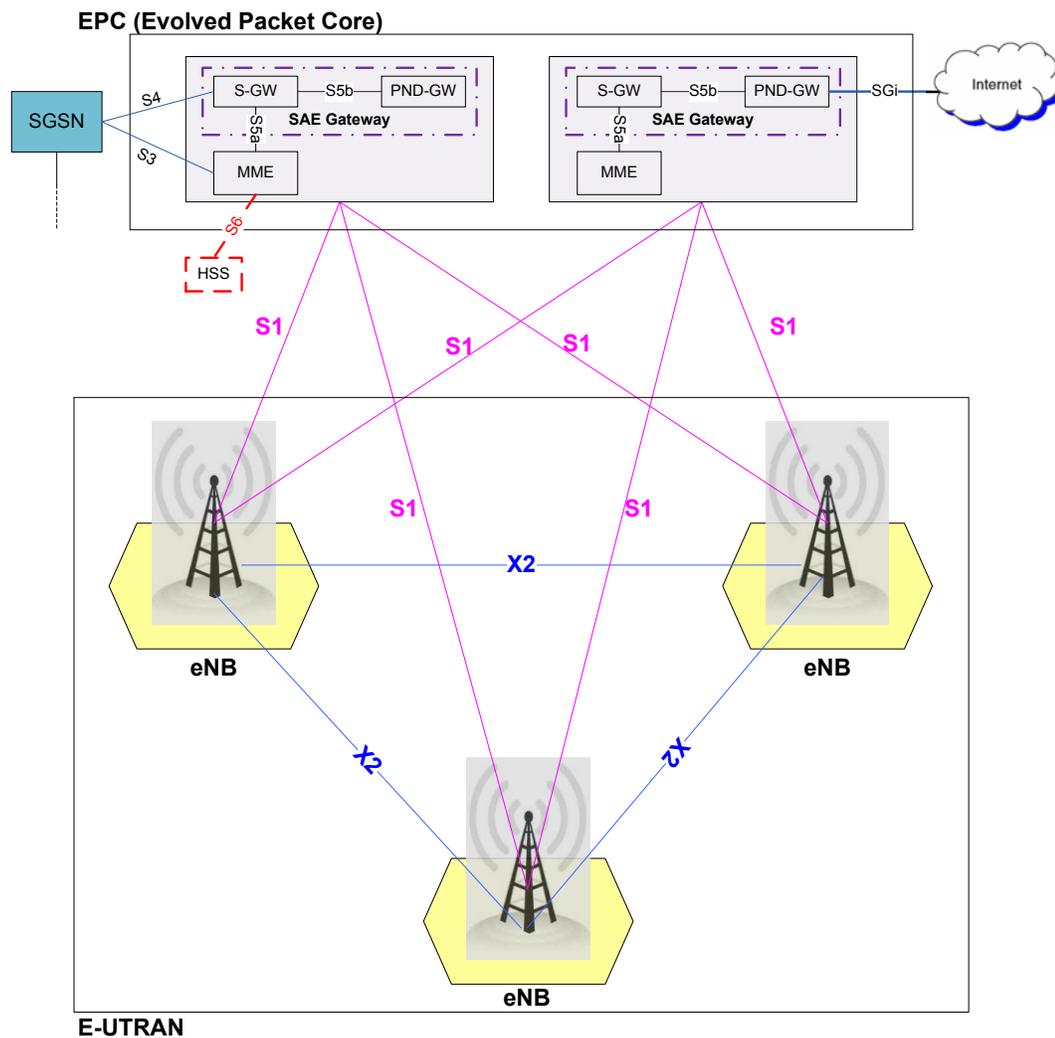


Figura 3. 7. Representación de la Arquitectura de LTE.

En LTE, el EPC actúa como un anclaje en el núcleo de red SAE para la movilidad, las entidades básicas para soportar la movilidad son: la MME, el S-GW y el PDN-GW.

El **SGSN** del núcleo de red GSM es utilizado para que WCDMA/HSPA sea conectado al EPC, y así poder enrutar el tráfico a la RAN de LTE. Los cambios necesarios para el *handover* desde y hacia LTE son mínimos, pero debe ser rápido e ininterrumpido.

3.6.1. Capas de la Interfaz de Radio de E-UTRA [16]

- **Capa 1:** Es la capa física y transfiere la información a las capas superiores por medio de canales de transporte. Existen diferentes canales de transporte en el enlace ascendente y descendente.
- **Capa 2:** Está dividida en tres subcapas que son:
 - *Medium Access Control* (MAC), maneja las retransmisiones HARQ y la programación del enlace ascendente y descendente. La MAC ofrece servicios al RLC en forma de canales lógicos.
 - *Radio Link Control* (RLC), se encarga de la segmentación/concatenación, manipulación de la retransmisión, y secuencia de la entrega a las capas más altas.
 - *Packet Data Convergente Protocol* (PDCP), realiza compresión de encabezado IP para reducir el número de bits necesario para transmitir por la interfaz radio.
- **Capa 3:** También conocida como *Radio Resource Control* (RRC), es un elemento clave de la capa del protocolo de señalización que soporta muchas funciones entre el terminal y el nodo de la arquitectura de red LTE/SAE, el eNB.

3.6.2. Tipos de Canales [16]

En las tecnologías de cuarta generación se maneja gran cantidad de señalización entre la radiobase y los equipos terminales, razón por la cual los canales a través de los

cuales se transmiten estos mensajes de control que juegan un papel importante, de ahí que entender su funcionamiento será de utilidad para nuestro estudio. Los canales se pueden agrupar en tres categorías que son:

- **Canales Físicos:** Estos son los canales de transmisión que transportan datos de usuario y mensajes de control.
- **Canales de Transporte:** Permiten la transferencia de información entre el control de acceso medio (MAC) y las capas superiores.
- **Canales Lógicos:** Proporciona servicios para el control de acceso medio (MAC) dentro de la estructura del protocolo LTE.

Estos canales varían entre el enlace ascendente y descendente ya que cada uno opera de una manera diferente.

3.6.2.1. Canales del Enlace Descendente:

- **Canales Físicos:**
 1. **Canal de difusión (PBCH):** Este canal físico lleva la información del sistema para los usuarios terminales que requieren para acceder a la red.
 2. **Indicador de control del formato físico de canal (PCFICH):** Este proporciona información para que los equipos de usuarios puedan decodificar el PDSCH.
 3. **Canal físico de control de enlace descendente (PDCCH):** El objetivo principal de este canal físico es llevar la programación de la información.
 4. **Indicador de canal ARQ híbrido (PHICH):** Como su nombre lo indica, este canal es utilizado para comunicar el estado de ARQ híbrido.
 5. **Canal físico compartido de enlace descendente (PDSCH):** Este canal es utilizado para funciones de paginación y *unicast*.

6. **Canal físico de multidifusión (PMCH):** Este canal físico lleva la información del sistema para fines de multidifusión.

- **Canales de Transporte**

1. **Canales de difusión (BCH):** es un canal de transporte que es usado para transmitir la información específica para la red o para una célula dada. Los datos más típicos necesarios en cada red son los códigos de acceso arbitrarios disponibles y ranuras de acceso en la célula, o los métodos de diversidad usados con otros canales para aquella célula.
2. **Canal Compartido de Downlink (DL-SCH):** Este canal se comparte entre todos los usuarios de la célula, es el canal de transporte principal utilizado para transmisión de datos de enlace descendente en LTE. Es compatible con funciones clave, tales como ARQ híbrido y sostiene la adaptación de enlace dinámico variando modulación, codificación y potencia de transmisión.
3. **Canal de Búsqueda (PCH):** es un canal que lleva datos relevantes para el procedimiento de búsqueda, es decir cuando la red quiere iniciar la comunicación con el terminal. El mensaje de búsqueda idéntico puede ser transmitido en una célula sola o en algunas celdas, según la configuración de sistema. Los terminales deben ser capaces de recibir la información de búsqueda en la célula entera. El diseño del PCH también afecta el consumo de energía del terminal en el modo de reserva.
4. **Canal de Multidifusión (MCH):** Canal de difusión con apoyo a combinación de Red de Frecuencia única de transmisión MBMS sobre múltiples células.

- **Canales de Lógicos de Control**

1. **Canal de Control de Difusión (BCCH):** utilizado para transmitir información de configuración del sistema a todos los terminales móviles en una celda. Antes

de acceder al sistema, un terminal móvil necesita obtener la información del mismo para saber cómo está configurado y, en general, cómo se comportan adecuadamente dentro de una celda.

2. **Canal de Control de Búsqueda (PCCH):** es utilizado para la ubicar a un terminal móvil que no se conoce en la red. El mensaje de búsqueda es transmitido en varias celdas.
 3. **Canal de Control Común (CCCH):** utilizado en el acceso aleatorio, para transmitir información de control.
 4. **Canal de Control Dedicado (DCCH):** utilizado para la transmisión de información de control a/o el terminal móvil. Este canal se utiliza para la configuración individual de los terminales móviles como mensajes de entrega, control de energía, etc.
 5. **Canal de Control de Multidifusión (MCCH):** utilizado para la transmisión de información de control necesario para la recepción del MTCH.
- **Canales de Lógicos de Tráfico:**
 1. **Canal Dedicado al Tráfico (DTCH):** utilizado para la transmisión de datos de usuario a un terminal móvil o viceversa. Se utiliza tanto en el enlace ascendente y descendente de datos no *Multicast/Broadcast over Single Frequency Network* (MBSFN) del usuario.
 2. **Canal de Tráfico *Multicast* (MTCH):** utilizado para la transmisión de bajada de los servicios de *multicast*.

3.6.2.2. Canales del Enlace Ascendente:

- **Canales Físicos**

1. **Canal físico de control de enlace ascendente (PUCCH):** Se encarga de enviar el reconocimiento del ARQ híbrido
2. **Canal físico compartido de enlace ascendente (PUSCH):** Este canal físico lleva la programación de la información, es la contraparte del canal del enlace descendente PDSCH.
3. **Canal físico de acceso aleatorio (PRACH):** Se utiliza para las funciones de acceso aleatorio.

- **Canales de Transporte**

1. **Canal Compartido de *Uplink* (UL-SCH):** es un canal que se comparte entre todos los usuarios dentro de una célula, utilizado para la transmisión de datos *uplink*.
2. **Canal de Acceso Aleatorio (RACH):** se utiliza normalmente para propósitos de señalización, para registrar un terminal después de encenderlo en la red o para realizar la actualización de ubicación después de mudarse desde un área de servicio hacia otra, o para iniciar una llamada.

- **Canales de Lógicos de Control**

1. **Canal de Control Común (CCCH):** utilizado en el acceso aleatorio, para transmitir información de control.

- 2. Canal de Control Dedicado (DCCH):** utilizado para la transmisión de información de control a o desde un terminal móvil. En un canal bidireccional punto a punto.

3.7. Estándares de LTE

La 3GPP ha definido algunos estándares para la Evolución del LTE puesto que en cada uno se especifican mejores características, a continuación se describen los *Releases* que definen esta tecnología [19]. En la figura 3.8. se muestra la evolución de las velocidades de LTE, de acuerdo a los años en los que se han desarrollado los diferentes estándares.

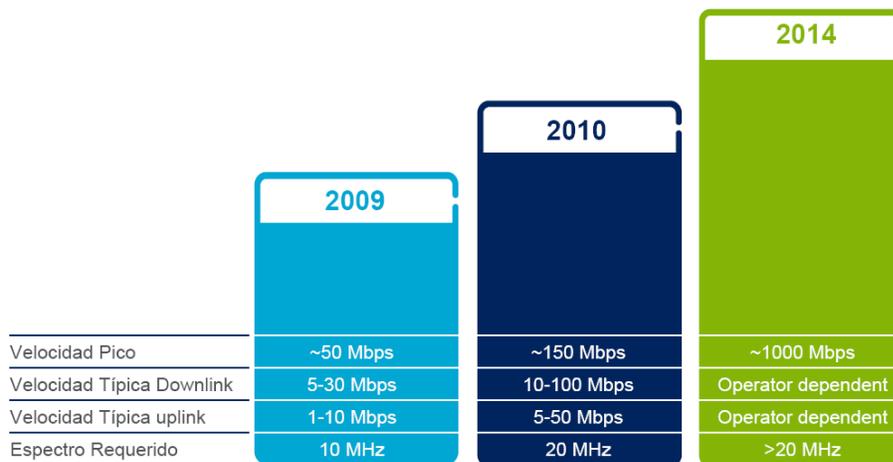


Figura 3. 8. Evolución de Velocidades de LTE.

3.7.1. *Release 8*

Este *release* fue aprobado en enero de 2008, sin embargo el trabajo de la 3GPP continuó durante todo el año, y en marzo de 2009, se publicaron las normas de HSPA +, LTE y EPC / SAE.

Desde noviembre de 2007, se realizaron llamadas de prueba de LTE entre los proveedores de infraestructura y proveedores de dispositivos móviles utilizando prototipos

a través del aire. Los ensayos de campo en escenarios realistas de despliegue urbano se crearon para LTE ya en diciembre de 2007, y con un sistema de antena MIMO 2x2, los ensayos alcanzaron velocidades de datos pico de hasta 173 Mbps y todavía más de 100 Mbps a distancias de varios cientos de metros. A finales de 2009, más de 100 operadores habían indicado sus intenciones de desplegar LTE.

En el *Mobile World Congress 2008* y *CTIA Wireless 2008*, se mostraron nuevas aplicaciones en redes LTE en varias bandas, incluyendo la nueva banda AWS 1.7/2.1 GHz, como: blogs de vídeo HD, vídeo de alta definición bajo demanda y *streaming* de video, colaboración de video multi-usuario, vigilancia por video, juegos en línea e incluso se muestran la posible migración de CDMA y EV-DO a LTE. En febrero de 2009, la movilidad y la velocidad de LTE se demostraron durante las pruebas en vivo a través de las calles de Barcelona donde se realizó el *Mobile World Congress*, en abril en la CTIA 2009 realizado en las Vegas y en agosto, en las carreteras de Suecia.

A partir del tercer trimestre de 2008, estaciones base UMTS, pudieron ser actualizadas a través del software, consiguiendo los operadores desplegar estaciones base con tecnología UMTS-HSPA y luego se actualizaron a LTE en 2010. Estas estaciones utilizan bandas como AWS 1.7/2.1 GHz y la banda de 700 MHz subastada ya en los EE.UU en 2008.

Muchos proveedores han desarrollado nuevas estaciones base que son compactas pues incluyen en un solo paquete GSM-EDGE, UMTS, HSPA y LTE, ofreciendo muchas opciones, ya que proporciona mayor libertad de elección y un claro camino evolutivo.

Uno de los elementos clave en este *release* es la mejor nueva estación base de la red LTE / SAE, conocida como Nodo B evolucionado (eNodeB). Esta mejora de la BTS proporciona la interfaz de LTE y gestiona los recursos de radio para el sistema de acceso. El eNodeB son estaciones base flexibles que se utilizan FDD o TDD y están disponibles en una gama de frecuencias de 700 MHz a 2,6 GHz con anchos de banda de 1,4 MHz a 20 MHz [17].

El primer eNodeB listo para el despliegue a escala comercial se puso en marcha en julio de 2009, y era capaz de soportar una tasa máxima teórica de hasta 150 Mbps en el *downlink*. En noviembre de 2009, las estaciones base LTE (eNodeBs) estaban disponibles

en el mercado de Alcatel-Lucent, Ericsson, Huawei, Motorola, Nokia Siemens Networks y Fujitsu.

El eNodeB tiene mejores características en cobertura, rendimiento, eficiencia de energía superior al consumo reducido de energía, menor costo total y avanzada auto-organización de redes (SON). La auto-organización de redes pretende dar un salto a un nivel más alto de operación automatizada en las redes móviles y es parte de la transición a LTE en *Release 8*, incluyendo como beneficios su capacidad para impulsar la calidad de la red y reducir los gastos operativos.

El *Evolved Packet Core* (EPC) es el núcleo de la red basado en IP definido por el 3GPP en este *release* para el uso de otras tecnologías de acceso y LTE. El objetivo del EPC es proporcionar un núcleo de la red IP con arquitectura simplificada para dar de manera eficiente el acceso a diversos servicios. EPC consiste esencialmente en un órgano de gestión de la movilidad (MME), una puerta de enlace de la porción (S-GW) que interactúa con la E-UTRAN y una puerta de enlace PDN (P-GW) de conexión con redes externas de paquetes de datos [16]. EPC para redes LTE fueron anunciados por numerosos vendedores a partir de febrero de 2009, permitiendo a los operadores modernizar sus redes de datos.

La flexibilidad del espectro que debía tener LTE se estableció como uno de los principales requisitos, que incluyen la posibilidad de operar en las asignaciones de espectro diferentes, así como la posibilidad de explotar el espectro. En esencia, esto significa proporcionar grandes economías de escala para los operadores.

En 2008, un proveedor dio a conocer la plataforma LTE comercial en dispositivos móviles, ofreciendo velocidades máximas de bajada teórica de hasta 100 Mbps y ascendentes de hasta 50 Mbps. LTE apoya la entrega y la itinerancia de las redes móviles, con lo que todos los dispositivos pueden tener cobertura de banda ancha móvil en todas partes desde el primer día.

3.7.2. *Release 9*

Este *release* definido por la 3GPP, se centra en las mejoras de HSPA + y LTE. El objetivo de LTE incluye características adicionales y mejoras para apoyar servicios de emergencia IMS, sistemas de alerta móvil comercial, servicios de localización, servicios de CS de dominio (es decir, voz), los servicios de radiodifusión, mejoras SON, mejoras en el enlace descendente, la tasa de adaptación vocoder para LTE, una mejor compatibilidad con Home NodeB/eNodeB y la evolución de la arquitectura IMS.

3.7.3. *Release 10*

En paralelo al *release 9* se trabajó el *release 10* y ha ido progresando con rapidez para definir las mejoras necesarias para cumplir los requisitos de IMT-Avanzadas a través de un elemento llamado *LTE-Advanced*.

En la demostración de *LTE-Advanced* se indica cómo los operadores pueden planificar sus inversiones en la red LTE sabiendo que clase de radio que les proporcionará el mejor rendimiento.

Además, las mejoras de rendimiento se obtuvieron en la manifestación por la combinación de un sistema de apoyo a LTE, un sistema de antena MIMO 2x2 y una estación de retransmisión [19]. La retransmisión ha sido utilizada en la banda, lo que significa que las estaciones no necesitan de un *backhaul* de datos externos, sino que están conectadas a las estaciones base más cercanas utilizando recursos de radio en la banda de frecuencia de funcionamiento de la estación base propia.

Conjuntamente mejora la cobertura de la célula y la equidad del sistema, lo que significa que ofrece mayores tasas de datos de usuario y un trato igualitario a los usuarios alejados de la estación base, también permitirá a los operadores utilizar la infraestructura existente de red LTE y aun así satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda.

Los elementos clave del éxito de las nuevas tecnologías son las redes, dispositivos y aplicaciones por lo que fabricantes de infraestructuras se han asociado con muchos proveedores de aplicaciones líderes para hacer que los operadores puedan aprovechar plenamente el potencial de la red LTE y así aumentar sus ingresos.

LTE-Advanced se ha centrado en la introducción de sistemas de soporte de agregación, mejora SU-MIMO y las técnicas de MU-MIMO y técnicas MIMO de red, soporte para los relés, mejoras SON, soporte para redes heterogéneas y mejoras en el *Home NodeB/Home eNodeB*. 3GPP ha presentado su propuesta de LTE-Advanced a la UIT, junto con una auto-evaluación que demuestra que LTE-Advanced cumple con todos los requisitos de IMT-Advanced para ser certificado oficialmente como "4G".

En la tabla 3.2. [20] se muestra una comparación de los parámetros sobresalientes de los diferentes *releases* que definen LTE.

Tabla 3. 2. Comparación de parámetros clave entre LTE (3GPP Rel-8), IMT-Advanced y LTE-Advanced (3GPP Rel-10).

Características de Sistema		E-UTRA/LTE (3GPP Rel-8)	Requerimientos IMT-Advanced	LTE-Advanced (3GPP Rel-10)	Función de LTE-Advanced con la que se supera los requisitos de IMT-Advanced	
Tasa de Datos (Pico)	DL	327.6 Mbps (4x4 MIMO, 64)	1 Gbps (Movilidad Alta) 100 Mbps (Movilidad Baja)	1 Gbps	Agregación de Portadora, MIMO	
	UL	86.4 Mbps (64 QAM)		500 Mbps		
Ancho de banda soportable		Hasta 20 MHz	40 MHz, hasta 100 MHz	Hasta 100 MHz	Agregación de Portadora	
Eficiencia espectral	Pico	DL	15bps/Hz (UE categoría 5)	15bps/Hz (4x4 MIMO)	30 bps/Hz	8x8 DL SU-MIMO
		UL	3.75 bps/Hz (UE categoría 5)	6.75 bps/Hz (2x4 MIMO)	15 bps/Hz	4x4 UL SU-MIMO
	Promedio	DL	1.87 bps/Hz	2.2 bps/Hz	3.7 bps/Hz (4X4 MIMO)	CoMP, MIMO
		UL		1.4 bps/Hz	2.0 bps/Hz (4X4 MIMO)	MIMO, mejoras UL, CoMP
	Borde de Celda	DL	0.06 bps/Hz (4x2 MIMO)	0.06 bps/Hz (4x2 MIMO)	0.12 bps/Hz (4X4 MIMO)	CoMP, MIMO
		UL	0.03 bps/Hz (2X4 MIMO)	0.03 bps/Hz (2X4 MIMO)	0.07 bps/Hz (2X4 MIMO)	MIMO, mejoras UL, CoMP
Latencia plano usuario		Menor de 30 ms	Menor de 10 ms	Menor de 10 ms		
Latencia plano control		Menor de 100ms	Menor de 100ms	Menor de 50 ms		

3.8. Bandas de frecuencias y asignación de bandas de LTE

Existe un número creciente de bandas de frecuencia que se han asignado como posibilidades para el uso con LTE. En la figura 3.9 se puede ver el despliegue de esta tecnología en el mundo [21].

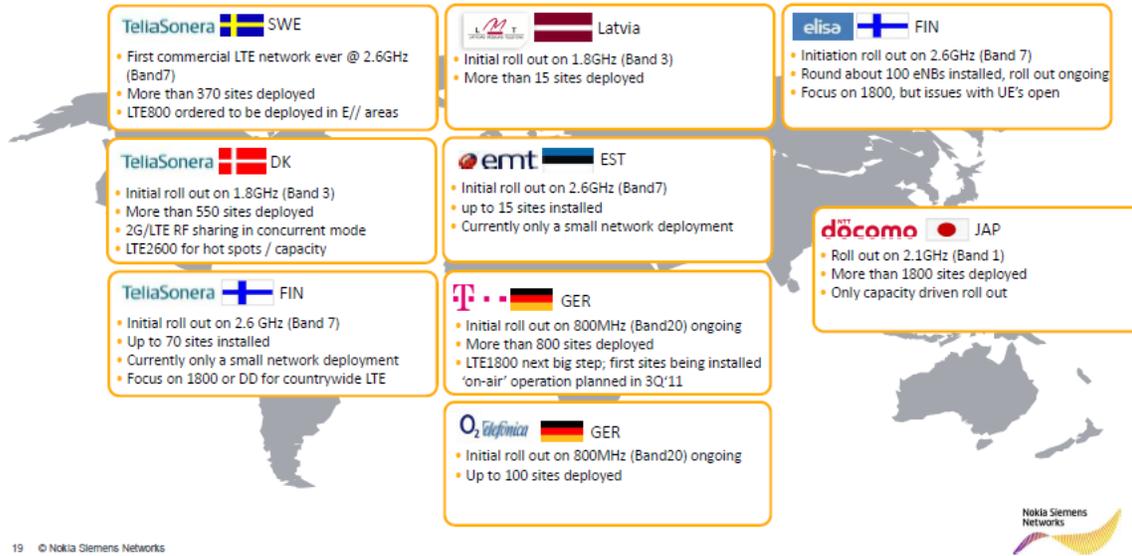


Figura 3. 9. Bandas de LTE en el Mundo.

Aunque algunas bandas de frecuencia ya están en uso para otros sistemas celulares, existen otras bandas de LTE que son nuevas [15]. Se observa en la tabla 3.3. las bandas de frecuencias asignadas por la 3GPP para el despliegue de esta tecnología:

Tabla 3. 3. Bandas de frecuencias definidas por 3GPP.

Nombre de la Banda	Espectro Total	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]
800	2x10 MHz	830 – 840	875 – 885
850	2x25 MHz	824 – 849	869 – 894
900	2x35 MHz	880 – 915	925 – 960
1500	2x25 MHz	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9
1700	2x35 MHz	1750 – 1785	1845 – 1880
1700/2100	2x45 MHz	1710 – 1755	2110 – 2155
1800	2x75 MHz	1710 – 1785	1805 – 1880
1900	2x60 MHz	1850 – 1910	1930 -1990
2100	2x60 MHz	1920 – 1980	2110 – 2170
2600	2x70 MHz	2500 – 2570	2620 – 2690

Además de estas bandas, en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (WRC-07) se definió también la banda de 700 MHz (698 – 806 MHz) ya que ofrecería mejoras

en la cobertura, pues las bandas de frecuencia más bajas brindan una mejor cobertura y una mejor propagación.

En el país aún no se ha definido la banda en la que se desplegaría LTE sin embargo se puede optar por la banda de 2.6 GHz como en Europa o la banda de 700 MHz como en Estados Unidos. No obstante hay que tener en cuenta que sería importante que los operadores que desplieguen LTE en el Ecuador cuenten con una combinación de espectro, es decir una banda alta que podría ser la de 2.6 GHz para ciudades grandes y muy útil para brindar mayor capacidad y una banda baja como la de 700MHz para zonas rurales donde se brinde mayor cobertura.

Cabe tener en cuenta que la banda de 700 MHz se encuentra actualmente utilizada pero con la migración a televisión digital, ésta quedaría libre para poder ser licitada. Y la banda de 2.6 GHz está asignada para televisión codificada terrestre (operador UNIVISA) hasta el 2012.

3.9. Obstáculos de implementación de LTE en América Latina

A pesar de que muchos operadores móviles tienen intenciones de desplegar sus redes con esta clase de tecnología [22], existen barreras que los limitan como:

- **Topes de Espectro:** Son establecidos por las autoridades y entes reguladores, a fin de que se eviten la acumulación de espectro hacia un operador determinado, pero en la actualidad únicamente limita el crecimiento en la penetración de servicios de banda ancha.
- **Limitante de Espectro para Operadores:** Debido a los topes de espectro, existen operadores que no pueden ya obtener bandas de espectro por lo que no pueden implementar nuevas tecnologías.
- **Falta de ecosistema de terminales:** Debido a que existe una combinación de bandas en las que se despliega LTE en EEUU y Europa, no se dispone de un mercado desarrollado de terminales que están al alcance de la mayor parte de la sociedad, puesto que el valor de los mismos es alto.

- **Limitaciones de infraestructura:** Se requiere una fuerte inversión por parte de los operadores para poder desplegar esta tecnología puesto que se requiere una red de transporte que pueda responder a las exigencias de velocidades de 4G (*backhaul* totalmente IP).

3.10. Servicios

El rápido crecimiento de la transmisión de datos ha generado la necesidad de una red que soporte este tráfico, tal es el caso de la red LTE, pero esta tecnología trae consigo la implementación de muchos servicios nuevos e innovadores, razón por la cual muchas empresas a nivel mundial como Alcatel-Lucent, NEC, NextWave Wireless, Nokia Siemens Networks y Sony Ericsson quieren impulsar ésta tecnología en el menor tiempo posible puesto que esto generará mayores ingresos para las operadoras del servicio.

Gracias a LTE se contará en los móviles de aplicaciones como Voz sobre IP (VoIP), video streaming, videoconferencias, descarga rápida (1GB en 1 minuto), servicios de televisión móvil, etc., también se podrá implementar aplicaciones como telemedicina y teleeducación, con la ayuda de LTE [21].

En la tabla 3.4. se observa una comparación de las características de los servicios tanto en redes actuales como en un ambiente LTE:

Tabla 3. 4. Comparación de las características de los servicios

Categoría de Servicios	Redes Actuales (Hasta 3G)	Red LTE
Voz	Audio en Tiempo Real.	VoIp, alta calidad en videoconferencias.
Mensajería	SMS, MMS, e-mails de baja prioridad.	Mensajes multimedia, IM, e-mail móvil, mensajería de video.
Navegador	Acceso a información en línea, actualmente limitado a WAP que navega sobre GPRS y redes 3G.	Navegador excelente y rápido, <i>uploading</i> para satisfacer la gestión de sitios de redes sociales.
Información Pagada	Información principalmente basada en texto.	Periódicos en línea. Alta calidad de flujo de audio.
Personalización	Ringtones incluyendo screensavers y ring backs.	Realtones y personalización de sitios web móviles.
Juegos	Descarga de juegos y juegos en línea.	Una consistente experiencia de juego en línea.
TV/Video sobre Demanda	Flujo de video descargable.	Servicios de TV <i>broadcast</i> , verdadera demanda de TV, alta calidad de video, IPTV
Música	Descarga de pista completa y servicios de radio analógicos.	Descarga y almacenamiento de música de alta calidad.
M-Comercio	Comisión en las transacciones y medios de pago emprendidos sobre redes móviles.	Los teléfonos móviles como dispositivos de pago, con detalle de pagos llevados sobre redes de alta velocidad habilitados para la realización rápida de las transacciones.
Red de datos Móvil.	Acceso a redes internas corporativas y bases de datos.	Transferencia de archivos, aplicaciones de negocios, aplicaciones compartidas, redes móviles internas y externas.

CAPÍTULO IV

4. TECNOLOGÍA IP/MPLS (*MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING*)

4.1. Introducción a la Tecnología MPLS

El protocolo TCP/IP ha sido hasta hoy en día, una solución clásica y estándar para el transporte de información en las redes, utiliza enrutamiento de paquetes con ciertas garantías de entrega, sin embargo el crecimiento acelerado del tráfico ha causado problemas en el manejo de los paquetes transportados.

Por esta razón, desde los años 90, diversas empresas empezaron a desarrollar la tecnología MPLS para tratar de combatir el problema presentado; entre estas compañías tenemos: Ipsilon con *IP Switching*, Toshiba con *Cell Switch Route*, *Cascade Communications* con *IP Navigator*, *Cisco Systems* con *Tag Switching* e IBM con *Aggregate Route-Based IP Switching*, pero recién años más tarde (abril 1997) la IETF (*Internet Engineering Task Force*) la adoptó para su estandarización, recogida en la RFC 3031 [23]. Los primeros estándares fueron publicados a partir del año 2001.

Multiprotocol Label Switching (MPLS) es una tecnología de conmutación de etiquetas, que combina la capacidad de la ingeniería de tráfico de ATM con la flexibilidad y la escalabilidad de IP, por lo que también se la conoce como IP/MPLS [24].

En la figura 4.1 se observa la ubicación de MPLS dentro del modelo OSI.

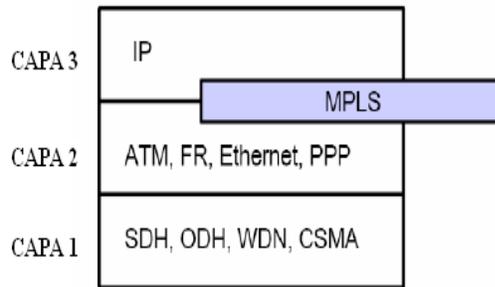


Figura 4. 1. Ubicación de MPLS en el modelo OSI.

MPLS permite establecer caminos orientados a la conexión en una red IP, facilitando así la aplicación de ingeniería de tráfico en la red, independientemente de las tablas de enrutamiento, además proporciona QoS basándose en la diferenciación de clases de servicio, y posibilita la implementación de redes privadas virtuales.

MPLS soporta múltiples tecnologías como ATM, TDM y SDH. Además para permitir la compatibilidad con el servicio tradicional de TDM y ATM utiliza *PseudoWire* (PW). IP/MPLS es independiente del tipo de protocolo de enrutamiento que se utilice, funciona con Protocolo IP, ATM, *Frame Relay* y otros protocolos de red [23].

Por la rapidez y facilidad con la que los routers transmitan el tráfico basándose en una simple etiqueta incrustada en la cabecera del paquete, hace que ésta tecnología aporte actualmente de manera significativa en la construcción de los nuevos cimientos para la Internet. Un enrutador IP/MPLS examina la etiqueta para determinar el siguiente salto del paquete, simplificando así el proceso de reenvío, inclusive separando este proceso del protocolo de enrutamiento, que determina la ruta que el tráfico tendrá en la red.

4.2. Conceptos básicos de *routing* IP/MPLS

4.2.1. Router

Un router es un dispositivo utilizado para interconectar redes de ordenadores y que actualmente implementan puertas de acceso a Internet. Además es el equipo encargado de direccionar los datagramas que son transmitidos por una red de datos.

Trabaja en la capa 3 del modelo OSI, por lo que puede tomar decisiones en base a direcciones de red. Sin embargo los routers realizan la conexión de diferentes tecnologías de capa 2 como Ethernet, FDDI y *Token Ring* [25]. Para enrutar paquetes, los routers utilizan información de capa 3 y se basan en el protocolo IP, razón por la que en muchas ocasiones logran resolver el problema de tráfico excesivo convirtiéndose así en la base del Internet.

Su principal función es examinar los paquetes entrantes, elegir la mejor ruta a través de la red y después conmutarlos hacia el mejor puerto de salida.

4.2.2. Protocolos de Enrutamiento

Protocolo de enrutamiento es el lenguaje o norma para la comunicación en la red que contiene algoritmos que permiten a los routers existentes en ésta, elegir la mejor ruta para llegar a su destino, compartiendo información entre ellos, así como también construir y mantener actualizadas las tablas de enrutamiento.

Para dar los servicios de enrutamiento, los routers utilizan la topología de la red y tablas de enrutamiento para determinar cuál es la mejor ruta para enviar la información a su destino.

Los protocolos de enrutamiento ocupan un ancho de banda dentro de una red de datos y ellos viajan en la red con información emitida periódicamente por los routers con respecto a las rutas, de tal forma, que cuando un router recibe un datagrama con información, inmediatamente define por qué camino debe ser despachado [25].

4.2.2.1. Tipos de protocolos de enrutamiento.

- **Tipo A:**

- a) **Interior:** Son protocolos que se utilizan para administrar redes que se interconectan entre sí y que pertenecen a una administración común, o

administración privada, también conocida como sistema autónomo (SA). Estos protocolos se denominan *Interior Gateway Protocol* (IGP).

Cada protocolo se distingue por las métricas que utiliza para determinar la ruta más corta para envío y por la forma en que comparten información con otros routers; es decir tiene su propio algoritmo de enrutamiento y cada sistema autónomo puede elegir qué tipo de protocolo utilizar.

Los algoritmos de enrutamiento pueden ser: Vector distancia como RIP, Estado de enlace como OSPF, Híbrido como EIGRP y serán explicados a detalle más adelante [25].

- b) Exterior:** Este tipo de protocolos se emplean para la interconexión entre sistemas autónomos, los más empleados son el protocolo de *Gateway Fronterizo* BGP y el Protocolo de *Gateway Exterior* EGB.

El *Border Gateway Protocol*, es un protocolo muy complejo que se usa en la interconexión de redes conectadas por un backbone de Internet. Este protocolo usa parámetros como ancho de banda, precio de la conexión, saturación de la red, denegación de paso de paquetes, etc. para enviar un paquete por una ruta o por otra [25]. Un router BGP da a conocer sus direcciones IP a los routers BGP y esta información se difunde por los routers BGP cercanos y no tan cercanos. BGP tiene sus propios mensajes entre routers.

- **Tipo B:**

- a) Sistemas autónomos:** Son un conjunto de redes o routers que tienen un mismo tipo de enrutamiento y son administrados con una política común. Dichos sistemas se interconectan generalmente a través del Internet, en donde se les asigna una identificación de 16 Bits que se determina mediante un Registro de Internet como RIPE, ARIN, o APNIC. Esto sirve para la administración de redes pequeñas que formaran parte del mundo del Internet.

- **Tipo C:**

- a) Enrutamiento Estático:** Este tipo de enrutamiento se da cuando se ingresa manualmente las redes a las que va a dirigir los datos de un router, resulta ser el

más óptimo en cuanto a la utilización de recursos del equipo, y el ruteo se da de una forma más rápida, sin embargo se torna complejo cuando la red crece, puesto que no se adapta a los cambios de la topología de la red.

Es el más usado cuando se trata de redes pequeñas, circuitos poco fiables o cuando un cliente no desea intercambiar información de enrutamiento dinámico.

- b) Enrutamiento Predeterminado o por defecto:** Es un enrutamiento por una ruta estática por la cual saldrá todo el tráfico hacia destinos desconocidos. Es la forma más fácil de enrutamiento para un dominio conectado a un único punto de salida. Esta ruta se indica como la red de destino 0.0.0.0/0.0.0.0.

- c) Enrutamiento dinámico:** En el uso de este tipo de enrutamiento, las tablas de enrutamiento de los routers son actualizadas de una forma dinámica, es decir, se automatiza la actualización de acuerdo a los cambios que sufra la red, ya que puede adaptarse a cualquier cambio topológico. Sin embargo consume mayor cantidad de recursos del equipo, por tanto es algo más lento que el enrutamiento estático y depende de un algoritmo de enrutamiento.

Existen algunos protocolos de enrutamiento que son muy utilizados por los administradores de la Red, a continuación se muestra una descripción de éstos:

1. PROTOCOLO RIP

RIP son las siglas en inglés de *Routing Information Protocol* y es un protocolo que utiliza el algoritmo vector distancia para calcular las rutas por las que despacha los paquetes, dichos algoritmos son los que fueron utilizados por ARPANET en 1969 [25].

RIP es un protocolo de enrutamiento interno, fue descrito en 1998 y cuenta con dos versiones (RIP V1 y RIP V2), se mantiene estable hasta la actualidad y al contrario de lo

que se pueda creer, RIP no es un protocolo en extinción, sino que se sigue desarrollando para IPv6.

RIP utiliza UDP como protocolo de transporte, con el número de puerto 520 como puerto de destino y opera en dos modos: activo (normalmente usado por routers) y pasivo (normalmente usado por hosts) [25]. La distancia o métrica está determinada por el número de saltos del router hasta alcanzar la red de destino.

a) Características de RIP

- Diseñado para redes pequeñas.
- Es un protocolo simple en relación a otros.
- Tiene dos versiones no compatibles entre sí.
- Se actualiza cada 30 segundos.

b) Ventajas y Desventajas

1) Ventajas

- Es el protocolo más sencillo de configurar comparado con otros protocolos.
- Permite versiones derivadas aunque no necesariamente compatibles.
- Es soportado por la mayoría de fabricantes.

2) Desventajas

- Determina la métrica únicamente tomando en cuenta el número de saltos, descartando otros criterios importantes, especialmente el ancho de banda, causando ineficiencias si se elige una ruta con un ancho de banda bajo.

- No resuelve posibles problemas de enrutamiento.
- En ocasiones el destino puede estar ubicado demasiado lejos como para ser alcanzable, ya que este protocolo tiene un límite de saltos (15 como máximo).

c) Versiones del Protocolo:

- **RIP V1:** Se define en el RFC 1058, esta versión se considera como un IGP con clase, ya que no soporta subredes, VLSM ni CIDR, además no posee mecanismos de autenticación, no realiza actualizaciones desencadenadas por eventos y para difundir un mensaje enviar utiliza una propagación broadcast.

La Versión 1 admite direcciones de clase A, B y C con máscara de subred por defecto, y además permite programar los intervalos para que los routers actualicen sus tablas de enrutamiento.

- **RIP V2:** Se describe en el RFC 1723, y aquí se abordan algunas de las deficiencias de la versión 1, es un enrutamiento sin clase. Admite máscaras de subred de longitud variable (VLSM) y ofrece autenticación en sus actualizaciones, pudiéndose utilizar un conjunto de claves en una interfaz como verificación de autenticación.

RIP V2 permite elegir el tipo de autenticación que se utilizará en los paquetes así como optar por texto no cifrado o cifrado con *Message-Digest 5 (MD5)* [25].

Las actualizaciones de enrutamiento se envían en *multicast* con la dirección Clase D 224.0.0.9, ofreciendo así mejor eficiencia.

d) Algoritmo vector distancia

La idea de este algoritmo está sugerida por su nombre, pues cada nodo construye un arreglo de una dimensión (vector) que contiene las distancias

(cantidad de saltos que los separa) del resto de routers de la red, este vector se distribuye a todos los vecinos.

Se aplica a diversos protocolos de enrutamiento y mantienen una tabla donde se indica la distancia o métrica (es el valor utilizado para elegir la ruta óptima puede ser el número de saltos, retardo, capacidad o una combinación de las anteriores) [25] para llegar a cada destino y que interface se utiliza para llegar al mismo.

Para ejemplificar el algoritmo vector distancia se empleará un esquema con nodos desde un nodo A hasta un nodo G, los cuales tendrán enlaces entre sí, y los mismos representarán a routers ubicados como se observa en la figura 4.2.

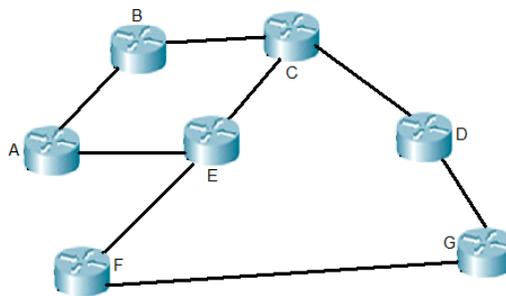


Figura 4. 2. Representación de una red.

Si cada enlace entre los nodos tiene el mismo costo, es decir un solo salto, entonces cada nodo inicialmente conocerá con un salto a sus vecinos directos, con cero saltos a él mismo y con una métrica de infinito al resto de nodos como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Ejemplo de construcción de tabla de enrutamiento del protocolo RIP.

	DISTANCIA PARA LLEGAR AL NODO						
	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	∞	1	1	∞
B	1	0	1	∞	∞	∞	∞
C	1	1	0	1	∞	∞	∞
D	∞	∞	1	0	∞	∞	1
E	1	∞	∞	∞	0	∞	∞
F	1	∞	∞	∞	∞	0	1
G	∞	∞	∞	1	∞	1	0

Luego cada nodo recibe la información que tiene su nodo adyacente en la que consta la métrica con respecto a los otros routers, inmediatamente compara esta información y si ésta tiene una métrica menor a actual reemplaza su tabla incrementando la distancia o métrica en 1, y si la métrica es mayor o igual a la que consta en su tabla no es tomada en cuenta. Por tanto la tabla 4.2. es el ejemplo de la tabla de enrutamiento en segunda instancia.

Tabla 4. 2. Ejemplo de tabla de enrutamiento del protocolo RIP en el siguiente salto.

	DISTANCIA PARA LLEGAR AL NODO						
	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1		1	1	
B	1	0	1				∞
C	1	1	0	1			
D			1	0	∞		1
E	1			∞	0		∞
F	1					0	1
G		∞		1		1	0

Cuando la métrica ha cambiado, se difunde a todos los routers de la red, además guarda la ruta aprendida hasta que conozca una mejor (de métrica estrictamente menor). Las rutas que RIP aprende de los vecinos expiran a menos que se vuelvan a difundir en 180 segundos. Cuando una ruta expira, su métrica se pone a infinito, la invalidación de la ruta se difunde a los vecinos, y 60 segundos más tarde, se borra de la tabla.

2. PROTOCOLO EIGRP

Enhanced Interior Gateway Routing Protocol es un protocolo de enrutamiento híbrido, propiedad de *Cisco Systems*, que combina lo mejor de los algoritmos de vector de distancias y del estado de enlace. Fue lanzado en 1994 como una versión escalable y mejorada de su protocolo propietario de enrutamiento por vector distancia, IGRP. Utiliza como algoritmo de enrutamiento el Algoritmo de Actualización Difusa (DUAL) [25].

Existen similitudes entre IGRP y EIGRP, por lo que este último multiplica la métrica de IGRP por un factor de 256. Esto ocurre porque EIGRP usa una métrica que tiene 32 bits de largo, e IGRP usa una métrica de 24 bits.

En el protocolo EIGRP se tiene las siguientes tablas [25]:

- 1) **Tabla de vecinos:** es la más importante de este protocolo. Cada router EIGRP mantiene una tabla de vecinos donde constan los routers adyacentes. Cuando se conoce nuevos vecinos, se registra la dirección y la interfaz. Esta información se guarda en la estructura de datos del vecino.

Los vecinos se descubren cuando envían un paquete *hello*, si este paquete no se recibe dentro del tiempo de espera, entonces vence el tiempo y se informa al DUAL, acerca del cambio en la topología para que recalcule la nueva topología.

- 2) **Tabla de topología:** se compone de todas las tablas de enrutamiento EIGRP del sistema autónomo. DUAL toma la información proporcionada en la tabla de vecinos y la tabla de topología y calcula las rutas de menor costo hacia cada destino. EIGRP rastrea esta información para que los routers puedan identificar y conmutar a rutas alternativas rápidamente. La información que el router recibe de DUAL se utiliza para determinar la ruta del sucesor, que es el término utilizado para identificar la ruta principal o la mejor, que también se introduce a la tabla de topología. Los routers EIGRP mantienen una tabla de topología por cada protocolo configurado en la red.
- 3) **Tabla de enrutamiento:** mantiene las rutas que se aprenden de forma dinámica y contiene las mejores rutas hacia un destino. Esta información se recupera de la tabla de topología.

a) **Ventajas y Desventajas**

1) **Ventajas**

- Envía actualizaciones parciales y limitadas, los reajustes se envían sólo a los routers que necesitan la información, no a todos los routers del área, por esta razón se lo conoce como actualizaciones limitadas.

- Hace un uso eficiente del ancho de banda, usa un ancho de banda mínimo cuando la red es estable.
- Compatibilidad con VLSM y CIDR.
- Independencia de los protocolos enrutados.
- La redistribución, o la capacidad para compartir rutas, es automática entre IGRP e EIGRP, siempre y cuando ambos procesos usen el mismo AS.
- Cuando el estado de enlace en un router local cambia, el dispositivo recalcula su tabla de topología con base en la nueva información. EIGRP se dirige a los equipos afectados directamente por las modificaciones. Esto permite un uso más eficiente del ancho de banda y de los recursos del router.
- Las actualizaciones son mensajes de *multicast* a la dirección 224.0.0.10 generadas por cambios en la topología.

2) Desventajas

- El límite máximo para el número de saltos en EIGRP es 224.
- No es un estándar de la industria; y sólo pueden utilizarlo aquellas compañías que tienen productos de Cisco.
- Los routers EIGRP descubren a sus vecinos e intercambian paquetes de saludo. Este protocolo envía paquetes de saludo cada cinco segundos, si no llegan tres, se da por hecho que el router vecino no tiene conexión y se utilizan otras rutas.
- También envía actualizaciones incrementales acerca de cambios en la topología (cuando son necesarias) y, a diferencia de RIP, no gasta ancho de banda en anunciar actualizaciones regulares.

EIGRP utiliza un protocolo de transporte fiable para garantizar la entrega correcta y ordenada de la información y las actualizaciones de la tabla de enrutamiento. Un router

hace el seguimiento de sus propias rutas conectadas y, además, de todas las rutas públicas de los routers vecinos. En base a esta información, EIGRP puede seleccionar eficaz y ágilmente la ruta de menor métrica hasta un destino sin que la ruta forme parte de un bucle de enrutamiento; la ruta seleccionada como principal será la llamada Sucesor.

Sucesor es el siguiente router que está en el camino hacia la red de destino. El protocolo también se mantiene al tanto de los routers de siguiente salto, denominados sucesores factibles, que ofrecen rutas de respaldo, esta información queda registrada en la tabla de topología. Si una ruta deja de estar disponible, se puede consultar rápidamente dicha tabla para encontrar los sucesores factibles, si se encuentra uno, la convergencia se da instantáneamente; si no hay ninguno, el router comenzará a indagar entre sus vecinos locales para tratar de descubrir otra ruta, y así actualizar la tabla de topología y la tabla de enrutamiento.

b) Algoritmo de Enrutamiento [25]

Fórmula por defecto

$$Métrica = [K1 \times (AB) + K3 \times (retraso)]$$

Fórmula completa

$$Métrica = \left[K1 \times (AB) + \frac{K2 \times (AB)}{256 - c \arg a} + K3 \times (retraso) \right] \times \left[\frac{K5}{(confiabilidad + K4)} \right]$$

Donde:

$K1=K2=K3=K4=K5 \rightarrow$ constantes

$AB \rightarrow$ ancho de banda

Los valores por defecto de las constantes son: $K1=1$, $K2=0$, $K3=1$, $K4=0$, $K5=0$. Cuando $K4$ y $K5$ son 0, la porción $[K5 / (confiabilidad+K4)]$ de la ecuación no forman parte del cálculo de la métrica. Los valores K predeterminados pueden cambiarse con un comando.

3. PROTOCOLO OSPF

Open Shortest Path First es un protocolo de enrutamiento basado en el algoritmo de estado de enlace, desarrollado a finales de los 80 y definido en el RFC 2328. Se diseñó para cubrir las necesidades de las grandes redes IP, que otros protocolos como RIP no podían soportar, incluyendo VLSM, autenticación de origen de ruta, convergencia rápida, etiquetado de rutas conocidas mediante protocolos de enrutamiento externo y publicaciones de ruta de multidifusión [25].

OSPF es de dominio público y no propietario. Es preferido sobre RIP V1 y V2 por su robustez y escalabilidad. Actualmente es usado en redes modernas que son grandes y jerárquicas. Utiliza el concepto de áreas para reducir gasto de procesamiento, acelerar la convergencia, limitar la inestabilidad de la red a un área y mejorar el rendimiento.

Utiliza el algoritmo *Dijkstra* para calcular la ruta más corta entre la red de origen y el destino para el envío de paquetes.

a) Características de OSPF

- Es un protocolo abierto.
- Permite reconocer varias métricas.
- Realiza enrutamiento dependiendo del tipo de servicio.
- Puede equilibrar las cargas.
- Reconoce sistemas jerárquicos (áreas).
- Implementa un mínimo de seguridad.
- Es un protocolo de enrutamiento interior pero puede operar como uno exterior (BGP).
- Trabaja con las mismas bases de datos topológicas para todos los routers dentro de un área.

- Se comunica por medio de IP.
- Los cambios de estado se producen como resultado de eventos.
- Usa la ruta más corta y converge rápidamente.
- Las actualizaciones son desencadenadas por los eventos.
- Envía paquetes de estado de enlace a todos los routers de red mediante una multidifusión de IP.
- No es susceptible a los bucles de enrutamiento.
- Requiere más memoria y potencia de procesamiento que en los protocolos vector distancia.
- Consume menos ancho de banda que el vector distancia.

b) Áreas:

OSPF distingue algunos tipos de área [25], entre los que se tiene:

- **Área *Backbone*:** También denominado área cero, forma el núcleo de una red y está presente en cualquier red OSPF, mantiene conexión, física o lógica, con todas las demás áreas existentes en la red. La conexión entre un área y el backbone se realiza mediante los ABR, que son responsables de la gestión de las rutas no-internas del área (esto es, de las rutas entre el área y el resto de la red).
- **Área *stub*:** Es aquella que no recibe rutas externas. Las rutas externas se definen como rutas que fueron inyectadas en OSPF desde otro protocolo de enrutamiento. Por lo tanto, las rutas internas necesitan normalmente apoyarse en las rutas predeterminadas para poder enviar tráfico a rutas fuera de la red.
- **Área *not-so-stubby*:** También conocidas como NSSA, constituyen un tipo de área *stub* que puede importar rutas externas de sistemas autónomos y enviarlas al *backbone*, pero no puede recibir rutas externas de sistemas autónomos desde el *backbone* u otras áreas.

c) Topología de Red

Para conocer perfectamente la topología de la red, los protocolos de enrutamiento de estado de enlace utilizan los siguientes elementos:

- **Publicaciones estado de enlace (LSA):** Son paquetes de difusión o *broadcast* que contienen información acerca de los vecinos y los costos de una ruta. Se utilizan para mantener actualizadas las bases de datos.
- **Base de datos topológica:** Esta topología se representa mediante un grafo dirigido y se mantiene en cada dispositivo de enrutamiento.
- **El algoritmo SPF (primero la ruta más corta) y el árbol SPF:** En caso de OSPF se utiliza el algoritmo de *Dijkstra* para calcular la ruta más corta y luego representa las rutas mediante árboles SPF.
- **Tabla de enrutamiento de rutas y puertos hacia cada red:** El grafo dirigido que se guarda en la base de datos topológica. A partir de este grafo mediante el algoritmo de *Dijkstra* calcula la ruta de menor costo.

d) Métrica

Su métrica se basa en el retardo, ancho de banda, carga y confiabilidad, de los distintos enlaces posibles para llegar al destino; en base a esos conceptos el protocolo prefiere una ruta por sobre otra. Sin embargo en este protocolo la métrica es igual al costo y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Costo} = \frac{10^8}{AB}$$

Donde AB=Ancho de banda de la interfaz

e) Algoritmo que utiliza OSPF

OSPF trabaja en base al algoritmo *Dijkstra* o SPF (Primero la ruta más corta), manteniendo una base de datos topológica compleja [25]. Tiene las siguientes consideraciones:

- Considera a la red como el conjunto de nodos conectados por enlaces punto a punto.
- Cada enlace tiene un costo.
- Cada nodo tiene un nombre.
- Cada nodo tiene una base de datos completa de todos los enlaces y una completa información de la topología física.
- Todas las bases de datos topológicas de los routers son idénticas.

El algoritmo de *Dijkstra*, o algoritmo de caminos mínimos, determina el camino más corto desde un nodo origen al resto de nodos en un grafo dirigido y con costos en cada interfaz, la ruta más corta es sin bucles y además examina la información que posee los nodos adyacentes. Cuando se obtiene el camino más corto desde un router origen, al resto de routers que componen el grafo, el algoritmo se detiene.

En la figura 4.3 se observa el grafo inicial de una red en la cual se aplica el algoritmo de *Dijkstra*.

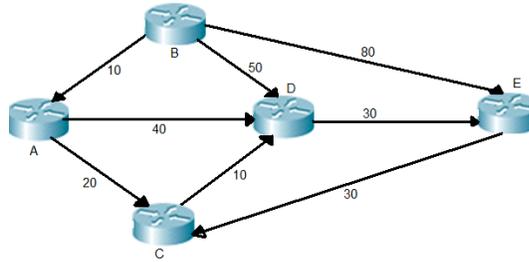


Figura 4. 3. Representación de una red con OSPF.

Se aplica el algoritmo *Dijkstra*, para encontrar el camino más corto entre el router B y el router E, entonces el grafo queda como se observa en la figura 4.4.

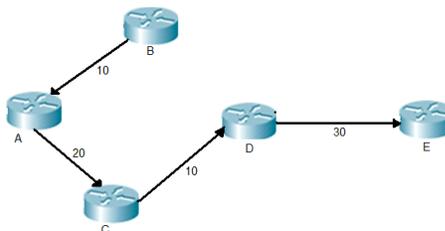


Figura 4. 4. Grafo con el camino más corto aplicando *Dijkstra*.

- **Funcionamiento del Algoritmo *Dijkstra***

1. Para encontrar la adyacencia con vecinos se utilizan los paquetes *hello* pues a través de éste, los routers mantienen relaciones con sus vecinos asegurando la comunicación bidireccional entre ellos; los paquetes *hello* se envían periódicamente al exterior por todas las interfaces de los routers. El router examina la lista de sus vecinos y desecha cualquiera que no tenga comunicación bidireccional.
2. Forma adyacencias.
3. Sincroniza base de datos.
4. Calcula la tabla de enrutamiento y anuncia los estados de enlaces.
5. Los routers efectúan todos estos pasos durante su activación, y los repetirán en respuesta a eventos de red.
6. Cada router genera y mantiene una sola tabla de enrutamiento para todas las redes.

4. PROTOCOLO IS - IS

IS-IS (*Integrated System to Integrated System*) descrito en el RFC 1142 es un protocolo de enrutamiento interior de estado enlace dinámico, desarrollado para la interconexión de Sistemas Abiertos [25]. Su desarrollo estuvo motivado por la necesidad de un sistema no propietario que pudiera soportar un gran esquema de direccionamiento y un diseño jerárquico.

Fue desarrollado aproximadamente al mismo tiempo que se desarrollaba OSPF y pretendía implementar el protocolo de capa de red del modelo OSI llamado CLNP (*ConnectionLess Network Protocol*)

a) Características de IS-IS

- Es un protocolo abierto.
- Reconoce sistemas jerárquicos.

- Se comunica por medio de IP.
- Muy escalable.
- Sintonizador de tiempo flexible.
- Soporta MPLS e Ingeniería de Tráfico.
- Direccionamiento jerárquico con un amplio rango de direcciones
- Rápida convergencia de la red con muy poco *overhead* sobre la misma.
- Utiliza un protocolo de saludo para descubrir a sus vecinos.
- La ruta más corta a un destino se determina mediante la adición de los costos y la búsqueda del menor costo

b) Áreas:

Este protocolo divide una red en áreas, pero a diferencia de OSPF no requiere que todas las áreas estén directamente conectadas al área *backbone* o área 0, ni siquiera existe una área 0 determinada.

En IS-IS hay tres tipos de enrutadores divididos en niveles [25]:

- Nivel 1: intra-área. Su conocimiento de la red es limitado al área y emplea una ruta por defecto al router de Nivel 2 más cercano para enrutar tráfico externo al área donde se encuentra.
- Nivel 2: inter-área. Son necesarios para el enrutamiento entre áreas distintas tal como los routers de backbone en OSPF.
- Nivel 1-2: pueden hacer funciones tanto de nivel 1 como de nivel 2. Son routers tanto Intra como Inter-area, similares a los routers fronterizos de área en OSPF, que pueden tener vecinos en diferentes áreas.

En IS-IS se establece una red de enrutadores de nivel 2 y nivel 1-2 interconectados, y a estos enrutadores se conectan los enrutadores de nivel 1. Teniendo en cuenta esto y los cuatro niveles de enrutamiento:

- Nivel 0: se transmiten datos entre ES (*host*) y un IS de nivel 1 (tráfico intra-área).
- Nivel 1: enrutamiento dentro de un área (comunicación entre IS nivel 1 y nivel 1-2).
- Nivel 2: enrutamiento entre áreas (comunicación entre IS nivel 1-2 y nivel 2).
- Nivel 3: enrutamiento entre sistemas autónomos.

c) Métrica

IS-IS tiene cuatro métricas definidas en ISO 10589:

- 1 **Default:** Llamada costo, es la única que se establece obligatoriamente en el estándar. Cisco configura por defecto todas las interfaces con un valor de 10.
- 2 **Delay (Retardo):** Mide el retardo del tránsito.
- 3 **Expense (Gasto):** Mide el costo monetario de la utilización del enlace.
- 4 **Error (Confiabilidad de la ruta):** Mide la probabilidad de error residual asociado con el enlace.

Las métricas ISO son configuradas en la interfaz de salida usando un entero entre 0 y 63. Un campo de 10 bits describe la ruta total al destino, permitiendo un valor entre 0 a 1023.

Todos los enlaces usan una métrica de 10 por defecto. El costo total a un destino es la suma de los costos en todas las interfaces de salida a lo largo de una ruta particular desde la fuente al destino. La ruta con menor costo es la preferida.

d) Algoritmo que utiliza IS-IS

Al igual que OSPF, IS-IS utiliza el algoritmo *Dijkstra (Shortest Path First –SPF)* para el cálculo de rutas, que ya ha sido explicado antes.

Después de haber analizado con mayor detalle los principales protocolos utilizados para la administración de redes, en las tablas 4.3. y 4.4. se observan una comparación entre ellos.

Tabla 4. 3. Tabla comparativa entre vector distancia y estado de enlace.

VECTOR DISTANCIA	ESTADO DE ENLACE
Vista de la topología de la red desde la perspectiva del vecino	Consigue una vista común de toda la topología de la red
Añade vectores de distancias de router a router	Calcula la ruta más corta hasta otros routers
Frecuentes actualizaciones periódicas, convergencia lenta	Actualizaciones activadas por eventos, convergencia rápida
Pasa copias de la tabla de enrutamiento a los routers vecinos	Pasa las actualizaciones de enrutamiento de estado del enlace a los otros routers

Tabla 4. 4. Tabla comparativa entre protocolos de enrutamiento.

CARACTERÍSTICAS	RIP	OSPF	IGRP	EIGRP	IS-IS
TIPO	Vector distancia	Estado enlace	Vector distancia	Vector distancia	Estado enlace
TIEMPO DE CONVERG.	Lento	Rápido	Lento	Rápido	Rápido
SOPORTA VLSM	No	Si	No	Si	Si
CONSUMO DE AB	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
CONSUMO DE RECURSOS	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto
MEJOR ESCALAMIENTO	No	Si	Si	Si	Si
SOPORTA MPLS E INGENIERIA DE TRAFICO	No	Si	No	No	Si
DE LIBRE USO O PROPIETARIO	Libre uso	Libre uso	Propietario	Propietario	Libre uso

4.3. Etiquetas en MPLS

Las etiquetas manejadas por la tecnología IP/MPLS son un identificador de conexión que sólo tiene significado local y que establece una correspondencia entre el tráfico y un FEC específico. Esta etiqueta es un valor corto y de tamaño fijo transportado en la cabecera del paquete para identificar un FEC (*Forward Equivalence Class*), que es un conjunto de paquetes que son reenviados sobre el mismo camino a través de la red, inclusive si sus destinos finales son diferentes [26].

Dicha etiqueta se asigna al paquete basándose en su dirección de destino, los parámetros de tipo de servicio o la pertenencia a una VPN. Cuando MPLS está implementado como una solución IP pura o de nivel 3, que es la más habitual, la etiqueta es un segmento de información añadido al comienzo del paquete y son colocadas a cada paquete solo una vez al inicio de la red MPLS, y eliminadas al final.

El núcleo de la red simplemente lee las etiquetas, le aplica una serie de servicios apropiados, y envía los paquetes. Este etiquetado MPLS y esquema de envío, ofrece la habilidad para controlar el enrutamiento basado en direcciones origen y destino, permitiendo fácilmente la introducción de nuevas implementaciones de servicios IP.

La cabecera genérica de MPLS [26] está compuesta por 32 bits los cuales como se observa en la figura 4.5. se reparten en:

- **Etiqueta:** 20 bits para la etiqueta MPLS y sirve para identificar una FEC y puede tomar los siguiente valores:
 - **0:** Representa la etiqueta explícita nula (*NULL*). Esta etiqueta se encuentra en caso de que sea la única entrada en la pila de etiquetas y el paquete es reenviado basándose en la cabecera del paquete IPv4.
 - **1:** Representa la etiqueta de alerta del enrutador y no puede estar en el último lugar de la pila de etiquetas.
 - **2:** Representa la etiqueta explícita nula IPv6. Es igual que el primer caso excepto que se reenvía el paquete basándose en la cabecera IPv6.
 - **3:** Representa la etiqueta implícita nula.

- **4-15:** Valores reservados.
- **EXP (experimental):** anteriormente llamado CoS, para identificar la clase de servicio se utilizan 3 bits.
- **S (stack):** sirve para poder apilar etiquetas de forma jerárquica. Toma el valor de 1 en la etiqueta que se encuentra en la cima de la pila y 0 para el resto de etiquetas.
- **TTL (time-to-live):** 8 bits para indicar el tiempo de vida que sustenta la funcionalidad estándar TTL de las redes IP.

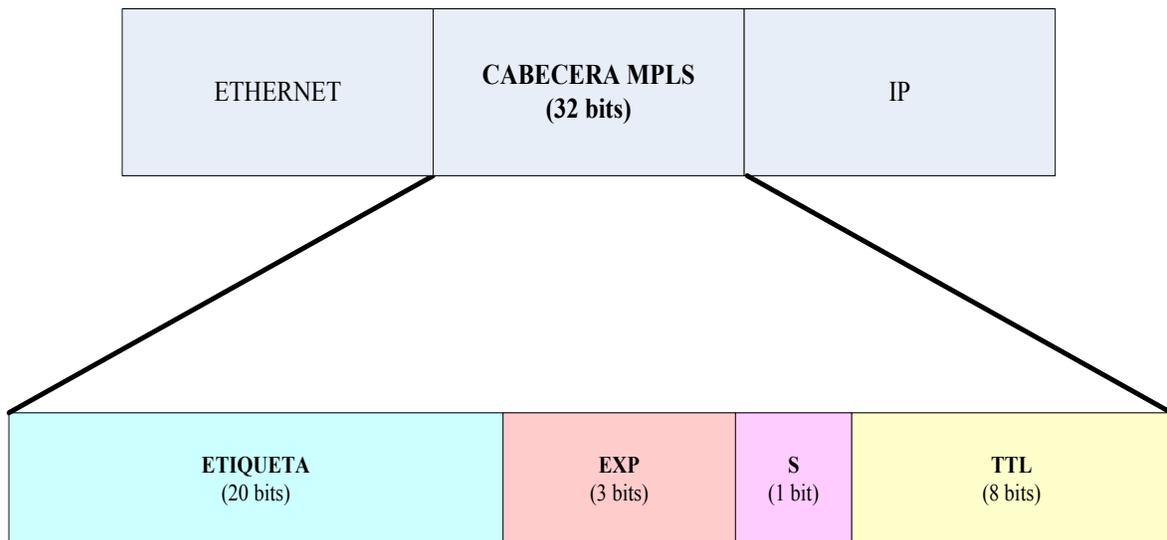


Figura 4. 5. Formato de la cabecera MPLS.

4.3.1. Pila de Etiquetas

Un paquete etiquetado puede transportar algunas etiquetas organizadas de forma jerárquica en una pila, que recibe el nombre de “pila de etiquetas”. Las etiquetas se anidan en el paquete formando una pila con funcionamiento *Last-In First-Out* (LIFO), como se indica en la figura 4.6. El procesamiento está siempre basado en la etiqueta superior, un paquete sin etiquetar se puede ver como un paquete con la pila de etiquetas vacía.

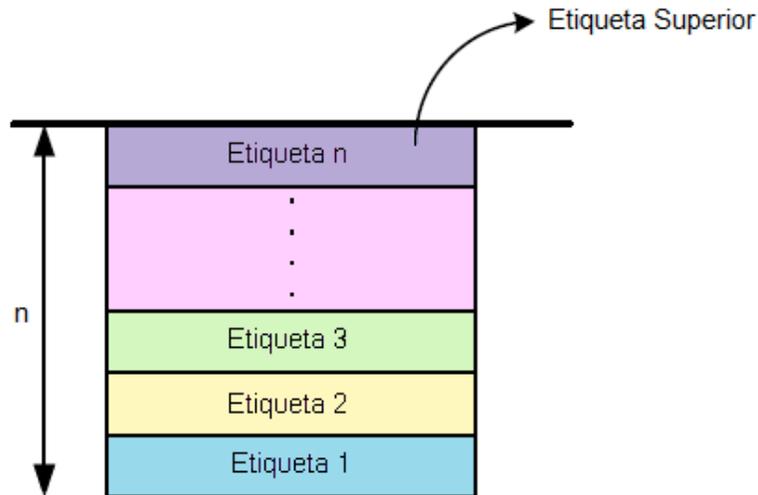


Figura 4. 6. Pila de Etiquetas con funcionamiento LIFO

4.3.2. Operaciones con etiquetas

En MPLS se produce 3 operaciones básicas con las etiquetas que son:

- **PUSH:** Imposición o asignación de etiqueta, si existe otra etiqueta antes de efectuar esta operación, la nueva etiqueta encapsula la anterior, tal como se ejemplifica en la figura 4.7.

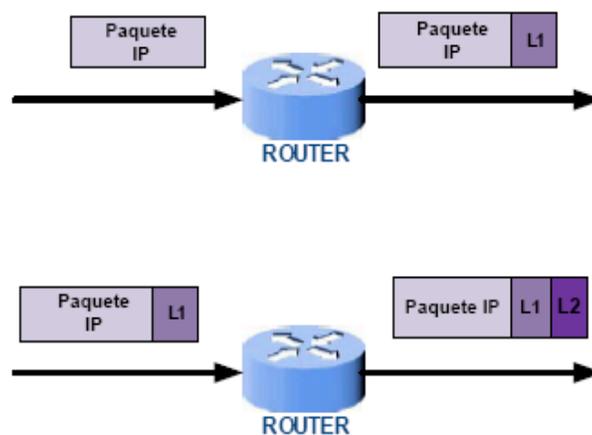


Figura 4. 7. Operación *PUSH*.

- **SWAP:** Intercambio de etiqueta, la etiqueta es cambiada por otra y el paquete es enviado por el camino asociado a esta nueva etiqueta, como se observa en la figura 4.8.

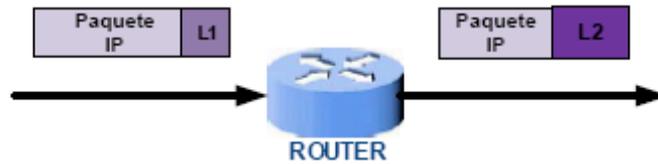


Figura 4. 8. Operación SWAP.

- **POP:** La etiqueta es retirada del paquete lo cual puede revelar una etiqueta interior si existiera. En la figura 4.9. se muestra este proceso que también se lo conoce como desencapsulado y es usualmente efectuada por el enrutador de egreso.

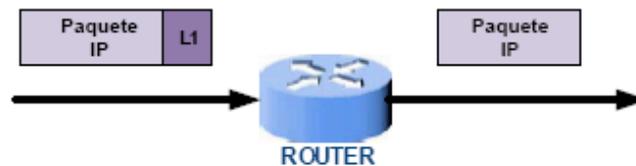


Figura 4. 9. Operación POP.

4.3.3. Intercambio de etiquetas (*Forwarding*)

IP/MPLS se basa en la asignación e intercambio de etiquetas, que permiten crear caminos LSP en la red. Los LSP se establecen en cada punto de entrada a la red y en un sólo sentido del tráfico por lo que para el tráfico bidireccional se requiere dos LSPs [24].

Cada LSP se crea a base de concatenar uno o más saltos en los que se intercambian las etiquetas, en base a una tabla de envío. Esta tabla se construye a partir de la información de encaminamiento que proporciona el componente de control, en la figura 4.10 se observa como cada entrada de la tabla contiene etiquetas tanto de entrada y salida

correspondientes a cada interfaz, que se utilizan para acompañar a cada paquete que llega por esa interfaz.

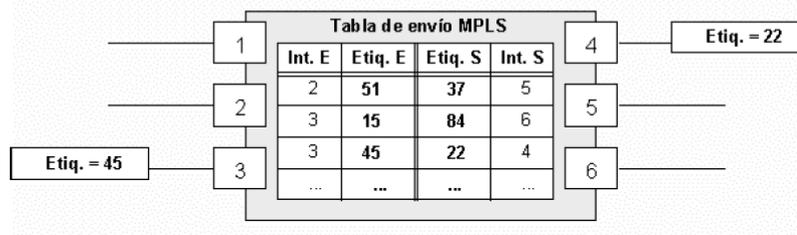


Figura 4. 10. Tabla de envío utilizada en MPLS.

Cada LSR tiene una tabla de envío por cada LSP que pasa por sus interfaces. Cuando los datos llegan al router de entrada de la red, se le asigna una etiqueta y se le envía al próximo salto. El router al que ha sido enviado, desecha la etiqueta de entrada y añade nuevas etiquetas para enviar el paquete al destino correspondiente de acuerdo a la tabla de envío. En la figura 4.11 se muestra un ejemplo del proceso de intercambio de etiquetas que se da en la tecnología MPLS.

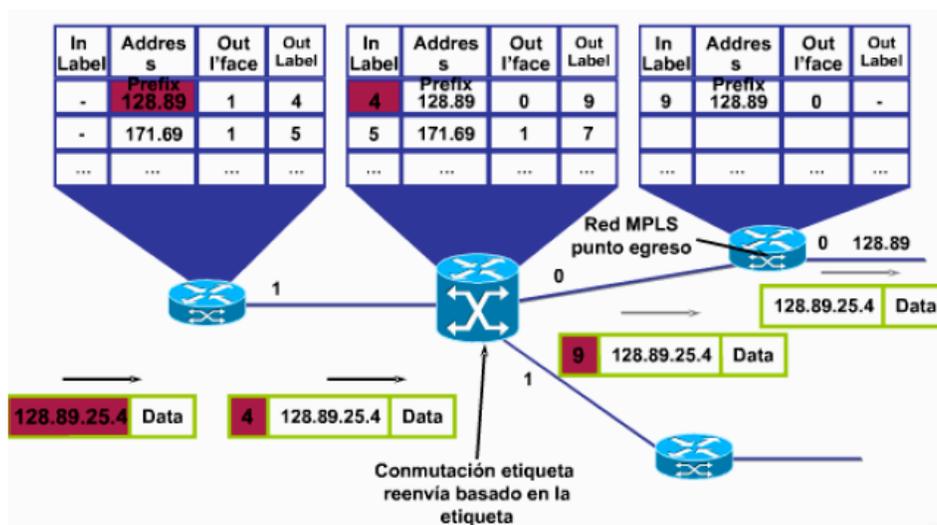


Figura 4. 11. Intercambio de etiquetas en MPLS.

4.4. Elementos de una red MPLS

A continuación se muestra la descripción especificada de los elementos [27] que conforman una red IP/MPLS:

- **LSP (*Label Switch Path*):** Es un camino de tráfico específico a través de la red, el cual se crea mediante los LDPs (*Label Distribution Protocols*), que serán estudiados a detalle más adelante.

La función principal de un LDP es que los nodos MPLS puedan descubrirse y establecer comunicación entre sí con el propósito de informarse el valor y significado de las etiquetas que serán utilizadas en sus enlaces contiguos.

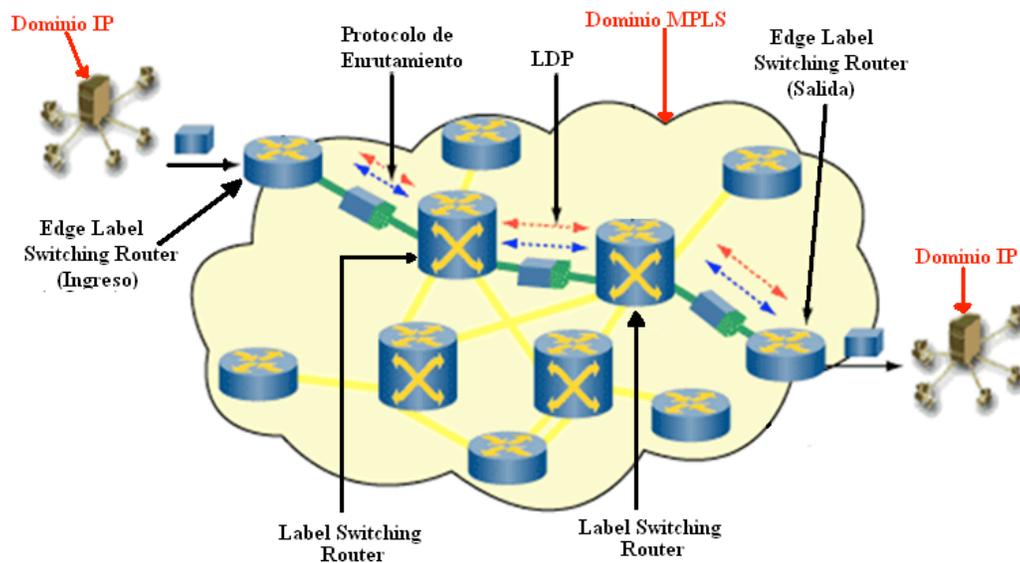


Figura 4. 12. Elementos de la Red IP/MPLS.

En la figura 4.12. se observa que en IP/MPLS se tiene 2 tipos de nodos, que pueden ser configurados para uno u otro modo de trabajo según lo estime el administrador [27].

- **LER (*Label Edge Routers*):** están ubicados en el borde de la red, por lo que opera entre el límite entre la red MPLS y la red de acceso existente y desempeña las funciones tradicionales de enrutamiento proporcionando conectividad a sus usuarios, generalmente son routers IP convencionales, soporta múltiples puertos conectados a diferentes tipos de redes. El LER analiza y clasifica el paquete IP entrante considerando hasta el nivel 3, es decir, considerando la dirección IP de destino y la QoS demandada; añadiendo la etiqueta MPLS que identifica en qué LSP está el paquete. Sin embargo, el LER en vez de decidir el siguiente salto, como haría un router IP

normal, decide el camino entero a lo largo de la red que el paquete debe seguir. Una vez asignada la cabecera MPLS, el LER enviará el paquete a un LSR.

- **LSR (*Label Switching Routers*):** Se ubican en el núcleo de la red efectuando un enrutamiento de alto rendimiento basado en la conmutación por etiqueta pues es capaz de reenviar los paquetes en la capa 3 y el reenvío de tramas que encapsulan los paquetes en la capa 2. Cuando le llega un paquete a una interfaz del LSR, éste lee el valor de la etiqueta de entrada de la cabecera MPLS, y lo compara con las etiquetas dentro de su tabla de reenvíos, llamada la base de información de la etiqueta (LIB, *Label Information Base*). El LSR de acuerdo con las instrucciones de LIB, efectúa las operaciones con las etiquetas y reenvía el paquete por el camino predefinido escribiendo la nueva cabecera MPLS.

Los nodos MPLS al igual que los routers IP tradicionales, intercambian información sobre la topología de la red mediante los protocolos de enrutamiento, cualquiera de los descritos anteriormente, que a partir de sus tablas de enrutamiento alcanzan las redes IP destinatarias. En el proceso de envío, al paquete se le asigna una “etiqueta”, en el momento de ingreso a la red y acompañará al paquete en el trayecto, contrario al tradicional y conocido sistema de envío de IP y *Ethernet*, cuya MAC en cada trama va cambiando después de un proceso, en el que se consulta la tabla de enrutamiento, esta etiqueta MPLS definirá los LSP que seguirán los paquetes y funcionará como un índice en una tabla donde se especificará el siguiente salto y a su vez el valor de la siguiente etiqueta, de esa manera el proceso es más rápido, evitando así someterlo en cada salto a un pesado proceso de decisión para determinar el siguiente salto [28]. Si un LSR detecta que debe enviar un paquete a un LER, extrae la cabecera MPLS; como el último LER no conmuta el paquete, se reducen así las cabeceras innecesarias.

Cada uno de estos LER y LSR, están formados por un plano de Control y plano de Datos diferenciables claramente en cuanto a las tareas que deben realizar; en la figura 4.13. se observa dichos planos [26].

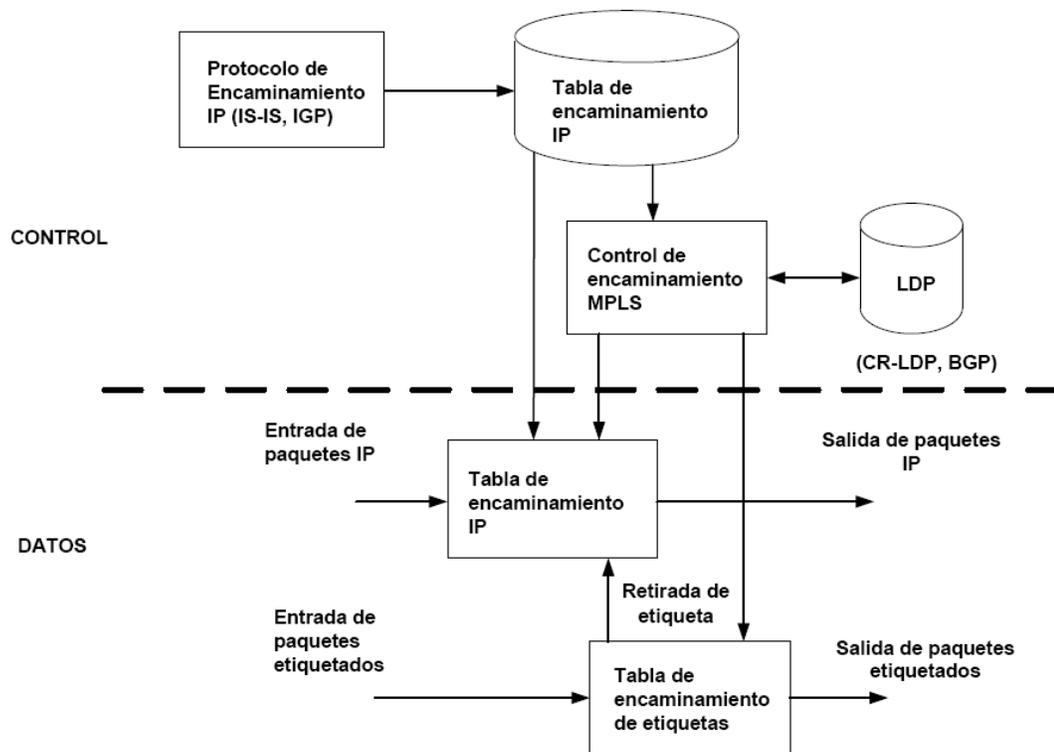


Figura 4. 13. Plano de Control y Datos en MPLS.

- Plano de Control o Componente de Control:** Se encarga de la generación y mantenimiento de las tablas de enrutamiento que establecen los LSPs, así como también de la distribución de la información sobre las etiquetas a los LSRs. Las tablas de enrutamiento se calculan usando bases de datos de estado de enlace así como políticas de control de tráfico como son: la topología, características de los enlaces, patrón de tráfico, etc. Los principales componentes de este plano son: tabla de enrutamiento y *Label Information Base (LIB)*.
- Plano de Datos o Componente de Datos:** Conmuta los paquetes MPLS entrantes, basándose en las tablas de enrutamiento entregadas por el plano de control. En el plano de datos se utiliza dos fuentes de información: la etiqueta transportada por el paquete y la tabla de envío LFIB (*Label Forwarding Information Base*).

El esquema funcional de MPLS es mostrado en la figura 4.14.

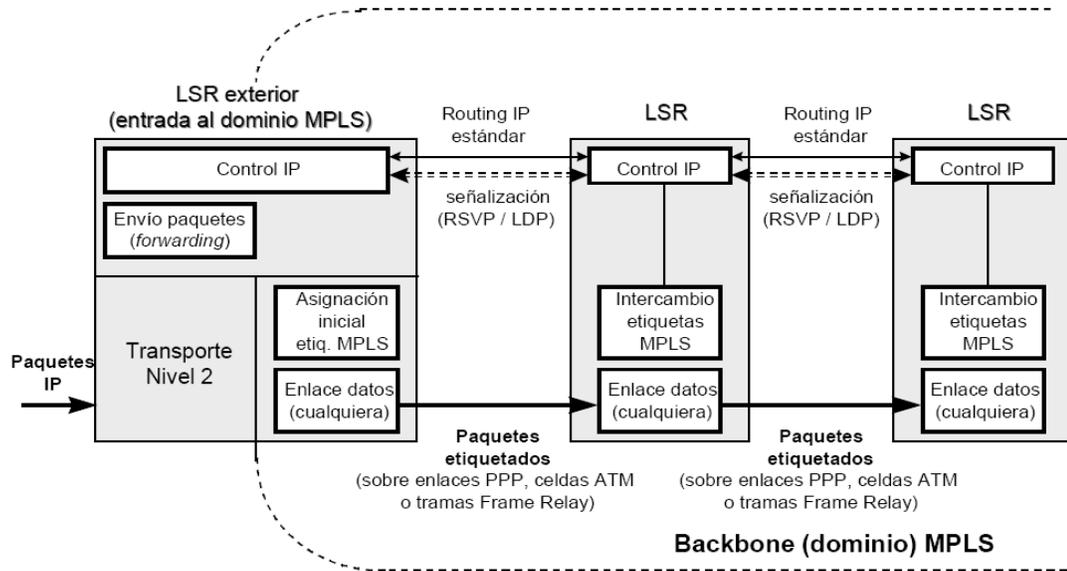


Figura 4. 14. Esquema Funcional de MPLS.

4.4.1. LSP (Label Switch Path)

MPLS maneja dos tipos de técnicas de selección de una ruta o LSP dentro de un FEC específico que son:

- **Enrutamiento *hop by hop*:** En este tipo de enrutamiento cada LSR escoge el siguiente salto para cada FEC independientemente de los demás LSRs existentes en la red, hace uso de un protocolo simple, como OSPF (*Open Shortest Path First*) para permitir a MPLS, el apilamiento y conmutación de etiquetas, así como también para procesar de manera diferenciada los paquetes de distintos FECs con la misma ruta; sin que exista ingeniería de tráfico o políticas de enrutamiento para el manejo de QoS.
- **Enrutamiento explícito (ER-LSP):** En este enrutamiento se tiene 2 formas que se detallan a continuación:
 - **Enrutamiento explícito estricto.** En este enrutamiento un LSR especifica todos y cada uno de los LSRs en un LSP.
 - **Enrutamiento explícito libre.** En este enrutamiento solo algunos LSRs son especificados.

Con cualquier enrutamiento explícito se logra tener ingeniería de tráfico y QoS. Las rutas explícitas se las selecciona por configuración o dinámicamente; para tener un enrutamiento explícito dinámico, el LER debe tener información de la topología de la red y de los requisitos de calidad de servicio en el dominio MPLS con lo cual se mejora la ingeniería de tráfico.

Se necesita de *pseudowires* (PW) para llevar servicios móviles a través de un LSP designado. Los *pseudowires* son servicios punto a punto cuya función es la encapsulación de un servicio de transmisión del tráfico tradicional TDM/ATM a través de una red de conmutación de paquetes como se observa en la figura 4.15 [24]. Un beneficio adicional de este tipo de túneles es la creación de un esquema de protección para garantizar un servicio continuo.

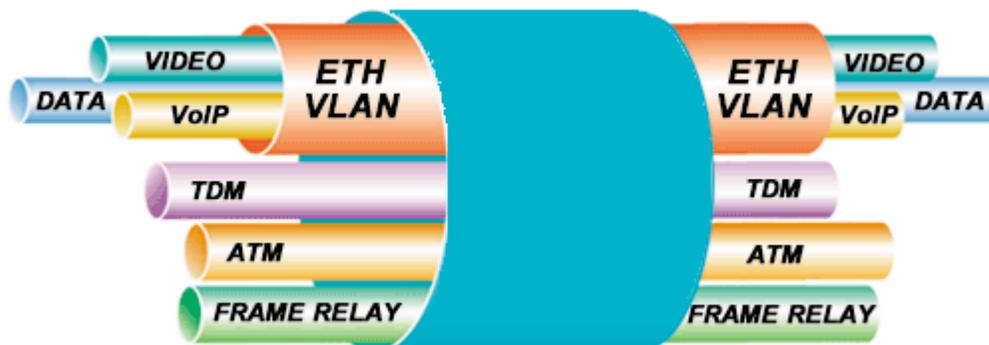


Figura 4. 15. Representación de un pseudowire.

4.5. Estándares y Protocolos de la Tecnología MPLS

Para que los routers de conmutación de etiquetas (LSR) se pongan de acuerdo sobre el significado de las etiquetas utilizadas para avanzar entre el tráfico a través de ellos se necesita de los protocolos de señalización para la distribución de etiquetas [24]. El LSR utiliza estos protocolos para establecer los LSP que se asocia a un FEC específico, y estos son:

1. *Label Distribution Protocol* (LDP)
2. *Constraint-based Routed Label Distribution Protocol*, (CR-LDP)

3. *ReSerVation Protocol Traffic Engineering (RSVP-TE).*

4.5.1. *Label Distribution Protocol*

LDP se caracteriza por establecer conexiones punto a punto entre LSR o LER para intercambiar información de etiquetado. LDP hace diferenciación entre diversas categorías de servicio: *Gold, Silver y Best-Effort*.

Dos LSRs que utilizan LDP para el intercambio de información de mapeo de etiqueta se les conoce como compañeros LDP o pares LDP y establecen una sesión LDP entre ellos. En una sola sesión, cada par es capaz de aprender acerca de las asignaciones de etiquetas a otros, es decir, el protocolo es bidireccional.

Hay 4 tipos de mensajes LDP:

- **Mensajes de Descubrimiento:** el LSR a través de mensajes periódicos de saludo (*hello*) anuncia su presencia en la red, estos son transmitidos como un paquete UDP, mientras que cuando se establece un nuevo período de sesiones, el mensaje de saludo es enviado a través de TCP. Todos los demás mensajes se envían a través de TCP.
- **Mensajes de Sesión:** establece, mantiene, y termina sesiones entre pares LDP. Una vez establecida los mensajes usan TCP. Estos mensajes sirven para fijar la versión del protocolo, el método de distribución de etiquetas, los valores de los temporizadores, así como la definición de rangos de etiquetas.
- **Mensajes de Anuncio:** crea, cambia, y borra mapeo de etiquetas para FECs.
- **Mensajes de Notificación:** Proporciona información de avisos y señalización de errores, existe dos tipos de mensajes de notificación:
 1. Error fatal, da por terminada la sesión.
 2. Notificaciones de asesoramiento, las cuales se utilizan para pasar al LSR información sobre la sesión o el estado de algún mensaje anterior recibido.

El procedimiento que siguen los mensajes generados por LDP, se muestra en la figura 4.16.

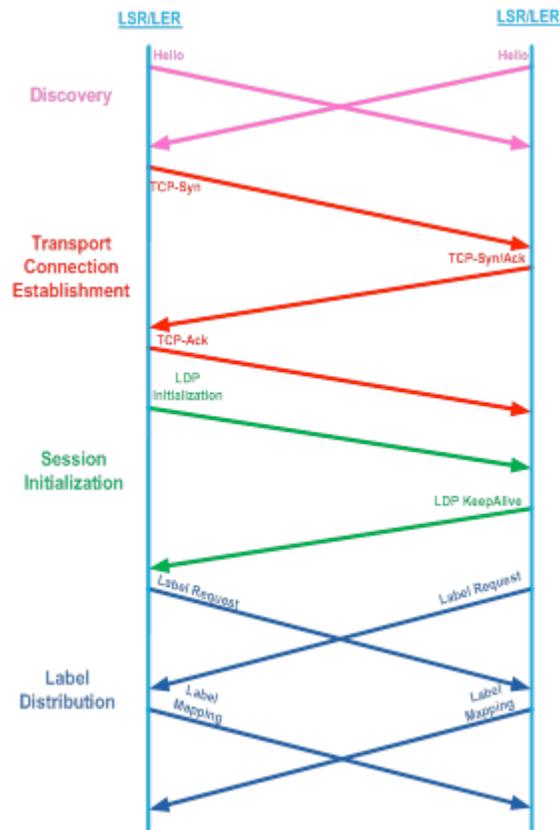


Figura 4. 16. Label Distribution Protocol LDP

4.5.2. CR-LDP

Constraint-based Routed Label Distribution Protocol, no necesita de implementaciones adicionales ya que está basado en LDP y utiliza su misma estructura para los mensajes. Se encuentra definido en el RFC 3212, y utiliza sesiones TCP entre compañeros LSR.

CR-LDP señala y distribuye las etiquetas extremo a extremo de un LSP. Cabe destacar que la señalización QoS en CR-LDP se basa en *DiffServ*, que establece las prioridades en función de las clases de servicio (CoS).

El proceso que siguen los paquetes en este protocolo es el descrito a continuación y su representación gráfica se puede observar en la figura 4.17.:

1. El LER de entrada quiere establecer un nuevo LSP hacia el LER de salida. Los parámetros de tráfico determinan por dónde debe pasar la ruta, así que el LER de entrada reserva los recursos que necesita y envía un mensaje con la ruta explícita hacia el LER de salida y con los parámetros de tráfico que requiere la sesión.
2. Cada nodo de la ruta que recibe el mensaje reserva los recursos, determina si es la salida para ese LSP, si no lo es, sigue enviando el mensaje eliminándose de la ruta. Puede reducir la reserva si los parámetros de tráfico están marcados como negociables.
3. Una vez llega al LER de salida, éste realiza cualquier negociación final sobre los recursos y hace la reserva. Asigna una nueva etiqueta al nuevo LSP y la distribuye en un mensaje que contiene los parámetros de tráfico finales reservados para el LSP.
4. Los LSRs intermedios emparejan los mensajes que han recibido según el identificador de LSP, asignan una etiqueta para el LSP, rellenan la tabla de envío y envían la nueva etiqueta en otro mensaje.
5. En cuanto llegue al LER de entrada se habrá establecido el LSP.

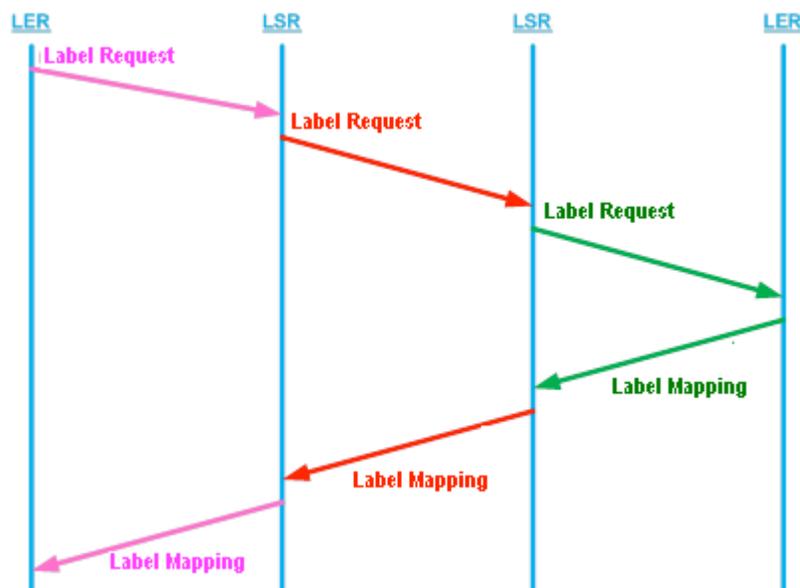


Figura 4. 17. Protocolo CR-LDP.

4.5.3. RSVP-TE

Resource reSerVation Protocol - Trafic Engineering es una extensión del protocolo RSVP, es un protocolo de capa de transporte diseñado para reservar canales o rutas en Internet para la posterior transmisión de datos.

RSVP-TE utiliza, datagramas IP y UDP para la comunicación entre LSRs y LERs, funciona extremo a extremo, pero tiene dos diferencias básicas que son:

1. La señalización QoS se realiza por prioridad por flujo (*IntServ*);
2. Necesita refrescar de forma periódica el estado de cada LSP, ya que, al ser UDP un mecanismo de transporte sin confiabilidad, no se tiene total certeza de que los mensajes entre LSR no se estén perdiendo, e incluso que algún LER se haya caído.

Este protocolo puede establecerse en terminales o en routers para solicitar o entregar diferentes tipos de calidad de servicio y se encarga de definir cómo las aplicaciones realizan las peticiones de reserva y cómo liberan los recursos cuando ya no se utilizan. La información necesaria para llevar a cabo la reserva de recursos precisa un conjunto de mensajes que se retransmiten junto con la cabecera. Existen 2 tipos de mensajes utilizados en este protocolo que son:

1. **Mensaje *Path*:** Este mensaje define el formato de los paquetes y especifica las características del tráfico. El receptor de cada mensaje *Path* está en la capacidad de procesar y confeccionar el mensaje de respuesta correspondiente. El camino que debe seguir un mensaje *Path* por la red MPLS es el mismo que deben seguir los paquetes de datos de la comunicación correspondiente.
2. **Mensaje *Resv*:** Estos mensajes llevan las reservas de recursos nodo a nodo a lo largo de las rutas siguiendo el camino inverso a la comunicación.

El establecimiento de reservas de recursos a lo largo de un *Label Switched Path* de una red MPLS es lo que se obtiene con el uso de RSVP sobre MPLS. Para la implementación de este protocolo sobre una red MPLS es necesario el uso de varios de los mensajes *Path* y *Resv*. El proceso de este protocolo es descrito a continuación y en la figura 4.18. se puede ver una representación gráfica del mismo:

1. Entrada en la red MPLS: El paquete de datos llega al primer LER de su ruta y busca si existe alguna reserva realizada para esta comunicación, de no existir procede a realizarla.
2. Envío del mensaje *Path*: Con la información del paquete se rellenan todos los objetos necesarios del mensaje *Path*. Una vez el mensaje está completo se envía siguiendo el enrutamiento MPLS de la misma forma que se haría con un paquete de datos.
3. Viaje del mensaje *Path*: Una vez se ha enviado por el LER que lo ha creado, el mensaje *Path* debe atravesar todos los LSRs necesarios hasta alcanzar el LER que actúa como salida de la red MPLS para esa comunicación. Cada *Label Switching Router* por el que pasa dicho mensaje debe añadir la información necesaria o modificarla y enviar el mensaje al siguiente salto. Esta información será imprescindible para luego realizar la reserva de los recursos.
4. Llegada al último elemento de la red MPLS: Cuando el elemento al que se envía el paquete es un LER eso significa que se ha alcanzado el final de la ruta MPLS. Este elemento procesa el mensaje y crea a partir de él un mensaje *Resv*. Este mensaje contiene la información para realizar el camino inverso y poder hacer las reservas pertinentes.
5. Viaje del mensaje *Resv*: Se recupera la información almacenada durante el viaje del mensaje *Path* y se conoce el siguiente elemento al que debe ir el mensaje. Durante su paso por todos los mensajes hasta llegar al LER que originó el proceso se comprueban todos los enlaces para realizar la reserva de los canales. En caso de que no se pueda llevar a cabo la reserva por falta de recursos, ésta se descarta.
6. Llegada al LER originario: Cuando el paquete alcanza el LER que inició el proceso, se realiza la reserva de los recursos en este último elemento y así finaliza el proceso RSVP. El siguiente paso es habilitar un registro que valide los paquetes para esa comunicación y puedan usar los recursos especificados.
7. Envío de los paquetes de datos: Finalmente, se recuperan los paquetes de datos que hayan ido llegando al LER y se envían usando el enrutamiento MPLS.

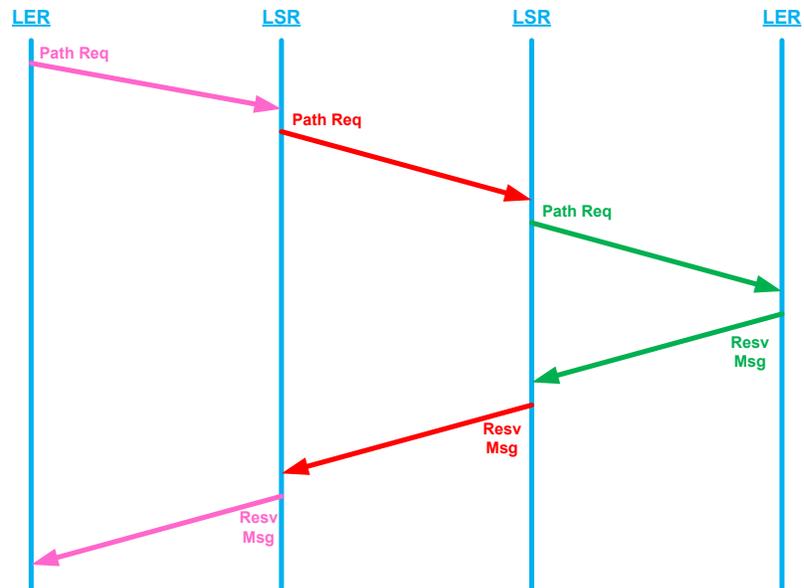


Figura 4. 18. Protocolo RSVP-TE.

4.6. Servicios de Red Privada Virtual (VPN)

Los caminos LSPs transportan los datos en una red MPLS, por lo que MPLS proporciona una base ideal para la construcción de VPNs (*Virtual Private Networks*).

En una red privada virtual (VPN) se comparte infraestructura pero con funcionalidades de red y de seguridad equivalentes a las que se obtiene con una red privada, puesto que se montan sobre una red insegura como lo es Internet pero conservando la privacidad de una red dedicada [26]. El objetivo principal de este servicio es soportar aplicaciones de intranet y/o extranet con integración de aplicaciones multimedia (voz, datos y video).

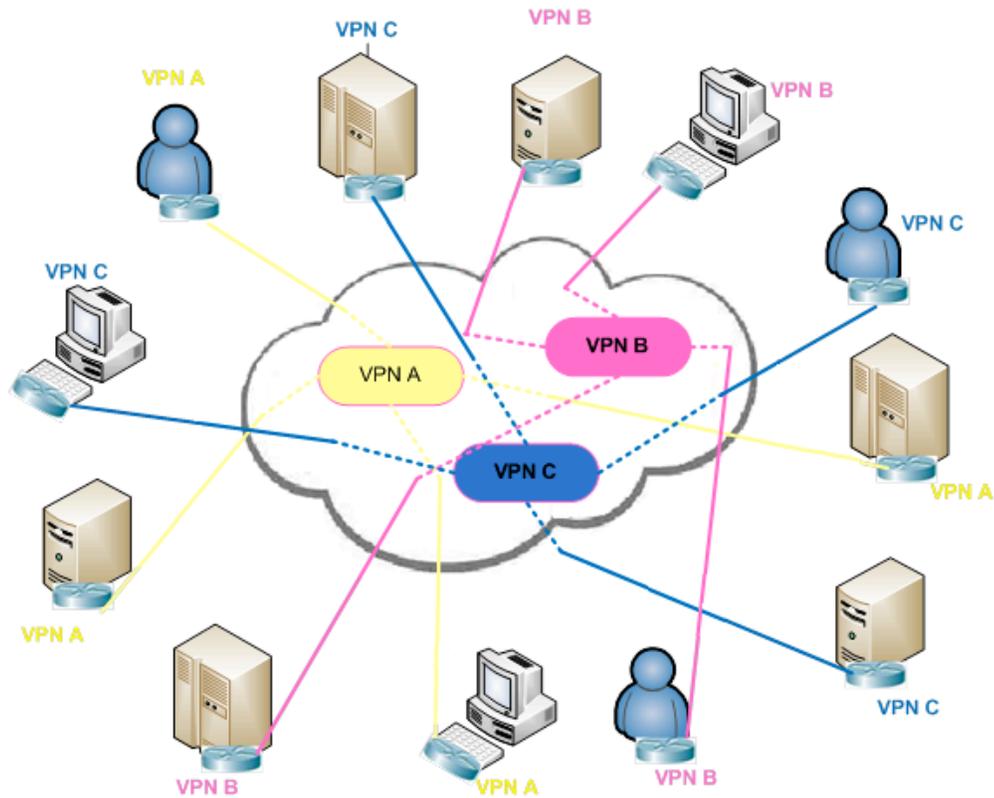


Figura 4. 19. Modelo de VPN.

Como se observa en la figura 4.19., las VPNs en IP/MPLS se crean dentro de la red y no de extremo a extremo como es el caso de los circuitos tradicionales IP, esta es su principal diferencia [26]. Gracias a esto, la red puede obtener algunas ventajas como:

- Modelo inteligente de red puesto que conoce de la existencia de VPNs
- Evita la complejidad de los túneles y circuitos virtuales.
- Permite mantener garantías QoS extremo a extremo, pudiendo separar flujos de tráfico por aplicaciones en diferentes clases.
- Permite aprovechar la ingeniería de tráfico para garantizar los parámetros críticos y la respuesta global de la red.

Existen algunas clasificaciones de las VPNs sin embargo para este estudio se detallara las clasificación de VPNs de acuerdo a la cantidad de trafico del cliente, donde están las VPLS (capa 2) y VPRN (capa 3), a través de las cuales los operadores pueden

atraer y mantener, una mayor cantidad de clientes ofreciendo mayor flexibilidad y calidad al usuario final.

Estos servicios, proveen servicios de conmutación en capa 2, o de conectividad enrutada por IP de capa 3 [26]. Por otra parte, la etiqueta de apilamiento permite configurar varias redes privadas virtuales anidadas en la infraestructura de red.

4.6.1. VPLS (Capa 2)

Virtual Private LAN Service, VPLS es un servicio de capa 2 multipunto que interconecta varios nodos *Ethernet* en un entorno conmutado que está dentro de una red IP/MPLS, con esto se logra unificar aparentemente los sitios de los clientes dentro de una misma LAN, aunque éstos se encuentren en ubicaciones geográficas diferentes [30].

En la figura 4.20. se observa cómo se vería la red IP/MPLS si se utilizaría un servicio de capa 2, para este caso sería una LAN viendo a la gran red como un *switch Ethernet*.

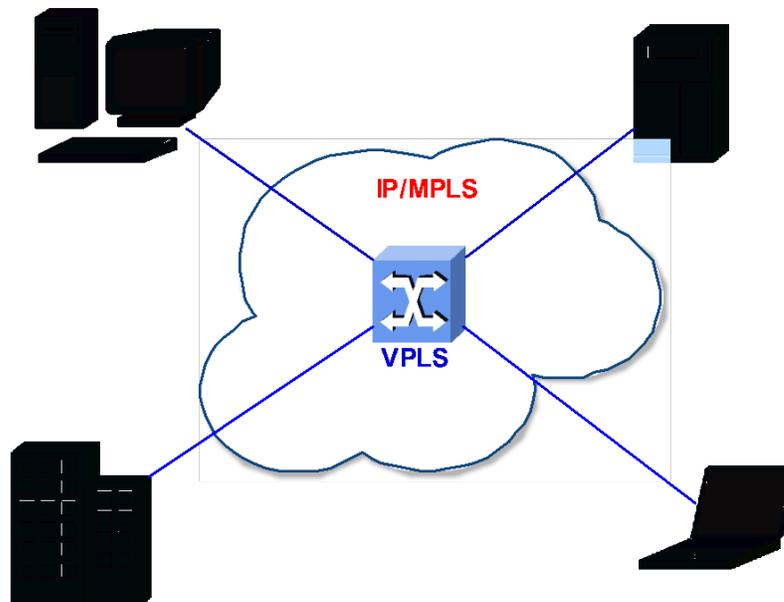


Figura 4. 20. VPLS desde perspectiva del usuario.

En una VPLS se encuentran dispositivos como CE que son dispositivos (router o *switch*) ubicado en las instalaciones del cliente, y los PE que es donde la VPLS se origina y termina [30], además mantienen los dominios de cada VPLS y mapean a éstos en sus correspondientes túneles, como se muestra en la figura 4.21.

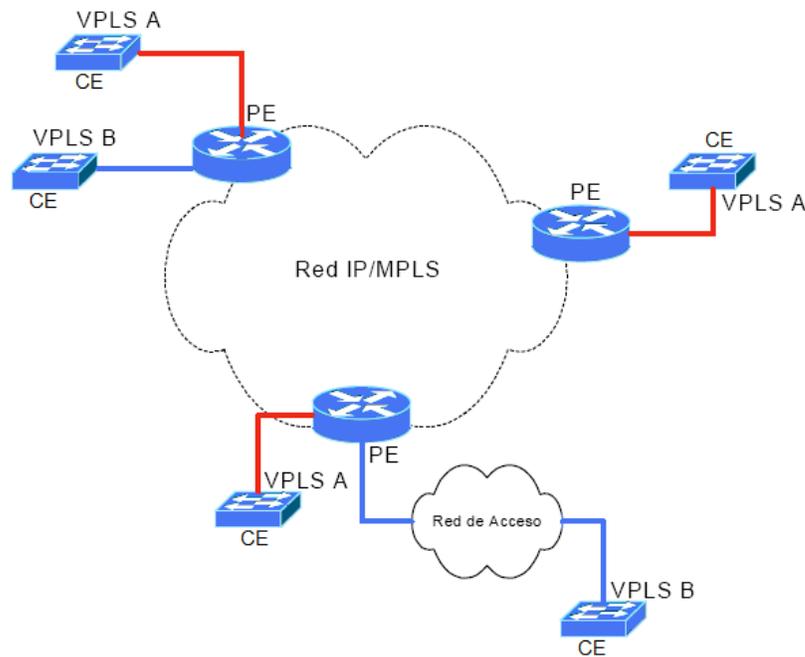


Figura 4. 21. Modelo de una VPLS.

En los túneles de nivel 2 se encapsulan paquetes multiprotocolo (no necesariamente IP), sobre los datagramas IP de la red. De este modo, la red del proveedor no pierde la visibilidad IP, por lo que hay mayores posibilidades de QoS para priorizar el tráfico por tipo de aplicación IP.

Virtual Private LAN Service (VPLS) usa *pseudowires* para establecer un servicio punto a punto LAN a través de una red IP / MPLS [26].

El tráfico en una VPLS se conmuta en base a las direcciones MAC y se reenvía a todos los enrutadores participantes usando túneles LSP; para que una VPLS se dé en una red IP/MPLS, los dispositivos participantes deben soportar todas las características clásicas de Ethernet, como por ejemplo el aprendizaje de direcciones MAC, y recepción y envío de paquetes. Los nodos aprenden la dirección MAC de origen del tráfico de los datos que se

encuentran en sus puertos de acceso y red, con esto cada equipo monta una VPLS en cada momento, a lo se le conoce como un *switch virtual (VS)*.

La operación de VS en un enrutador se la realiza a través de la Base de Datos de Envío (FD, por sus siglas en inglés), misma que consta con todas las direcciones MAC aprendidas.

Por defecto, los paquetes que no poseen un destino conocido, son enviados a lo largo de todos los LSPs de los dispositivos participantes hasta que la dirección de destino sea encontrada dentro de los enrutadores asociados al servicio.

Existen algunos beneficios por manejar VPLS en la red, como los mencionados en el listado siguiente [30]:

- El servicio multipunto es transparente e independiente del protocolo de enrutamiento que se esté utilizando.
- El costo de equipos se reduce significativamente, ya que no son necesarios equipos de complejidad alta.
- El proveedor de servicios no tiene que preocuparse de los problemas de enrutamiento de los clientes.
- Se pueden colocar nuevos sitios en la red de manera rápida y sencilla, puesto que demanda tan solo una mínima re – configuración en los equipos.
- Parámetros de ingreso y egreso pueden ser definidos por separado.

4.6.2. VPRN (Capa 3)

Virtual Private Remote Networking, permite la conexión de múltiples sitios sobre un dominio enrutado en una red IP/MPLS administrada por un proveedor de servicios.

En esta red, los nodos están conectados a una red privada enrutada, por lo que el operador puede realizar una reutilización de la red IP/MPLS para ofrecer nuevos servicios.

Cuando se utiliza el servicio de VPRNs en la red IP/MPLS se puede observar esta gran red en la que se encuentra, desde la perspectiva del usuario, se ve como un router como se muestra en la figura 4.22.

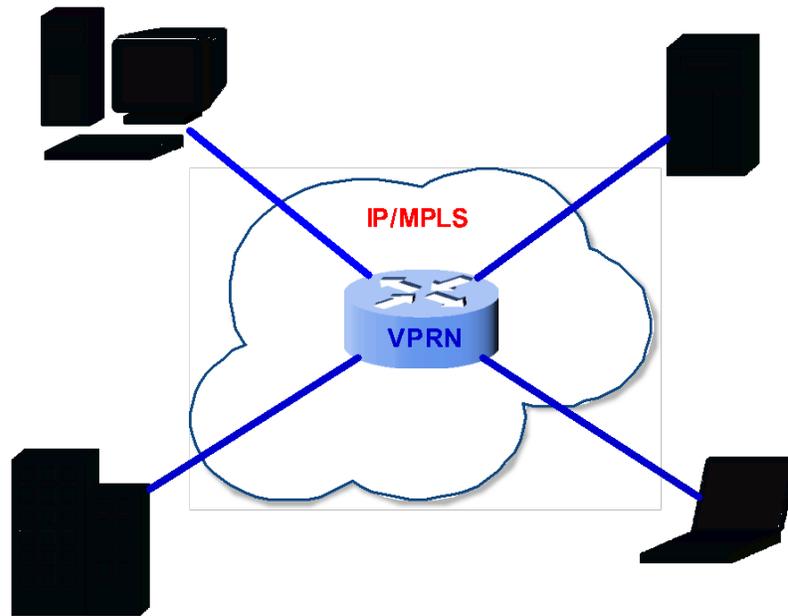


Figura 4. 22. VPRN desde perspectiva del usuario.

Cada VPRN aparece como una instancia de ruteo adicional, las rutas para el servicio entre varios equipos de frontera (PE) son intercambiadas usando BGP [26]. Cada router asociado a la red mantiene una diferente tabla de direcciones para cada VPRN existente. Los paquetes de los clientes son aislados de forma segura, mientras que la red sigue siendo una infraestructura compartida.

Antes que un paquete de datos de un cliente viaje a través del *backbone* de la red, en la VPN del cliente se encapsula con la etiqueta MPLS que le corresponde, para tomar la ruta que mejor se adapte a la dirección de destino del paquete. El paquete MPLS es encapsulado nuevamente con otra etiqueta MPLS, con ésta logra pasar por el túnel a través del *backbone* hasta el PE apropiado [30]. Los equipos que pertenecen al *backbone* no necesitan saber las rutas de la VPN.

Las VPRNs son de gran ayuda cuando los suscriptores desean conectividad de capa tres (Capa de Red), y preferirían implementar su enrutamiento exterior por medio de un

proveedor de servicios, esto asegura que una gran variedad de interfaces de capa dos puedan ser usadas en cualquier lado de una VPN.

Por esto, los sitios parecen estar conectados directamente entre sí, a nivel de IP. Ahora bien, de aquí parten muchas de las ventajas del uso de VPRNs, algunas de ellas son enlistadas a continuación:

- Simplifica el enrutamiento en los sitios del cliente, puesto que el proveedor administra toda la infraestructura de la zona enrutada; inclusive ciertos sitios pueden lograr una conectividad total con tan sólo una ruta por defecto.
- Esta infraestructura presenta redundancia y flexibilidad a la hora de crecer, además de encontrar beneficios en el diseño de la infraestructura del *core*.
- La seguridad ofrecida por una VPRN es muy similar a la seguridad inherente ofrecida por servicios de capa 2 como *Frame Relay* o ATM, y su implementación de circuitos virtuales. En una VPRN, la conexión entre múltiples sitios, puede ser vista como una conexión lógica dedicada entre sitios diferentes del mismo cliente, lo cual en concepto, es muy similar a los circuitos virtuales.
- La privacidad y seguridad son administradas por el aislamiento de cada red y la topología de ruteo que separa las diferentes rutas en tablas lógicas de ruteo. El cliente puede utilizar virtualmente cualquier jerarquía de direccionamiento, independiente de la elección de los proveedores del direccionamiento y de las direcciones de otros clientes del proveedor.
- Cualquier tipo de interconexión física puede ser usada entre equipos del *core* y equipos tipo *edge*, siempre y cuando ambas entre los equipos sean soportadas.

En la tabla 4.5. se observa una comparación entre VPLS (capa 2) y VRNS (capa 3) de acuerdo a algunos parámetros que se consideran importantes al momento de decidir con qué tipo de servicio se implementará la red IP/MPLS.

Tabla 4. 5. Comparación entre VPLS y VPRN.

PARÁMETRO	VPLS	VPRN	CARACTERÍSTICA
Match Tecnológico de acuerdo al tipo de tráfico		Mejor	La forma más natural de agregar y transportar tráfico IP es usando IP.
Transparencia de tráfico	Mejor		Por esta razón se utiliza en la parte de acceso, pues para el usuario es irrelevante la forma en que se transportan sus datos.
Flexibilidad de Implementación		Mejor	Se implementa independiente de la combinación a utilizar y de la configuración de los nodos.
Granularidad en el manejo de QoS		Mejor	Permite distinguir la calidad del tráfico con mayor granularidad ya que permite Ingeniería de Tráfico y se puede tener un mejor manejo de los diferentes servicios.
Seguridad		Mejor	Se puede configurar parámetros para limitar la cantidad de tráfico asegurando la calidad de servicio.
Complejidad	Mejor		Son mucho más sencillas de configurar.
Escalabilidad		Mejor	Permite mayor escalabilidad de la red.
Gestión (Implementación y operación)		Mejor	
Evolución de la red a LTE		Mejor	

4.7. Beneficios de *Multiprotocol Label Switching*

Los beneficios que MPLS proporciona a las redes IP son: realizar ingeniería del tráfico o TE (*Traffic Engineering*), cursar tráfico con diferentes calidades de clases de servicio o CoS (*Class of Service*) o grados de calidad de servicio o QoS (*Quality of Service*), además de transmisión jerárquica, escalabilidad y seguridad.

4.7.1. Ingeniería de Tráfico

Descrita en el RFC 2702, este beneficio de la red IP/MPLS permite mover determinados flujos de tráfico de datos, desde la ruta más corta calculado por los protocolos de enrutamiento, a otros caminos físicos menos congestionados o menos susceptibles a sufrir fallos, es decir, balancea la carga de tráfico entre todos los enlaces, routers y *switches* en la red [29]; de modo que ninguno de estos recursos se encuentre inutilizado o sobrecargado, logrando así adaptar los flujos de tráfico a los recursos físicos de la red a fin de obtener un mejor rendimiento.

La ventaja de la ingeniería de tráfico MPLS es que se puede hacer directamente sobre una red IP, al margen de que haya o no una infraestructura ATM por debajo, todo ello de manera más flexible y con menores costos de planificación y gestión para el administrador, y con mayor calidad de servicio para los clientes.

4.7.2. Calidad de Servicio

Para satisfacer las necesidades de ancho de banda y de tolerancia a retrasos en la transmisión de los datos que los usuarios de Internet demandan continuamente necesitan adoptar no sólo técnicas de ingeniería de tráfico, sino también de clasificación del tráfico generado de acuerdo a calidad de servicio definido por clases de servicio.

MPLS está diseñado para poder cursar servicios diferenciados, según el Modelo *DiffServ* del IETF, es decir, que el usuario determina el nivel de prioridad; los routers van agregando las demandas de los usuarios y propagándolas por el trayecto; en el campo EXP de la etiqueta MPLS se puede colocar la clase de servicio CoS.

Para administrar la calidad de servicio (QoS), la tecnología IP/MPLS define 5 clases de servicios que son [29]:

- **Video:** Está clase de servicio tiene el nivel de prioridad más alto de las clases de servicio para datos.
- **Voz:** Tiene un nivel de prioridad equivalente al de video.
- **Datos de alta prioridad (D1):** Se utiliza para aplicaciones que son críticas en cuanto a necesidad de rendimiento, disponibilidad y ancho de banda.
- **Datos de prioridad (D2):** Corresponde a aplicaciones que no son críticas y que tienen requisitos particulares en cuanto a ancho de banda.
- **Datos no prioritarios (D3):** Constituye la clase de servicio de prioridad más baja.

Se ha definido un estándar en el 802.1Q que permite diferenciar tramas pertenecientes a diferentes VLANs cuando se mezclan en la red troncal además de definir el nivel de prioridad a cada trama. En la tabla 4.6. se observa los valores de DSCP (*Differentiated Services CodePoint*) que se pueden asignar para establecer colas de prioridad.

Tabla 4. 6. Tabla de valores de DSCP.

Valor de DSCP	Valores de la Cola de Envío
0-15	q1 (prioridad más baja)
16-31	q2
32-47	q3
48-63	q4 (prioridad más alta)

En la tabla 4.7. se especifican los valores de las etiquetas de prioridad de CoS.

Tabla 4. 7. Tabla de servicios correspondiente de CoS.

Valor	Servicio Correspondiente de CoS
7	Control de red
6	Control de red
5	Reenvío acelerado
4	Reenvío asegurado Clase 4
3	Reenvío asegurado Clase 3
2	Reenvío asegurado Clase 2
1	Reenvío asegurado Clase 1
0	Best Effort (por defecto)

4.7.3. Transmisión jerárquica

El cambio más importante producido por MPLS se da en el reenvío de los datos. Esta modificación en la transmisión tiene un impacto significativo en su capacidad para proporcionar transmisión jerárquica.

El reenvío jerárquico no es nuevo en la tecnología IP/MPLS, puesto que ATM ofrece ya niveles de jerarquía de reenvío a través de rutas virtuales y circuitos virtuales, sin embargo, MPLS permite a los proveedores de servicios proporcionar un control múltiple para el envío de los paquetes.

4.7.4. Escalabilidad de la red

IP/MPLS permite la implementación de múltiples VPNs usando el mismo *core* de red, donde la base de datos de ruteo (RIB, *Routing Information Base*) de la VPN es independiente de la tabla RIB del *core*, haciendo de MPLS más escalable.

La arquitectura e inteligencia de la red está implementada básicamente en los PE routers los mismos que mantienen una RIB por cada VPN permitiendo la implementación de VPNs que soportan *overlapping* (mismo espacio de direcciones) en el mismo core.

La topología de esta tecnología puede adaptarse acorde a cada necesidad, dada su naturaleza que brinda conexiones "*Any-to-Any*" entre los distintos puntos, pero asegurando la mejor ruta entre cada punto, y una actualización en la topología implica tan solo una reconfiguración de los puntos involucrados.

4.7.5. Seguridad

A través de la configuración de las tablas virtuales en el PE es posible el aislamiento del tráfico entre VPNs ya que el PE es el único en tener conocimiento acerca de cada VPN que está configurada en el *backbone*. Adicionalmente la utilización de etiquetas para distinguir los paquetes IP asegura que los paquetes serán entregados a la VPN correcta.

Después de haber estudiado minuciosamente las características y aplicaciones de la tecnología IP/MPLS se pueden resumir sus beneficios en:

- Reducción de costos de implementación puesto que se utiliza IPs existentes y tecnologías *Ethernet*.
- Mejores capacidades de enrutamiento, gracias a la ayuda de la conmutación de etiquetas y de usar criterios como ingeniería de tráfico y clases de servicio.
- Flexibilidad para evolucionar la funcionalidad de control sin cambiar el mecanismo de transmisión.
- Los servicios ofrecidos por esa tecnología pueden brindarse sobre, prácticamente, cualquier tecnología de la capa de enlace de datos y soporta el flujo IP *unicast* y *multicast*.
- MPLS minimiza la búsqueda IP, envío, y proceso de clasificación sobre redes tradicionales IP, ya que estos procesos son realizados sólo en el ingreso y egreso de la red MPLS.

CAPÍTULO V

5. DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA REDES DE CUARTA GENERACIÓN

5.1. Situación actual de las redes de transporte tradicionales

Las redes de transporte tienen como objetivo principal concentrar el tráfico de información procedente de las redes de acceso para llevarlo a los elementos que permiten la interconexión de red; tradicionalmente sus características y arquitectura dependen del tipo de información que se desea trasladar y de las particularidades de las redes de acceso. Sin embargo con la llegada de la paquetización inició un proceso de convergencia en las redes de transporte para que sean capaces de transportar cualquier tipo de información.

La tendencia actual de integrar todo tipo de servicios en una única infraestructura de red IP, conocida como modelo Todo IP o *All-IP* en inglés, ha puesto de manifiesto las debilidades que tienen las redes de transportes *legacy* en cuanto a capacidad, flexibilidad, calidad de servicio, seguridad y fiabilidad. Para solucionar estos problemas han aparecido en el mercado gran variedad de equipos, técnicas, tecnologías y protocolos, que combinados adecuadamente crean modelos híbridos de red que proporcionan a los clientes nuevos servicios [31]. Estos modelos son llamados Redes de Nueva Generación o *Next Generation Network* (NGN) donde recaen las redes de cuarta generación (4G).

A fin de obtener servicios con garantía de anchos de banda y QoS se necesita migrar las antiguas redes de *backhaul* a redes modernas con capacidad de ofrecer una diversidad de soluciones orientadas a satisfacer las nuevas y crecientes demandas de los usuarios.

Las tecnologías HSPA+, WiMAX y LTE requieren una conectividad diferente a la que pueden proveer las redes de transporte tradicionales que sirven hasta ahora a GSM, CDMA y UMTS. Esto impulsa la necesidad de cambiar las tecnologías de interfaz y transporte basado en multiplexado por división de tiempo (TDM) y modo de transferencia asincrónica (ATM) por una tecnología IP/*Ethernet* basada en paquetes [32].

Se debe tener en cuenta que el uso de servicios de transporte tradicionales somete al cliente a incurrir en costo adicional debido a los protocolos de transporte que se introducen. En la figura 5.1. se muestra una evolución a la era de datos:

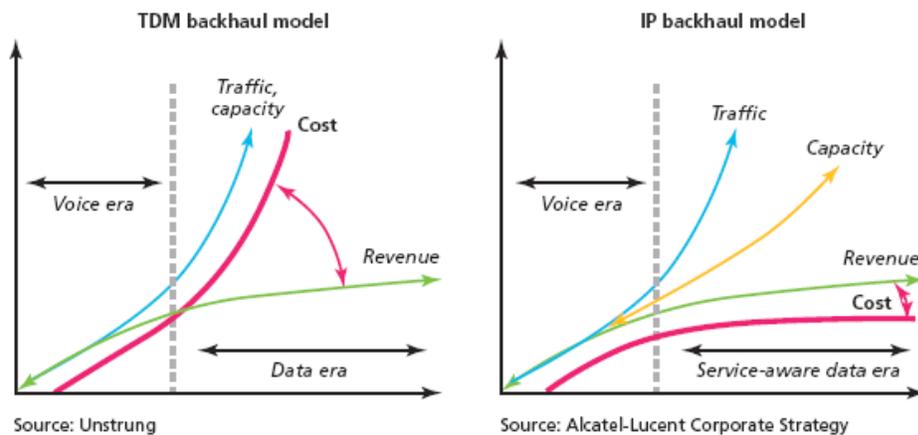


Figura 5. 1. Evolución de la Era de Datos.

En la figura anterior se puede notar que es fundamental, la consideración de costo/Mbps que puede involucrar realizar el cambio de una red de transporte tradicional a una red de transporte de nueva generación (IP RAN), pues como se observa que el margen de beneficio por Mbps se ha reducido considerablemente con la introducción de las nuevas tecnologías.

Las líneas de transmisión utilizadas con frecuencia en el *backhaul legacy* son enlaces E1/T1 punto a punto, que interconectan los elementos de red a través del uso de diversos tipos de topologías, utilizando radioenlaces, cable o fibra óptica.

Para adaptarse a las características del tráfico transportado hoy en día, las redes de transporte han evolucionado. El desafío del *backhaul* en la telefonía móvil es poder

incorporar nuevas soluciones a la red de transporte como tecnologías basadas en paquetes, para así optimizar los recursos disponibles. Cualquier solución basada en paquetes debe cumplir o superar los puntos de referencia entregados por las redes tradicionales.

En 2G, se utiliza tecnologías como PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) y SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) pues el tráfico en su totalidad era el producido por la voz únicamente y para su transporte era suficiente con un pequeño número de enlaces E1/T1, dado que cada canal de voz consumía tan sólo 8 kbps.

En la actualidad, los fabricantes utilizan frecuentemente la tecnología ATM, y su adopción se debe a que permite proporcionar una QoS configurable y coherente. Sin embargo, el crecimiento en el tráfico está forzando a los operadores a buscar soluciones alternativas para el *backhaul* que sean escalables, económicas y no comprometan la QoS.

A medida de que la estación base requiere de mayor capacidad se debe incrementar el número de enlaces E1 (2048 Kbps), en la actualidad existen redes que utilizan enlaces TDM *legacy* de hasta 16 E1s, que no serían suficiente para transportar las velocidades q generadas en LTE.

En 3G, ya se nota un incremento del tráfico de datos con lo que se necesita una tecnología que pueda proveer mayor ancho de banda con calidad de servicio, y económicamente no se hace viable el uso de los tradicionales enlaces E1/T1, pues un usuario de redes de 3G puede consumir varios Mbps, por tal motivo las redes de transporte *legacy* están llegando al final y tendrá que ser reemplazadas es por eso que aquí, aparecen ya las soluciones basadas en MPLS [31].

Cabe recalcar que aunque en redes de cuarta generación se tiene características muy similares a las de 3G, el tráfico de datos se incrementa aún mucho más, por lo cual las soluciones tecnológicas de las redes de transporte de 3G también puede ser adecuado pero con finalidad de que luego de transcurrida la migración se tenga implementa una solución netamente IP.

Con IP/MPLS a través de *Ethernet* como mecanismo de transporte principal se ofrece la misma calidad que en la actual red de transporte, pero a un costo reducido. Este cambio gradual a un **transporte IP** simplificará el diseño de la red, reducirá los gastos de infraestructura y permitirá gestionar todas las tecnologías de acceso sobre una misma red troncal, puesto que del costo total de servicio para los operadores móviles, el *backhaul* con

frecuencia es el más costoso y el reto será superior cuando los operadores deban brindar una capacidad mayor a precios muy similares a los actuales. El operador tendrá entonces que ser muy sensible para minimizar no sólo el costo de capital (CAPEX) sino también los costos totales del ciclo de vida de la red *backhaul*.

5.2. Microondas para Redes de Transporte de Nueva Generación

A lo largo del documento se ha visto que la popularidad del tráfico de datos en redes de telefonía celular ha culminado con la mayor demanda de servicios IP y de banda ancha. Sin embargo, esto provoca cuellos de botella en los sistemas de microondas convencionales.

La migración de las microondas a tecnologías de conmutación de paquetes es una forma en que los operadores móviles pueden incrementar la flexibilidad de la red y reducir los costos operativos.

Las Microondas IP incorpora modulación adaptativa (AM) para asignar directamente las señales de paquetes en una interfaz de aire. Esta modulación mejora notablemente la eficiencia y la capacidad de transmisión de paquetes de datos al ofrecer gran ancho de banda y adaptarse dinámicamente el entorno de microondas de paquetes para diferentes condiciones climáticas, como lluvia y niebla [33].

Los sistemas de microondas deben transmitir servicios IP y grandes volúmenes de servicios a las redes de transporte, pero requieren tecnologías de última generación. El sistema de microondas IP cambia automáticamente el modo de modulación por ejemplo de 256 QAM a 16 QAM, cuando las condiciones climáticas son desfavorables, como se observa en la figura 5.2., a fin de garantizar una comunicación libre de errores, mientras que cuando las condiciones climáticas son favorables el sistema se reanuda automáticamente a su tasa de bits original.

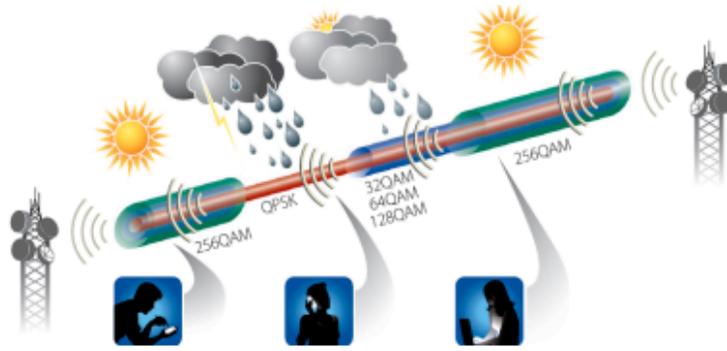


Figura 5. 2. Modulación adaptativa de Microondas IP.

Por lo tanto, la tecnología AM implementada ajusta el ancho de banda a través de la interfaz de aire de microondas para ayudar a los operadores a reducir los costos del espectro de frecuencias y reducir el peso de la antena [33].

Las microondas hoy en día se presentan compatibles con los tres tipos de modos de interfaz de aire: TDM, híbridos (TDM + IP), e IP.

Los equipos de microondas IP representan entonces la mejor opción para la transmisión a una red de servicios *All-IP*, es por eso que a continuación se detallan algunos equipos que se encuentran en el mercado.

5.2.1. RTN 605

El OptiX RTN 605 conocido también como RTN 605, equipo fabricado por Huawei que se utiliza al final del acceso a la cola, soporta AM y transmite los servicios E1 y *Ethernet* [34]. Con un diseño compacto y de alta integración, es fácil de instalar, poner, y solucionar problemas, el mantenimiento de rutina no es necesario. Además, las interfaces de aire de los RTN 605 pueden interconectarse con las de los RTN 620.

En la figura 5.3 se muestra el equipo RTN 605.



Figura 5. 3. Equipo RTN 605

Características Generales:

- Existen varios modelos, con diseño compacto y peso ligero.
- Soporta una gran variedad de servicios de *Ethernet*, tales como EPLAN y EVPLAN.
- Soporta cuatro clases de QoS, clasificación de tráfico por VLAN ID, IEEE 802.1p y DSCP, además de políticas de programación de colas, como SP + WRR.
- Poder de transmisión automático de control (ATPC) para ajustar automáticamente la potencia de salida del transmisor de acuerdo con el nivel de señal recibida (RSL), minimizando así la interferencia con los sistemas vecinos, y la tasa de error residual.
- RTN 605 puede ser instalado en un armario, en un escritorio, o en una pared, puede también compartir un gabinete con equipo de telefonía móvil de la estación base.
- Mantenimiento sencillo.
- Utiliza la disipación del calor natural para ahorrar energía y generar menos ruido.
- Utiliza el NMS para cargar los programas de software y datos de forma remota.
- Se puede monitorear indicadores clave de rendimiento, tales como la potencia de transmisión y el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI).

Mayores detalles y características del equipo se pueden encontrar en el Anexo 1.

5.2.2. RTN 620

Equipo de radio integrado (TDM/híbrido) fabricado por Huawei, apoya la agregación, la conexión cruzada, así como la transmisión de servicios E1 y Ethernet nativo [34]. También es compatible con AM para asegurar la calidad de servicio de alta prioridad, sin comprometer la capacidad de los servicios *Ethernet*, optimiza el rendimiento de la red y mejora la utilización del espectro. Además, el RTN 620 puede interconectarse con otros equipos de transmisión óptica de alta velocidad a través de puertos ópticos, el modelo de este equipo se puede observar en la figura 5.4.



Figura 5. 4. Equipo RTN 620.

Características Generales:

- Fácil de instalar con diseño compacto y peso ligero.
- Dispone ancho de banda de canal de 7 MHz a 56 MHz en las interfaces de aire y soporta los modos de modulación desde QPSK a 256 QAM.

- Soporta configuraciones flexibles de ancho de banda (2xE1 a 75xE1) en las interfaces de aire para servicios de TDM.
- Soporta configuración flexible (10 Mbps hasta 400 Mbps) para los servicios nativos de *Ethernet*.
- Cuando la calidad del enlace de radio a través de la interfaz de aire es buena utiliza un modo de modulación de orden superior para lograr la transmisión de banda ancha, reduciendo los gastos de capital.
- Cuando la calidad del enlace radio a través de la interfaz de aire es mala cambia a un tipo de modulación que mejora la capacidad anti-interferencia del enlace de radio, lo que garantiza la calidad de transmisión.
- Es flexible para admitir topologías de red (PDH / SDH).
- Apoya plenamente las conexiones cruzadas en todas direcciones.
- Soporte y ajuste rápido de suministro de servicios.
- Soporta una gran variedad de servicios de *Ethernet*, tales como el EPL, EVPL, EPLAN, y EVPLAN.
- Soporta ocho clases de QoS, clasificación de tráfico basado en VLAN ID, IEEE 802.1p, o DSCP y políticas de programación de colas, como SP + WRR.
- Admite capacidades avanzadas de protección.
- Poder de transmisión automático de control (ATPC) para ajustar automáticamente la potencia de salida del transmisor de acuerdo con el nivel de señal recibida (RSL), minimizando así la interferencia con los sistemas vecinos, y la tasa de error residual.
- RTN 620 se puede configurar como equipo de transmisión de microondas o equipo de transmisión óptica, o un híbrido.

En el Anexo 2 se encontrara la descripción detallada del equipo.

5.2.3. RTN 910

OptiX RTN 910 mostrado en la figura 5.5., es la nueva generación de equipos integrados de transmisión de radio desarrollada por Huawei (TDM/Híbrido/Paquetes). El equipo cuenta con tres ranuras para tarjetas enchufables y admite un máximo de dos direcciones de RF [34]. Además, el equipo es de fácil instalación y configuración flexible al ofrecer varios tipos de interfaces de servicio. Proporciona una solución de transmisión que combina la transmisión de la microonda de radio tradicional, híbrida, y la transmisión pura por paquetes. RTN 910 es aplicable en redes de transporte 3G y LTE.



Figura 5. 5. Equipo RTN 910.

Características Generales:

- Soporta AM integrada con calidad de servicio, maximizando la utilización del espectro y la prestación del servicio de la mejor calidad.
- Mejores soluciones de sincronización de reloj.
- Soporte de servicios TDM y *Ethernet* nativo.
- Compatible con el plano de control MPLS, facilitando redes con las direcciones de RF múltiples.
- Compatible con multiplexación estadística para mejorar la utilización de ancho de banda.
- Compatible con redes MPLS mediante el uso de la tecnología de túnel LSP y la tecnología PWE3.

- Soporta ocho clases de QoS para proporcionar una amplia gama de servicios y garantizar la calidad de la transmisión de servicios de alta prioridad.
- Capacidades avanzadas de protección para los enlaces de radio, a nivel de red y de equipos.
- Compatible con una tarjeta CF de conexión en caliente, que almacena archivos de datos de configuración y programas de software. La tarjeta CF se pueden utilizar para la carga de datos o actualizaciones de software.
- Soporta actualizaciones de software sin interrumpir los servicios en curso.
- Abundantes métodos de gestión de red.

Características más específicas sobre el equipo se podrá observar en el Anexo 3.

5.2.4. RTN 950

El OptiX RTN 950 al igual que el RTN 910 es de la nueva generación de equipos integrados de transmisión de radio desarrollada por Huawei (TDM/Híbrido/Paquetes), su representación se observa en la figura 5.6. El equipo dispone de ocho ranuras para tarjetas enchufables y soporta hasta seis direcciones de RF. Además, el equipo es de fácil instalación y una configuración flexible, proporcionando una variedad de interfaces de servicio. Proporciona una solución de transmisión que combina la transmisión de radio tradicional y la transmisión de radio por paquetes pura, es aplicable no solo en redes de transporte de 3G y LTE, sino también para el acceso de radio de los servicios de redes privadas [34].



Figura 5. 6. Equipo RTN 950.

Características Generales:

- Soporta AM integrada con calidad de servicio, maximizando la utilización del espectro y la prestación del servicio de la mejor calidad.
- Mejores soluciones de sincronización de reloj.
- Soporte de servicios TDM y *Ethernet* nativo.
- Compatible con el plano de control MPLS, facilitando redes con direcciones de RF múltiples.
- Compatible con multiplexación estadística para mejorar la utilización de ancho de banda.
- Dispone de 10 Gbps de capacidad de conmutación, soporta control de flujo y VLANs.
- Soporta LSP estática, servicio de redireccionamiento, y las funciones básicas de MPLS.
- Compatible con redes MPLS mediante el uso de la tecnología de túnel LSP y la tecnología PWE3.
- Soporta ocho clases de QoS para proporcionar una amplia gama de servicios y garantizar la calidad de la transmisión de servicios de alta prioridad.
- Capacidades avanzadas de protección de los enlaces de radio, a nivel de red y de equipos.
- Compatible con una tarjeta CF de conexión en caliente, que almacena archivos de datos de configuración y programas de software. La tarjeta CF se pueden utilizar para la carga de datos o actualizaciones de software.
- Soporta actualizaciones de software sin interrumpir los servicios en curso.
- Abundantes métodos de gestión de red

En el Anexo 4, se podrá observar las características del equipo detalladamente.

5.2.5. MPR 9500

El *microwave packet radio* 9500 mostrado en la figura 5.7., pertenece a Alcatel-Lucent y permite la transformación fluida de las redes de retorno de TDM a IP, proporcionando un eficiente transporte de tráfico multimedia, sin dejar de apoyar el legado TDM [35]. Mejora la agregación de paquetes, incrementa el ancho de banda, optimiza la conectividad Ethernet y ofrece la calidad de servicio necesaria para satisfacer a los usuarios finales. Los paquetes se manejan de forma nativa y la transmisión se adapta a las condiciones de propagación y de calidad exigidos por los diferentes tipos de servicios.



Figura 5. 7. Equipo MPR 9500.

Características Generales:

- Gestiona el tráfico IP - en su forma nativa.
- Es compatible con la tecnología PDH y SDH ya existentes.

- Ayuda a optimizar el RAN con agregación de paquetes a través de protocolos estándar - sin necesidad de utilizar cajas externas.
- Agregación multiservicio totalmente escalable.
- Permite a los operadores a adoptar backhaul IP sin abandonar los ya existentes servicios TDM.
- Encapsula todo el tráfico en forma de paquetes, pone en la cola y da prioridad a paquetes por tipo de servicio, la criticidad y calidad de servicio (QoS) antes de transportar los paquetes.
- Servicios con AM así se adapta a las condiciones cambiantes del enlace buscando brindar la mejor disponibilidad.

En el Anexo 5, se detallan características del equipo con mayor minuciosidad.

5.3. Equipos multiservicios para Redes de Transporte de Nueva Generación

Hoy en día, en el mercado existen gran variedad de equipos que aumentan la capacidad de las redes de transporte, para dar servicios a redes 2G y 3G. Gracias a las nuevas soluciones de hardware para redes, las operadoras podrán proporcionar a sus usuarios los nuevos servicios antes mencionados en cuanto a vídeo, voz y datos, y al mismo tiempo enfrentar a la creciente demanda de servicios de banda ancha móvil.

En este contexto, los fabricantes de equipos están proponiendo distintas soluciones encaminadas a incrementar la eficiencia de la red de transporte. Los fabricantes ofrecen equipos capaces de agregar y optimizar el tráfico. A su vez *Ethernet* permite que el *backhaul* sea independiente del tipo de tráfico, permitiendo una rápida expansión de la red y respondiendo rápidamente a las demandas de crecimiento con opciones de backhaul IP de banda ancha de bajo costo.

A modo de ejemplo se detallan algunas soluciones desarrolladas por los fabricantes, que incorporan tecnologías emergentes para redes de transporte de nueva generación. A continuación se resume brevemente las principales opciones.

5.3.1. Router SR 7750

El router SR 7750 (siglas en inglés de router de servicio), es desarrollado por Alcatel-Lucent a fin de optimizar la entrega de alto rendimiento en el transporte de datos, voz y servicios de video. SR 7750 es un router multiservicio de borde superior con características específicas de sistema, enrutamiento y capacidades de servicio que han hecho de estos equipos [35].

Alcatel-Lucent SR 7750 integra la escalabilidad, la flexibilidad y la previsibilidad de MPLS, junto con el ancho de banda y la economía de *Ethernet* y una amplia selección de interfaces por esta razón está disponible en tres tamaños de chasis - 1 ranura, ranuras 7 y 12 *slots*, como se puede ver en la figura 5.8., para que una infraestructura de red convergente para la prestación de servicios de próxima generación.



Figura 5. 8. Router SR 7750 con diferentes *slots*.

Características Generales:

En el Anexo 6 se detallan con mayores especificaciones las características físicas y técnicas del equipo, sin embargo en la siguiente lista se hace un recuento general de las mismas:

- Plataforma de entrega de servicio flexible

- Software de alta disponibilidad y una arquitectura de hardware que permite brindar la capacidad exacta a los servicios.
- Capacidad para el procesamiento de paquetes completamente programables y colas por servicio jerárquicos.
- SR 12 soporta redundancia de energía como de controladoras, posee además bandejas de ventilación que aseguran su temperatura en los márgenes permitidos.
- Migración rentable de una red basada en T1/E1, a una red más económica y flexible como la IP/MPLS.
- Resistencia y redundancia, entre ellas: redundancia en caso de falla, redundancia de sincronización, y redundancia en las fuentes de poder.
- Permite a los operadores, operaciones consistentes, confiables y gestión a la hora de desplegar *Ethernet* (VLL, VPLS), IP / MPLS (IP VPN), el legado de (ATM, TDM, POS), y/o servicios móviles.
- Aplicación jerárquica altamente flexible de QoS con soporte de hardware para la configuración de múltiples niveles y jerarquías ya proporciona las herramientas para definir y aplicar las más estrictas SLA (acuerdo de nivel de servicio) para servicios diferenciados.
- Admite la funcionalidad IP para proporcionar servicios IP/MPLS VPN a través de la configuración de OSPF, ISIS, BGP4, MP-BGP, enrutamiento estático y reenvío IP, además incluyendo funciones para MPLS LDP y la señalización RSVP-TE y RIP como PE-CE protocolos de enrutamiento

5.3.2. Router SAR 7705

Router SAR 7705 que se observa en la figura 5.9., pertenece a la familia de los routers de agregación de servicio (SAR, por sus siglas en inglés) es un producto Alcatel – Lucent que constituye una plataforma para la concentración de tráfico que brinda

capacidades superiores en *pseudos* circuitos y redes IP/MPLS [35]. El SAR 7705 permite la creación de una soluciones extremo a extremo para soportar y capitalizar el crecimiento del mercado móvil. SAR 7705 es ideal para la agregación, red de retorno y envío de tráfico móvil de 2G, 3G y LTE.



Alcatel-Lucent 7705 SAR-8



Alcatel-Lucent 7705 SAR-F

Figura 5. 9. Router SAR 7705 con diferentes slots.

Características Generales:

En el Anexo 7 se detallan las especificaciones físicas y técnicas del equipo, y a continuación se muestra de forma resumida las mismas:

- Plataforma con capacidades de convergencia de redes de acceso móvil.
- Procesamiento de servicios nativos de tráfico de 2G, 3G y 4G (LTE).
- Gestiona múltiples protocolos de transporte.
- Ofrece una mezcla flexible de módulos y tarjetas (Interfaces Multi – puertos T1/E1, 10/100 *Ethernet* y *Gigabit Ethernet*), mismas que convergen con ATM, TDM y Ethernet sobre la nueva era de MPLS.
- Conectividad a través de *Fast Ethernet*, *Giga Ethernet* y n x T1/E1.
- Migración rentable del *backhaul* basado en E1/T1 hacia una plataforma IP/MPLS.
- Redundancia de sincronización, poder de recuperación y redundancia de red así como en la alimentación del equipo.

- Amplía el servicio de enrutamiento IP / MPLS con capacidades dinámicas en el sitio remoto, *hubs* y bordes de la red en factores de forma compacta, con bajo consumo de energía.
- Transición de conectividad PDH hacia *Ethernet* y/o la creación de redes basadas en IP.
- Sincronización precisa permite una implementación rentable de paquetes, (menor pérdida de datos y un mínimo de llamadas perdidas en aplicaciones móviles).

5.4. Etapas de migración de una red de transporte *legacy* a una red IP RAN

En este apartado, se analizará detenidamente las etapas de migración de la red IP RAN, en la figura 5.10. se observa un diagrama de bloque de las mismas.

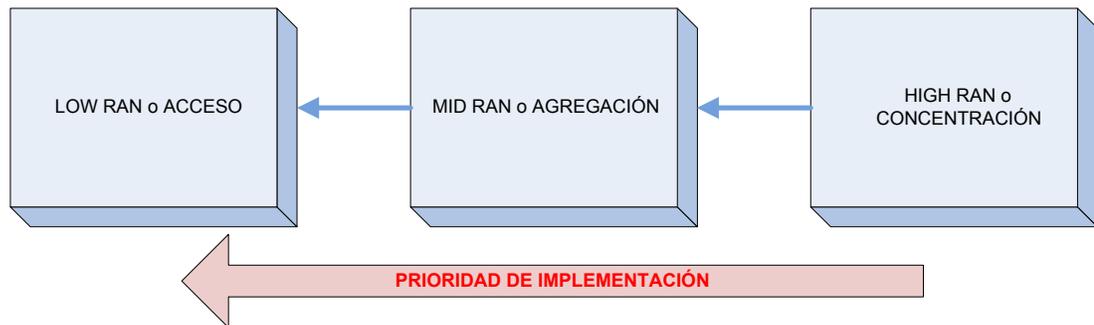


Figura 5. 10. Etapas de migración a una red IP RAN.

5.4.1. *Low* RAN o Acceso

En esta etapa se provee la última milla de conectividad entre las radio bases y la red de *backhaul*. Se puede utilizar múltiples tecnologías de enlaces físicos (microondas, cobre o fibra óptica). La disponibilidad de alguno de estos medios de acceso en la L-RAN con

frecuencia influye significativamente en la escogencia de la tecnología para la red de transporte.

La etapa de acceso transporta el tráfico desde la celda hasta el primer nodo de agregación de la red MPLS. Puede ser una combinación de radios *Full IP* o híbridos dependiendo del tráfico que estén transportando.

En el caso de radios Ethernet y/o híbridos es posible que aparte de las funciones propias de transporte, los radios también hagan *Ethernet Switching*.

5.4.2. Mid RAN o Agregación

La función principal de la MRAN es la de agregar todo tipo de tráfico y convergerlo sobre un mismo transporte que puede ser cualquier de diferentes medios: fibra óptica, cobre o microonda, no obstante hoy en día se prefiere implementar esta etapa a través de fibra óptica.

También se incluyen en esta etapa mecanismos para manejar la calidad de servicio y realizar protección de tráfico de tal forma que se tenga una red con bastante confiabilidad.

Además en MRAN se debe adaptar los diferentes tipos de servicios para que puedan ser transportados en forma y transparente sobre la red MPLS, es decir que el tráfico de los diferentes servicios no se mezcle entre sí a pesar de que todos están compartiendo en forma dinámica un mismo transporte y ancho de banda, aquí es donde se utiliza VPNs para los servicios que se implementan sobre MPLS.

Como se ha estudiado en el capítulo anterior, las VPNs pueden ser punto a punto (PWEs) o multipunto de capa 2 (VPLS) o capa 3 (VPRNs o IP VPNs).

5.4.3. High RAN o Concentración

La etapa *High RAN*, también conocida como concentración es la encargada de recoger, agregar y concentrar desde la *Mid RAN* hacia el *core* de la red.

La etapa de concentración es la que mayor prioridad tiene al momento de implementar una red IP RAN.

Además en *High RAN* se produce una clasificación del tráfico que llega hacia el *core*, es decir, a través del router de concentración se dirige el tráfico hacia la central de voz, el Internet, servidores, etc.

5.5. Diseño descriptivo de una Red de Transporte IP RAN

Como ya se ha visto a lo largo del documento, se necesita un gran ancho de banda para la demanda de los servicios de nueva generación, por esto la evolución del *backhaul* de la RAN hacia una red de paquetes es realmente importante. Sin embargo no se debe olvidar que la voz también tendrá que trasladarse en la misma red.

Después de que se ha estudiado las tecnologías, elementos, protocolos y demás detalles que intervienen en la red de transporte IP RAN que permitirá el transporte de voz y datos se presenta un diseño descriptivo de la misma.

De manera general, para la implementación de una red IP RAN se necesitará realizar algunos trabajos en la red existente como:

- Dimensionamiento e implementación de trabajos en cambios de radios de microondas a radios híbridos, es conveniente realizar esta implementación de acuerdo a prioridades.
- Dimensionamiento e implementación de equipos multiservicio necesarios para dar servicio a través de una conmutación basada en paquetes.
- Creación de red IP/MPLS en la sección de agregación con equipos multiservicio y medios propios.
- Cambio de configuración en Nodos B y demás radiobases existentes hacia un escenario *Full IP*.
- Migrar y liberar los servicios de 3G con E1's hacia las interfaces *Ethernet*.

El diseño presentado tiene 2 partes: la descripción de la parte física y la descripción de la parte lógica para la implementación de la red.

5.5.1. Diseño Físico

En la figura 5.11. se muestra un bosquejo de cómo debería implementarse la red físicamente, mostrando algunas opciones que se puede utilizar en la etapa de Acceso o *Low RAN*, así como también se detalla características de las etapas restantes en lo que se refiere a medios de transmisión a utilizarse.

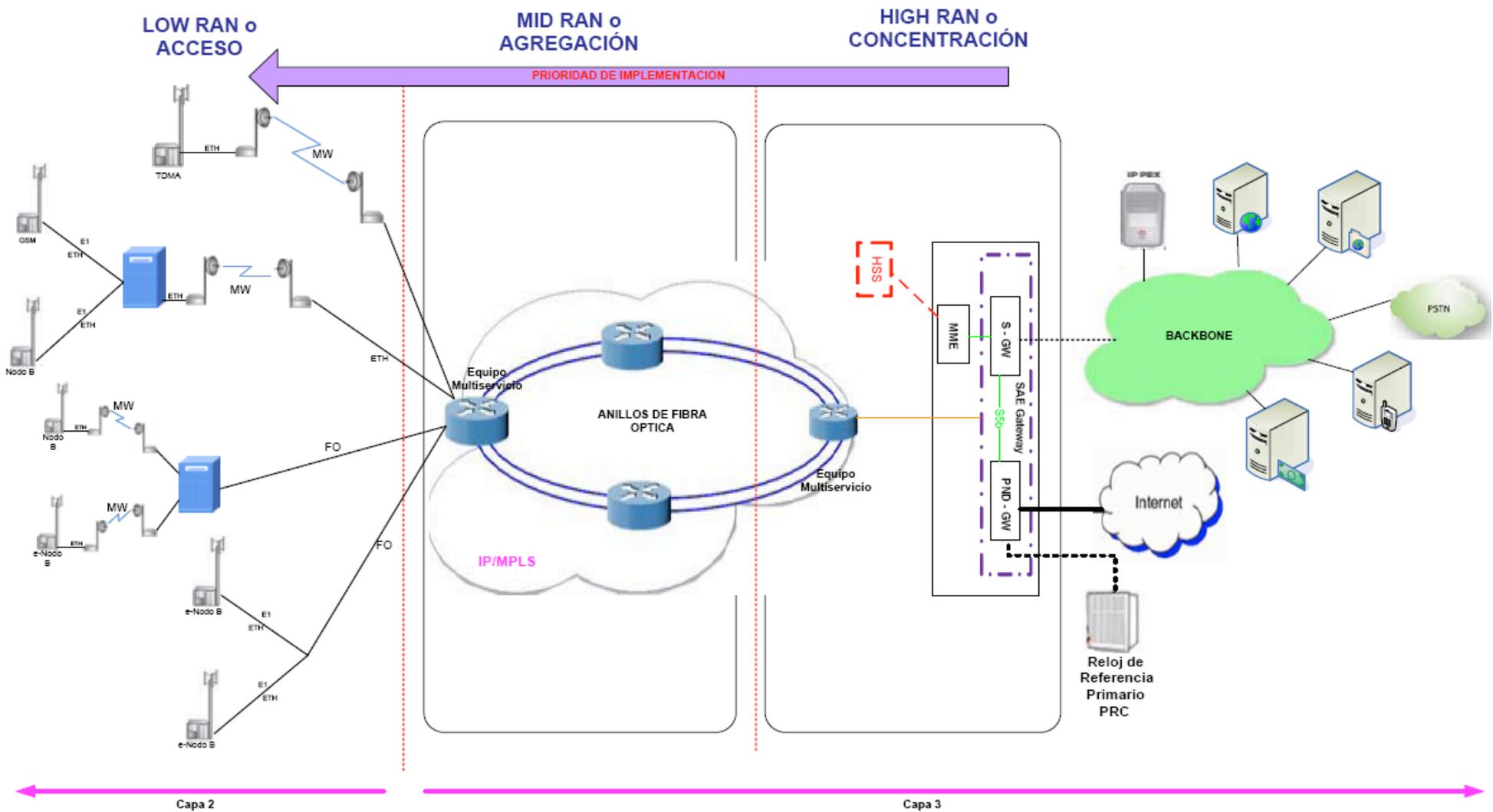


Figura 5. 11. Diseño físico descriptivo de una red IP RAN.

El proceso de migración debe ser transparente para convertir la tradicional red de transporte a una red IP para transportar el tráfico de *backhaul* (voz y datos) en el RAN, por lo que se debe realizar algunas fases en el momento de la implementación de la red de transporte IP RAN.

Una vez que se ha tomado la decisión de tener una red basada en paquetes, un proceso de diseño detallado es el más adecuado, pues nunca una transición es fácil.

Como se puede observar en la figura 5.11, el tráfico de las radiobases existentes se agrega dinámicamente usando IP sobre el menor número posible de enlaces E1, compartiendo el ancho de banda y aprovechando el ancho de banda recapturado para introducir y transportar nuevos servicios IP en la estación base.

En las siguientes figuras 5.12. y 5.13. se muestra una comparación de la capacidad demandada por la red cuando se utiliza el transporte el tradicional TDM y cuando se utiliza IP, los valores de la capacidad pico teórica se da por la suma de la capacidad de cada uno de los tres sectores del nodo.

- Utilizando TDM

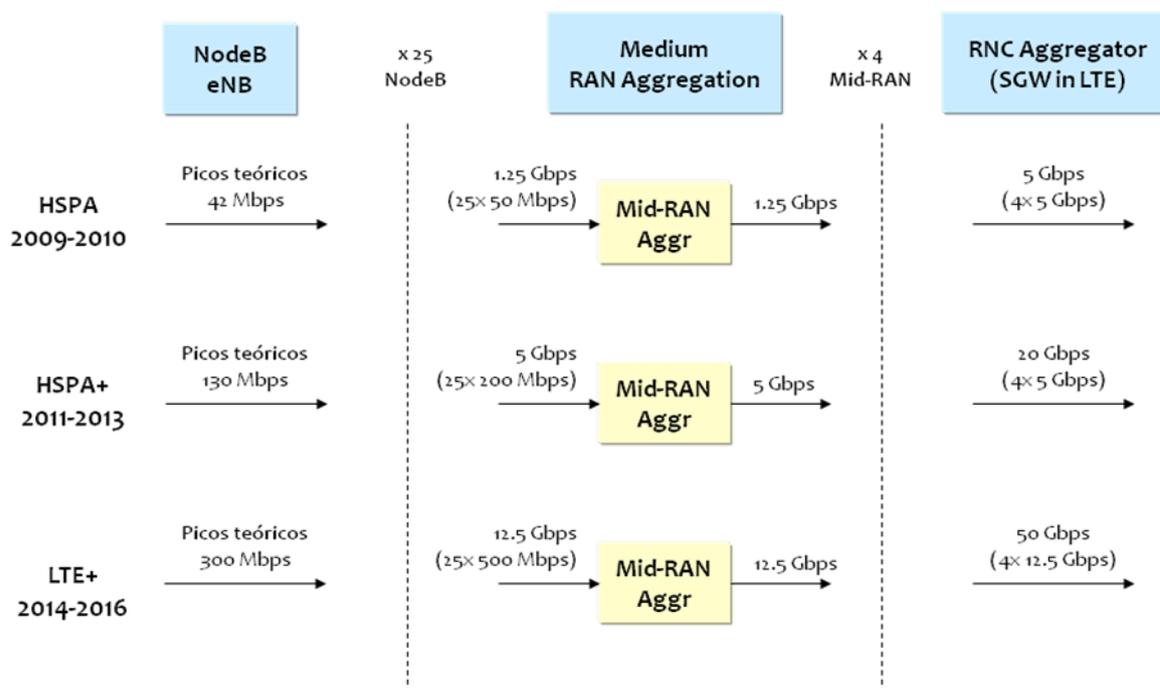


Figura 5. 12. Capacidad demanda utilizando agregación TDM.

En la figura 5.12 se puede observar que cada tecnología tiene una velocidad pico teórica en la radiobase sin embargo cuando se está en la etapa de agregación la capacidad demandada es diferente puesto que se debe transmitir Ethernet sobre TDM o SDH, razón por la cual se aumenta el valor por las cabeceras que se deben transportar logrando congestionar aun más la red.

- Utilizando IP

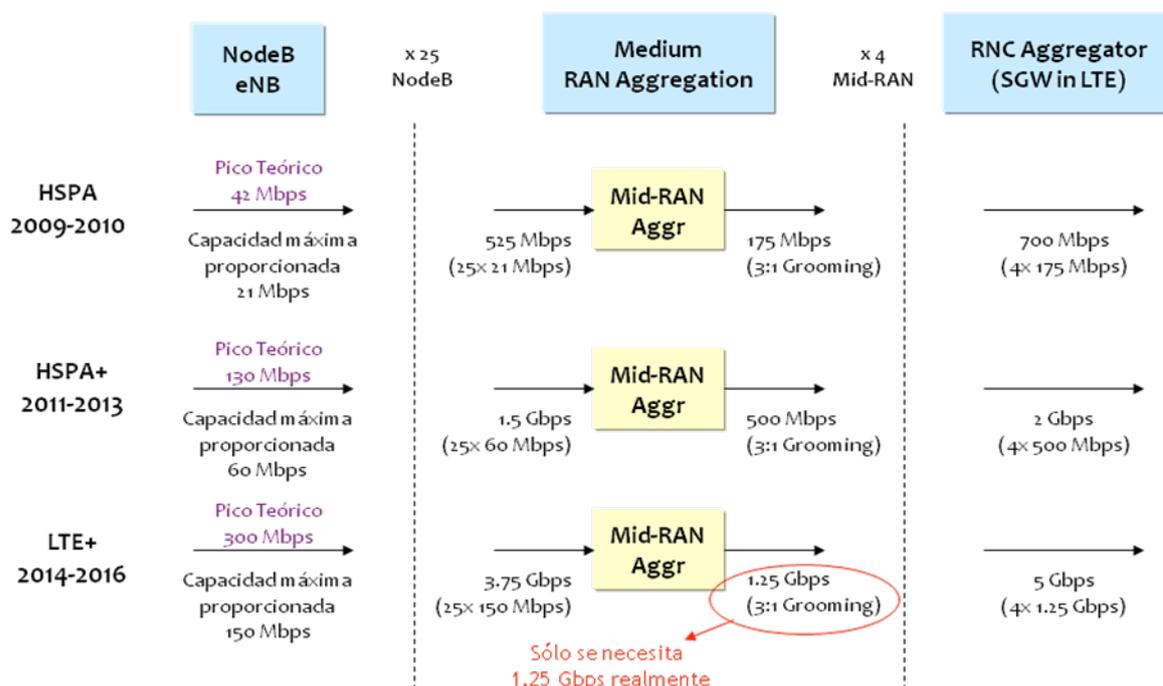


Figura 5. 13. Capacidad demanda utilizando agregación IP.

Sin embargo en la figura 5.13. se muestra que utilizando IP existe una capacidad demanda por la red mucho menor que la requerida en TDM, logrando así la optimización de la red que se obtiene principalmente por la reducción de cabeceras y por la sobresuscripción que se da a los usuarios, es decir se comparte los recursos del canal.

5.5.2. Diseño Lógico

Luego de haber visto el diseño de la red físicamente, es importante establecer algunas premisas para la configuración lógica de los elementos dentro de la red IP/MPLS formada en la etapa de agregación y concentración de la red IP RAN, puesto que por ella transitan gran cantidad de información y datos.

En la figura 5.14., se muestra las conexiones lógicas que se deberá tener en la red IP RAN.

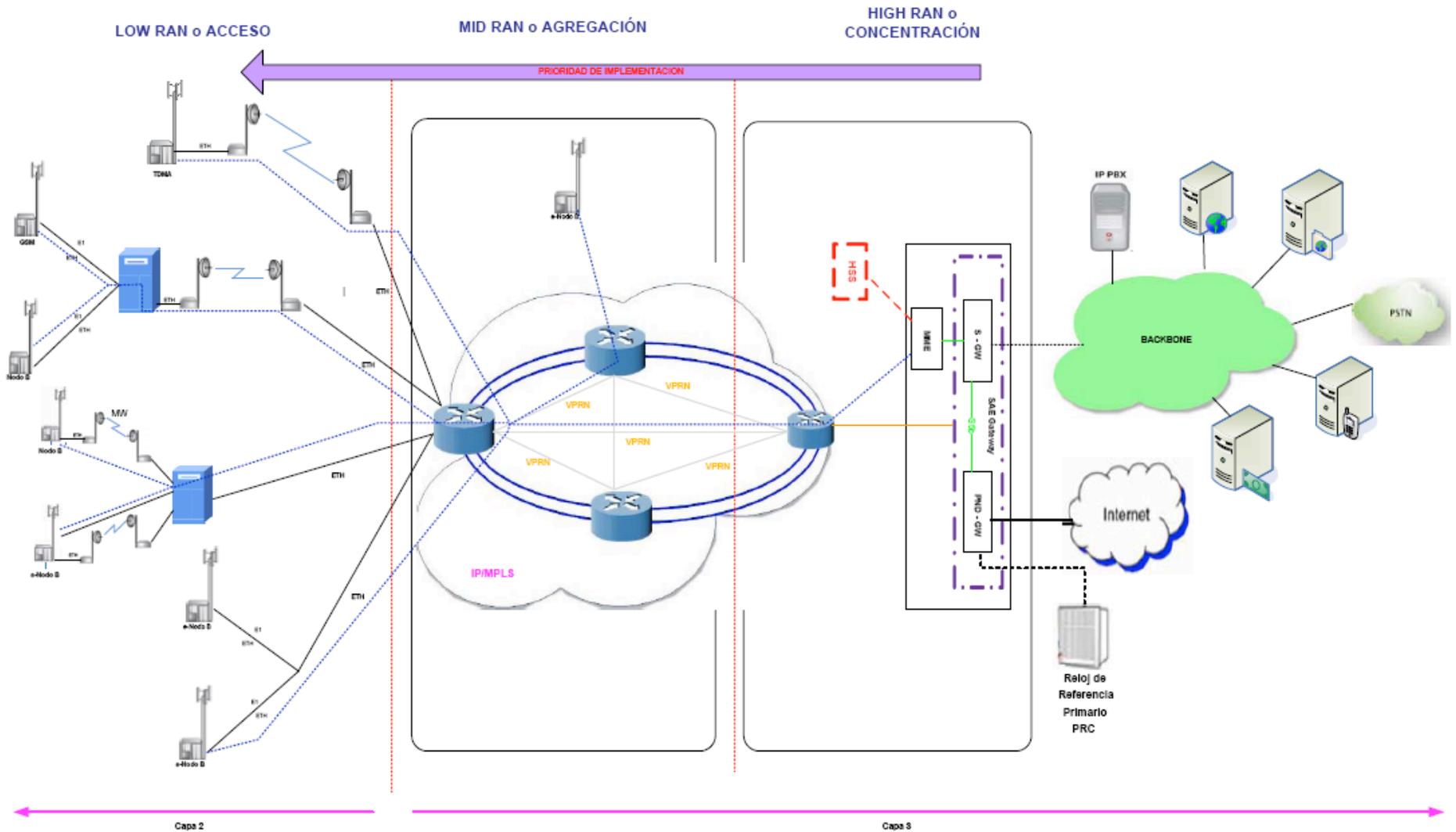


Figura 5. 14. Diseño lógico descriptivo de una red IP RAN.

Para el diseño lógico se puede establecer algunas consideraciones de configuraciones tanto en los protocolos de enrutamiento, los protocolos de señalización, servicios para la virtualización de la red y la topología de la red.

Para la topología de la red se sugiere una conexión **full mesh virtual**, es decir, una red totalmente mallada, con esto cada sitio de la VPN puede comunicarse con cualquier otro sitio que se encuentre dentro de la misma VPN utilizada, independientemente de que sea una VPN capa 2 o capa 3.

El protocolo de enrutamiento que se recomienda utilizar para los distintos anillos de fibra óptica es **OSPF** configurado bajo la misma área *backbone* (área 0), a continuación se mencionan beneficios de esta configuración.

- Configuración simple y fácil, teniéndose una misma configuración en todos los elementos de la red, por esta razón cuando existan problemas tan sólo se debe buscar en la configuración de enlaces individuales.
- Crear LSPs de extremo a extremo con o sin Ingeniería de Tráfico, con ésta última inclusive se puede crear LSPs de extremo a extremo así los routers se encuentren en diferentes anillos, reduciendo así el tiempo de recuperación ante un posible fallo en la red.
- En la tabla de enrutamiento de OSPF se puede verificar que los enrutadores han aprendido sobre la existencia de todas las redes conectadas al núcleo de la red IP/MPLS (incluyendo las direcciones de *Loopback*)

Sin embargo se debe considerar que el protocolo OSPF se podrá utilizar hasta redes con 100 nodos como máximo, superado este número de nodos se deberá utilizar el protocolo IS – IS como protocolo de enrutamiento.

Una de las mayores preocupaciones de los operadores, es el elegir si desplegar su red con L2VPNs (VPNs de capa 2) o L3VPNs (VPNs de capa 3) para la virtualización de la red.

No obstante sería provechoso utilizar VPNs de capa 2 en la parte de acceso ya que proveen un transporte transparente del tráfico de los clientes y permiten cualquier protocolo de capa 3 a ser usado en la red y VPNs de capa 3 desde la etapa de agregación en

adelante tomando en cuenta que con VPRNs se puede integrar y administrar las estaciones base de manera rápida.

A fin de brindar calidad de servicio (QoS) se debería utilizar el protocolo de señalización RSVP – TE, que permite el manejo de ingeniería de tráfico basándose en recursos que el flujo de datos requiere y en los recursos disponibles en toda la red. Al mismo tiempo este protocolo admite protección de caminos y por medio de los mensajes que utiliza se puede determinar si un camino está o no activo.

Siguiendo las premisas de diseño tanto físico como lógico se logrará un buen manejo del tráfico existente en la red evitando así congestionamientos, mejorando el desempeño general y reduciendo la latencia, maximizando así la capacidad de la red y minimizando los costos.

5.6. Tipos de Sincronismo de una red IP RAN

Como ya se ha estudiado con IP RAN se pretende construir una red totalmente IP, sin embargo existen todavía muchos obstáculos que dificultan la migración de los servicios tradicionales. El reto más difícil, es cómo entregar el reloj o sincronía a través de una red basada en paquetes, por este motivo la sincronización se convierte en otra consideración importante al momento de desplegar la red.

Las redes de 2G y 3G se basan en las tecnologías de red TDM (SONET/SDH y PDH), que tienen una capacidad nativa para realizar una sincronización de referencia en la capa física de su señal de sincronización. Al migrar a tecnologías de conmutación de paquetes, que son inherentemente asincrónicos, hay una necesidad de proporcionar una adecuada sincronización de todos los elementos de la red [36].

En la recomendación ITU-T G.8261 se definen tres tipos de sincronización, cada aplicación tiene distintas necesidades en cuanto a sincronismo, y por tanto la red de transporte obligatoriamente debe atender esta necesidad; sino el operador se verá obligado a resolverlo por fuera de la red de transporte agregando más elementos a la complicada red.

Los tres tipos de sincronización determinados en la recomendación antes mencionada son [37]:

- Sincronización de frecuencia
- Sincronización de fase
- Sincronización de tiempo

En la sincronización de frecuencia también llamada sintonización, los relojes se alinean en frecuencia o los relojes oscilan a la misma frecuencia. En la sincronización de fase los relojes se alinean en fase, es decir, sincronización de tiempo relativo. La sincronización de tiempo conocida como *time-of-day* (hora del día), aquí los relojes están en una base de tiempo común y universal. Cuando dos relojes estén sincronizados en tiempo y en fase, también lo estarán en frecuencia.

De acuerdo a la arquitectura de la red, puede variar la necesidad de utilizar cualquiera de estos tipos de sincronización.

En la actualidad, el *backhaul* se utiliza una red TDM sincrónica E1/T1 que proporciona la información del reloj necesaria para la sincronización con la estación base, pero la expansión de TDM tradicional es cara de implementar y no puede satisfacer los requisitos de crecimiento del tráfico móvil [37]. A medida que las redes de telefonía móvil se actualizan a *Ethernet*, las estaciones base quedan aisladas de la información de sincronización que solía transportarse a través de los hilos TDM.

Por las razones ya expuestas, la sincronización en el móvil RAN se torna importante, pues los elementos móviles del sistema deben mantenerse en estrecha sincronización para que las comunicaciones se realicen con eficacia, sin llamadas caídas ni distorsión o ruido.

La sincronía en la red IP RAN puede entregarse tanto en frecuencia como en fase, a continuación se mencionan algunas clases de sincronismo:

- Solo frecuencia:
 - ✓ Sync E
- Frecuencia y Fase:
 - ✓ Sincronización basada en GPS
 - ✓ *Differential clock recovery* – NTP (*Network time protocol*) & IEEE 1588v2 (PTP)

El *backhaul* del IP/RAN tiene requerimientos estrictos en frecuencia y fase para la sincronía. A continuación, en la tabla 5.1. se muestra un cuadro de estos requerimientos de acuerdo al tipo de tecnología [37]:

Tabla 5. 1. Requerimientos de sincronismo de diferentes tecnologías.

Sistema Inalámbrico	Estación base IP RAN		Femto Celdas	
	Sincronización Frecuencia	Sincronización Fase (Tiempo)	Sincronización Frecuencia	Sincronización Fase (Tiempo)
GSM	< 50 ppb	No se requiere	< 100 ppb	No se requiere
CDMA	< 50 ppb	$\pm 3 \mu\text{s}$	< 100 ppb	$\pm 1 \mu\text{s}$ $\pm 10 \mu\text{s}$ durante holdover sobre 8 hr
3GPP2 CDMA2000	< 50 ppb	$\pm 3 \mu\text{s}$ $\pm 10 \mu\text{s}$ sobre 8 hr	< 100 ppb	$\pm 3 \mu\text{s}$ $\pm 10 \mu\text{s}$ peor de los casos más 8 hr
WCDMA/UMTS -FDD	< 50 ppb - área amplia < 100 ppb - área local	No se requiere	< 250 ppb	No se requiere
WCDMA/UMTS -TDD	< 50 ppb	$\pm 2.5 \mu\text{s}$	< 250 ppb	$\pm 2.5 \mu\text{s}$ entre estaciones base
WIMAX/FDD	< 50 ppb	No se requiere	< 8 ppm	No se requiere
WIMAX/TDD	< 50 ppb	$\pm 1 \mu\text{s}$	< 8 ppm	$\pm 1 \mu\text{s}$ con GPS $\pm 5 \mu\text{s}$ sin GPS $\pm 25 \mu\text{s}$ durante holdover
TD-SCDMA	< 50 ppb	$\pm 3 \mu\text{s}$	< 100 ppb	$\pm 2.5 \mu\text{s}$ entre estaciones base
LTE	< 50 ppb	Fase de desarrollo Algunos usan $\pm 3 \mu\text{s}/\pm 10 \mu\text{s}$	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo

A continuación se describe rápidamente cada una de las técnicas que se pueden utilizar a fin de lograr la sincronización en la red.

5.6.1. GPS

La sincronización GPS se consigue utilizando el dato de tiempo de la base de datos recibidos de los satélites. Los datos obtenidos son una serie de datos de tiempo de alta precisión usando relojes atómicos [37]. Este sistema debería implementarse con equipos GPS en todos los sitios celulares, como se observa en la figura 5.15.

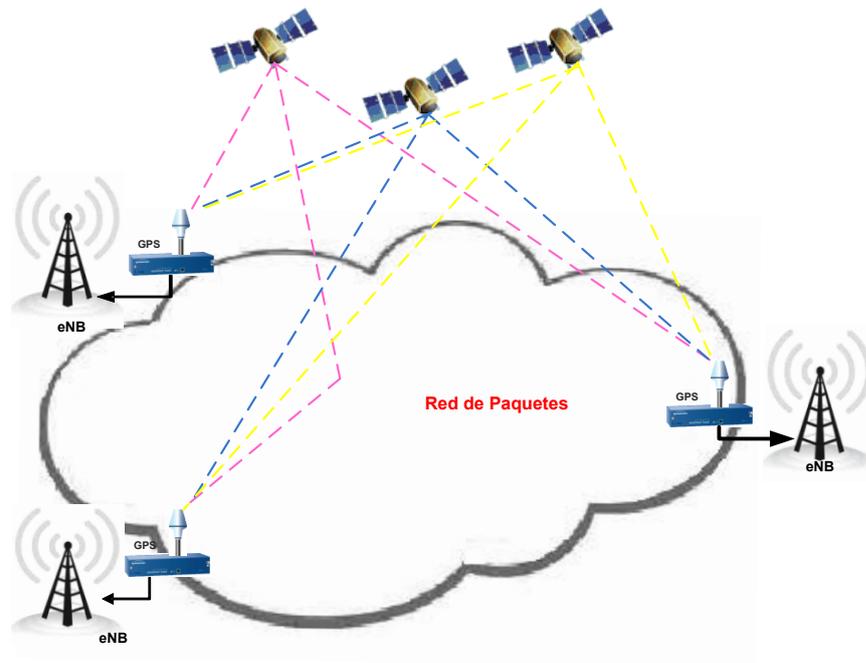


Figura 5. 15. Sincronización GPS en redes 4G.

Ventajas:

- Soporta inmediata transición a un *backhaul* de paquetes.
- Ayuda al servicio de posicionamiento (precisión de tiempo)
- La sincronía del eNodo B es independiente de la red.

Desventajas:

- Altos Costos y mayor tiempo para la implementación.
- Es necesario un elemento individual de gestión.
- Mantenimiento alto (montaje de la antena).
- Solución de alto rendimiento con alto costo.

5.6.2. Synchronous Ethernet

Sync-E es un método de generación de reloj sobre *Ethernet* muy similar al utilizado en SONET/SDH. Sync-E debe extenderse a todos los sitios celulares para el transporte de frecuencia. En la figura 5.16. se observa como los dispositivos reciben la frecuencia del reloj de referencia principal centralizado transportado a través del *backhaul* RAN conmutado de *Carrier Ethernet* que está habilitado para Sync-E [37]. Además elimina la necesidad de desplegar un dispositivo GPS en cada antena de telefonía móvil gracias a su capacidad de proveer de sincronismo de manera independiente a la cantidad de paquetes.

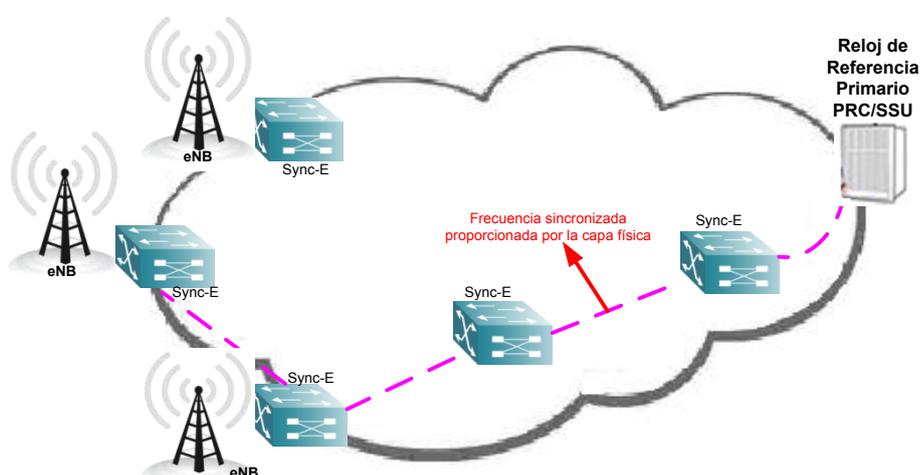


Figura 5. 16. Sincronización Sync-E en redes 4G.

Características:

- Es un esquema *Ethernet* de alta capacidad que transporta frecuencia sobre la capa física (óptica o eléctrica).
- Las capas superiores incluyendo IP son asíncronas.
- Los *switches* y routers Sync-E deberán usar un equipo externo, SSU, o línea de sincronía para recuperar la frecuencia para la capa de aplicación.
- ITU-T G.8261 define la sincronía en *Ethernet*.

Ventajas:

- El reloj es transportado en cada elemento *Ethernet* de la red.
- No depende de la carga de tráfico que se esté transportando.
- Es similar a la sincronización utilizada en TDM solo que requiere de puros dispositivos *Ethernet* que soporten este tipo de tecnología.
- No tiene un impacto directo sobre las tramas *Ethernet* 802.3.
- Cada dispositivo *Ethernet* en la red recupera eficientemente la señal de reloj.

Desventajas:

- El transporte del reloj requiere Sync-E *end to end* (todos los equipos a lo largo del transporte deben soportar Sync-E, puertos *ethernet*)
- Los dispositivos conectados a la red deben tener una interfaz Sync-E para leer correctamente la señal del reloj de la capa física.
- Al día de hoy no se encuentran disponibles las interfaces Sync-E en los Nodos B, ni en diversos dispositivos *Ethernet* en el mercado.
- La eficiencia en el costo para la RAN dependerá de la utilización y el aprovechamiento de los servicios del transporte de Sync-E.
- Aplicación limitada para redes arrendadas en el *backhaul* donde el monitoreo de Sync-E no puede ser asegurado.

5.6.3. IEEE 1588v2

Se trata de un protocolo de transferencia de reloj bidireccional; los extremos maestro y esclavo son los que transportan la información. En este método, los nodos intermedios no se tienen que actualizar, y la ventaja es que proporciona la sincronización de fecha y hora

que se requiere en las redes móviles. El uso de IEEE 1588v2 para transportar una señal de reloj precisa (y derivar frecuencia) se requiere un dispositivo en el sitio celular.

Los dispositivos utilizados en este tipo de sincronización funcionan como esclavos y se comunican con el reloj de referencia primario (PRC) centralizado mediante mensajes cortos IEEE1588v2 a través de la red de transporte asincrónico *Carrier Ethernet*, como se muestra en la figura 5.17. Este sistema no requiere cambios en las señales de capa física, pero la QoS se vuelve crítica puesto que los paquetes de tiempo deben tener la prioridad más alta para evitar congestiones y deficiencias en la red *backhaul* [36].

Hay varios factores que pueden afectar la exactitud y precisión del sistema de sincronización entre los relojes en una red IEEE 1588v2, como los cambios de frecuencia en la fuente de sincronización local de un reloj, la resolución de un reloj y la fluctuación de un dispositivo de red intermedios, tales como concentradores y conmutadores.

Con IEEE 1588v2 se logra sincronizar sistemas en tan solo unos microsegundos; sin embargo el alcance de dicha red *backhaul* es limitado dado que un protocolo basado en paquetes puede sufrir congestión de la red y variaciones en el retardo del paquete. Esta limitación se puede corregir con una planificación correcta de la red.

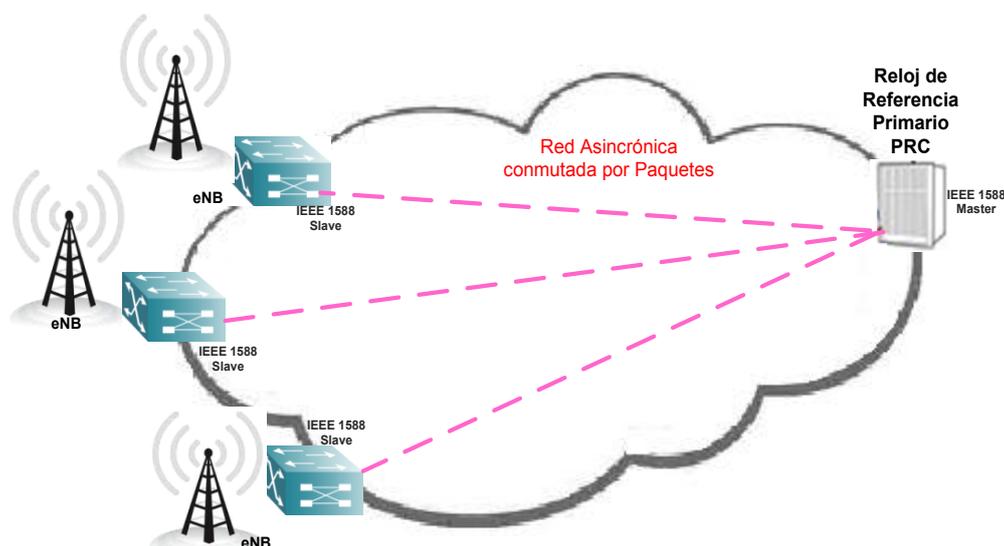


Figura 5. 17. Sincronización IEEE 1588v2 en redes 4G.

Características:

- Es un protocolo basado en estándares que ofrece una alta precisión de reloj sobre una red de datos, evitando un sistema paralelo de sincronía punto a punto.
- Tiene como propósito sincronizar relojes independientes en nodos separados de un sistema distribuido a un alto grado de precisión.
- Utiliza una arquitectura *Master/Slave*: Los paquetes de 1588 son transportados sobre IP.
- Paquete basado en un mecanismo de sincronización, UDP/IP.
- Se requiere de un hardware de cliente o *slave* en el equipo remoto y un *master* en el equipo central.
- Se transmiten con precisión paquetes de estampa de tiempo a través de la red.
- El “esclavo” puede determinar el tiempo de arribo de los paquetes y reconstruir la frecuencia.
- La carga de tráfico, los routers y *switches*, disminuyen la precisión del reloj.

Ventajas:

- IEEE se basa en estándares (inter-operabilidad de unidades).
- El reloj es transportado con el tráfico.
- La sincronía de los sitios celulares puede ser homogénea con la sincronía en la red.
- La mayoría de los proveedores están implementando clientes de IEEE 1588v2 en sus equipos (eNB).
- Tiempo y frecuencia pueden ser recuperados para soportar un amplio rango de servicios.

- La calidad de los relojes esclavos es gestionable.

Desventajas:

- La implementación puede llegar a ser compleja.
- Requiere una aplicación estricta de calidad de servicio con el fin de garantizar la oportuna recepción de los paquetes.

5.6.4. Network Time Protocol (NTP)

NTP es un protocolo definido por IETF que se ha utilizada para sincronizar los relojes de los *hosts* y los routers en Internet. La evolución de NTP se muestra en la siguiente lista:

- 1985: NTPv0 RFC958
- 1988: NTPv1 RFC 1059
- 1989: NTPv2 RFC 1119
- 1992: NTPv3 RFC1305

Aun la sincronización NTP V4 se encuentra ya definida, sigue considerándose a NTPv3 estándar oficial para la sincronización del Internet. NTP es jerárquico y está dividido en estratos; una fuente de reloj se denomina Estrato 0, mientras que un servidor NTP es Estrato 1, los equipos y dispositivos que reciben el reloj de un servidor Estrato 1 se convierten en el Estrato 2 y así sucesivamente [36]. Esta estructura jerárquica permite que miles de dispositivos puedan sincronizarse al mismo tiempo sin saturar al servidor NTP o el ancho de banda de la red. Las implementaciones de NTP se basan principalmente en software.

5.6.4.1. NTPv3 en IP RAN

Es un estándar basado en NTP que puede trabajar sobre el *backhaul* de una red móvil para producir frecuencia si la red tiene un buen funcionamiento.

Ventajas:

- Altamente utilizado en entornos IP (Internet).
- El reloj de Cliente y servidor fluyen a la misma velocidad.

Desventajas:

- Las implementaciones actuales son principalmente basadas en software.
- No recomendable su implementación en la construcción de redes con tráfico de importancia.

Después de haber analizado los diferentes métodos para la sincronización, se describe la recomendación para llevar a cabo el transporte de sincronía en una red de paquetes.

Al inicio de la implementación del IP-RAN, resultaría muy conveniente la utilización de IEEE 1588v2 pues es el tipo de sincronización que la mayoría de operadoras utilizan por esta razón sería fácil su implementación debido a que como ya se cuenta con el hardware necesario solo se requiere a un *upgrade* del mismo, además la sincronía es transportada con el flujo de tráfico lo que permite brindar calidad de servicio a través de la red y no es necesario que todos los equipos soporten 1588v2 lo que facilita una migración en fases y la convivencia con diferentes redes.

Cabe tener en cuenta que la elección para la implementación de la sincronización se debe realizar dependiendo de la arquitectura de red y los servicios que se vayan a entregar. Sin embargo, un sistema debe tener la flexibilidad para la configuración en una

variedad modelos de distribución de reloj que se ocupen de las necesidades del operador y se puede configurar con redundancia fuerte.

5.7. Ventajas y desventajas del IP RAN

5.7.1. Ventajas de IP RAN

Las principales ventajas que se consiguen con la implementación de una red IP RAN se enumeran en la siguiente lista:

- Una red IP RAN es una red simplificada, rentable, fácil de desplegar, y fácil mantener.
- Ofrece una gama de soluciones para la cobertura inalámbrica de las redes celulares, así como mejora la capacidad del backhaul.
- Reducción de CAPEX: Las redes IP RAN pueden ofrecer un ahorro significativo comparados con un despliegue de una red tradicional reduciendo gastos de implementación del sitio y maximizando la utilización del recurso espectral.
- Permiten que un operador despliegue capacidad adicional en la red exactamente donde es necesaria.
- Reducción de OPEX: El uso de IP proporciona enormes ahorros en OPEX tanto como una reducción del 75 por ciento en costo con respecto al uso de E1/T1 tradicionales, además que proporciona soluciones escalables extremo a extremo.
- Más fiabilidad y seguridad, puesto que con IP RAN se puede ofrecer QoS garantizado en toda la red, desde el sitio del cliente hasta la capa de acceso y el *core* de la red.

- Con este tipo de red se puede ofertar nuevos servicios con mayor ancho de banda, mejor cobertura y con capacidad de calidad de servicio con lo que se aumentará la satisfacción del cliente.
- Admite una integración de *backhaul* de los sistemas 2G, 3G y 4G a través de una convergencia IP.

5.7.2. Desventajas de IP RAN

- Una de las desventajas más notorias al momento de la implementación de la red es la inversión que el operador tendrá que realizar en la adquisición de nuevos equipos multiservicios que permitan el manejo del tráfico a través de la conmutación de paquetes.
- La coexistencia de redes 2G, 3G y 4G produce un precio de los gastos operativos más altos y la necesidad de apoyar las redes de transporte y sistemas de gestión y mantenimiento tanto para TDM, ATM y *Ethernet*, se vuelve costoso puesto que se debe invertir capital en la capacitación del personal para que sepa como sobrellevar cualquier problema sin importar que tipo de red sea (2G, 3G, 4G).

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se realizó el estudio del arte de LTE, donde se observa que cuenta con una arquitectura IP muy eficiente y rentable que permitirá a los operadores móviles realizar un ahorro significativo en los gastos de CAPEX y OPEX para ofrecer mayores velocidades de datos y asignar mayor tráfico para que los servicios móviles a menor costo.
- Al estudiar la tecnología LTE se mostró que las velocidades de descarga llegan hasta 100 Mbps y velocidades ascendentes de hasta 50 Mbps, velocidades que antes sólo se conseguían a través de redes cableadas.
- Las empresas móviles han incrementado sus patrones de tráfico en las redes de telefonía por la utilización de terminales con servicio de datos, por lo tanto, una red inteligente con la capacidad de optimizar de forma rápida y autónoma, podría mantener tanto la calidad de la red así como una experiencia de usuario satisfactoria.
- Luego de realizar el análisis de la tecnología IP/MPLS se concluye que este tipo de red soporta el transporte de diferentes servicios ya sean capa 2 o capa 3 incluyendo TDM, ATM, e IP aportando de manera significativa a la migración hacia IP RAN pues permite la convergencia de los diferentes tipos de tráfico, ayudada por la Ingeniería de Tráfico (TE) y Calidad de Servicio (QoS) mejorando y maximizando el manejo de los recursos de la red.

- Para las operadoras de telefonía móvil será de vital importancia la optimización de la red de transporte, pues actualmente en sus redes los datos cada vez son más importantes y requieren de una infraestructura por conmutación de paquetes que contribuya de manera acertada al manejo de los mismos.
- Con la utilización de IP/MPLS en las redes de backhaul es factible reutilizar los elementos de red o infraestructura ya existente como los elementos de red instalados en el pasado para el transporte TDM/ATM generando ahorros al momento del despliegue de la red IP RAN.
- El diseño de la red de transporte IP RAN que se presenta, permite manejar adecuadamente las redes móviles generando una red rentable que cumple con los requerimientos actuales de aumento de tráfico de datos, además de ser un diseño escalable, confiable, y que permite una gestión simplificada a fin de reducir los costos de operación.
- La red de transporte IP RAN diseñada, cumple estrictos requisitos de calidad para los servicios móviles y es capaz de transferir la información de sincronización del reloj cuando sea necesario por la red.
- Al estudiar los servicios que se pueden brindar en LTE se determinó que el *backhaul* celular a través de *Ethernet* permite ofrecer los servicios existen en la actualidad y también nuevos e innovadores servicios, además de permitir que la red de transporte esté lista para el tráfico generado por tecnologías futuras.
- Después de realizar el proyecto de tesis y analizar los beneficios y desventajas de una red de transporte IP RAN se llega a concluir que los costos generados por la convergencia de redes genera menores gastos de OPEX para los operadores, que seguir añadiendo líneas preparadas para voz T1/E1 para transportar datos.

6.2. Recomendaciones

- Es importante que el Ente Regulador defina las bandas en las cuales se va desplegar LTE antes del 2012 cuando ya el mercado comercial de esta tecnología empiece a crecer apresuradamente. Además que se debe recordar es necesario un conjunto de bandas de baja y alta frecuencia para que los operadores obtengan cobertura y capacidad.
- El dimensionar correctamente la red de transporte inteligente para LTE será decisivo para poder maximizar el desempeño de la red LTE tanto desde el punto de vista de sus prestaciones como desde el financiero.
- Se recomienda elegir la tecnología IP/MPLS, para disminuir la inversión que genera al montar una nueva red de transporte ya que es una tecnología que admite la reutilización, de la infraestructura existente además de proporcionar la optimización del canal.
- Se debe realizar una transformación paulatina hacia la red IP RAN a fin de que este cambio sea totalmente transparente para el usuario y de cómo resultado el aumento de una cantidad de nuevo servicios que serán innovadores servicios *ALL IP* y así la expansión sea relativamente simple evitando los cuellos de botella tradiciones causados por la actual arquitectura.
- Se recomienda que para que la red por conmutación de paquetes (IP/MPLS) funcione adecuadamente, el protocolo de enrutamiento a implementarse en los equipos multiservicios, debe ser aquel que permita conocer la información de ruteo a nivel de IP, por lo que sería beneficioso el uso del protocolo OSPF si la red llega hasta los 100 nodos sí supera esta cantidad de nodos lo mejor es utilizar IS-IS.
- A pesar de que lo óptimo es una red netamente IP, se sugiere que la voz siga siendo trasportada por redes 2G y la red LTE me sirva estrictamente se utilice para el tráfico de datos.
- Por otro lado se recomienda a los investigadores, trabajar en proyectos de investigación relacionados al presente como la factibilidad de desplegar

servicios de seguridad mediante cámaras IP de video vigilancia a través de redes celulares de cuarta generación en tiempo real, aplicaciones sobre servicios de localización utilizando las nuevas redes de transporte así como también el comportamiento del tráfico generado por el video-streaming para implementar IPTV sobre redes celulares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Internet. "Migration to All-IP RAN Transport".
http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns523/white_paper_c11-517545.html.
- [2] Internet. Junquera, Rafael. "América Móvil vs Movistar". www.telesemana.com.
- [3] Internet. "Historia de las telecomunicaciones en el Ecuador".
<http://www.slideshare.net/guest0011be1/las-telecomunicaciones-en-el-ecuador-2948691>.
- [4] Internet. "Sector de las Telecomunicaciones en el Ecuador".
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Sector-De-Las-Telecomunicaciones-En-El/2658883.html>.
- [5] Internet. "Ministerio de Telecomunicaciones y la Sociedad de la Información".
www.mintel.gob.ec.
- [6] Internet. "Consejo Nacional de Telecomunicaciones y Secretaría Nacional de Telecomunicaciones". www.conatel.gob.ec.
- [7] Internet. "Superintendencia de Telecomunicaciones". www.supertel.gob.ec.
- [8] Internet. "Claro". www.claro.com.ec.
- [9] Internet. "Movistar". www.movistar.com.ec.
- [10] Internet. "Alegro". www.alegro.com.ec.
- [11] Internet. "Corporación Nacional de Telecomunicaciones". www.cnt.gob.ec.
- [12] Internet. "A la espera de la cuarta generación (4G) de la telefonía móvil".
<http://www.eveliux.com/mx/a-la-espera-de-la-cuarta-generacion-4g-de-la-telefoniamovil.php>.
- [13] Internet. "4G - Tecnologías De Cuarta Generación".
<http://www.buenastareas.com/ensayos/4G-Tecnologias-De-Cuarta-Generacion/643769.html>.
- [14] Internet. "Desarrollo de las IMT-Avanzadas".
<http://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=10&ipage=39&ext=html>.

- [15] Internet. "LTE". <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [16] HOLMA H, TOSKALA A, LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, Editorial John Wiley & Sons, Año 2009.
- [17] SESIA, Stefania, LTE - the UMTS long term evolution: from theory to practice, Editorial John Wiley & Sons Inc.
- [18] Internet. "MIMO Technology Tutorial".
<http://www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/multiple-input-multiple-output-technology-tutorial.php>
- [19] Internet. "Releases". <http://www.3gpp.org/releases>.
- [20] Internet. Revista Española de Electrónica 2010/No.671. "LTE (Long Term Evolution): El siguiente nivel". http://www.redeweb.com/_txt/671/82.pdf. Pag. 82.
- [21] Conferencia: Días de Innovación Ecuador 2011. Nokia Siemens.
- [22] Conferencia: Espectro LTE. Agosto 2011. Alcatel Lucent.
- [23] Internet. "MPLS (MultiProtocol Label Switching)".
<http://www.ramonmillan.com/tutoriales/mps.php>
- [24] Internet. "Multiprotocol Label Switching (mpls)". <http://datatracker.ietf.org/wg/mps/>.
- [25] Internet. "Manual Cisco CCNA".
www.guillesql.es/Articulos/Manual_Cisco_CCNA.aspx
- [26] MASON, Andrew, Arquitecturas MPLS y VPN: Redes Privadas Virtuales De Cisco Secure, Editorial Pearson Educación, Edición 1, Año 2002.
- [27] Internet. "MPLS".
http://www.cisco.com/en/US/tech/tk436/tsd_technology_support_protocol_home.html
- [28] Internet. "MPLS MULTI PROTOCOL LABEL SWITCHING, Una Arquitectura de Backbone para la Internet del Siglo XXI".
<http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/informatica/SistemasOperativos/libmpls.PDF>
- [29] Internet. "MPLS".
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/morales_d_1/capitulo2.pdf.
- [30] Internet. "Red privada virtual" <http://www.uv.es/siuv/cas/zxarxa/vpn.htm>.
- [31] Internet. "Evolución y Desarrollo de Red de Transporte Orientada a All-IP"
<http://www.huawei.com/es/catalog.do?id=1021>
- [32] Internet. "MPLS in Mobile Backhaul Networks Framework and Requirement."
<http://www.broadband-forum.org/technical/download/ipmpls/IPMPLSForum20.0.0.pdf>
- [33] Internet. "When microwave meets the IP wave".
<http://www.huawei.com/en/static/hw-079820.pdf>

-
- [34] Internet. "Enterprise Business" www.huawei.com/enterprise/ip-microwave.do
- [35] Internet. "Nuestro Portafolio" <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal>.
- [36] Internet. "Synchronization deployment considerations for IP RAN backhaul operator." <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000400-en.pdf>
- [37] Internet. Sincronismo en redes móviles WCDMA
http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_229_Sincronismoenredes_Hobbinsyotros.pdf

ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado titulado: “ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED DE TRANSPORTE IP RAN PARA VOZ Y DATOS PARA REDES DE TELEFONÍA CELULAR DE CUARTA GENERACIÓN EN EL ECUADOR”, fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, 30 de Septiembre de 2011

ELABORADO POR:

Srta. Ana Cristina Ayala Abarca

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Gonzalo Olmedo