



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

**Simulación y optimización de recursos de
transmisión para operadores móviles celulares con
priorización de servicios ante fallas**

Carlos Andrés Sandoval Aparicio

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2014

Simulación y optimización de recursos de transmisión para operadores móviles celulares con priorización de servicios ante fallas

Carlos Andrés Sandoval Aparicio

Tesis en modalidad Profundización presentada como requisito para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en Telecomunicaciones

Director:

Ing. LUIS CARLOS TRUJILLO, MsC.

Línea de investigación:

Redes y sistemas de Telecomunicaciones

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de ingeniería

Bogotá, Colombia

2014

A mi familia que los momentos compartidos y con su apoyo incondicional me dieron la fortaleza para cumplir este nuevo logro en mi vida.

CONTENIDO

CONTENIDO	I
LISTAS DE FIGURAS.....	III
LISTAS DE TABLAS.....	V
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.	3
Objetivos específicos.	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Red de transmisión.....	4
1.2. Red UMTS	5
1.3. Modelos de optimización.	7
1.3.1. Modelo de optimización de la congestión del LSP (OCL)	8
1.3.2. Modelo general de asignación de flujo (GFA).	8
1.3.3. Modelo de asignación de capacidad y flujo CFA.....	9
1.3.4. Asignación de la capacidad del Buffer (ACB).....	10
1.3.5. Optimización de los caminos mediante el uso de multiobjetivos.....	10
2. ESPECIFICACIONES.....	11
2.1. Servicios TDM (E1s)	11
2.2. Servicios ETH (Interfaz IuB).	14
2.3. Caracterización interfaz IuB.....	15
2.4. Modelos de optimización.	18
2.4.1. Modelo de asignación de flujo VTP [3].....	18
2.4.2. Modelo de asignación de capacidad y flujo ACB [5].....	20
2.4.3. Modelo IGP/MPLS [4].....	21
3. DESARROLLOS.....	28
3.1. Simulación.	28
3.1.3. Red de Prueba	38
3.1.4. Modelo modificado de asignación de capacidad y flujo (ACB).....	40

3.1.5. Modelo de asignación de flujo VTP (Virtual Traffic Path).	42
3.1.6. Modelo IGP\MPLS.....	44
3.2. Modelo de optimización propuesto.	45
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.1. Resultados modelo de optimización propuesto.	49
4.2. Comprobación del modelo de simulación.	51
4.3. Verificación de los resultados del modelo de optimización.	52
5. CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58
GLOSARIO	59

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Requerimientos de la red IP/MPLS de un operador móvil.	4
Figura 2. Estructura general de UTRAN [1].	6
Figura 3. Interfaz lub en la red UMTS e IP/MPLS.	7
Figura 4. Separación de demandas en redes MPLS.	9
Figura 5. Modelo de colas modelo ACB. [1].	10
Figura 6. Encapsulación de servicios TDM en redes MPLS.	11
Figura 7. Palabra de control SAToP vs CESoPSN.	12
Figura 8. Encabezado fijo protocolo RTP.	13
Figura 9. Ejemplo comportamiento diario interfaz luB.	16
Figura 10. Ejemplo evolución interfaz luB en diferentes días.	16
Figura 11. Ejemplo comportamiento interfaz luB durante 15 días con periodos de muestreo de una hora.	17
Figura 12. Saturación de enlaces.	17
Figura 13. Modelo optimización IGP/MPLS.	23
Figura 14. Túneles que hacen uso de un mismo enlace.	24
Figura 15. Red para priorización de tráfico ante fallas.	25
Figura 16. Priorización de servicios.	26
Figura 17. Ejemplo red de simulación.	28
Figura 18. Diagrama de flujo del protocolo OSPF.	32
Figura 19. Diagrama bloque rutas secundarias.	33
Figura 20. Diagrama de Flujo programa de simulación.	34
Figura 21. Falla de enlaces vs demandas no atendidas.	35
Figura 22. Máxima ocupación vs enlace en falla.	36
Figura 23. Enlace más saturado vs enlace en falla.	36
Figura 24. Gráfica tridimensional ocupación de enlace.	37
Figura 25. Incidencia en el tiempo fuera de servicio por falla de enlaces.	37
Figura 26. Gráficas tridimensionales de la ocupación del enlace en uplink y downlink.	38
Figura 27. Red de prueba.	39
Figura 28. Resultado modelo ACB sin rutas secundarias.	40
Figura 29. Resultado modelos ACB con rutas secundarias calculadas por OSPF.	41
Figura 30. Desbordamiento de tráfico presentado con las rutas secundarias establecidas por OSPF.	42
Figura 31. Resultados modelo de flujo VTP sin rutas secundarias.	43
Figura 32. Resultados modelo de flujo VTP con rutas secundarias establecidas por OSPF.	43
Figura 33. Resultados modelo IGP/MPLS.	44
Figura 34. Falla de enlaces vs demandas no atendidas, modelo propuesto.	49
Figura 35. Uso de enlaces con el modelo propuesto.	49

Figura 36. Uso enlace 20 con el modelo propuesto.....	50
Figura 37. Uso del enlace 13 con el modelo propuesto.....	50
Figura 38. Uso del enlace E5 real vs simulado.....	51
Figura 39. Uso del enlace E15 real vs simulado.....	52
Figura 40. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo ACB sin rutas secundarias.....	55
Figura 41. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo de flujo VTP sin rutas secundarias.....	55
Figura 42. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo propuesto.....	55

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1. Enlaces del ejemplo de la red de simulación.	29
Tabla 2 Ejemplo tabla demandas.....	30
Tabla 3. Tabla de rutas principales	31
Tabla 4. Comparación re-enrutamiento vs cambio de protección. [6]	48
Tabla 5. Comparación existencia de saturación.	53
Tabla 6. Cantidad de servicios no atendidos con los modelos de optimización.....	54
Tabla 7. Comparación cantidad de servicios no atendidos entre los modelos presentados que no presentan saturación de enlaces.....	54

INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayoría de compañías de telefonía móvil de Colombia están operando con varias tecnologías como son 2G, 3G y en proceso de implementación de 4G, razón por la cual tienen que ofrecer, diferenciar y brindar calidad de servicio a cada una de las ofertas que se les realiza a sus clientes.

Puesto que están a disposición diferentes tecnologías las compañías de telecomunicaciones deben tener la infraestructura para brindar un servicio adecuado a los usuarios y así tener un puesto privilegiado en el mercado y evitar multas y sanciones por las entidades de regulación del estado, para esto se deben garantizar buenos indicadores de desempeño en las diferentes partes que componen la red, desde acceso hasta el CORE.

En la red de transmisión se tienen dos servicios principales, el primero de ellos corresponde a canales E1s (conmutación de circuitos) generalmente usado para transportar la interfaz Abis (nombre dado a la interfaz entre la estación base y la BSC, Base Station Controller), mientras que el segundo corresponde con conexiones Ethernet (conmutación de paquetes) las cuales son usadas para transportar la interfaz luB entre los distintos nodos B y las RNCs (Radio Network Controller).

Para evitar el despliegue de múltiples redes de transmisión y así reducir el CAPEX y OPEX, las compañías intentan tener una red de transmisión unificada la cual pueda brindar soluciones a todas sus necesidades sobre la misma infraestructura; así se han creado protocolos que permiten emular servicios creados para otra tecnología.

Debido a que TCP/IP es un conjunto de protocolos conocido alrededor del mundo y aceptado tanto por fabricantes de equipos como por proveedores de servicios se han generado grandes desarrollos sobre el mismo, uno de los protocolos desarrollados corresponde con MPLS (Multiprotocol Label Switching) el cual opera entre las capas de enlace de datos y de red del modelo OSI (2 y 3 respectivamente) el cual permite la unificación de la red de transporte brindando la posibilidad de brindar soluciones para redes basadas en conmutación de circuitos y de paquetes.

Al implementar MPLS sobre redes de telecomunicaciones se tienen grandes ventajas de flexibilidad y rendimiento debido a su capacidad de brindar funcionalidades como:

- Redes privadas virtuales, tanto de capa dos y tres en servicios punto a punto como punto multipunto, permitiendo así emular Switches y Routers y así poder tener separados datos de diferentes usuarios sobre la misma red.

- Ingeniería de tráfico, permite escoger los caminos donde se transportará cada uno de los servicios que existen en la red y así evitar la saturación de enlaces.
- Esquemas de protección que permiten establecer la forma de recuperación ante posibles fallas de enlaces y/o elementos de la red.
- QoS, junto con ingeniería de tráfico permite establecer parámetros de anchos de banda comprometidos, picos y otros para diferentes clases de tráfico.

Debido a que los proveedores de soluciones deben ser capaces de brindar buenos indicadores de desempeño dentro de los que se encuentran bajo Jitter, poca pérdida de paquetes y gran porcentaje de disponibilidad se hace necesario del conocimiento de la red y de las demandas para crear esquemas de protección, priorización de servicios, evitar saturación de enlaces, realizar optimizaciones y desplegar nueva infraestructura.

Existen varias formas de abordar la administración de la red de transmisión las cuales son:

- Planeación: El establecimiento de conexiones entre los elementos que compondrán la red de transporte para brindar calidad de servicio sin incrementar de manera considerable el CAPEX y OPEX.
- Control: Ingeniería de tráfico necesaria para mejorar los parámetros de los servicios sobre la red de transporte ya establecida.
- Análisis: Permite evidenciar el desempeño de la red de transporte y de los servicios sobre la misma.

Debido a que en momentos de fallas se ha evidenciado que en la mayoría de ocasiones el tráfico fluye por nuevos túneles esto conduce a la saturación de enlaces, degradando indicadores de desempeño como son caída de llamadas, bajas velocidades y posible pérdida de sincronismo de las estaciones base, por lo cual las estaciones base no pueden ofrecer ningún servicio a los abonados que se conectarían a ella durante varios minutos que dura retomar la sincronización y debido a que la saturación continuaría existirán estaciones base intermitentes con los inconvenientes que esto implica.

OBJETIVO GENERAL.

Simular y diseñar un mecanismo de optimización que permita reducir la máxima ocupación de los enlaces en una red MPLS bajo condiciones de falla de un enlace en la red de Movistar Colombia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Diseñar e implementar un modelo de simulación en scilab en el cual se evidencie la ocupación de los enlaces al mezclar tráfico 2G y 3G evidenciando el comportamiento de la interfaces luB en las diferentes zonas geográficas del país.
- Validación del modelo de optimización a través de escenarios de prueba y confirmación de simulación con datos reales de la red del operador móvil Movistar.
- Implementar y comparar en ambiente de simulación y bajo condiciones de falla los mecanismos de optimización del modelo general de asignación de flujo VTP propuesto en [1], el modelo de optimización de la asignación de capacidad de buffer ACB presentado en [2] y del establecimiento de rutas óptimas para ingeniería de tráfico en redes IGP/MPLS presentado en [4].
- Establecer los enlaces que más afectan tráfico en la operación de la red y por lo cual son susceptibles a mejoras, los mismos son obtenidos mediante el análisis de disponibilidad de enlaces, cantidad de servicios que soporta cada uno de ellos y los esquemas de protección.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. RED DE TRANSMISIÓN.

La red de transmisión IP/MPLS en el ámbito de telefonía celular usualmente es usada por los operadores para satisfacer las necesidades de comunicaciones existentes entre las estaciones base y las centrales en redes 2G y 3G, para ello es necesario que transporte servicios Ethernet (ETH) para la red 3G y servicios E1s para la tecnología 2G, que es la que usualmente se usa en el mercado, de forma que los enlaces intermedios transporten ambos servicios compartiendo un mismo ancho de banda.

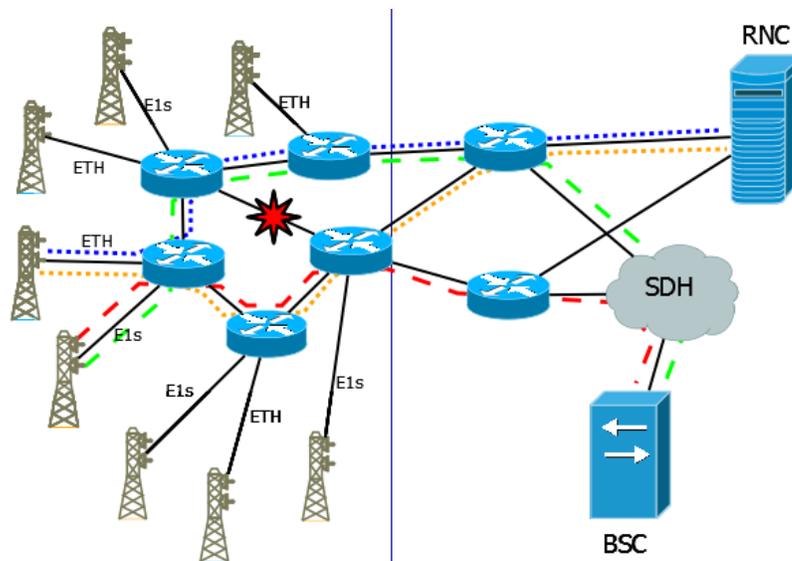


Figura 1. Requerimientos de la red IP/MPLS de un operador móvil.

En la figura 1 se puede evidenciar que la red transporta dos clases de servicios, los cuales son Ethernet para el tráfico de los nodos B (red UMTS) y E1s para el de las BTSs (Base transceiver station). Cada servicio es transportado hasta un punto de interconexión con elementos externos a la red IP/MPLS el cual puede ser tanto conexiones directas con las RNCs (Radio Network Controller) o con elementos que hacen conversión a la red SDH para terminar el servicio en las respectivas BSCs.

1.2. RED UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System o UMTS) es la red usada por dispositivos móviles de tercera generación para acceder a servicios tanto de voz como de multimedia.

De manera simplificada la red UMTS se puede dividir en tres grandes bloques los cuales son:

- Equipos de usuario: Son los dispositivos móviles usados por los clientes de la red para comunicarse con la UTRAN y acceder a los distintos servicios de telecomunicaciones, esto puede ser realizado tanto en FDD o TDD (División de frecuencia dúplex y División de Tiempo dúplex respectivamente).
- URAN: Es la red de acceso y es el punto en el cual se los proveedores de servicios disponen de equipos para controlar las frecuencias usadas por los equipos de los usuarios y se establecen conexiones con los equipos de CORE, está conformada por los nodos B y las RNCs, tiene varias implementaciones físicas como son UTRAN y BRAN.
- CORE: Está conformada por varios componentes dentro de los cuales se encuentran el MSC y el SGSN, sus funciones principales son de transporte de información tanto de tráfico como de señalización; en esta parte se encuentra la inteligencia del sistema, algunas de sus funciones son:
 - Soportar servicios de conmutación de paquetes.
 - Proveer la capacidad de monitorear y medir el flujo de tráfico y características dentro de la red.
 - Solucionar el reto de conectividad entre redes.

En la red UMTS existen varias interfaces las cuales son usadas para interconectar los distintos elementos de la red, algunas de ellas se muestran a continuación:

- Interfaz Uu: Es la interfaz que comunica la red de acceso con el usuario.
- Interfaz Iub: Es la interfaz que comunica al nodo B con la RNC, permite controlar la asignación de frecuencias en el nodo B y controlar los equipos de los radios.
- Interfaz Iur: Es la interfaz que comunica distintas RNCs para intercambiar datos de usuario e información.
- Interfaz Iu: Conecta el CORE con la URAN, está es subdivida a su vez en dos interfaces las cuales son:
 - Iu-CS: Comunica la URAN a dominios de conmutación de circuitos.
 - Iu-PS: Comunica la URAN a dominios de conmutación de paquetes.

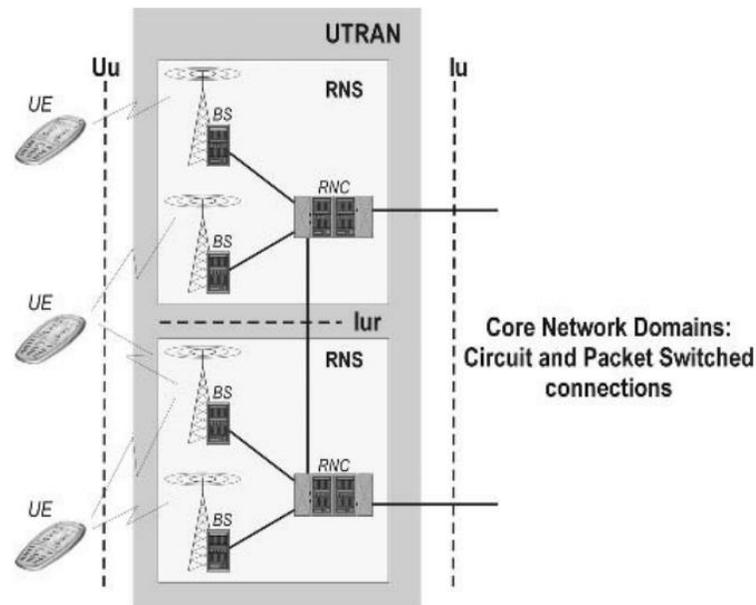


Figura 2. Estructura general de UTRAN [1].

En la figura 2 se muestra la estructura general de UTRAN, en el cabe mencionar que la interfaz Iur es la que comunica los distintos nodos B (BS en la figura) con la RNC.

Debido a que los nodos B son el punto de acceso para los usuarios estos son distribuidos a lo largo y ancho de los países y de esta manera ofrecer los distintos servicios brindados por la compañía de comunicaciones, de forma distinta las RNCs son puntos concentradores que reciben la interfaz Iur de gran cantidad de nodos B; debido a su gran importancia las RNCs son ubicadas en zonas que ofrezcan continuidad de energía, comunicaciones, acceso, seguridad y otros para obtener gran disponibilidad, debido a ello suelen estar concentradas en ciudades principales y suelen recoger el tráfico de uno o varios departamentos.

La red de transporte es la encargada de realizar la interconexión de la interfaz Iur por lo cual es la encargada de soportar el tráfico de los distintos nodos B enviando la información por sus distintos enlaces que pueden al final ser una conexión local o puede transportarse por diferentes departamentos o inclusive hacer parte de una conexión satelital en caso de ser un nodo B ubicado en un sitio remoto. Debido a su característica de llevar la información de la interfaz Iur en la gran mayoría de ocasiones los enlaces de transmisión están soportando el tráfico de más de un nodo B para obtener gran retorno a la inversión y al final obtener más ganancias.

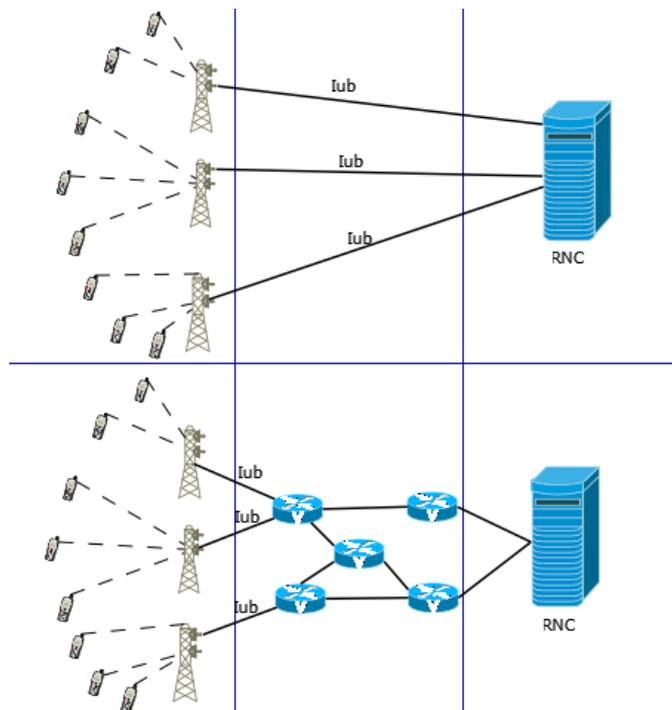


Figura 3. Interfaz Iub en la red UMTS e IP/MPLS.

En la parte superior de la figura 3 se muestra un ejemplo de la red UMTS en la cual existen tres nodos B que se conectan a una misma RNC a través de sus respectivas interfaces IuB, en la parte inferior se evidencia que la interfaces IuB pueden estar siendo soportadas por una red completa de transporte, en este caso se muestra que está conformada por cinco routers, dos de ellos conectados directamente a los nodos B, un router intermedio que realiza interconexión entre varios routers y finalmente dos routers que se conectan con la RNC.

1.3. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN.

Para generar el problema de optimización se pueden acoger dos modelos diferentes los cuales son *nodo-enlace* y *enlace-camino*, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas, por ejemplo, la formulación *nodo-enlace* puede ser resuelto más rápido y eficientemente pero no tiene una base firme ya que no es posible tener todos los posibles caminos para las demandas en cuestión; por el otro lado la formulación *enlace-camino* tiene una estructura más completa pero a su vez implica más recursos en su solución.

A partir de estos dos modelos se han realizado variaciones y se han llegado a nuevos modelos tales como los que se muestran a continuación:

1.3.1. Modelo de optimización de la congestión del LSP (OCL)

Es este modelo se crean diferentes LSPs para los diferentes tráficos que hay en la red, acá se adiciona una nueva restricción al problema de optimización que corresponde a la cantidad máxima de túneles LSPs por nodo. El problema a optimización se muestra a continuación:

Minimizar τ

$$\text{Sujeto a } \sum_{P_d} x_{dp} = 1 \quad d = 1, 2, \dots, D$$

$$\sum_d h_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq c_e \quad e = 1, 2, \dots, E$$

$$x_{dp} \leq u_{dp} \quad d = 1, 2, \dots, D \quad p = 1, 2, \dots, P_d$$

$$\varepsilon u_{dp} \leq h_d x_{dp} \quad d = 1, 2, \dots, D \quad p = 1, 2, \dots, P_d$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp} u_{dp} \leq \tau \quad e = 1, 2, \dots, E$$

Donde:

- τ Es la función a minimizar y el número máximo de túneles LSP.
- x_{dp} Fracción del volumen de la demanda d a ser llevada por el túnel p .
- d Demanda asociada a un par de nodos y a una clase de tráfico.
- D Número total del volumen de demanda.
- h_d Ancho de banda de la demanda d a ser encaminado en la red.
- δ_{edp} Cuando es 1 indica que el túnel p para la demanda d usa el enlace e .
- c_e Capacidad del enlace e .
- E Número total de enlaces existentes en la red.
- P_d Posibles túneles para satisfacer la demanda d .
- u_{dp} En uno (1) indica que el túnel p de la demanda d es seleccionado.
- ε Límite inferior del porcentaje del flujo en el túnel.

1.3.2. Modelo general de asignación de flujo (GFA).

Este modelo se describe por la capacidad de transmisión y el flujo en los enlaces y su función a minimizar puede ser el costo del tráfico, porcentaje de utilización u otros. El modelo se muestra a continuación:

$$\text{Minimizar } \sum_{\beta \in B} \sum_{p \in P_\beta} D_p(x_p)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{p \in Q} x_p \leq C_i$$

$$\sum_{p \in P_\beta} x_p = \gamma_\beta$$

$$x_p \geq 0 \quad \forall p \in P_\beta, \beta \in B$$

Donde:

D_p Costo de flujos de la trayectoria p .

x_p Flujo de la trayectoria p .

B Conjunto de todos los pares origen – destino (OD).

β Par Origen destino perteneciente a B .

P_β Conjunto de todas las trayectorias origen – destino conectadas a un par β .

γ_β Requerimiento de tráfico externo asociado al par origen destino que pertenece a β .

C_i Capacidad del enlace i .

Q_i Conjunto de todas las trayectorias que pasan por el enlace i .

Como se puede evidenciar en este modelo la asignación de los flujos presenta dos restricciones, la primera es la cual evita que a un enlace se le asigne más tráfico que el que pueda transportar, mientras que la segunda restricción indica que el flujo por todas las trayectorias debe ser igual al requerimiento de la capacidad entre dos puntos de la red; cabe destacar que en este caso se está indicando tanto que como un Router de borde (LER) puede atender varias demandas de tal manera que una o varias de ellas pueden ir a otro punto de la red B existiendo la posibilidad de enviar cada una de estas necesidades por una o varias rutas, del mismo modo que la separación de una misma necesidad en varios flujos, por ejemplo, la gestión por una ruta mientras que el tráfico por otra.

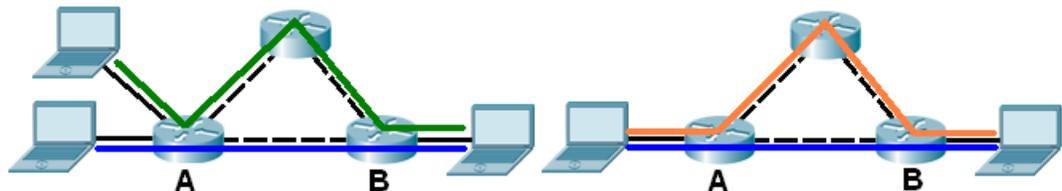


Figura 4. Separación de demandas en redes MPLS.

1.3.3. Modelo de asignación de capacidad y flujo CFA.

Este modelo de red se caracteriza por mirar los parámetros dependientes de la carga o equivalentes a formulaciones de programación no lineal con una formulación nodo – enlace. Debido a que se basa en parámetros dependientes de la carga es perfecto para fomentar la calidad de servicio, esto se debe a que se puede realizar priorizaciones de tráfico en la red por la cual se generan mejores servicios a una o varias clases de tráfico, como puede ser gestión, sincronismo o inclusive servicios para clientes preferenciales.

En su planteamiento se puede formular el problema de dos formas diferentes, la primera es para disminuir el retardo y la segunda para disminuir el costo de las capacidades, para ambos casos la variable no usada se usa como restricción.

1.3.4. Asignación de la capacidad del Buffer (ACB).

En este modelo por cada nodo se le agrega un buffer para cada trayectoria, se modela el tráfico mediante procesos de distribución de Poisson, comportamiento determinístico y planeación Round Robin en donde todos los elementos se distribuyen de manera equitativa.

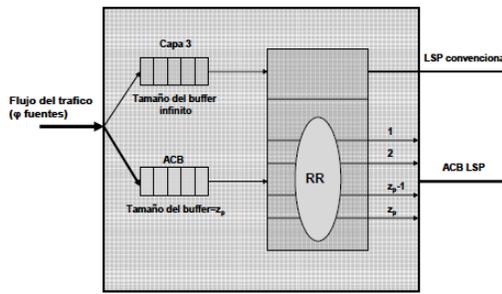


Figura 5. Modelo de colas modelo ACB. [1]

El modelo de asignación de la capacidad del Buffer se basa en el modelo de asignación de capacidad y flujo por lo cual permite realizar priorización de tráfico. En la formulación además de la cogestión en los enlaces se tiene en cuenta la congestión en cada uno de los túneles y la solución depende de las características de las fuentes de información, la distribución de colas y otros.

1.3.5. Optimización de los caminos mediante el uso de multiobjetivos.

En este modelo el algoritmo que crea la tabla de enrutamiento se basa en varios criterios los cuales son definidos por el programador y cuando se hayan definido los mismos son distribuidos por los enrutadores dentro de los paquetes de actualización. Varios criterios pueden ser considerados tales como energía, retardo, errores entre otros.

2. ESPECIFICACIONES

2.1. SERVICIOS TDM (E1S)

En la red a analizar uno de los servicios más priorizados correspondiente a los servicios TDM (E1s) los cuales llevan el tráfico desde las estaciones base 2G (BTS) hasta la BSC, para llevar estos servicios es necesario realizar conversión de conmutación de circuitos a conmutación de paquetes, los RFC 4553 (SAToP) y RFC 5086 (CESoPSN) contienen la información de encapsulación de servicios TDM sobre redes MPLS, la forma general de la trama de estos paquetes se muestra en la figura 6.

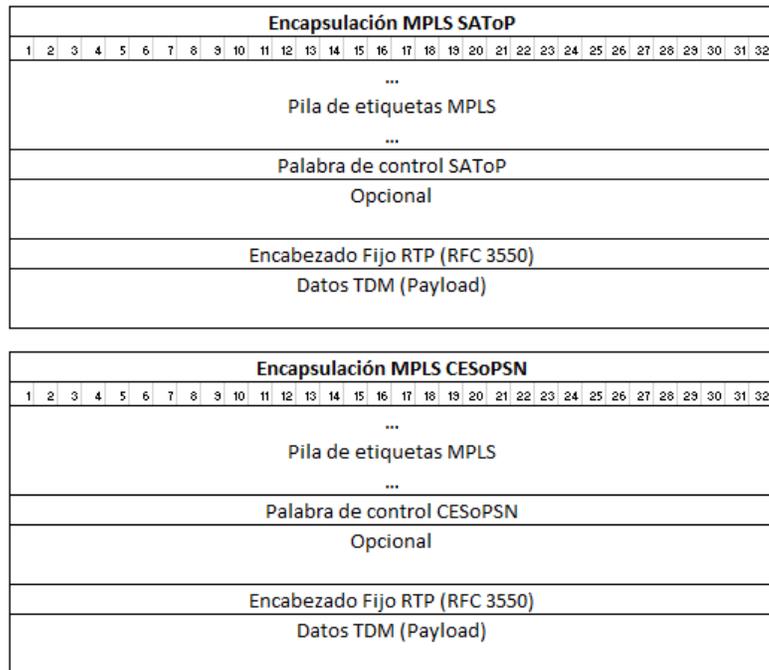


Figura 6. Encapsulación de servicios TDM en redes MPLS.

En la figura 6 se puede apreciar que la única diferencia entre los dos tipos de encapsulación se presenta en la palabra de control, la cual tiene el mismo tamaño en ambos casos.

Respecto a la pila de etiquetas MPLS cada etiqueta comprende los siguientes cuatro campos los cuales son:

- Etiqueta (20 bits): Contiene el número de la etiqueta.

- EXP (3bits): Usada para QoS ya que se pueden usar para identificar la clase de servicio.
- S (1 bit): Sirve para distinguir si hay o no más etiquetas en el paquete.
- TTL (8 bits): Time to live, tiene la misma función que en el protocolo IP.

En la palabra de control se tienen las siguientes posibilidades:

1) SAToP (RFC 4553), tiene los siguientes campos.

- Los primeros cuatro bits se definen en el RFC 4385. Usualmente son cero a menos que sean usados para indicar el comienzo de un encabezado de canal asociado (ACH).
- L (1 bit), indica que la carga útil es inválida debido a falla en el circuito de acoplamiento.
- R (1 bit), indica que CE-Bound IWF (interworking function, convierte TDM en paquetes SAToP) está en estado de pérdida de paquetes.
- RSV y FRG (bits 6 a 9), RSV es *reserved* y FRG es *fragmentation*.
- LEN (bits 10 a 15), indica el tamaño del encabezado SAToP mas carga útil.
- Número de secuencia (últimos 16 bits), usado para proveer la función de secuencia del PW (PseudoWire) también para la detección de pérdida de paquetes.

2) CESoPSN (RFC 5086)

- Los primeros cuatro bits se definen en el RFC4385, usualmente son cero a menos que sean usados para indicar el comienzo de un encabezado de canal asociado (ACH).
- L (1 bit), indica condiciones anormales en el circuito de acoplamiento.
- M (2 bits), permite discriminación de paquetes de señalización y llevar RDI (Remote Defect Indication) del circuito de acoplamiento a través del PSN.
- R (1 bit), indica que CE-Bound IWF está en estado de pérdida de paquete.
- FRG (2 bits) indica fragmentación (RFC 4623).
- LEN (bits 10 a 15), indica el tamaño del encabezado CESoPSN mas la carga útil.
- Número de secuencia (últimos 16 bits), usado para proveer la función de secuencia del PW (PseudoWire) también para la detección de pérdida de paquetes.

Palabra de control SAToP																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	0	0	0	L	R	RSV	FRG	LEN								Número de secuencia															

Palabra de control CESoPSN																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	0	0	0	L	R	M	FRG	LEN								Número de secuencia															

Figura 7. Palabra de control SAToP vs CESoPSN.

El encabezado fijo de RTP está compuesto por los campos que se muestra a continuación:

- V (2bits), indica la versión de RTP.
- P (1 bit padding), indica si hay octetos de relleno al final que no son parte de la carga útil.
- X (1 bit, extention), si es configurado indica que el encabezado fijo tiene que ser seguido por un encabezado de extensión.
- CC (4 bits, CSRC count), indica la cantidad de identificadores CSRC que siguen el encabezado fijo de RTP.
- M (1 bit, market), la interpretación de este campo es definido por un perfil.
- PT (7 bits, payload type), identifica el formato de la carga útil del RTP y determina su interpretación por la aplicación.
- Número de secuencia (16 bits), es usado por quien recibe para detectar perdida de paquetes y restaurar la secuencia de paquetes.
- Marca de tiempo (32 bits), la marca de tiempo refleja el tiempo en que fue muestreado el primer octeto de la carga útil del paquete RTP.
- SSRC (32 bits), indica la fuente de sincronización.
- CCRC list de 0 a 15 ítems, cada uno de 32 bits, indica la cantidad de fuentes que contribuyeron para la creación del paquete RTP, este campo es dado por el campo CC.



Figura 8. Encabezado fijo protocolo RTP.

Para el caso en estudio se tendrá una sola etiqueta, el paquete RTP será conformado solo por una fuente y una carga útil de 256 bytes ya que es la solución brindada para E1s no estructurados, por lo cual este protocolo tendrá 24 bytes de encabezado, posteriormente a esto se le adiciona los encabezados de la capa de enlace de datos que puede ser Ethernet en el cual se tiene 7 bytes de preámbulo, un delimitador de inicio de trama de 1 byte, MAC de destino y de origen de 6 bytes cada una, longitud de datos de 2 bytes, un CRC de 4 bytes y un gap entre tramas de 12 bytes lo cual con los encabezados de MPLS suman 62 bytes adicionales de la carga útil, por lo cual, se pasa de un flujo de 2 Mbps a aproximadamente 2.48 Mbps.

- IWF (Interworking Function): Describe el bloque funcional que segmenta y encapsula TDM en paquetes SAToP.

- PW (PseudoWire) Emulación de un servicio punto a punto en una red de conmutación de paquetes.
- RDI (Remote Defect Indication).
- PSI(Packet Switched Network)
- RTP: Protocolo de transporte para aplicaciones de tiempo real.

2.2. SERVICIOS ETH (INTERFAZ IUB).

Debido a la gran cantidad de nodos que puede tener un operador móvil se hace necesario el uso de sistemas flexibles y extensibles que permitan realizar configuraciones y cambios de los Nodos B sin necesidad de ir a sitio a reconfigurar el nodo con lo cual los operadores móviles pueden adaptarse de manera más fácil a los cambios de las necesidades del mercado así como solucionar los problemas con configuraciones no ideales debido a cambios en el entorno donde se encuentran ubicados los nodos.

Estos sistemas también permiten evidenciar el comportamiento del nodo en diferentes aspectos, uno de ellos corresponde con el uso de la interfaz IuB, la cual es la interfaz que conecta el nodo B y las RNCs que se encuentran en las centrales de los operadores móviles. Al poder tener datos de esta interfaz se pueden obtener información como el tráfico de subida y bajada del nodo B hacia la red (la cual es diferente a la sumatoria de tráfico de subida y bajada desde el nodo B hasta los equipos terminales en todos sus sectores), fallas en la reservación de recursos del nodo B debido a fallas en la red de transporte y otros. Todos estos datos suministrados pueden ser usados para realizar troubleshooting en la red ya que usualmente pueden ser únicamente causada por pocos elementos de la red, por ejemplo, cuando fallas en la reservación de recursos se puede deber a poco ancho de banda asignado al nodo B el cual puede ser por poca capacidad en la red de transporte o limitantes de ancho de banda que se colocan en la RNC para distribuir mejor los recursos entre diferentes radio bases.

Como esta tecnología ha estado presente durante muchos años y el mercado responde positivamente a soluciones que permitan facilidad en la operación y mantenimiento de la red los proveedores de equipos tienen sistemas con funcionalidades muy similares que impiden que este tema sea una brecha importante, algunos sistemas diseñados para brindar estas soluciones son el OSS (Operations Support System) para Nokia-Siemens y el M2000 para Huawei.

Debido al uso de la tecnología IP para transportar esta interfaz existe ganancia estadística en el ancho de banda asignado en el camino ya que este es compartido por diferentes interfaces IuB que tienen el mismo camino hacia la RNC, por lo cual

al usar la topología de la red y los datos usados por los elementos de gestión se pueden realizar optimizaciones sobre la red.

El protocolo más usado en capa de enlace de datos por temas de dinero y facilidad de implementación es Ethernet lo cual implica que el único encabezado que se añade es el correspondiente con las etiquetas de MPLS, el cual al ser de solo 4 bytes se encuentra dentro de la incertidumbre propia de la interfaz.

2.3. CARACTERIZACIÓN INTERFAZ IUB

Al realizar el estudio de la interfaz IuB en las diferentes zonas geográficas del país, discriminadas por departamento, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La capacidad usada en la interfaz IuB usualmente es menor desde el Nodo B hasta la RNC. Cuando sucede lo contrario usualmente se debe a problemas de configuración del nodo o al ancho de banda asignado al nodo B en la red.
- El valor pico de la demanda de la interfaz IuB en bajada (RNC al nodo) usualmente presenta menor varianza que la demanda de la interfaz IuB en subida.
- La mayor varianza de los valores pico de la carga requerida por los nodos B tanto en subida como en bajada se presenta en los departamentos que tienen pocas estaciones base y/o son sitios turísticos como son Amazonas y San Andrés.
- Si se quiere caracterizar el comportamiento de la demanda de la interfaz IuB es conveniente realizar un análisis del posible valor que tendrá la demanda a determinadas horas del día en lugar de seleccionar un valor constante ya que la demanda es variable en el tiempo; esto se presenta con mayor detalle a continuación.

En la figura 9 se evidencia el comportamiento de la demanda de un nodo B; en ella se aprecia que el nodo analizado presentó un valle desde las 2 hasta las 6 de la mañana y un horario pico desde las 3 hasta las 5 de la tarde con lo cual se comprueba que la necesidad de los nodos B es variable en las diferentes horas del día. Sin embargo, cuando se compara el comportamiento de un día respecto a otro, se evidencia que tienen una demanda muy parecida al comparar sus respectivas cargas a la misma hora del día, tal como se aprecia en la figura 10 cada línea representa el valor de la demanda del nodo a una determinada hora, las cuales son graficadas durante 24 días.

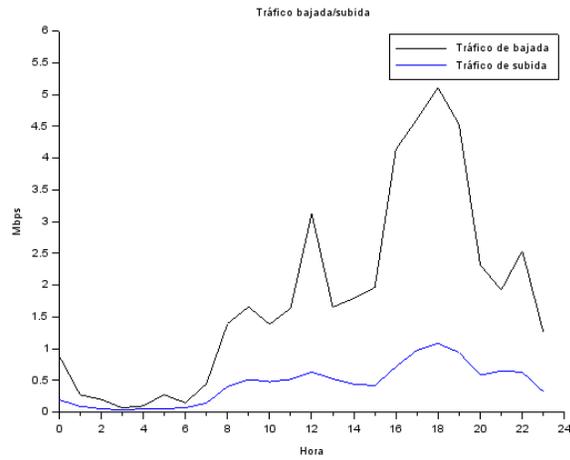


Figura 9. Ejemplo comportamiento diario interfaz luB.

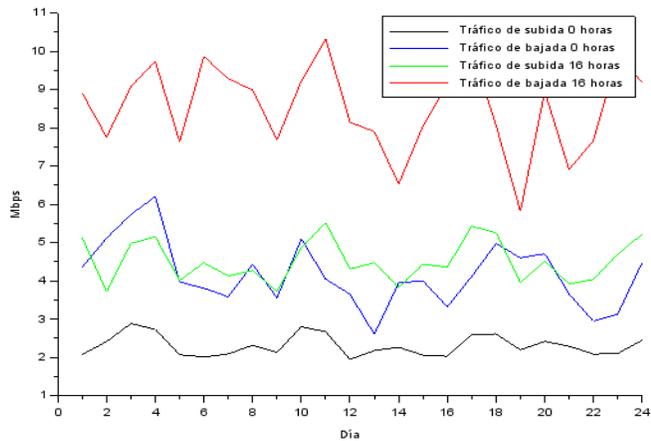


Figura 10. Ejemplo evolución interfaz luB en diferentes días.

En la figura 11 se evidencia que el tráfico de la interfaz luB es bastante variable en el tiempo pero tiende a tener ciclos que se repiten cada día, con lo cual se afirma lo encontrado en la figura 10 la cual muestra que la carga necesitada a una determinada hora va a estar en un determinado rango. La forma como se obtuvieron estos rangos se presenta al final de esta sección.

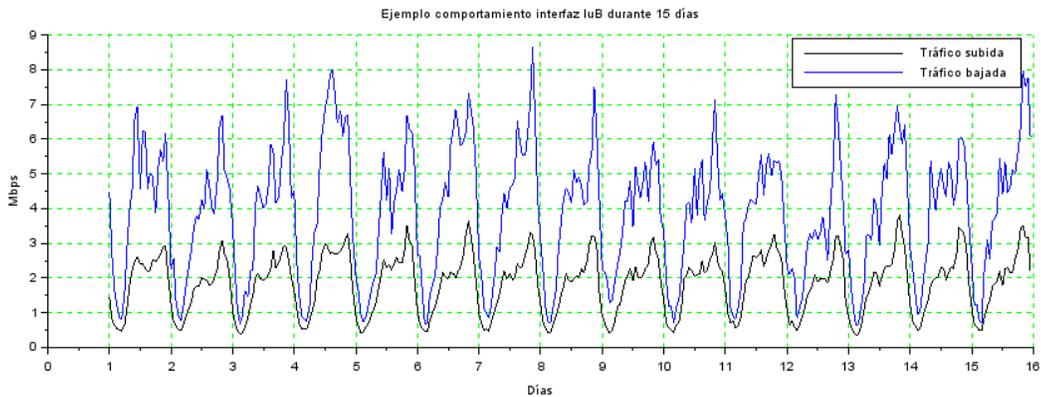


Figura 11. Ejemplo comportamiento interfaz luB durante 15 días con periodos de muestreo de una hora.

Debido a que la demanda de la interfaz luB es variable para las diferentes horas del día, las cargas de los enlaces fluctuarán en el tiempo, sí a esta varianza se le añade que en momentos de falla el tráfico puede desbordarse por caminos alternos un enlace podría ayudar a satisfacer las demandas que hacían uso del enlace en falla, de forma que si la sumatoria de todas las cargas no supera la capacidad del enlace se pueden satisfacer las necesidades de la red sin inconvenientes, pero en caso de superarlo (posiblemente en horario pico) se empiezan a perder paquetes por falta de capacidad en los enlaces saturados, como se pueden apreciar en la figura 12.

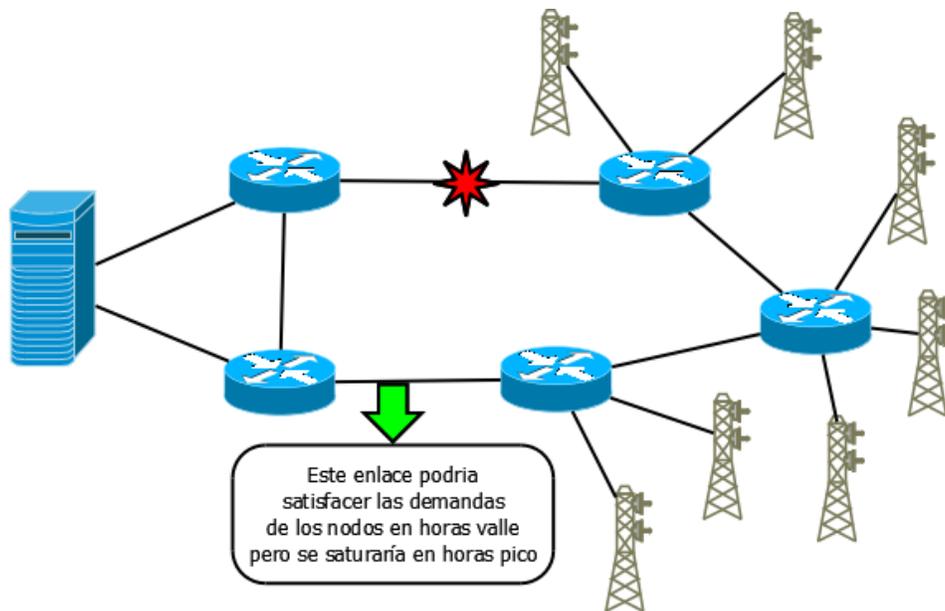


Figura 12. Saturación de enlaces.

Lo anterior hace que para identificar la cantidad de servicios que pueden atenderse y durante qué horario se debe realizar un análisis de las demandas y capacidades de las demandas durante los diferentes momentos del día de forma probabilística.

De esta manera, al tener discriminado el tráfico de los nodos B en las diferentes horas del día se puede realizar análisis del comportamiento que tendría la red en ese momento, lo cual claramente agrega beneficios en el diseño de los caminos principales y de respaldo de cada servicio ya que el diseñador puede asumir una mayor saturación y posible pérdida de paquetes durante ciertas horas del día a cambio de atender más demandas durante otras.

Al realizar el análisis de la carga de la interfaz luB en bajada en más de 3500 nodos B a nivel Colombia se cuantificó la incertidumbre que se presenta en cada uno de ellos y se obtuvieron los rangos en los cuales se espera que la carga se encuentre con diferentes rangos de certeza, los resultados se muestran a continuación:

- El rango para el cual se tiene la probabilidad de tener un 95 % de certeza en el tráfico de bajada de un nodo B se presenta con más o menos un 12% de la media del tráfico de bajada del nodo B.
- El rango para el cual se tiene la probabilidad de tener un 90 % de certeza en el tráfico de bajada de un nodo B se presenta con más o menos un 10% de la media del tráfico de bajada del nodo B.

2.4. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN.

Dentro de la sección 2 se mostraron algunos modelos generales para la optimización de redes MPLS, sin embargo, en ella no se profundizó las modificaciones que se han realizado a algunos modelos para brindar mejores resultados.

Durante esta sección se analizarán a fondo los tres modelos de optimización que habían sido escogidos previamente y se determinaran las ventajas y desventajas que se tienen frente a los otros modelos.

2.4.1. Modelo de asignación de flujo VTP [3].

El modelo de asignación de flujo VTP presentado en [3] muestra un problema de optimización no lineal en el cual la función objetivo trata de reducir dos problemas, el primero de ellos corresponde con la capacidad asignada y congestión de cada túnel creado en la red MPLS, el segundo corresponde con la capacidad de los túneles a usar. Debido a la complejidad para resolver este problema se plantea una solución compuesta de dos partes, la primera de ellas corresponde a resolver la asignación de capacidades respecto a un porcentaje de uso del LSP fijo y la

segunda a encontrar la ocupación de cada LSP con las capacidades ya definidas. Para entender este modelo de optimización podemos empezar mirando el problema original el cual vamos a ir transformando hasta llegar al modelo mostrado en el artículo, este se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad \sum_{\pi \in W} \sum_{p \in P} d_p \left(\frac{x_p}{G_p} \right) x_p \\
 & \text{Sujeto a} \quad \sum_{p \in P} x_p = \gamma_w, \quad x_p \leq G_p, \quad \sum_{p \in P_\pi} G_p \leq C_i \\
 & \quad x_p \geq 0, \quad \forall p \in P_w, \quad w \in W, \quad i \in L
 \end{aligned}$$

En este modelo x_p y G_p son variables de diseño; d_p es la unidad del costo del camino p ; G_p es la capacidad del LSP; x_p/G_p es el factor de utilización del LSP; C_i es la capacidad del enlace i ; x_p es el flujo del LSP p ; γ_w la entrada para el flujo w de una demanda origen-destino; L el conjunto de todos los enlaces.

Como se puede evidenciar la función objetivo está intrínsecamente relacionada con los túneles que se crean en la red MPLS ya que el término entre paréntesis representa su utilización el cual es ponderado por el costo de cada camino y el flujo asociado a cada LSP. Respecto a las restricciones, la primera garantiza que se deben satisfacer todas las demandas, la segunda indica que no debe existir ningún túnel con una ocupación de más del 100 %, mientras que en la tercera restricción se garantiza que la sumatoria de todas las capacidades que usan un enlace nunca superarán la capacidad de ningún enlace dentro de la red, la cuarta restricción especifica que todos los flujos deben ser positivos, con estas cuatro restricciones se garantiza que el resultado pueda ser aplicable dentro de la red MPLS analizada.

Para mayor facilidad en la solución el problema de optimización se reformula realizando un cambio de variable en el cual U_p representa el factor de utilización del LSP, con lo cual el problema se convierte en:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad y = \sum_{\pi \in W} \sum_{p \in P} d_p u_p^2 G_p \\
 & \text{Sujeto a} \quad \sum_{p \in P_w} u_p G_p = \gamma_w, \quad 0 \leq u_p \leq 1, \quad \sum_{p \in P_\pi} G_p \leq C_i \\
 & \quad \forall p \in P_w, \quad w \in W, \quad i \in L
 \end{aligned}$$

En este cambio de variable se puede observar que aunque no se especifica que todos los flujos deben ser mayores de cero, esto está implícito dentro de la segunda restricción en la cual se asegura que el uso del túnel no puede ser menor a cero y

además asegura que no va a existir ningún LSP con una utilización de más del 100%.

Las variables de este modelo de optimización son u_p y G_p , debido a la complejidad de su solución, este problema de optimización puede ser resuelto durante dos etapas que se repetirán cíclicamente, en la primera se trata a u_p como un valor fijo y se resuelve como un problema de optimización lineal para G_p , posteriormente se resuelve el problema para u_p donde G_p es el valor óptimo encontrado en el paso anterior, de manera que el problema a resolver es:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } z = y^* &= \sum_{\pi \in W} \sum_{p \in P_w} d_p u_p^2 G_p^* \\ \text{Sujeto a } \sum_{p \in P_w} u_p G_p^* &= \gamma_w, \quad 0 \leq u_p \leq 1, \\ \forall p \in P_w, \quad w &\in W \end{aligned}$$

Para este problema G_p^* se trata como un valor constante, por lo cual se resuelve como un problema cuadrático respecto a u_p , este problema se resuelve cíclicamente hasta que se llegue a un resultado en el cual la diferencia sea aceptable para el usuario.

*La función D_p puede representar diferentes temas como son distancia física, tasa de utilización, grado de congestión o unidad del costo de flujo del tráfico.

2.4.2. Modelo de asignación de capacidad y flujo ACB [5].

Al igual que el modelo presentado anteriormente este modelo también se basa en la utilización de los túneles LSP ya que determina el valor de cada uno de ellos. La principal diferencia radica en el factor de utilización ya que se puede especificar el uso que cada uno de los túneles podría tener, debido a esta diferencia se pueden asegurar diferentes factores de calidad que se verán reflejados en la congestión y el retardo ya que cada túnel tendrá especificaciones diferentes. A continuación se presenta el modelo propuesto:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } U &= \sum_{\beta \in B} \sum_{p \in P_\beta} (a_p y_p + b_p z_p) \\ \text{Sujeto a } \frac{x_p}{y_p} &\leq q_p, \quad \sum_{p \in P_\beta} x_p = \gamma_\beta \\ x_p, y_p, z_p &\geq 0 \quad \forall p \in P_\beta, \beta \in B \end{aligned}$$

Donde:

U	Costos de la trayectoria p .
x_p	Flujo de la trayectoria p .
y_p	Capacidad de la trayectoria p .
z_p	Tamaño del buffer de la trayectoria p .
B	Conjunto de todos los pares origen – destino (OD).
β	Par origen destino perteneciente a B .
P_β	Conjunto de todas las trayectorias OD conectadas a un par β .
a_p	Unidad de costo de la capacidad de la trayectoria p .
b_p	Unidad de costo del buffer de la trayectoria p .
q_p	Límite superior de la trayectoria p .
γ_β	Requerimiento de tráfico asociado al par OD que pertenece a β .

Como se puede evidenciar la función a minimizar está compuesta de dos partes, el primer término está relacionado con la capacidad y el uso de cada LSP en la red mientras que el segundo término se relaciona con el uso de cada buffer en la red MPLS.

Las restricciones del modelo aseguran:

1. Cada túnel debe tener una congestión menor a un valor q_p , primera restricción.
2. Se deben satisfacer todas las demandas ya que la sumatoria de todos los flujos relacionados es igual a la capacidad a satisfacer, segunda restricción.
3. Todos los flujos y capacidades deben ser positivos, esto se asegura con la tercera restricción.

Un aspecto que es de importancia destacar en el presente modelo es que a diferencia de los otros modelos mostrados durante esta sección este es el único que no verifica dentro de sus restricciones que la capacidad de cada enlace debe ser mayor a la sumatoria de todas las cargas que son transportadas por este enlace.

2.4.3. Modelo IGP/MPLS [4].

El modelo de optimización IGP/MPLS presentado en [4] tiene presente el comportamiento del sistema cuando existen fallas en la red, para realizar ello la función objetivo a minimizar es la máxima utilización de los enlaces, la cual es analizada en la falla de cada uno de los enlaces.

En las restricciones se especifica el comportamiento que tendría el sistema ante la falla de cada uno de sus enlaces; para llevarlo a cabo el modelo de optimización distribuye el tráfico mediante dos formas del establecimiento de las rutas de los túneles, la primera corresponde a caminos creados por el protocolo de enrutamiento en el cual dicho protocolo indica el camino que seguirá cada uno de los túneles

calculando la ruta de menor costo con las métricas existentes en la red, mientras que la segunda forma corresponde al protocolo MPLS-TE en el cual el usuario muestra el camino por el cual debe pasar el tráfico asociado a los túneles, a continuación se presenta el modelo de optimización:

$$\begin{aligned}
 & \min u_{max} \\
 & \sum_{h \in K} is^h x_{ij}^h + \sum_{p: (i,j) \in p} f_p \leq u_{max} c_{ij} \\
 & \sum_{p \in P^h} f_p = d_h - is^h \\
 & \sum_{h \in K} is^h x_{ij}^{hl} + \sum_{h \in K} \sum_{p \in P^h: l \in p} f_p x_{ij}^{hl} + \sum_{p: (i,j) \in p, l \notin p} f_p \leq u_{max} c_{ij} \\
 & f_p \geq 0 \\
 & is^h \in [0, d^h]
 \end{aligned}$$

Los datos de la red con los que se implementa la optimización son:

- N Conjunto de nodos.
- A Conjunto de enlaces.
- K Conjunto de demandas.
- c_{ij} Capacidad del enlace $(i,j) \in A$, [bits/s]
- d^h Demanda de tráfico de h , $h \in K$, [bits/s]
- x_{ij}^h Fracción de la demanda del tráfico de h , que es transportado por el protocolo de enrutamiento IS-IS/OSPF por el enlace (i,j) .

Por su parte las variables del modelo de optimización son:

- u_{max} Máxima utilización de todos los enlaces en la red.
- is^h Tráfico de la demanda d^h que es transportado por el protocolo de enrutamiento.
- f_p Tráfico de la demanda d^h que es transportado por el protocolo MPLS-TE.

En la figura 13 se presenta el comportamiento del modelo, para ello se analizan los túneles establecidos para satisfacer la demanda entre el Punto A y el Punto B de la figura. En este modelo la demanda es distribuida en dos flujos, el primero de ellos es soportado por los túneles creados por el protocolo siguiendo las métricas del protocolo IGP (camino mostrado por la línea naranja), mientras que el segundo de ellos es transportado por túneles de MPLS-TE preestablecidos por el usuario (los caminos son representados en color verde, en línea continua el principal y en discontinua el secundario), en la parte *a* se muestran los caminos establecidos, en este caso la demanda seguirá los caminos mostrados por las líneas continuas; en la parte *b* de la figura se muestra la falla en un enlace que hacía uso del camino principal del túnel creado para MPLS-TE, para este caso el tráfico será manejado

por el camino secundario el cual es mostrado en la línea discontinua de color verde; finalmente en la parte c de la figura se muestran los caminos que transportarán las demandas en el cual previamente se presentó una falla en un enlace usado por los caminos del protocolo IGP y principal de MPLS-TE, en este caso el protocolo IGP actualiza sus tablas de enrutamiento y encuentra un camino alternativo, mientras que el túnel de MPLS-TE es conmutado al camino secundario.

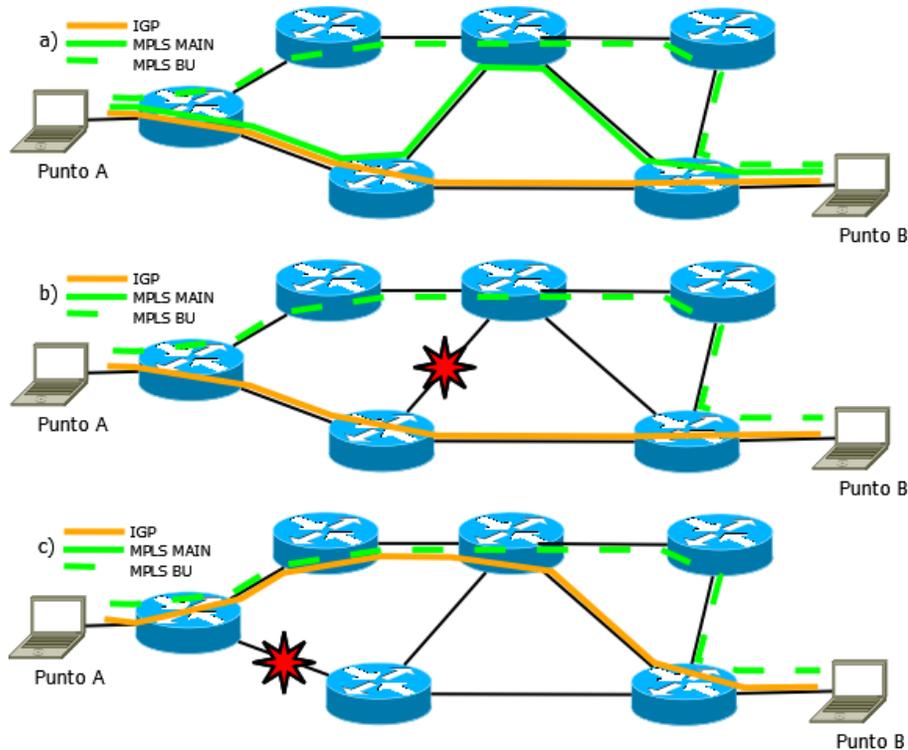


Figura 13. Modelo optimización IGP/MPLS.

La principal diferencia de este modelo respecto a los modelos de optimización anteriores corresponde a la tercera restricción ya que verifica el comportamiento del sistema ante la falla de cada enlace en la red, en esta restricción la primera sumatoria corresponde al efecto que tendrá la carga transportada por cada túnel creado por el protocolo de enrutamiento cuando hay falla en el enlace I , la segunda sumatoria corresponde con el tráfico que es manejado por MPLS-TE cuando hay falla en el enlace I y este hace parte del camino principal, es decir, cuando hay falla en un enlace y es necesario conmutar a una ruta secundaria especificada en el túnel por el usuario para cada una de las demandas afectadas, la tercera sumatoria corresponde con el tráfico que es manejado por MPLS-TE cuando hay falla en el enlace I y este no hace parte del camino principal, es decir, las rutas principales para MPLS-TE para cada una de las demandas cuyo camino principal no hace uso del enlace I .

Como se puede apreciar este modelo de optimización tiene en cuenta el comportamiento del sistema ante fallas y depende en gran medida de los caminos pre-establecidos como principal y secundario para cada demanda. Debido a la última restricción donde se especifica que is^h varía entre cero y el valor de la demanda el programa es de optimización es lineal, lo cual agrega grandes facilidades en su solución.

Este modelo de optimización presenta grandes ventajas respecto a los dos expuestos anteriormente ya que presenta mejor comportamiento ante fallas, sin embargo, está diseñado para asegurar el cien por ciento de recuperación ante fallas, esto es muy factible en redes en las cuales se tiene por lo menos dos caminos independientes por cada nodo, sin embargo, no es posible su implementación en todas las redes ya sea porque todas las rutas comparten un mismo enlace o porque la capacidad de un enlace se vuelve un cuello de botella ante falla de otro enlace de la red.

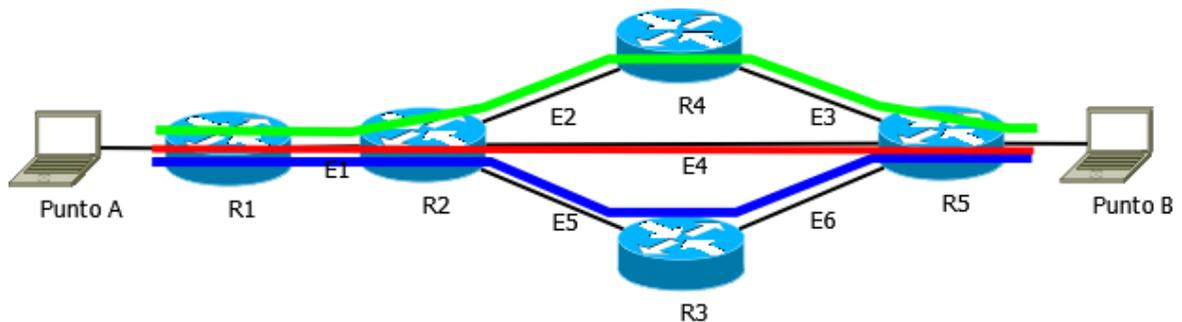


Figura 14. Túneles que hacen uso de un mismo enlace.

En la figura 14 se presenta una red compuesta por cinco enrutadores y seis enlaces en la cual se muestran tres posibles túneles que se pueden establecer entre el punto A y el punto B, el primero de ellos el de color verde que hace uso de los enlaces E1, E2 y E3, el segundo hace uso de los enlaces E1 y E4 de color rojo y el tercero de ellos hace uso de los enlaces E1, E5 y E6 de color azul, con lo cual el uso del enlace E1 es mandatorio independientemente de cual camino vaya a ser usado, esto hace que en ocasiones no se pueda satisfacer el cien por ciento de las demandas ante fallas ya que si falla el enlace E1 no hay forma de establecer un camino entre el origen y destino de la demanda, en este caso desde el punto A y el punto B, mostrado a la izquierda y derecha de la figura 14 respectivamente.

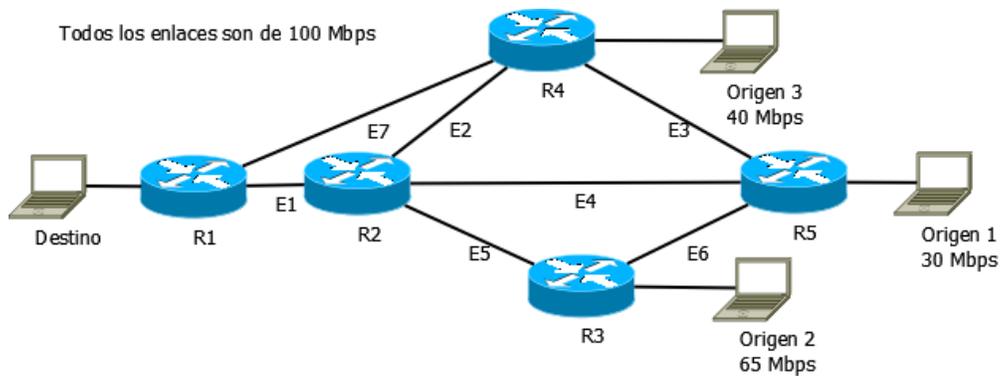


Figura 15. Red para priorización de tráfico ante fallas

En la figura 15 se muestra una red en la cual existen tres demandas las cuales tienen un mismo destino el cual es la red que está conectada al router R1, identificada en la figura como *destino*. Si todos los enlaces son de 100 Mbps se puede observar que todas las demandas se pueden satisfacer sin problema, pero en caso de falla del enlace E1, el enlace E7 se saturará y viceversa, con lo cual se presentarán graves problemas en todos los servicios.

Debido a que todos los servicios pueden tener una importancia diferente se puede aprovechar esta complejidad para crear servicios priorizados sobre la red que puedan estar con mayor disponibilidad que servicios no priorizados, un ejemplo se muestra en la figura 16 donde se observa que la demanda procedente del origen 1 tiene una prioridad alta, mientras que las demandas procedentes del origen 2 y origen 3 tienen una prioridad baja, con lo cual se debe asegurar que la demanda del origen 1 se satisfaga aunque no se satisfagan las demás demandas.

La figura 16 está compuesta de tres partes, en la parte A se muestran los caminos principales (color verde) y caminos secundarios (color rojo) para cada túnel, en él se observa que existen tres caminos principales y solo hay un camino secundario el cual está asociado con el túnel que transportará la demanda de prioridad alta. En la parte B se muestra los caminos que usaran los túneles en caso de falla del enlace E7, en él se evidencia que no hay caminos disponibles para el origen 3 pero se encontraría en funcionamiento el camino secundario de la demanda del origen 1 y el camino principal de la demanda 2; de la misma forma en la parte C se muestran los caminos que se encontrarán disponibles en caso de falla del enlace E1, en él se evidencia que se encuentran disponibles los caminos principales de las demandas del origen 3 y origen 1, mientras que la demanda del origen 2 no tiene forma de ser establecida ya que no tiene caminos de respaldo a ser usados. En este caso se muestra que la demanda del origen 1 (prioridad alta) es la única que se va a satisfacer en caso de falla de un único enlace en la red, las otras dos demandas estarán disponibles dependiendo si están todos los enlaces disponibles o en caso de cual enlace se presente falla.

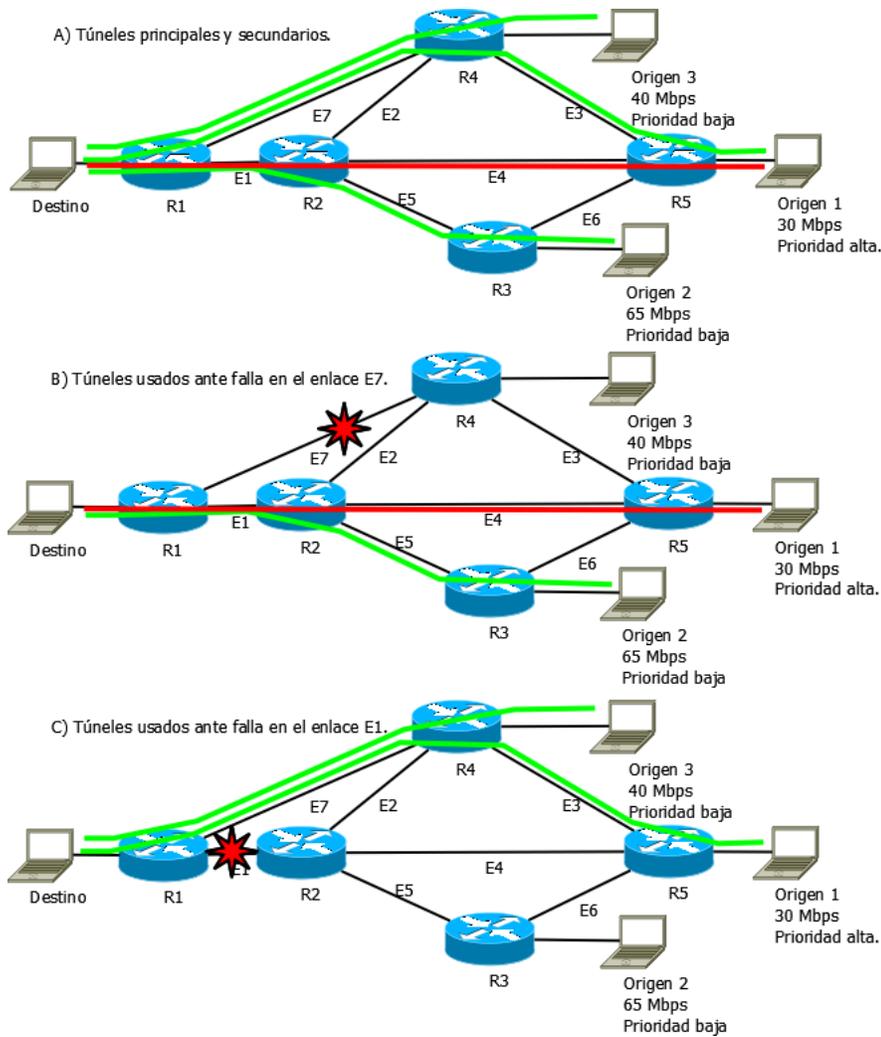


Figura 16. Priorización de servicios.

Como se puede apreciar en el ejemplo de la figura 16 hay una manera diferente en la cual se pueden abordar el problema de la creación y disponibilidad de rutas con priorización de servicios ante fallas de enlaces, en este punto se observa que los modelos propuestos presentan muy buenos resultados cuando la red se encuentra sin fallas e inclusive cuando la red puede satisfacer todas sus demandas cuando hay falla en un solo enlace en la red, pero en ninguno de estos modelos se analizó el problema de satisfacer todas las demandas cuando todos los enlaces de la red se encuentra operativos y satisfacer la mayor cantidad de demandas cuando hayan falla en cualquiera de sus enlaces sin superar la capacidad de sus enlaces realizando priorización sobre los servicios más importantes dentro de la red.

Para realizar ello se puede basar en el modelo de Anna Mereau, en el cual se verifica la capacidad de todos los enlaces ante la falla de cada uno de ellos, sin

embargo, la función objetivo se modificaría para penalizar de mayor manera el no atender servicios no prioritarios.

3. DESARROLLOS

3.1. SIMULACIÓN.

Debido a la existencia de múltiples modelos de optimización es necesario la validación de los resultados de cada uno de ellos. Por esta razón el modelo de simulación es el encargado de realizar esta confirmación para ello el modelo obtiene datos relevantes de la capacidad de la red usada así como de la cantidad de servicios atendidos.

El modelo de simulación se encarga de emular los diferentes caminos que usaran cada una de las demandas cuando hay falla en cada uno de sus enlaces así como cuando todos se encuentran operativos, tomando datos de la capacidad usada en cada uno de sus enlaces y llevando el conteo de cuantos servicios no se pueden satisfacer ante la falla de cada enlaces.

Para realizar lo anterior, lo primero que se necesita es tener la topología de la red a analizar. Para ello se deposita la información de los enlaces en una tabla que contenga las características técnicas relevantes, para el modelo actual se deposita la información de los enlaces que conectan los diferentes enrutadores, especificando los routers a los que conecta, la capacidad y la disponibilidad de cada enlace. Estos parámetros son de vital importancia ya que unos de los elementos de salida corresponden al uso de cada enlace.

Para mayor claridad en la figura 17 se muestra la topología de una red, la cual posteriormente se caracterizará para obtener los datos necesarios para la simulación.

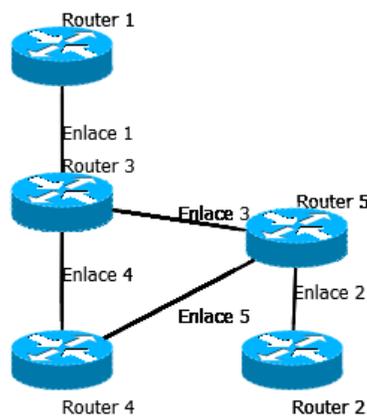


Figura 17. Ejemplo red de simulación

La figura 17 se puede representar mediante una tabla que contenga los datos necesarios en la simulación, para ello se deposita la información en la tabla demandas la cual puede ser usada por el programa de simulación, en la tabla 1 se muestra la tabla usada en la simulación.

Enlace	Router Origen	Router Destino	Capacidad	Disponibilidad
1	1	3	100	0.99
2	2	5	100	0.99
3	3	5	100	0.99
4	3	4	100	0.99
5	4	5	100	0.99

Tabla 1. Enlaces del ejemplo de la red de simulación.

Posteriormente al conocimiento topológico de la red a analizar es necesario establecer el conjunto de demandas origen-destino de cada una de ellas, para realizar ello se puede acceder a los elementos de gestión y establecer cuáles son los enrutadores por los cuales ingresan cada uno de los nodos B que se encuentran en la red a analizar y adicionar la cantidad de servicios E1s operativos.

Una vez establecida la cantidad de demandas origen-destino se procede a realizar el cálculo de la capacidad necesitada en las diferentes horas del día para lo cual se establecen dos clases:

- El tamaño de paquete de la interfaz luB tienen aproximadamente el mismo tamaño de los paquetes cuando se le adiciona las etiquetas del protocolo MPLS motivo por el cual una muy buena aproximación para el tráfico usado corresponde con los datos obtenidos por los sistemas de gestión y monitoreo de los nodos B, los cuales se obtienen desde herramientas centralizadas.
- El tráfico TDM correspondientes a E1s por su característica de ser constantes en el tiempo se pueden representar mediante un ancho de banda requerido igual al tráfico transportado más los encabezados adicionales que se necesitan para su emulación en la red IP, como se analizó en secciones anteriores los encabezados adicionales correspondientes con Ethernet, el protocolo RTP y MPLS hacen que el flujo de E1s pase de 2Mbps a 2.48 Mbps, cabe destacar que diferentes proveedores pueden establecer diferentes formas de emular estos servicios E1s por lo cual se tiene que analizar cada situación en particular.

En la herramienta de simulación todas las demandas son sumariadas en una tabla que contiene el número de demanda, los routers origen-destino, la capacidad usada

tanto en subida como bajada así como la hora del día en la que se presenta este tráfico, en la tabla 2 se muestra un ejemplo de la tabla demandas.

Demanda	Tráfico UL	Tráfico DL	Origen	Destino	Hora	Prioridad
1	0.489	1.144	1	5	0	1
1	0.971	1.981	1	5	1	1
1	1.244	2.498	1	5	2	1
1	1.47	2.401	1	5	3	1
1	1.669	2.952	1	5	4	1
1	0.993	2.112	1	5	5	1
1	0.14	0.299	1	5	6	1
1	1.747	2.743	1	5	7	1
1	0.998	2.256	1	5	8	1
1	0.308	0.591	1	5	9	1
1	1.8	2.806	1	5	10	1
1	1.194	2.512	1	5	11	1
1	0.22	0.447	1	5	12	1
1	0.205	0.507	1	5	13	1
1	0.505	0.913	1	5	14	1
1	0.941	1.593	1	5	15	1
1	1.347	2.486	1	5	16	1
1	1.485	2.934	1	5	17	1
1	0.289	0.573	1	5	18	1
1	1.563	3.192	1	5	19	1
1	0.564	1.969	1	5	20	1
1	0.153	0.326	1	5	21	1
1	0.114	0.28	1	5	22	1
1	1.897	2.978	1	5	23	1

Tabla 2 Ejemplo tabla demandas.

Una vez establecida la topología y la matriz de demanda se procede a calcular cual es la ruta que seguirá cada una de las demandas, para ello se toma la información de los enlaces que usan las demandas, la ruta principal siempre es obtenida con el resultado de cada modelo de simulación, la salida de cada uno de ellos representa el uso de cada SDP, ya sea mediante su obtención directa en el modelo de asignación de flujo ACB e IGP/MPLS o la multiplicación de la capacidad de cada LSP por su uso en el modelo de asignación de flujo VTP.

Toda la información de las rutas estrictas creadas para ingeniería de tráfico son depositadas en tablas las cuales posteriormente son procesadas por el modelo de simulación, en la Tabla 3 se muestra un ejemplo de las tablas usadas para especificar el camino de cada una de las demandas.

Demanda	Primer Enlace	Segundo Enlace
1	1	3
2	2	0
3	3	0
4	5	0

Tabla 3. Tabla de rutas principales

Como se puede apreciar en la tabla 3 en ella se especifica los enlaces por los cuales fluirá cada demanda, cabe resaltar que cuando aparece un enlace con el valor de cero (0) quiere decir que ya no se necesitan más enlaces ya que se ha llegado al destino.

Una segunda opción a las tablas donde se especifica los enlaces por los cuales fluirá cada una de las demandas corresponde al cálculo de las mismas mediante el protocolo de enrutamiento OSPF, este es usado para calcular las rutas secundarias cuando se especifica en la entrada del modelo de simulación que las rutas secundarias no est n preestablecidas sino que son calculadas mediante el protocolo OSPF.

Debido a que un enrutador puede ser el medio mediante el cual se reciben múltiples demandas que pueden tener prioridades distintas, el protocolo OSPF es el encargado de obtener la ruta con la menor métrica cuando hay falla en uno de sus enlaces, posteriormente esta información es usada para calcular la ruta de cada demanda ya que se conoce el nodo origen y destino de las mismas.

El diagrama del protocolo OSPF implementado se muestra en la figura 18, en ella se aprecia que el protocolo empieza de la información suministrada de la topología de la red (la cual es obtenida de la tabla de enlaces) posteriormente asigna una métrica de infinito a todos los demás enrutadores, a partir de ese momento empieza a calcular cual es el router con la menor métrica (en comienzo el mismo) y analiza los enlaces que se conectan a este verificando si la métrica del router adyacente es menor mediante el enlace usado, si es así la métrica al nuevo enrutador es modificada al igual que la ruta para llegar al mismo, eso se realiza sucesivamente hasta analizar todos los enlaces conectados, una vez analizados todos los enlaces el router sale de análisis y se continua con el siguiente que tiene la métrica menor y así sucesivamente hasta culminar con todas las posibles rutas que se pueden establecer, la salida de este bloque corresponde a los enlaces usados para alcanzar los diferentes enrutadores, el comportamiento se muestra a continuación:

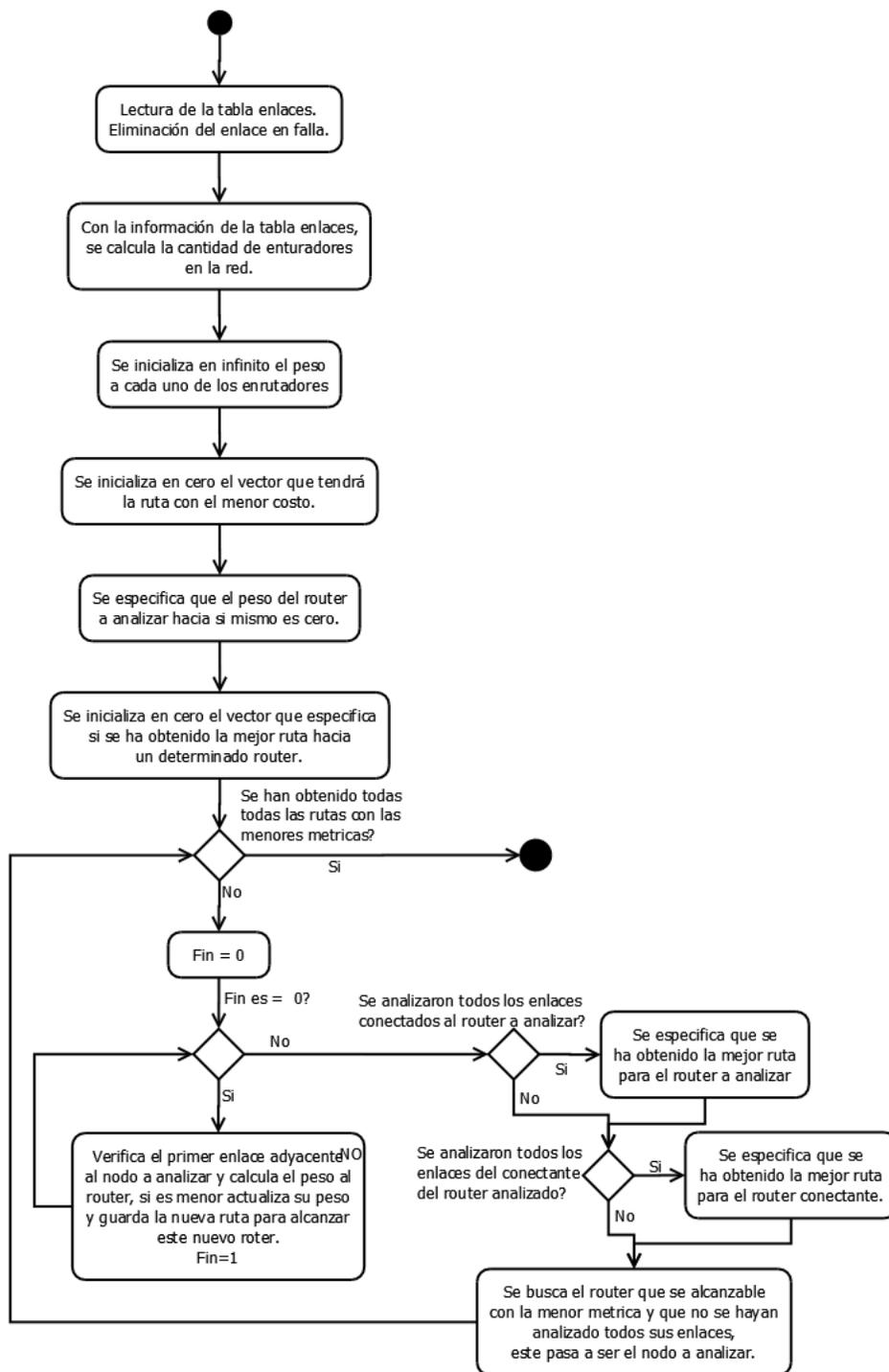


Figura 18. Diagrama de flujo del protocolo OSPF.

Una vez entendido el funcionamiento y la salida del bloque OSPF se puede entrar a analizar la rutina encargada de calcular las rutas secundarias, este bloque es el envía al programa principal las rutas secundarias que se deben analizar para

determinar si las distintas demandas del sistema se pueden establecer o no. Para ello el programa verifica si las rutas secundarias son calculadas mediante OSPF o no. Si las rutas secundarias son calculadas por OSPF el programa llama la función OSPF y en ese momento relaciona las diferentes demandas con el resultado obtenido de la función OSPF, en caso contrario cuando las rutas secundarias son preestablecidas, el programa empieza asumiendo que todas las demandas son inalcanzables para lo cual evalúa si se puede establecer una ruta secundaria con las rutas preestablecidas, en tal caso actualiza la tabla que contiene la información de las rutas secundarias que van a ser la salida de la función, este comportamiento se presenta con más detalle en la figura 19.

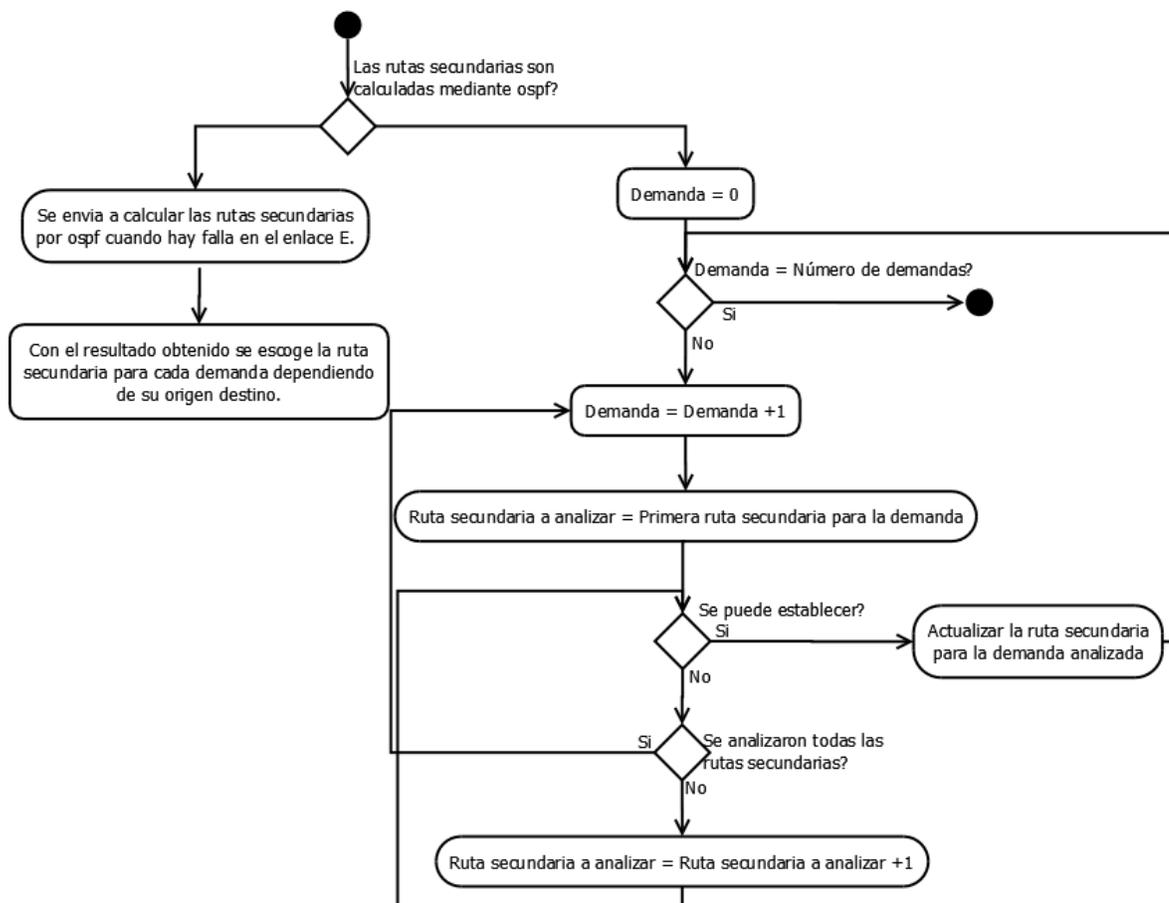


Figura 19. Diagrama bloque rutas secundarias.

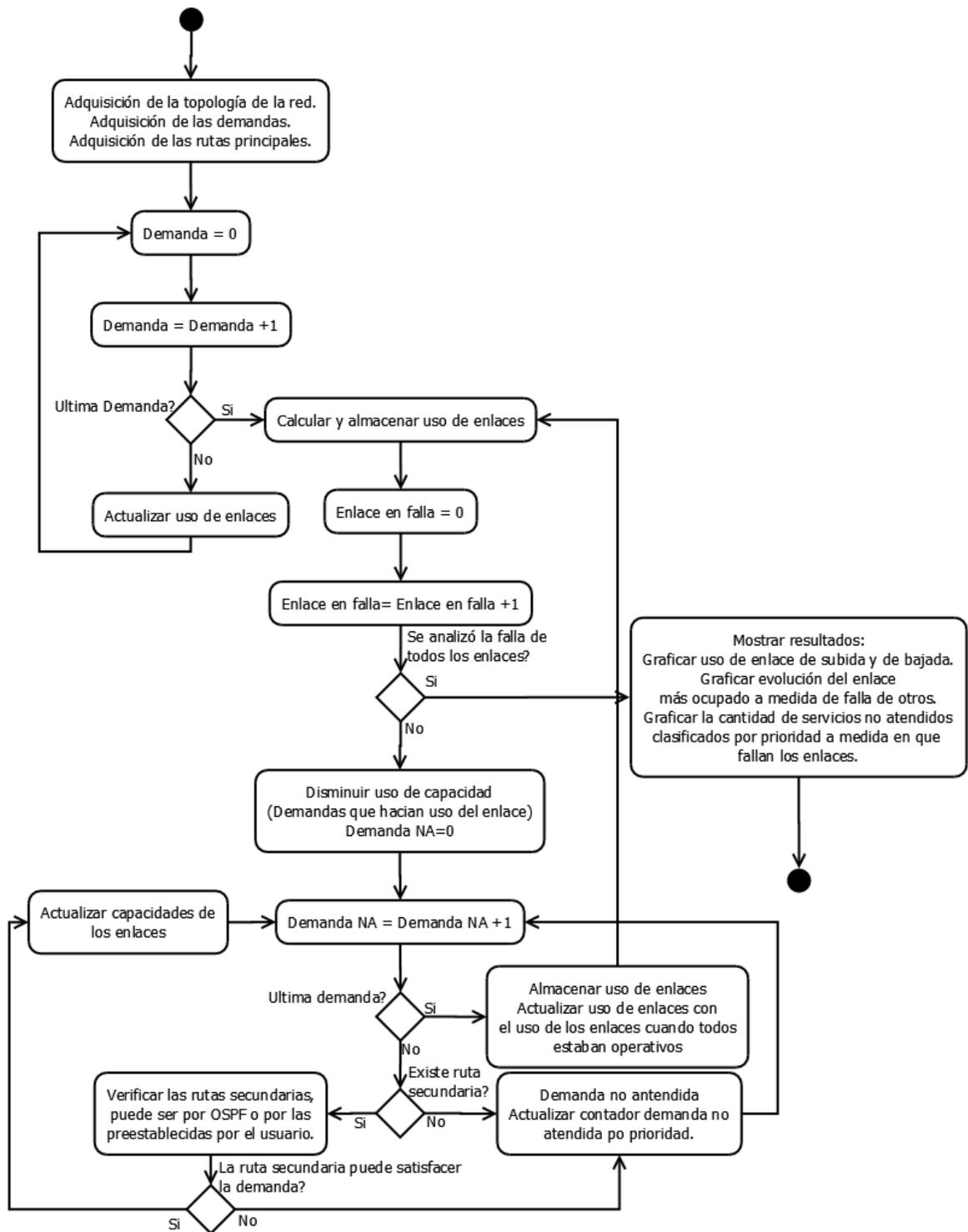


Figura 20. Diagrama de Flujo programa de simulación.

Como se puede apreciar en la figura 20 el programa de simulación primero calcula la ocupación de los enlaces cuando la red se encuentra sin fallas, para ello

establece una matriz en la cual va almacenando el tráfico en ambos sentidos de los enlaces de la red, esta matriz se va actualizando a medida que analiza cada demanda ya que la capacidad requerida se adiciona a los la capacidad usada de los enlaces que hacen parte del camino, una vez finalizado el análisis de todas las demandas, el programa guarda el valor de la ocupación de los enlaces y procede verificar que pasa cuando hay falla en cada uno de los enlaces, para ello empieza simulando falla en el enlace número uno (1), verifica si cada una de las demandas hacia uso del enlace en falla, en caso de hacer uso el programa decrementa la capacidad requerida de la demanda en todo el camino previo y procede a verificar si existe alguna ruta secundaria, para ello llama la función mostrada en la figura 19 y con esta entrada procede a verificar el establecimiento de la ruta secundaria, si puede realizar su establecimiento adiciona la capacidad de la demanda en cada uno de los enlaces que hacen parte del nuevo camino, en caso contrario aumenta los contadores de la cantidad de servicios no atendidos clasificándolos por su prioridad, al finalizar el análisis de todas las demandas guarda el resultado de la capacidad de todos los enlaces y de los contadores y procede a analizar el comportamiento que tendrá el sistema cuando hay falla en el siguiente enlace, para ello carga la información de la ocupación de los enlaces cuando todos se encuentran operativos y se reinician los contadores de servicios no atendidos, esto se realiza cíclicamente hasta verificar el comportamiento del sistema ante la falla de cada uno de sus enlaces.

La salida del modelo de simulación son varias graficas que muestran la evolución del sistema ante la falla de cada uno de sus enlaces, estas representan los parámetros a analizar para determinar cuál es el modelo que tiene los mejores resultados:

1. La primera gráfica que se muestra es la que relaciona la cantidad de servicios no atendidos ante la falla de cada uno de los enlaces, para ello se muestran tres comportamientos, cada uno de ellos representa la cantidad de servicios no atendidos clasificados en las tres prioridades establecidas previamente.

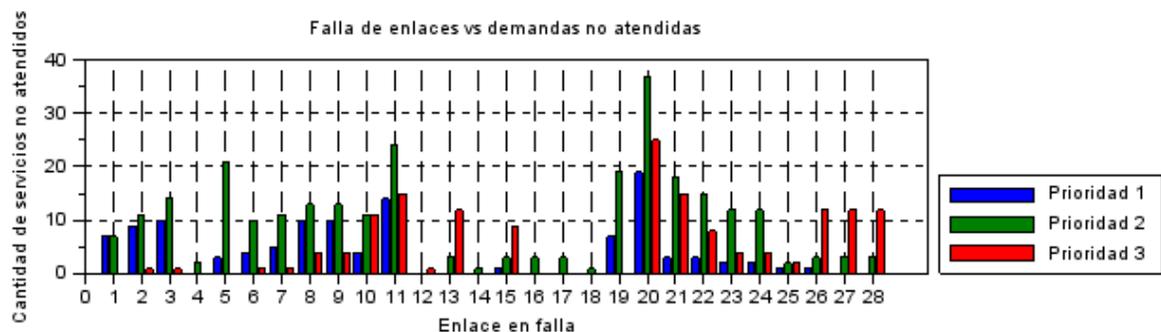


Figura 21. Falla de enlaces vs demandas no atendidas.

- Otra gráfica que se muestra corresponde a la máxima ocupación de los enlaces, para ello se verifica la máxima ocupación porcentual de cada uno de los enlaces a medida que estos van fallando.

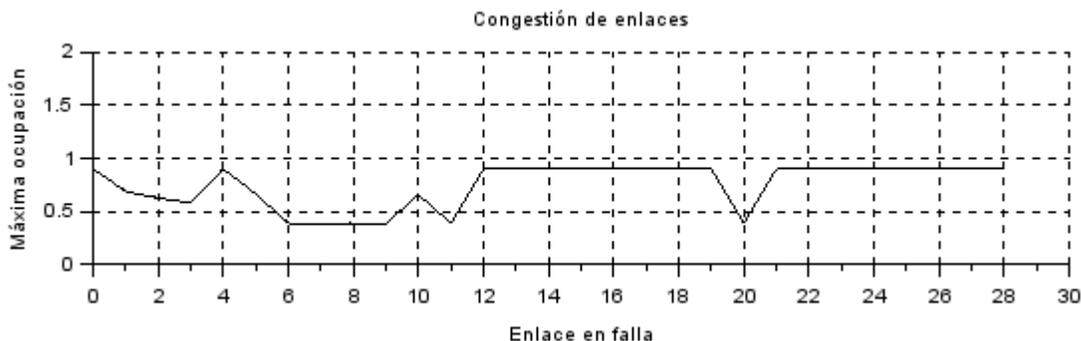


Figura 22. Máxima ocupación vs enlace en falla.

- Debido a que ya se conoce la máxima ocupación que se presenta cuando hay falla en cada uno de los enlaces también resulta útil conocer cual enlace es el que está presentando esta congestión, por tal razón se presenta una gráfica en la cual se especifica cual enlace es el que presenta la mayor congestión:

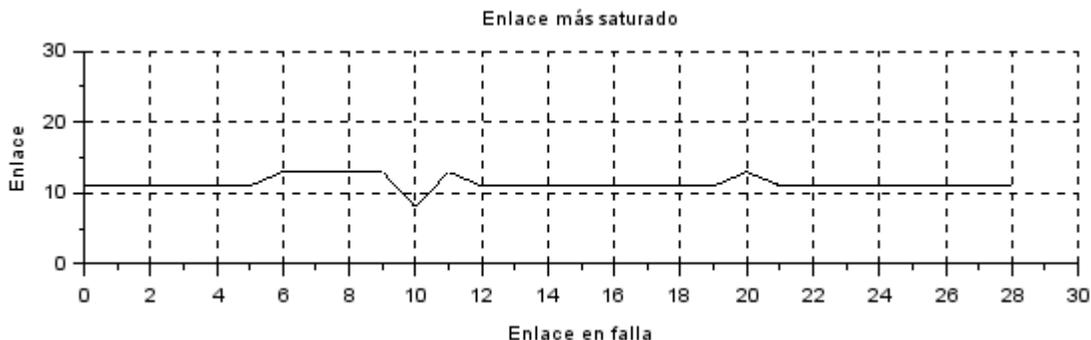


Figura 23. Enlace más saturado vs enlace en falla.

- También se presenta la gráfica tridimensional del enlace más ocupado cuando el sistema se encuentra sin fallas, en uno de sus ejes es representada la ocupación del enlace en Mbps, el segundo eje corresponde con la falla de cada uno de los enlaces en la red y finalmente el tercer eje representa el comportamiento que tendrá a las diferentes horas del día.

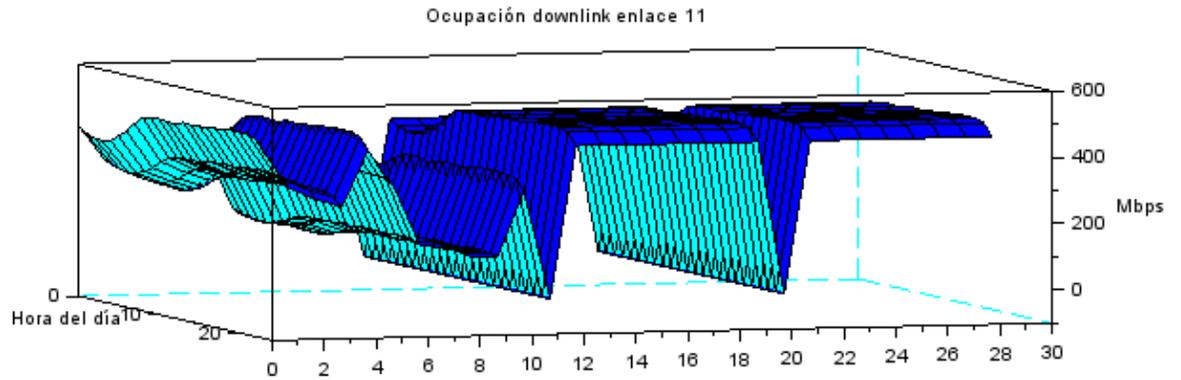


Figura 24. Gráfica tridimensional ocupación de enlace.

- Finalmente se muestra la incidencia que tendrá la falla de cada enlace en la red, realizando la conversión entre cantidad de servicios no atendidos por la falla del enlace con la disponibilidad del mismo, como se puede apreciar a continuación.

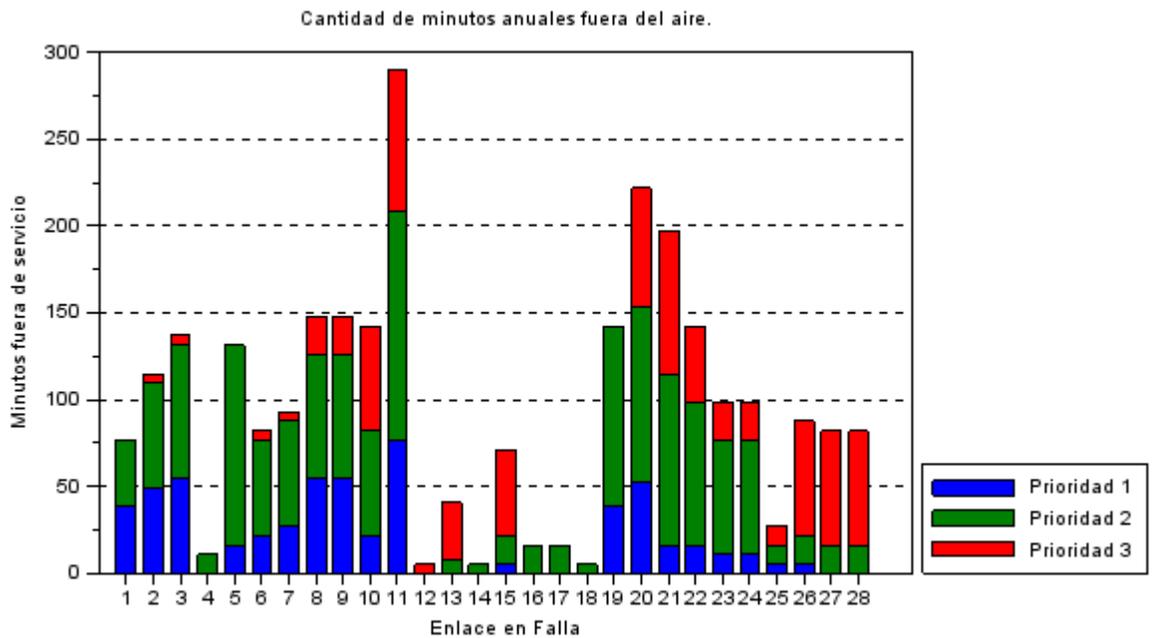


Figura 25. Incidencia en el tiempo fuera de servicio por falla de enlaces.

- En caso de requerir el comportamiento de otro enlace en la red diferente al ya mostrado existe una función que permite realizar la gráfica del uso del enlace en Mbps contra las diferentes horas del día y ante la falla de los enlaces en la red.

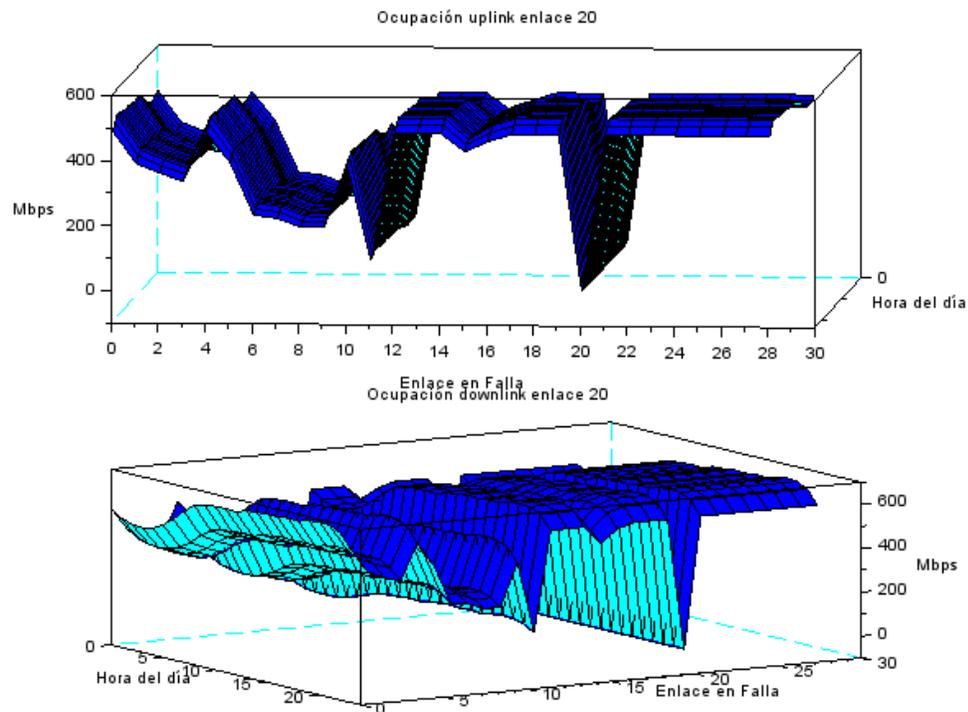


Figura 26. Gráficas tridimensionales de la ocupación del enlace en uplink y downlink.

3.1.3. Red de Prueba

Debido a la falta de fibra óptica que se presentaba en muchas zonas del territorio colombiano esto forzó a las empresas de telefonía celular a realizar despliegues de su red de transporte por medio de enlaces de microondas ya que las necesidades del mercado no requerían grandes anchos de banda y resultaba más económico en su despliegue. Esto generó grandes cadenas de enlaces de microondas que unían routers comúnmente en una topología de árbol. Posteriormente habían lugares en los cuales era posible conectar dos ramas para formar una topología de anillo y así tener mayores beneficios en caso de falla por temas de redundancia, sin embargo, debido a la demanda creciente de datos móviles esto generó saturación de enlaces en momentos de falla por lo cual para la primera simulación se escogió una red en la cual se tuvieran múltiples anillos, un ancho de banda pequeño en los enlaces que conforman la red y además de ellos múltiples servicios (E1s y Ethernet) con diferentes prioridades para analizar su comportamiento.

Para realizarlo se obtuvo la cantidad de servicios E1s y Ethernet operativos en cada router y se verificaron sus diferentes orígenes y destinos. La red que se analizó se presenta en la figura 27.

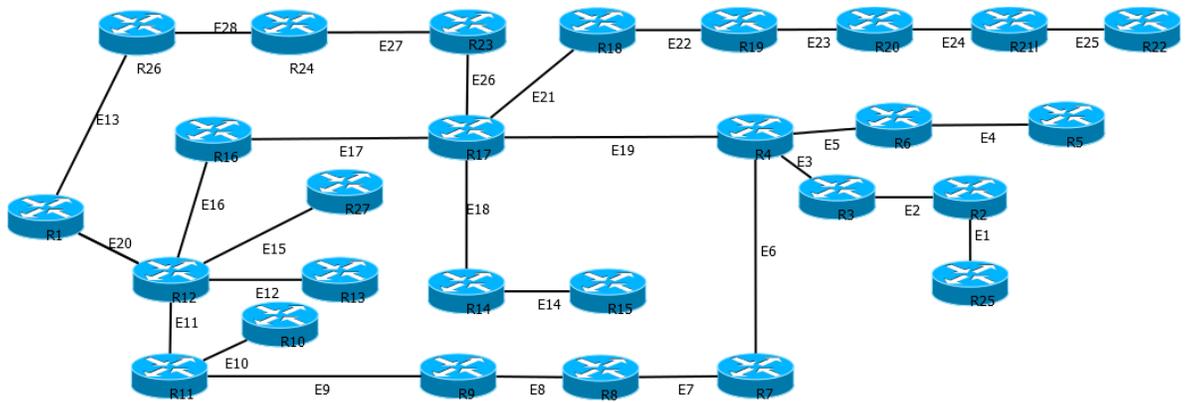


Figura 27. Red de prueba.

Debido a que las necesidades de tráfico son diferentes por cada servicio transportado y a las diferentes prioridades generadas por temas administrativos, los servicios de la red mostrada anteriormente se clasificaron en las siguientes tres categorías:

- **Prioridad Alta:** Conjunto de servicios E1s emulados sobre MPLS pertenecientes a BTSs que manejan el tráfico de importantes sectores o clientes.
- **Prioridad Media:** Conjunto de servicios Ethernet para nodos B con gran importancia y servicios E1s para BTSs con importancia media y baja.
- **Prioridad Baja:** Conjunto de servicios Ethernet para nodos B con importancia normal.

En la red mostrada en la figura 27 todo el tráfico 2G y 3G es dirigido desde los diferentes puntos de acceso hasta el enrutador R1 el cual representa los diferentes routers de transmisión que se encuentran en la central. Para cada uno de ellos se calculó las diferentes rutas que existen para llegar a la central.

3.1.4. Modelo modificado de asignación de capacidad y flujo (ACB).

Al realizar la optimización de la red con este modelo se obtuvieron los diferentes las diferentes capacidades para cada caminó desde el enrutador remoto hasta el router R1, posteriormente se extendió el uso de estos caminos para cada una de las demandas que son originadas en el enrutador remoto.

Con los resultados obtenidos con este modelo se realizaron dos simulaciones, la primera de ellas corresponde con el comportamiento del sistema cuando no hay rutas secundarias, este comportamiento se muestra a continuación:

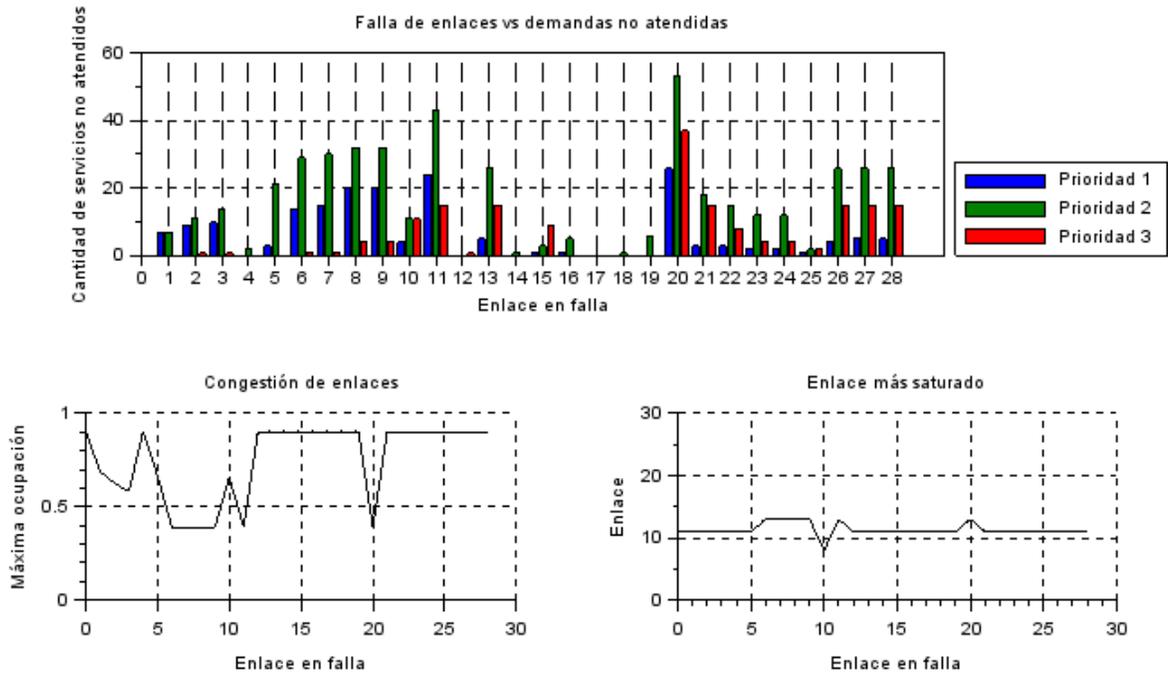


Figura 28. Resultado modelo ACB sin rutas secundarias.

En la figura 28 Se puede apreciar que hay una gran cantidad de servicios no atendidos cuando hay falla en el enlace 20, del mismo modo se observa que la máxima ocupación es de 0.9, el cual fue el parámetro usado en el modelo de optimización, esta ocupación disminuye a medida que hay falla en los enlaces pero está nunca superará el valor de 0.9 que fue establecido previamente.

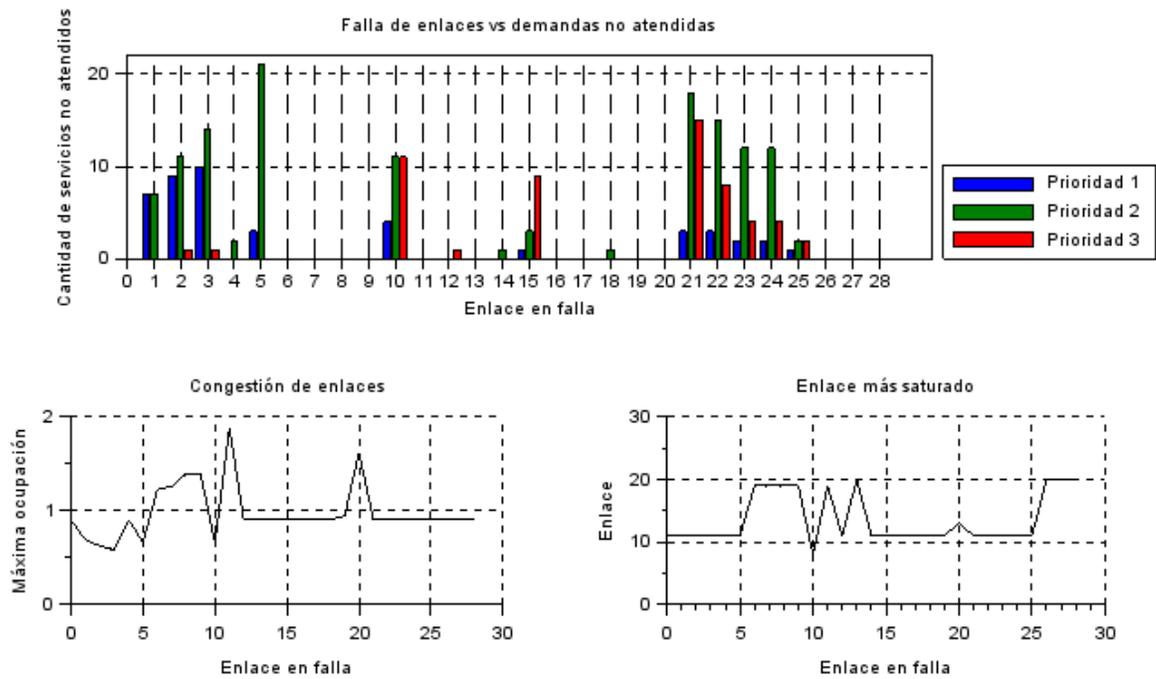


Figura 29. Resultado modelos ACB con rutas secundarias calculadas por OSPF.

En la figura 29 se muestra el comportamiento del modelo ACB cuando las rutas secundarias son calculadas mediante el protocolo OSPF, en el se puede apreciar que cuando hay falla en uno de los enlaces el tráfico re-enrutado tiene a saturar los demás enlaces en la red, en muy pocas ocasiones se presenta caídas de la máxima ocupación, cuando estas suceden es debido a que no hay forma de suplir todas las demandas afectadas, cabe destacar que a diferencia del comportamiento cuando no existían rutas secundaria en este caso hay “cero” servicios afectados cuando fallas en el enlace 20, esto es debido a que todo el tráfico es desviado hacia el enlace 13, estos cambios generan grandes congestiones en los enlaces que claramente afectarán los servicios más susceptibles (E1s) y degradaran la calidad de los servicios de los nodos B.

Un gran problema que se cuándo las rutas secundarias son calculadas por OSPF y hay falla en un enlace que presenta gran tráfico es que este el nuevo enrutamiento de este tráfico tiende a saturar los demás enlaces de transmisión, esto se puede evidenciar en la figura 30, en la figura en la parte izquierda se muestra el comportamiento del enlace 13, mientras que en la derecha el comportamiento del enlace 20, se puede apreciar que el tráfico del enlace 13 crece súbitamente cuando falla en el enlace 20, del mismo modo el enlace 20 presenta un gran incremento cuando falla en el enlace 13.

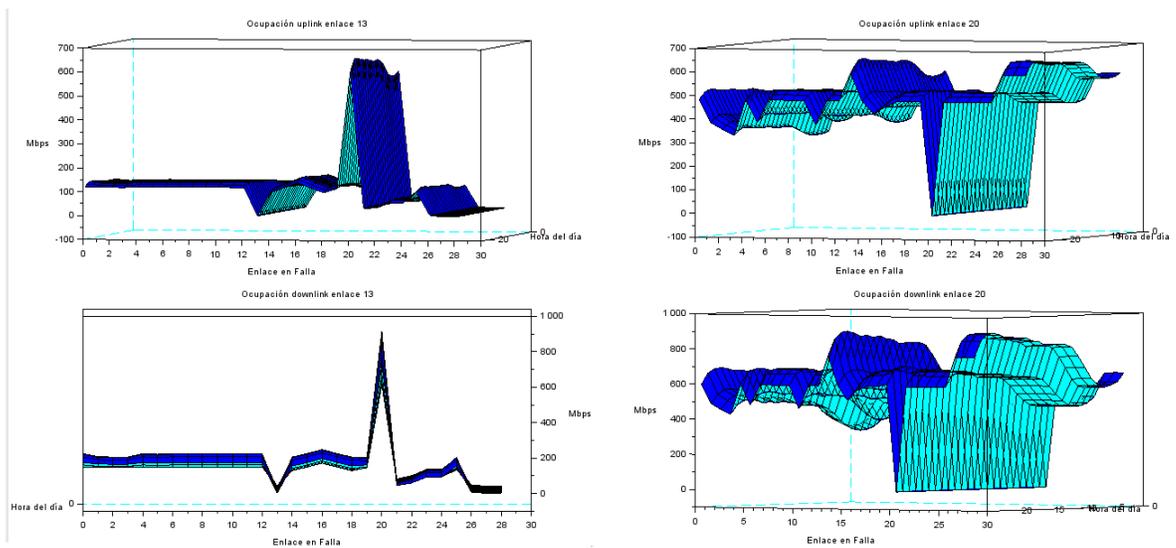


Figura 30. Desbordamiento de tráfico presentado con las rutas secundarias establecidas por OSPF.

3.1.5. Modelo de asignación de flujo VTP (Virtual Traffic Path).

Debido a que el modelo de optimización en sus restricciones no especifica que la capacidad de los enlaces no debe ser superada por su este problema podría conllevar a resultados no posibles en la realidad por lo cual se agregó una restricción en la cual se especificaba que la sumatoria de las capacidades de cada túnel por sus respectivo usos en ningún momento debe superar la capacidad de los enlaces.

Al realizar un ciclo de la optimización empezando con un uso de los túneles del 50% del modelo de asignación de flujo VTP (Virtual Traffic Path), se obtuvieron las diferentes capacidades desde los distintos enrutadores, posteriormente se asignó esta capacidad a las diferentes demandas del router.

Al realizar la simulación del modelo de flujo VTP sin el establecimiento de rutas secundarias se obtienen los siguientes resultados:

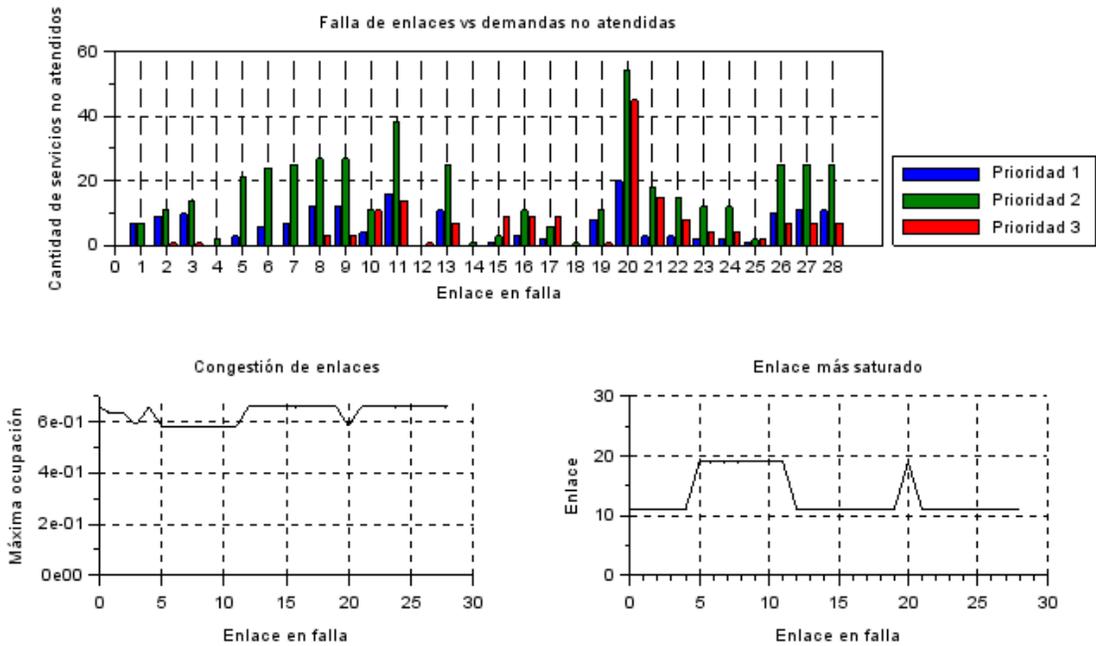


Figura 31. Resultados modelo de flujo VTP sin rutas secundarias.

En el modelo de flujo VTP al igual que en modelo de asignación de flujo y capacidad ACB cuando no hay rutas secundarias se observa gran cantidad de servicios afectados cuando hay falla en los enlaces que sostienen la mayor cantidad de tráfico cuando no la red se encuentra sin fallas.

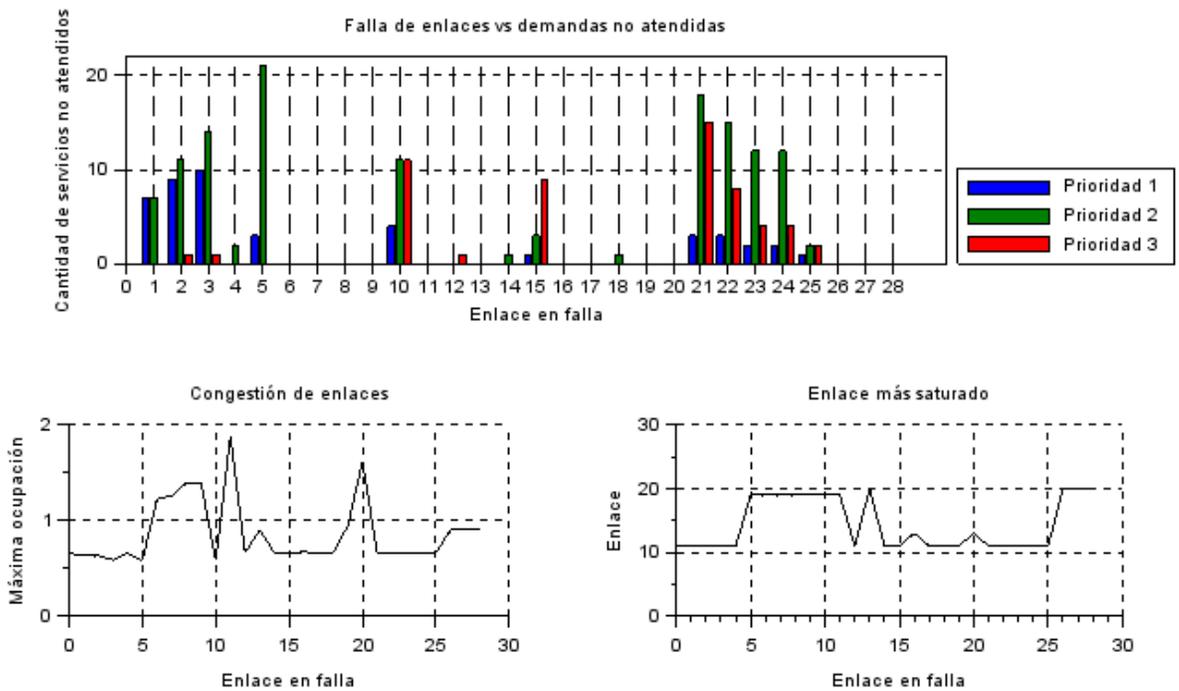


Figura 32. Resultados modelo de flujo VTP con rutas secundarias establecidas por OSPF.

Al igual que el modelo de optimización ACB, el modelo de flujo VTP también presenta grandes problemas de congestión cuando hay falla en los enlaces con mayor utilización cuando no se presentan fallas, esto genera grandes problemas especialmente para los servicios que son susceptibles a los retardos y al jitter.

3.1.6. Modelo IGP\MPLS.

El modelo IGP\MPLS es el único que para el cálculo de las rutas mira el comportamiento que tendrá el sistema cuando hay falla en cada uno de los enlaces en la red, debido a que está diseñado para garantizar el 100 % de sobrevivencia se ignoraron las fallas de los enlaces que impedían esta restricción aunque se tuvieron en cuenta en el momento de la simulación.

Al realizar la simulación del modelo de optimización IGP\MPLS para la red a analizar se obtuvieron los siguientes resultados.

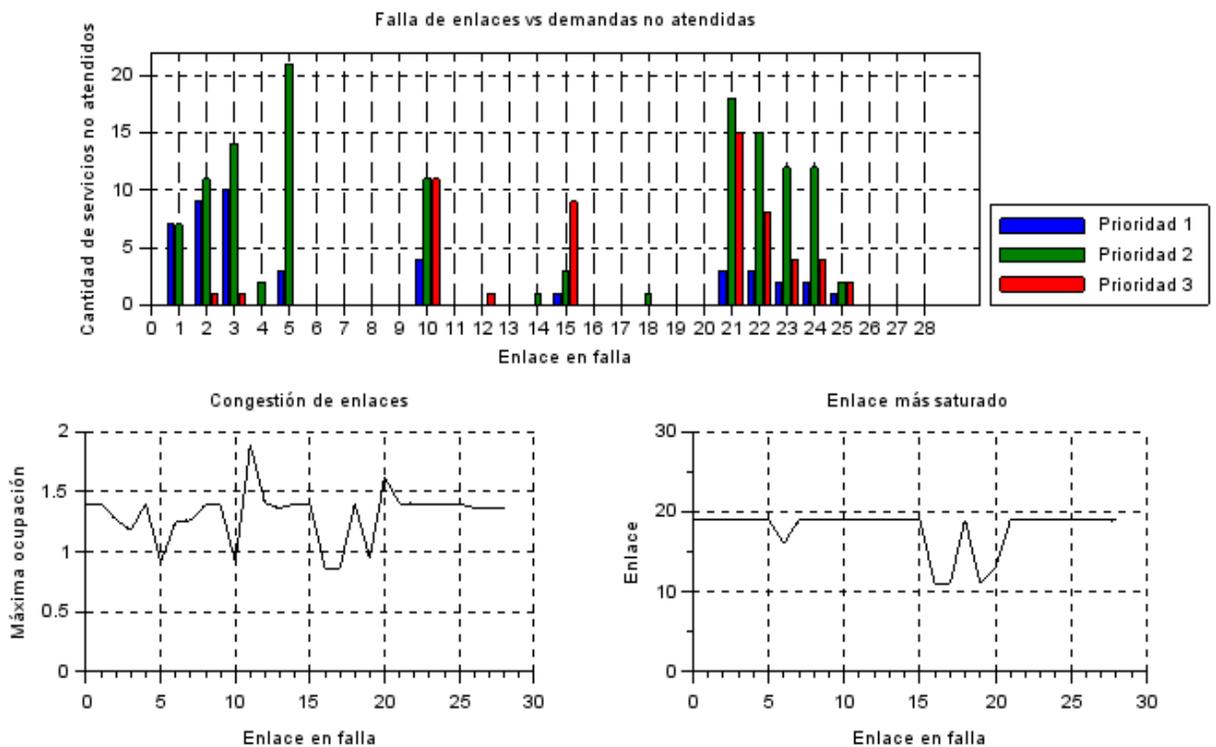


Figura 33. Resultados modelo IGP\MPLS.

Como se evidencia en la figura 33 los enlaces usualmente se encuentran saturados, esto es debido a que el sistema tiene dos características las cuales son:

- El modelo de optimización trata de satisfacer el 100% de las demandas.

- Pueden existir demandas que ante fallas de enlaces no se puedan balancear.

Por estas dos razones la función objetivo a minimizar (máxima ocupación de todos los escenarios) en el modelo de optimización puede ser un valor tan grande que impida la búsqueda de nuevas rutas ya que independientemente de las rutas que se elijan este valor nunca va a decrecer.

3.2. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

Cada uno de los modelos presentados tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo, los modelos de flujo VTP y el modelo ACB presentan buenos resultados cuando el sistema se encuentra sin fallas, pero en el momento de existir fallas en uno de sus enlaces se pueden presentar dos situaciones, la primera de ellas es que si no hay rutas secundarias todas las demandas que hacían uso del enlace van a estar no atendidas, mientras que si las rutas secundarias son calculadas por el protocolo OSPF el sistema tendrá a saturar enlaces con lo cual habrán demandas que no podrán satisfacerse por problemas de pérdida de paquetes, retardo y demás. Por su parte el modelo IGP\MPLS presenta una estructura más fuerte al momento de fallas ya que analiza el comportamiento del sistema cuando falla cada uno de los enlaces, sin embargo, tiene un problema grave que es tratar de satisfacer todas las demandas, lo cual en ocasiones conlleva a saturación de enlaces y como en el caso anterior lleva a pérdida de paquetes, retardo y demás que inducen a servicios con poca calidad y si estos son susceptibles a ciertos parámetros puede conducir a caída de servicios.

Por los motivos anteriores el modelo a optimización realizado contiene los siguientes parámetros y restricciones:

1. La máxima ocupación de los enlaces cuando se encuentran todos operativos o ante la falla de uno de ellos no debe superar un valor establecido por el usuario.
2. Todas las demandas se deben satisfacer cuando todos los enlaces se encuentran operativos.
3. Cuando se presenta falla en un enlace se puede no satisfacer todas las demandas, sin embargo, las demandas no satisfechas son analizadas con su prioridad en la función objetivo a minimizar.

Como se puede apreciar el modelo presentado es una mezcla de los modelos presentados en los capítulos anteriores ya que el análisis del comportamiento del sistema ante situaciones de falla fue resultado del obtenido del modelo IGP\MPLS el cual verifica el establecimiento de las rutas, por su parte la máxima ocupación está garantizada en los modelos de flujo VTP y del modelo ACB.

El modelo propuesto se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 & \min U_{max} + \sum_{j=1}^J (4 - P_j) * X_j \\
 & s. t. \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L SDPs * E_n * C}{Cap} \leq U_{max_i} \quad \forall n = 0, 1, \dots, N \\
 & \sum_{k=1}^K SDPs * E_0 * E = D_j \\
 & \sum_{k=1}^K SDPs * E_i * E = D_j - X_j \quad \forall i = 1, \dots, I \\
 & U_{max}, U_{max_i} \leq \alpha \\
 & SDPs_k \geq 0
 \end{aligned}$$

Donde:

- $SDPs$ es la vector de la variable de diseño y representa el valor de la demanda a ser atendida por cada túnel.
- K es el conjunto de túneles.
- L es el conjunto de caminos.
- N es el conjunto de nodos en el sistema.
- J es el conjunto de demandas.
- I es el conjunto de enlaces.
- D_j representa la demanda j .
- Cap representa la capacidad del enlace i .
- C representa la matriz de incidencia enlace camino.
- E_0 representa la matriz de incidencia túnel camino cuando todos los enlaces se encuentran operativos.
- E_i representa la matriz de incidencia túnel camino cuando hay falla en el enlace i .
- E representa la matriz de incidencia túnel demanda.
- U_{max} es la máxima ocupación de los enlaces sin fallas en la red.
- α representa un valor predefinido por el usuario el cual indica la máxima ocupación permitida para los enlaces.
- X_i representa el valor de las demandas no atendidas cuando hay falla en el enlace i .
- P representa el vector del valor de las prioridades de cada demanda.
- U_{max_i} es la máxima ocupación de los enlaces permitida cuando hay falla en el enlace i .

Como se puede apreciar, la función a minimizar está compuesta por dos términos, el primero de ellos representa la máxima ocupación y el segundo corresponde a la sumatoria de cada elemento de los vectores de las demandas no atendidas ante la falla de los enlaces de la red ponderado por el factor $(4 - P_j)$, la función de este término es darle mayor importancia a satisfacer las demandas prioritarias brindando mayor disponibilidad cuando existen fallas en la red.

La primera restricción asegura que la ocupación de cada enlace durante todas las situaciones va a ser menor que el parámetro U_{max} , cabe destacar que en el modelo IGP/MPLS este factor representaba la función a minimizar, pero presentaba dos inconvenientes, estos son corregidos en las próximas restricciones.

La segunda restricción asegura que todas las demandas se deben satisfacer cuando no existen fallas en la red, esto se debe a que al realizar la correlación de cada túnel SDP con los caminos y posteriormente a las demandas que cada uno de ellos satisface estos valores deben ser exactamente iguales al valor de cada una de las demandas.

Una falla del modelo IGP/MPLS para las redes en análisis corresponde a que no siempre todas las demandas se pueden satisfacer cuando hay falla en algún enlace de la red debido a que puede existir saturación, debido a esto la tercera restricción adiciona el término X_j , el cual representa el valor de cada demanda no atendida, esto es realizado examinando el comportamiento cuando hay falla en cada uno de los enlaces de la red.

El segundo error del modelo IGP/MPLS en las redes a analizar corresponde con la máxima ocupación de los enlaces, esto es debido a que al tratar de satisfacer todas las demandas la ocupación de los enlaces se podría elevar a valores no factibles, es por esta razón que se agregó el parámetro α el cual es definido por el usuario y representa la máxima ocupación permitida en los enlaces.

Por último, pero no menos importante esta la restricción de no negatividad de los SDPs, esta indica que todos los SDPs deben ser positivos por lo cual no existirán problemas de túneles con capacidades negativas que no tienen sentido en el mundo MPLS.

Algo a destacar en el modelo propuesto es que todos los túneles son establecidos mediante MPLS-TE y no se deja que ninguno sea establecido por el protocolo IGP, por lo cual el modelo de recuperación es cambio de protección y no re-enrutamiento.

En re-enrutamiento los túneles de respaldo son creados una vez un link falla, motivo por el cual el tiempo de restauración es bastante grande ya que el protocolo de enrutamiento tiene que converger y posteriormente viene el establecimiento de los túneles, mientras que cambio de protección es más rápido en el momento de falla de un enlace ya que los túneles de respaldo son establecidos antes de la falla por

lo cual en el momento de la misma solo se cambia de camino disminuyendo el tiempo de afectación de los servicios. Un resumen de las características de cada grupo se muestra a continuación:

Recovery model	Recovery Path Type	Recovery Path Setup Point	Recovery Time	Resource Utilization/Optimization	Services
Rerouting	Pre-qualified	After Fault	2	3	Highly priority Service (VPN, real-time service)
	Establish-On-Demand		1	4	Best-Effort Service (TCP, UDP)
Protection Switching	1+1	Before fault	3	1	High QoS Service (EF)
	1:1, 1:n, m:n		3	2	Low QoS Service (AF)

Tabla 4. Comparación re-enrutamiento vs cambio de protección. [6]

De esta manera el resultado del modelo presentado a parte de la gran disponibilidad de las demandas prioritarias adiciona una rápida convergencia de los servicios ante las posibles fallas que se pueden presentar.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

Al realizar la optimización con el modelo propuesto con un parámetro α de 0.9 se obtuvieron mejoras significativas en temas de saturación de enlaces y cantidad de servicios prioritarios atendidos en presencia de falla como se puede apreciar a continuación:

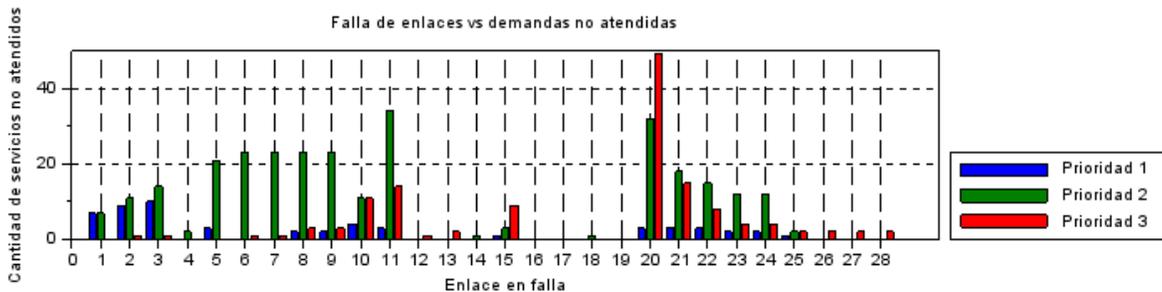


Figura 34. Falla de enlaces vs demandas no atendidas, modelo propuesto.

Como se puede apreciar en la figura 34 la cantidad de servicios atendidos prioritarios no atendidos es muy menor en comparación con la cantidad de servicios no atendidos con prioridad media y baja.

Respecto a la saturación de los enlaces se obtuvieron los siguientes resultados:

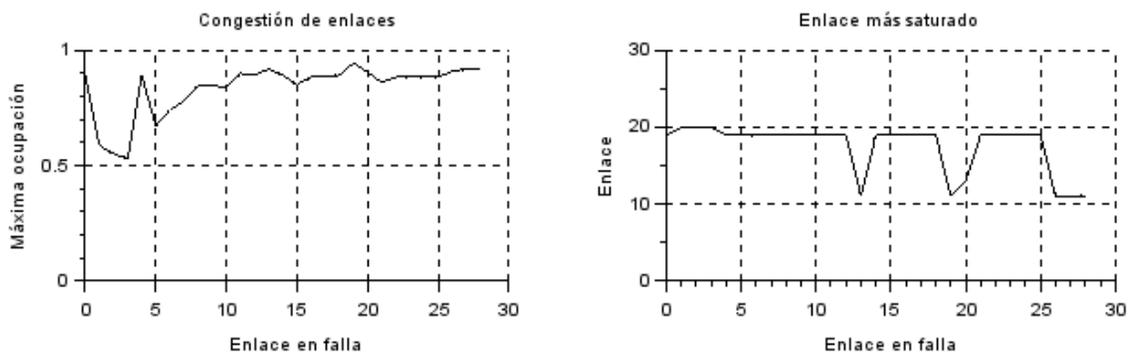


Figura 35. Uso de enlaces con el modelo propuesto.

En la figura 35 Se aprecia el comportamiento del máximo uso de los enlaces a medida en que estos van fallando, como se puede evidenciar la ocupación de los enlaces no supera el valor α que se estableció como entrada al modelo de simulación, por lo cual se asegura que independiente del enlace que falle todos los

servicios atendidos por la red van tener la suficiente capacidad para operar sin que hayan perdida de paquetes por temas de saturación.

A continuación se muestra el comportamiento de los enlaces que conectan la red a analizar con la central (enlaces 13 y 20):

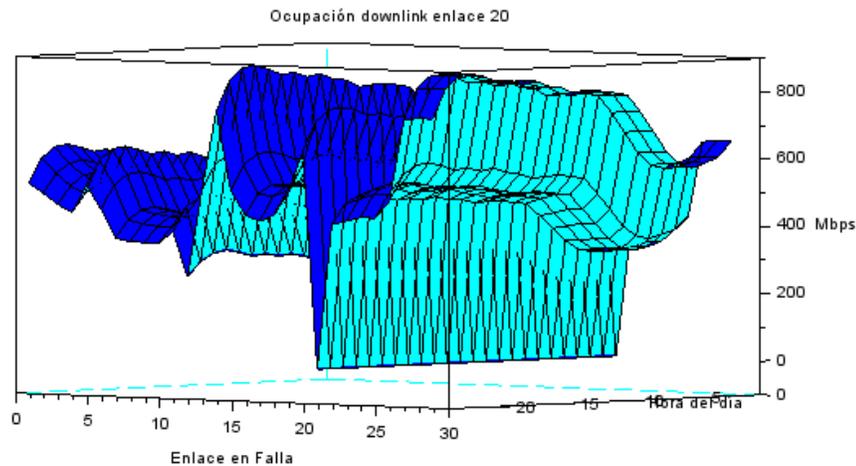


Figura 36. Uso enlace 20 con el modelo propuesto.

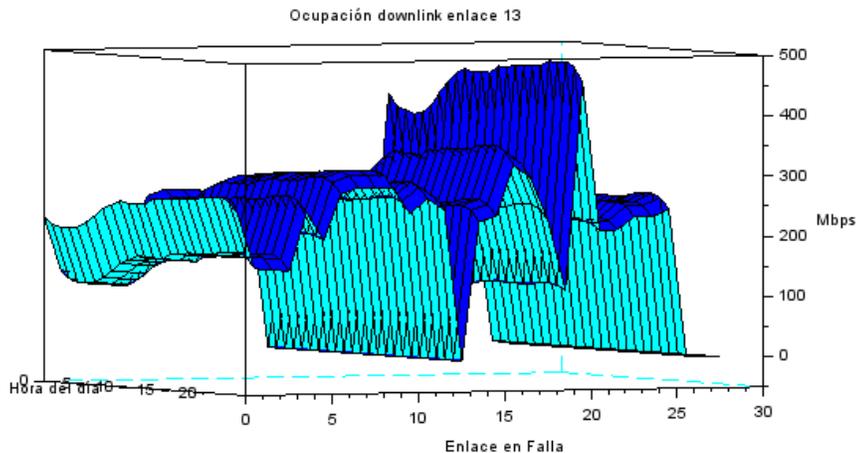


Figura 37. Uso del enlace 13 con el modelo propuesto.

Una ventaja del modelo presentado es que se pueden establecer diferentes máximas ocupaciones a medida en que fallan los enlaces, de esta manera se puede plantear un problema en el cual la máxima ocupación cuando todos los enlaces se encuentren operativos sea de un parámetro β y que en momento de falla este valor pueda subir a un valor α definido por los diseñadores para controlar la operación de la red; de esta manera se pueden admitir diferentes usos de enlaces cuando falle un enlace que soporte muchas demandas de la red a uno con pocas.

4.2. COMPROBACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.

Al ser el modelo de optimización generado a partir de la información suministrada por los gestores de los nodos B y por la cantidad de servicios E1s de los diferentes enrutadores, se hace necesario la comprobación de que el tráfico por cada enlace realmente corresponda con los datos reales de la red, para ello se escogieron dos enlaces para comprobar las estadísticas de uso.

El primer enlace analizado corresponde al enlace número 5, el cual se encuentra distante del enrutador R1 al cual van dirigidas todas las demandas, su comportamiento se muestra a continuación:

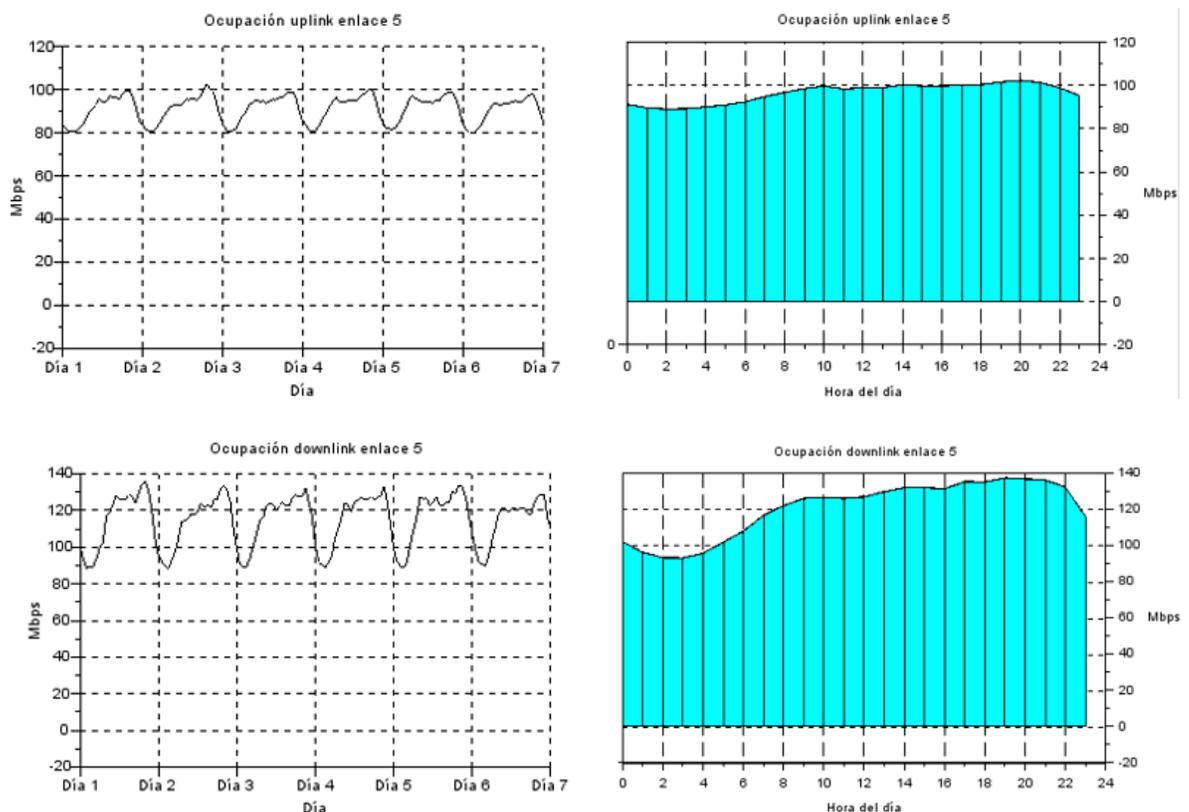


Figura 38. Uso del enlace E5 real vs simulado.

En la figura 38 se evidencia que el tráfico en ambos sentidos de lo simulado corresponde con los datos reales ya que se presentan los valles de forma cíclica a la misma hora y adicionalmente los rangos en los que se encuentra el tráfico son muy similares, por ejemplo, en la ocupación downlink del enlace E5 se observa que el tráfico usualmente está entre los 90 y los 140 Mbps, mientras que el uso en uplink se encuentra entre los 80 y los 100 Mbps.

De la misma manera se realizó la comparación con el enlace 15 el cual se encuentra más cercano al enrutador R1 al cual son dirigidas todas las demandas, su comportamiento se presenta a continuación:

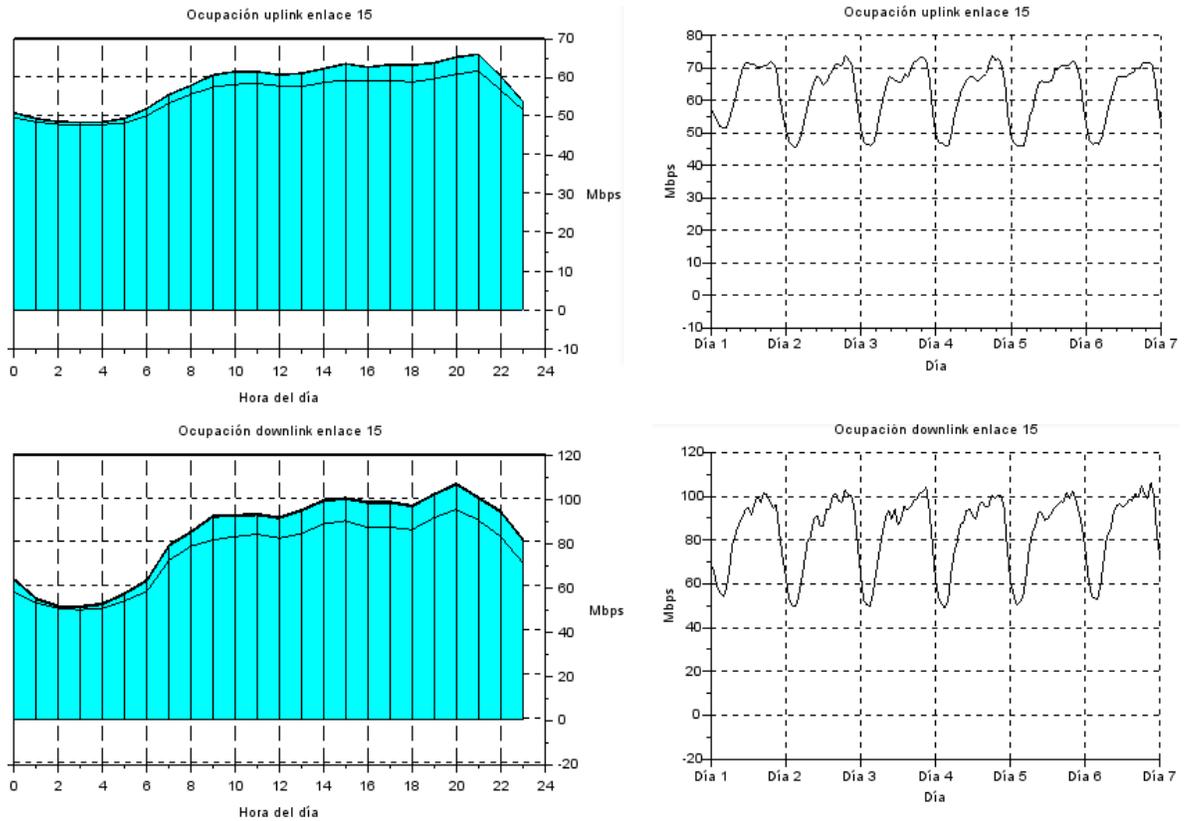


Figura 39. Uso del enlace E15 real vs simulado.

En la figura 39 se evidencia que el comportamiento del uso del enlace de lo real a lo simulado es muy similar ya que la capacidad usada del tráfico durante el día presenta comportamientos muy similares, por ejemplo, la ocupación en uplink está entre los 45 y los 75 Mbps, mientras que el tráfico de downlink se encuentra entre los 55 y los 110 Mbps presentado la hora valle y la hora pico en los mismo periodos.

4.3. VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

En capítulos anteriores se mostró el resultado obtenido para cada uno de los modelos de optimización aplicados a la red de prueba, en la presente sección se realizará la comparación entre los resultados obtenidos con el uso de cada uno de ellos.

La máxima ocupación de los enlaces en la red de telecomunicaciones es de vital importancia cuando se manejan servicios susceptibles a la pérdida de paquetes y al retardo, tales como servicios TDM, ya que la pérdida de paquetes o el retardo en la llegada de uno o varios de ellos pueden conllevar a la pérdida momentánea del servicio ya que para esta clase de servicio no es admitida la retransmisión, de manera contraria los servicios de transporte para los nodos B tienen la ventaja de ser elásticos, de manera que pueden admitir cierta congestión ya que pueden retransmitir paquetes y al mismo tiempo reducir la demanda, aunque esto implique la denegación de recursos a usuarios, a continuación se presenta un resumen en el cual se especifica si se presenta saturación de enlaces en cada uno de los modelos:

Modelo	Saturación sin fallas en la red.	Saturación con fallas en la red.
ACB con rutas secundarias calculadas por OSPF.	No	Si
ACB sin rutas secundarias.	No	No
Flujo VTP con rutas secundarias calculadas por OSPF.	No	Si
Flujo VRP sin rutas secundarias.	No	No
IGP/MPLS	Si	Si
Asignación de flujo con priorización de servicios ante fallas.	No	No

Tabla 5. Comparación existencia de saturación.

En la tabla 5 se muestra que en tres ocasiones hay saturación de enlaces cuando hay fallas en la red, esto se presenta con los modelos ACB y de asignación de flujo VTP cuando las rutas de respaldo son obtenidas mediante el protocolo OSPF del mismo modo que con el modelo IGP/MPLS.

Debido a que el tema de saturación se puede presentar en los enlaces de transmisión, un análisis a profundidad del comportamiento de la interfaz luB debe ser capaz de identificar hasta qué punto se puede reducir el ancho de banda necesitado para la operación de los nodos B, ya que al restringirse la capacidad se reduce la capacidad requerida en la interfaz luB, debido a que no es objeto de esta investigación a continuación solo se comparará los resultados obtenidos para los modelos que no presentan saturación en los enlaces cuando se presenta falla en uno de sus enlaces:

Modelo	Clase de prioridad	Número de servicios no atendidos.
ACB con rutas secundarias calculadas por OSPF	Prioridad 1	45
	Prioridad 2	130
	Prioridad 3	56
ACB sin rutas secundarias	Prioridad 1	184
	Prioridad 2	464
	Prioridad 3	178
Flujo VTP con rutas calculadas por OSPF	Prioridad 1	45
	Prioridad 2	130
	Prioridad 3	56
Flujo VTP sin rutas secundarias.	Prioridad 1	174
	Prioridad 2	453
	Prioridad 3	168
IGP/MPLS	Prioridad 1	45
	Prioridad 2	130
	Prioridad 3	56
Asignación de flujo con priorización de servicios ante fallas.	Prioridad 1	55
	Prioridad 2	288
	Prioridad 3	135

Tabla 6. Cantidad de servicios no atendidos con los modelos de optimización.

En la tabla 6 se muestra la cantidad de servicios no atendidos suponiendo que hay falla en cada uno de los enlaces y los servicios son contabilizados cada vez que no pueden ser atendidos, de esta manera, un servicio es contado cada vez que no se pueda establecer un camino para la demanda.

Como se puede apreciar el modelo presentado tiene grandes ventajas en su comportamiento cuando se presenta falla en los enlaces ya que no hay saturación y además hace una muy buena función de brindar la priorización de servicios. En la tabla 7 se aprecia que la cantidad de servicios no atendidos con prioridad 1 se redujeron drásticamente con el modelo propuesto, esta mejora supera en gran medida a la mejora presentada para los servicios con prioridad 2, la cual a su vez es mejor que los servicios de prioridad 3, quedando de esta manera evidenciado la priorización que realiza el modelo.

Clase de prioridad	ACB sin rutas secundarias	Propuesto	Mejora	Flujo VTP sin rutas secundarias.	Propuesto	Mejora
Prioridad 1	184	55	70.11%	174	55	68.39%
Prioridad 2	464	288	37.93%	453	288	36.42%
Prioridad 3	178	135	24.16%	168	135	19.64%

Tabla 7. Comparación cantidad de servicios no atendidos entre los modelos presentados que no presentan saturación de enlaces.

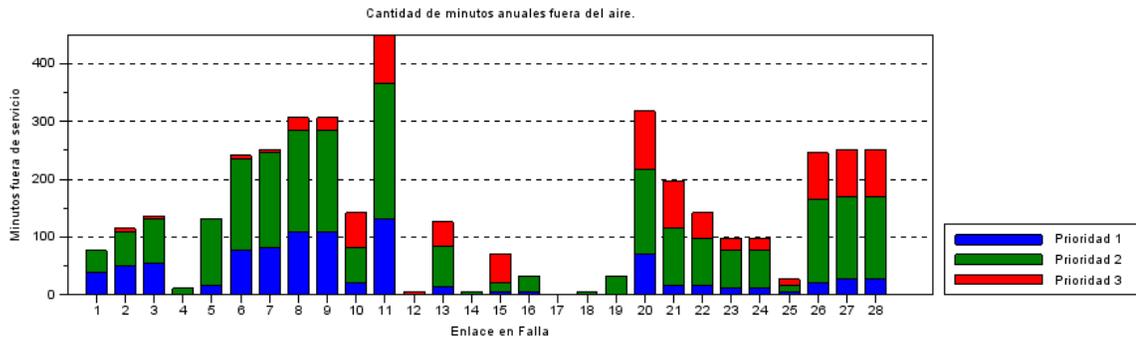


Figura 40. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo ACB sin rutas secundarias.

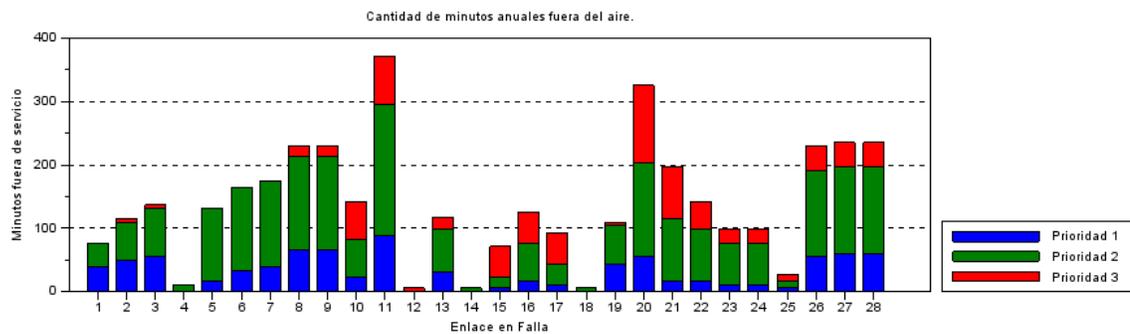


Figura 41. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo de flujo VTP sin rutas secundarias.

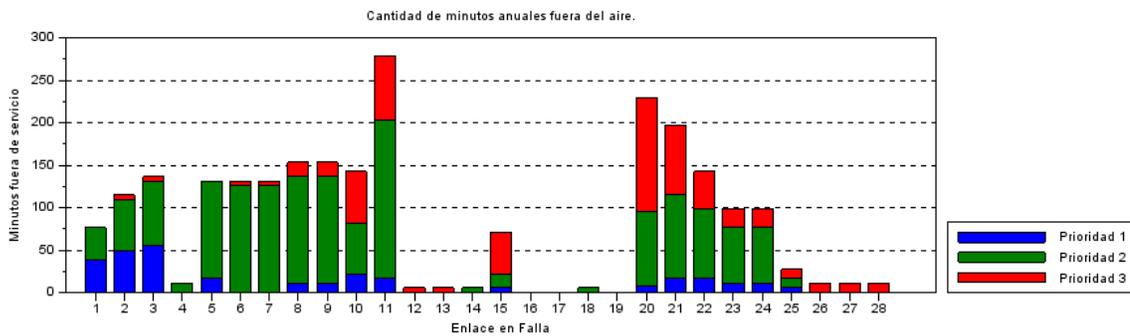


Figura 42. Cantidad de minutos fuera del aire presentado con el modelo propuesto.

En las figuras mostradas anteriormente se presenta la cantidad de minutos fuera de servicio para los modelos que no presentan saturación en los enlaces, cabe destacar que la cantidad de minutos para la prioridad 1 se presenta en la falla de los enlace 1, 2, 3 y 5 los cuales no pueden ser reducidos ya que se encuentran en segmentos lineales.

5. CONCLUSIONES

El modelo de optimización propuesto se comparó con el modelo de optimización ACB, el modelo de asignación de flujo VTP y el modelo de optimización IGP\MPLS y se encontraron grandes ventajas para su puesta en funcionamiento en redes que no tengan la forma de soportar todas las demandas cuando se presenta falla en uno de los enlaces como se puede apreciar a continuación:

1. El modelo de optimización planteado admite el establecimiento de la máxima ocupación cuando todos los enlaces se encuentran operativos, esto permite que se pueda establecer un uso bastante inferior lejos de la saturación de cualquiera de sus enlaces, lo cual es de vital importancia ya que en la gran mayoría del tiempo las redes se encuentra sin fallas en sus enlaces, con esta configuración la red puede aceptar el incremento temporal de las demandas, las cuales se presentan cuando hay eventos especiales como vacaciones, conciertos, conferencias y demás sin comprometer la continuidad de los servicios.
2. El modelo tiene solución factible inclusive si no se pueden satisfacer todas las demandas cuando se presenta falla en uno de los enlaces. Esto es necesario en redes con segmentos lineales y/o con poca capacidad, ya que si hay falla en uno de los enlaces del segmento lineal no existe forma de establecer caminos para satisfacer una o varias demandas, lo cual induciría a la no factibilidad en la solución del problema sí no se tuviera esta característica adicionalmente ayuda a la no saturación de los enlaces, lo cual no debe ser admitido especialmente con servicios susceptibles a la pérdida de paquetes, al jitter o al retardo.
3. La priorización de servicios ante fallas permite que el modelo de optimización busque la forma de satisfacer las demandas prioritarias antes del establecimiento de los túneles para demandas no prioritarias. Esto permite brindar mejores indicadores de disponibilidad para los servicios requeridos, lo cual puede ser usado para permitir una mayor disponibilidad a servicios prioritarios, por ejemplo, ya sea brindando que el servicio de transporte para los nodos 2G se establezca aunque no exista el transporte para los nodos 3G, garantizando que una zona geográfica del país tenga mayor disponibilidad que otra o inclusive una combinación de las dos anteriores.
4. Debido a que túneles son establecidos previamente con los caminos principales y de respaldo el cambio entre las diferentes rutas es menor al que se pueda presentar con los caminos generados por el protocolo de enrutamiento interno (IGP), ya que no es necesario que converja el protocolo IGP ni continuar con la negociación necesitada por MPLS para el establecimiento de los túneles, lo cual puede evitar la pérdida de conectividad momentánea para una o varias demandas.
5. El modelo de optimización permite el establecimiento de diferentes máximas ocupaciones de los enlaces cuando se presenta falla en cada uno de ellos,

esto permite que se admita una mayor ocupación cuando hay falla en los enlaces de mayor capacidad de la red que los que no, de esta manera los diseñadores pueden colocar una ocupación mayor al 100% cuando fallan determinados enlaces, teniendo en cuenta que esto satisface una mayor cantidad de demandas en horas valle permitiendo mientras tanto que el personal de mantenimiento resuelva la falla.

6. Debido a que la salida del modelo de optimización corresponde con las rutas principales y de respaldo, este modelo puede extrapolarse a otras redes como DWDM en la cual también se tiene la opción de especificar los caminos por los cuales fluirá el tráfico.
7. Debido a las características de la red, aunque se inició simulando varios modelos de optimización que presentan un muy buen comportamiento en otro tipo de topologías, no se debe realizar la aplicación en la red analizada debido a que pueden degradar los servicios a causa de la saturación de enlaces, ante lo cual se creó un modelo de optimización que solventaba los errores para este tipo de topología lo cual permite su implementación.
8. El modelo de simulación fue validado con datos reales del operador Movistar y mediante su análisis permite verificar la afectación que tendrían los servicios cuando hay falla en cada uno de los enlaces, dando así una entrada necesaria al momento de analizar el crecimiento de la red.
9. Con el análisis realizado se evidenció que la mayor varianza de los valores pico de la carga requerida por los nodos B tanto en subida como en bajada se presenta en los departamentos que tienen pocas estaciones base y/o son sitios turísticos
10. Dado que se logra obtener el trabajo deseado con el modelo, el trabajo a futuro corresponde en la implementación de los resultados en la red de Movistar en zonas que presenten degradación de servicio a causa de la ocupación de los enlaces ante la presencia de falla.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Heikki Kaaranen, Ari Ahtiainen, Lauri Laitinen, Siamäk Noghian, Valtteri Niemi, "UMTS NETWORKS Architecture, Mobility and Services", Second Edition; ISBN 0-470-01103-3, John Wiley & SonS, Ltd.

[2] Alcatel Lucent 7705 Service Aggregation Router OS Release 4.0 Services Guide, 2010.

[3] Dongfang Zheng, Xian Liu, Mrinal Mandal, Weidong Lu, "Virtual traffic path optimization in connection-oriented network with stochastic traffic", Journal of Network and Systems Management, Vol. 12, No. 2, June 2004.

[4] Anna Mereau, Davide Cherubini, Alessandra anni, Antonio Frangioni, "Primary and BackUp path optimal design for traffic engineering in hybrid IGP/MPLS networks", Design of Reliable Communication Networks, 2009. DRCN 2009. 7th International Workshop on, pag 273-280, E-ISBN 978-1-4244-5048-0, 2009.

[5] M.K Huerta, X. Hesselbach, R. Fabregat, J.J. Padilla, O. Ravelo, R. Clotet, "Reducción de congestion mediante técnicas de optimización de flujos en redes MPLS", IEEE Latin America Transactions, Vol 5 No 5, pag 352-359, Septiembre 2007.

[6] J. Foo, "A survey of service restoration techniques in MPLS networks," in Proc. of Australian telecommunications, Networks and Applications Conference; 2003.

GLOSARIO

Abis: En red GSM interfaz que comunica la estación base y la BSC.

BSC: Base Station Controller, prove la inteligencia a las BTSs.

BTS: Base Transceiver Station, equipo que prove la comunicación entre los equipos de los usuarios y la red.

CAPEX: Capital Expenditures, inversiones en bienes capitales.

E1: Formato de transmisión digital en redes de conmutación de circuitos con una tasa de 2048 kbps.

ETH: Ethernet, estándar de red de área local.

IGP: Interior Gateway Protocol, protocolo para intercambiar información de enrutamiento dentro de un Sistema autónomo.

IuB: Interfaz que comunica el nodo B y la RNC.

LDP: Label Distribution Protocol, protocolo para intercambiar información de etiquetas en redes MPLS que no implica ingeniería de tráfico.

LER: Label Edge Router, enrutador de borde en una red MPLS.

LSP: Label Switched Path, camino en la red MPLS.

MPLS: Multiprotocol label Switching, mecanismo de transporte de datos que opera entre la capa de enlace de datos y la capa de red del modelo OSI (2y 3 respectivamente).

Nodos B: En UMTS son las estaciones base donde se sitúan las antenas y elementos de transmisión.

OPEX: Operational Expenditure, costos de operación del producto, Sistema o negocio.

RNC: Radio Network Controller, en la tecnología UMTS es responsable del control de los nodos B que se conectan a ella.

SDH: Synchronous Digital Hierarchy, es un protocolo estandarizado para transmitir información en redes de conmutación de circuitos.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System, tecnología usada por equipos de tercera generación.