

IMPACTO DEL MECANISMO DE PREEMPTION EN REDES MPLS



**MARÍA DEL MAR IBARRA VIVAS
MARIO IVAN LÓPEZ MORA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
GESTIÓN INTEGRADA DE REDES, SERVICIOS Y ARQUITECTURAS DE
TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2009**

IMPACTO DEL MECANISMO DE PREEMPTION EN REDES MPLS



MARÍA DEL MAR IBARRA VIVAS

MARIO IVAN LÓPEZ MORA

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

Director

Ing. OSCAR J. CALDERON C.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
GESTIÓN INTEGRADA DE REDES, SERVICIOS Y ARQUITECTURAS DE
TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2009**

*A Dios mi fuerza y guía en cada momento de mi vida.
A mis padres Fanny María y Luis Humberto por su inmenso amor y apoyo incondicional.
A mi hermano Javier por su gran colaboración compañía y amistad.
A mi hermana Patricia por su respaldo y motivación.*

Mario Ivan

*Con cariño a mis padres y mis hermanos
por su infinito amor y comprensión.
A toda mi familia por su apoyo y sus enseñanzas.*

María del Mar

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan su agradecimiento al Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones Oscar Calderón por su valiosa orientación y colaboración en la consecución de los objetivos propuestos.

Además es pertinente agradecer a los Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones Jenny Cuatyndioy y Alejandro Toledo por sus aportes durante el desarrollo del trabajo de grado.

También agradecemos a nuestras familias por su apoyo incondicional durante estos años de estudio.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS	14
1.1 MPLS	15
1.2 Atributos relacionados con los LSPs	17
1.3 Atributos relacionados con los recursos de los enlaces.....	18
1.4 El control de admisión y la decisión de hacer preemption	18
CAPÍTULO 2 EL MECANISMO BÁSICO DE PREEMPTION	19
2.1 EL CONCEPTO DE PREEMPTION	19
2.1.1 IGP-TE Y EL MECANISMO DE PREEMPTION.....	20
2.2 EL PROCESO DE PREEMPTION	21
2.2.1 Preemption con CR-LDP	22
2.2.2 Preemption con RSVP-TE	24
2.3 Hard y Soft Preemption	25
2.3.1 Hard Preemption	25
2.3.2 Soft Preemption.....	26
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION	27
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION	27
3.1.1 V-PREPT.....	28
3.1.2 V-PREPT MEJORADO.....	30
3.1.3 ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO	31
3.1.4 PNBR.....	33
3.1.5 SERA	34
3.1.6 MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO	36
3.1.7 LIP.....	37
3.1.8 MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE.....	38
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION.....	39
3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENFOQUES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION	39
3.2.1.1 VARIABLES DE ENTRADA REQUERIDAS POR EL MECANISMO	40
3.2.1.2 CRITERIOS PARA SELECCIONAR LOS LSPs <i>APROPIADOS</i>	40

3.2.1.3 LUGAR EN QUE OPERA EL MECANISMO DE PREEMPTION	42
3.2.1.4 MOMENTO EN QUE SE HACE PREEMPTION	42
3.2.1.5 FLEXIBILIDAD DEL MECANISMO	43
3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION DE ACUERDO A LOS ENFOQUES	44
3.2.2.1 V-PREPT	44
3.2.2.2 V-PREPT MEJORADO	45
3.2.2.3 ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO	46
3.2.2.4 PNB	47
3.2.2.5 SERA	48
3.2.2.6 MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO	50
3.2.2.7 LIP	51
3.2.2.8 MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE	52
3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION	53
3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL LUGAR EN QUE OPERAN	53
3.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL MOMENTO EN EL QUE OPERAN	54
3.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO A SU FLEXIBILIDAD	55
3.4 AGRUPACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION DE ACUERDO A LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs	56
3.5 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION	57
3.6 RECOMENDACIONES A LA HORA DE ELEGIR UN MECANISMO DE PREEMPTION	59
CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN Y RESULTADOS	60
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	60
4.1.1 Throughput	60
4.1.2 Pérdida de paquetes	60
4.1.3 Retardo de paquete	61
4.1.4 Jitter	61
4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA	61
4.3 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN	63
4.3.1 Descripción de los dos escenarios de simulación	63
4.3.2 Descripción de los casos de estudio	65

4.3.3 Descripción de las pruebas	66
4.3.3.1 Sucesión de eventos en cada prueba.....	66
4.4 RESULTADOS.....	68
4.4.1 CASO DE ESTUDIO 1. LSP de prueba de voz.....	68
4.4.1.1 Comportamiento escenario1: sin preemption.....	69
4.4.1.2 Comportamiento escenario2: con preemption	71
4.4.1.3 Evaluación del desempeño.....	76
4.4.1.3.1 Evaluación del desempeño para el tráfico de datos	76
4.4.1.3.2 Evaluación del desempeño para el tráfico de video	80
4.4.1.3.3 Evaluación del desempeño para el tráfico de voz	83
4.4.1.3.4 Comparación del desempeño de los tres tipos de tráfico	86
4.4.1.3.5 Evaluación del desempeño en el enlace	87
4.4.1.4 Conclusiones para el caso de estudio 1	89
4.4.2 CASO DE ESTUDIO 2: LSP de prueba de video.....	91
4.4.2.1 Comportamiento escenario 1: sin preemption.....	91
4.4.2.2 Comportamiento escenario 2: con preemption.....	93
4.4.2.3 Evaluación del desempeño.....	95
4.4.2.3.1 Evaluación del desempeño para el tráfico de datos	95
4.4.2.3.2 Evaluación del desempeño para el tráfico de video	99
4.4.2.3.3 Evaluación del desempeño para el tráfico de voz	102
4.4.2.3.4 Comparación del desempeño de los tres tipos de tráfico	104
4.4.2.3.5 Evaluación del desempeño en el enlace	105
4.4.2.4 Conclusiones para el caso de estudio 2	107
4.4.3 CASO DE ESTUDIO 3: LSP de prueba de datos	109
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS	113

LISTA DE ACRÓNIMOS

BGP4:	Border Gateway Protocol Version 4(Protocolo de Pasarela de Frontera Versión 4)
CBR:	Constraint-Based Routing (Enrutamiento Basado en Restricciones)
CR-LDP:	Constraint-based Routing with Label Distribution Protocol (Enrutamiento Basado en Restricciones con el Protocolo de Distribución de Etiquetas)
CSPF:	Constrained Shortest Path First (Primero la Ruta más Corta con Restricciones)
DiffServ:	Differentiated Services (Servicios Diferenciados)
FEC:	Forwarding Equivalence Class (Clase Equivalente de Envío)
IGP:	Interior Gateway Protocol (Protocolo de Pasarela Interior)
IP:	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
ISIS:	Intermediate System to Intermediate System (Sistema Intermediario a Sistema Intermediario)
ISIS-TE:	Intermediate System to Intermediate System - Traffic Engineering (Sistema Intermediario a Sistema Intermediario con extensiones para la Ingeniería de Tráfico)
LDP:	Label Distribution Protocol (Protocolo de Distribución de Etiquetas)
LER:	Label Edge Router (Enrutador de Etiquetas de Frontera)
LSP:	Label Switched Path (Trayecto Conmutado de Etiquetas)
LSR:	Label Switched Router (Enrutador de Conmutación de Etiquetas)
MPLS:	Multi Protocol Label Switching (Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo)
OSPF:	Open Shortest Path First (Primero la Ruta Libre más Corta)
OSPF-TE:	Open Shortest Path First – Traffic Engineering (Primero la Ruta Libre más Corta con extensiones para la Ingeniería de Tráfico)
QoS:	Quality of Service (Calidad de Servicio)
RSVP:	Resource Reservation Protocol (Protocolo de Reserva de Recursos)
RSVP-TE:	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering (Protocolo de Reservación de Recursos con extensiones para la Ingeniería de Tráfico)
TE-DB:	Traffic Engineering Data Base (Base de Datos de Ingeniería de Tráfico)
VoIP:	Voice over Internet Protocol (Voz sobre el Protocolo de Internet)

LISTA DE FIGURAS
CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Dominio MPLS	16
-------------------------	----

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 El proceso de preemption	22
Figura 2.2 Preemption con CR-LDP	24
Figura 2.3 Preemption con RSVP-TE	25

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Ancho de Banda demandado por los LSPs	35
Figura 3.2 Mecanismos de preemption proactivo y reactivo	43

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Topología de la simulación	63
Figura 4.2 Mensaje LDP REQUEST	66
Figura 4.3 Mensaje LDP MAPPING	67
Figura 4.4 Tráfico en curso de los 9 LSPs	68
Figura 4.5 Mensaje LDP MAPPING del LSP de prueba	69
Figura 4.6 Throughput vs Tiempo para los LSPs en la prueba 2 sin preemption	70
Figura 4.7 Rechazo del LSP de prueba	71
Figura 4.8 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 sin preemption	71
Figura 4.9 Mensajes LDP REQUEST y LDP RELEASE	72
Figura 4.10 Mensaje LDP MAPPING	73
Figura 4.11 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 con preemption	74
Figura 4.12 Cantidad de LSPs <i>apropiados</i> en cada prueba para el caso de estudio 1	75
Figura 4.13 Throughput promedio del tráfico de datos. Caso de estudio 1	77
Figura 4.14 Porcentaje de pérdida de paquetes del tráfico de datos. Caso de estudio 1	78
Figura 4.15 Retardo en el tráfico de datos. Caso de estudio 1	79
Figura 4.16 Jitter del tráfico de datos. Caso de estudio 1	79
Figura 4.17 Parámetros de desempeño del tráfico de video. Caso de estudio 1	81
Figura 4.18 Parámetros de desempeño del tráfico de voz. Caso de estudio 1	84

Figura 4.19 Comparación del throughput de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1	86
Figura 4.20 Comparación de las pérdidas de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1	87
Figura 4.21 Utilización de los recursos del enlace. Caso de estudio 1	89
Figura 4.22 Throughput vs. Tiempo en la prueba 2	92
Figura 4.23 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 sin preemption	92
Figura 4.24 Throughput vs tiempo prueba 3 con preemption	93
Figura 4.25 LSPs <i>apropiados</i> en el caso de estudio 2	95
Figura 4.26 Throughput promedio para el tráfico de datos. Caso de estudio 2	96
Figura 4.27 Porcentaje de pérdida de paquetes del tráfico de datos. Caso de estudio 2	97
Figura 4.28 Retardo en el tráfico de datos. Caso de estudio 2	98
Figura 4.29 Jitter del tráfico de datos. Caso de estudio 2	98
Figura 4.30 Parámetros de desempeño del tráfico de video. Caso de estudio 2	100
Figura 4.31 Parámetros de desempeño del tráfico de voz. Caso de estudio 2	103
Figura 4.32 Comparación del throughput de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1	104
Figura 4.33 Comparación de las pérdidas de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1	105
Figura 4.34 Utilización de los recursos del enlace. Caso de estudio 2	107

LISTA DE TABLAS
CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Características de V-PREPT	45
Tabla 3.2 Características de funcionamiento de V-PREPT MEJORADO	46
Tabla 3.3 Características de Funcionamiento del algoritmo para la satisfacción del usuario	47
Tabla 3.4 Características de funcionamiento de PNR	48
Tabla 3.5 Características de Funcionamiento de SERA	49
Tabla 3.6 Características de funcionamiento del mecanismo heurístico centralizado	50
Tabla 3.7 Características de Funcionamiento de LIP	51
Tabla 3.8 Características de funcionamiento del MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE	52
Tabla 3.9 Clasificación de los mecanismos estudiados de acuerdo al lugar en el que operan	53
Tabla 3.10 Clasificación de los mecanismos de preemption de acuerdo al momento en el que operan	54
Tabla 3.11 Clasificación de los mecanismos de preemption de acuerdo a su flexibilidad	55
Tabla 3.12 Criterios de selección de los mecanismos de preemption	57
Tabla 3.13 Características de funcionamiento de los mecanismos de preemption	58

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Parámetros de red de los escenarios	64
Tabla 4.2 Parámetros del tráfico	64
Tabla 4.3 Ancho de banda del LSP de prueba	65
Tabla 4.4 Casos de estudio para los dos escenarios	65
Tabla 4.5 LSPs <i>apropiados</i> en el caso de estudio 1	75
Tabla 4.6 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario sin preemption	76
Tabla 4.7 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario con preemption	77
Tabla 4.8 Desempeño para el tráfico de video en el escenario sin preemption	80
Tabla 4.9 Desempeño para el tráfico de video en el escenario con preemption	81
Tabla 4.10 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario sin preemption	83
Tabla 4.11 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario con preemption	83
Tabla 4.12 Medidas del desempeño en la red en el escenario sin preemption	88
Tabla 4.13 Medidas del desempeño en la red en el escenario con preemption	88
Tabla 4.14 LSPs <i>apropiados</i> en el caso de estudio 2	94
Tabla 4.15 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario sin preemption	95

Tabla 4.16 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario con preemption	96
Tabla 4.17 Desempeño para el tráfico de video en el escenario sin preemption	99
Tabla 4.18 Desempeño para el tráfico de video en el escenario con preemption	99
Tabla 4.19 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario sin preemption	102
Tabla 4.20 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario con preemption	102
Tabla 4.21 Medidas del desempeño en la red en el escenario sin preemption	106
Tabla 4.22 Medidas del desempeño en la red en el escenario con preemption	106

LISTA DE ANEXOS

- A.** Herramienta de simulación Network Simulator (NS-2).
- B.** Instalación de NS-2 y el módulo MNS en Linux.
- C.** Comportamiento y resultados para el caso de estudio 3.

INTRODUCCIÓN

La tradicional red IP que se caracteriza por proporcionar un tratamiento best-effort, ha evolucionado en los últimos años para convertirse en una red multiservicio que soporta múltiples aplicaciones con diferentes requerimientos de calidad de servicio y prioridades. Es necesario utilizar los recursos de una manera más eficiente al mismo tiempo que se garantiza la calidad de servicio requerida por las aplicaciones más exigentes. Lo anterior es posible en una red MPLS que incorpore políticas de ingeniería de tráfico orientadas a una adecuada asignación de los recursos [1].

Un problema fundamental dentro de la asignación de los recursos es manejar las situaciones en las que el ancho de banda demandado excede las capacidades de la red. En ese caso los flujos de tráfico deben competir por los recursos existentes y, lo más conveniente es que el tráfico con mayores requerimientos de calidad de servicio reciba tratamiento preferencial. Para ello dentro del marco de la ingeniería de tráfico existe la estrategia de preemption que permite a un flujo de alta prioridad establecerse por una ruta relativamente favorable a expensas de la *apropiación* de los recursos utilizados por flujos de menor prioridad ya establecidos en la red.

En este trabajo de grado se realizó un estudio detallado de la estrategia de preemption en redes MPLS. Inicialmente, como resultado de un proceso de investigación, se obtuvo un grupo representativo de diversos mecanismos de preemption. Se realizó un análisis de cada uno de esos mecanismos y se propuso un conjunto de enfoques que permitieran elaborar una caracterización homogénea de los mismos. Posteriormente se construyó una clasificación de los mecanismos basada en los enfoques propuestos. Finalmente se determinó mediante simulación el impacto del mecanismo básico de preemption sobre los parámetros de desempeño medidos para tráfico de diferentes prioridades y en general para la red MPLS simulada.

El presente documento cuenta con cinco capítulos que se estructuraron de la siguiente manera:

El capítulo I describe el contexto que enmarca al presente trabajo de grado presentando algunas consideraciones teóricas necesarias para el estudio del mecanismo de preemption.

En el capítulo II se detalla el mecanismo básico de preemption, se describe cómo se utilizan los protocolos de señalización CR-LDP y RSVP-TE en la aplicación del procedimiento de preemption en la red y finalmente se explican los conceptos de hard y soft preemption.

En el capítulo III se hace una descripción de cada uno de los diferentes mecanismos de preemption seleccionados, luego se define un grupo de enfoques de caracterización y se identifican las características de funcionamiento de los mecanismos de acuerdo a estos enfoques, posteriormente se construye una clasificación de acuerdo a las formas en que los mecanismos realizan preemption dependiendo del momento en el que operan el lugar en el que operan y a su flexibilidad y se hace una agrupación de los mecanismos de preemption teniendo en cuenta los criterios de selección de LSPs.

En el capítulo IV primero se define el escenario de red usado, seguidamente mediante la simulación de tres casos de estudio en un escenario con el mecanismo básico habilitado y en otro sin el mecanismo de preemption habilitado se determina el impacto del mecanismo de preemption en la red MPLS simulada mediante la medida de los parámetros de desempeño definidos para cada tipo de tráfico.

En el capítulo V se muestran las conclusiones obtenidas con la elaboración del trabajo de grado, las recomendaciones y los posibles trabajos futuros.

NOTA

Ya que no se encontró una palabra que tradujera exactamente el término ‘preemption’ al español, se determinó usar la palabra ‘*apropiación*’ por ser la más cercana al significado de ‘preemption’. Por lo tanto en este documento la palabra ‘*apropiación*’ tiene el mismo significado de ‘preemption’ en inglés. Igualmente, en adelante el verbo ‘*apropiar*’ y sus derivados tienen el mismo significado del verbo en inglés ‘preempt’ y sus derivados. Por ejemplo: la palabra ‘*apropiado*’ hace referencia a la palabra ‘preempted’, la palabra ‘*apropiador*’ hace referencia a la palabra ‘preemptor’, etc. Para hacer énfasis en este significado, el verbo *apropiar* y las palabras derivadas de este verbo se encuentran en letra bastardilla u oblicua en este documento. A continuación se muestra una lista de las palabras derivadas de *apropiar* utilizadas en este documento y sus significados en inglés.

Apropiable : preemptable

Apropiado : preempted

Apropiador : preemptor

Apropiar (y sus conjugaciones como *apropie*, *apropiarse*, *apropiarlos*, etc.) : preempt

CAPÍTULO 1

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La creciente demanda de aplicaciones multimedia como voz sobre IP (*VoIP, Voice over Internet Protocol*) o video streaming genera nuevos retos para los proveedores de servicios de Internet. Los requerimientos de retardo, throughput, y pérdida de paquetes propios de estas aplicaciones son inherentemente distintos a los requerimientos de las aplicaciones de datos. El servicio IP, que se caracteriza por brindar un tratamiento best effort y funciona satisfactoriamente con tráfico de datos, no es suficiente para proveer las garantías de calidad de servicio (*QoS, Quality of Service*) que demandan las aplicaciones multimedia. Es por esto que surge la necesidad de ejercer un tratamiento diferenciado del tráfico que pueda proporcionar esas garantías. De esta manera cada aplicación puede recibir un tratamiento ajustado a sus necesidades. Lo anterior es posible con la implementación de distintas estrategias de ingeniería de tráfico entre las cuales una de las más importantes es la adecuada asignación de los recursos [2].

Para suministrar calidad de servicio, el uso de los recursos de la red debe estar estrictamente controlado. La red no puede admitir más tráfico del que es capaz de transportar con un nivel satisfactorio de calidad de servicio. Gracias al principio de reservación de los recursos, en cada enlace existe la garantía de que el volumen de tráfico no será excesivo. Sin embargo, esta restricción no siempre conduce a resultados óptimos.

Puede suceder que una conexión necesita establecerse, pero en la ruta seleccionada no hay ancho de banda suficiente porque los recursos ya han sido asignados. Si el servicio de la nueva conexión tiene requerimientos de QoS superiores a los del tráfico que está ocupando los recursos, es posible que ésta se *apropie* de esos recursos, en lugar de ser rechazada. A esto se le conoce como mecanismo de preemption. Es una estrategia según la cual una nueva petición para transportar un servicio de alta prioridad debe ser aceptada aún cuando no haya ancho de banda libre. Esto se logra removiendo algunas de las conexiones previamente establecidas y liberando sus recursos. Este mecanismo, llamado también estrategia de preemption es uno de los principales componentes de la ingeniería de tráfico [3].

La ingeniería de tráfico está constituida por un conjunto de distintas estrategias orientadas a utilizar los recursos de la red de manera óptima aprovechándolos al máximo, además de garantizar la QoS del tráfico que circula por la red. Es por esto que se habla de dos objetivos:

orientados a los recursos y orientados al tráfico. Con los primeros lo que se busca fundamentalmente es distribuir el tráfico de tal manera que no existan partes de la red donde los recursos estén sobrecargados y otras partes donde los recursos estén subutilizados. Dentro de los recursos más importantes se encuentran el ancho de banda, el espacio en el buffer y los recursos computacionales. Los objetivos orientados al tráfico se relacionan con la mejora de la calidad de servicio del tráfico. Dentro de los más importantes se destacan la disminución en la pérdida de paquetes, la disminución en el retardo y el aumento en el throughput. La estrategia de preemption puede ubicarse tanto en los objetivos orientados al tráfico como en los orientados a los recursos.

En este trabajo de grado se determinarán los efectos que tiene la aplicación del mecanismo básico de preemption en una red MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) y, ya que en la literatura existen diversos mecanismos de preemption, se realizará también una clasificación de esos mecanismos. Para adentrarse en el contexto que enmarca el principio de preemption es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones teóricas que se brindan a continuación.

1.1 MPLS

MPLS significa, por sus siglas en inglés, Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo. Es un conjunto de procedimientos encargados de enrutar los paquetes dentro de la red de forma rápida, eficiente y flexible [4]. Se trata de un nuevo paradigma de envío basado en el concepto de conmutación de etiquetas: a cada paquete IP se le asigna una o varias etiquetas. La etiqueta es un identificador de tamaño corto y constante que contiene información sobre la ruta y los requerimientos del paquete. Los nodos MPLS utilizan la información contenida en esas etiquetas para enrutar los paquetes hacia su destino. MPLS ofrece capacidades que facilitan la implementación de QoS, gestión de recursos e Ingeniería de Tráfico [5].

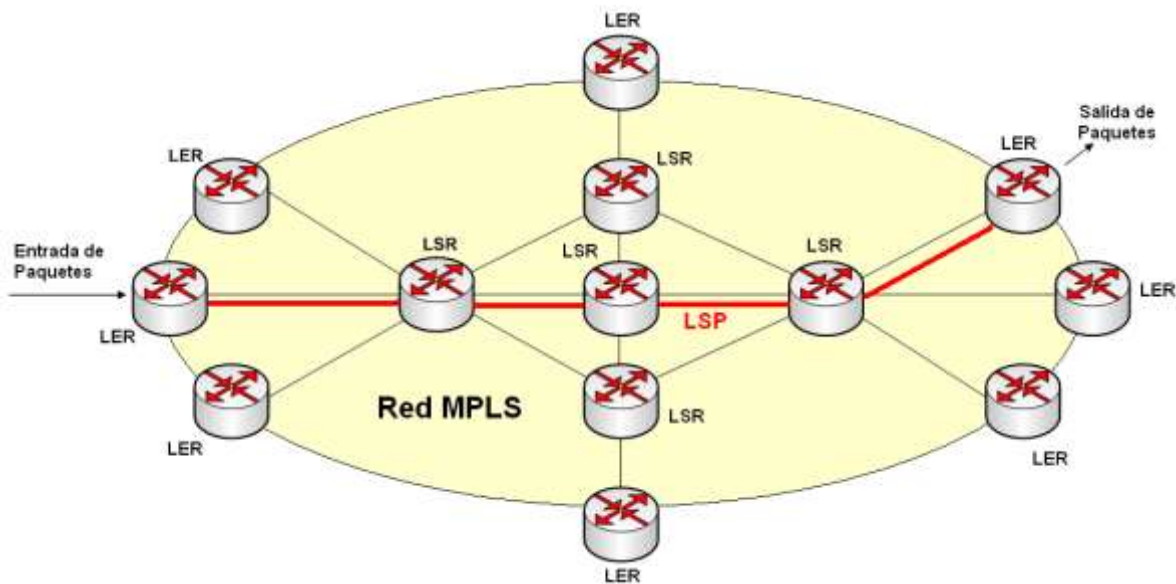


Figura 1.1 Dominio MPLS

La figura 1.1 muestra los componentes de una red MPLS: los enrutadores dentro del dominio MPLS se denominan Enrutadores de Conmutación de Etiquetas (LSRs, Label Switched Routers) y son los encargados de enrutar los paquetes hacia su destino final. Una clase especial de LSRs son los que se encuentran en el borde, es decir los que comunican el dominio MPLS con otros dominios como el IP, estos son los Enrutadores de Etiquetas de Frontera (LERs, Label Edge Routers) [6, 7].

En MPLS las rutas para el envío de los paquetes se asignan una sola vez. Cuando el paquete entra al dominio MPLS el enrutador que lo recibe (LER) es el encargado de calcular esa ruta y asignar una etiqueta al paquete. Es por esto que MPLS es una tecnología orientada a conexión, ya que inicialmente se establece una conexión extremo a extremo antes de empezar a enviar los paquetes. Los enrutadores a lo largo del trayecto (LSRs) no deben hacer ninguna decisión de enrutamiento a nivel de red, sino que utilizan la etiqueta asociada a cada paquete para buscarla en una tabla de envío que especifica cuál es el siguiente salto. Antes de enviarlo hacia el siguiente salto, el enrutador reemplaza la etiqueta asociada al paquete por una nueva para que sea utilizada por el siguiente enrutador dentro del Trayecto de Conmutación de Etiquetas (LSP, Label Switched Path) [6, 8]. Esta forma de enrutamiento proporciona gran flexibilidad y permite realizar enrutamiento explícito y basado en restricciones.

Cuando los paquetes entran al dominio MPLS los recibe el LER de ingreso que los clasifica y les asigna una Clase Equivalente de Envío (FEC, Forwarding Equivalent Class) basándose en elementos como requerimientos de QoS, nivel de prioridad, trayectos explícitos e información sobre el estado de la red. A cada FEC le corresponde una etiqueta, por lo tanto un grupo de paquetes con la misma etiqueta se envía por el mismo LSP y recibe el mismo tratamiento dentro de la red. Esta característica es la que permite a MPLS facilitar la implementación de calidad de servicio. De acuerdo a los parámetros mencionados, el nodo MPLS encontrará la ruta más adecuada para enviar al grupo de paquetes; para ello debe obtener información acerca del estado y las propiedades de los recursos disponibles en la red. Esto se logra utilizando las extensiones para ingeniería de tráfico de los protocolos de estado del enlace (Link-State Protocols) como OSPF (Open Shortest Path First) o ISIS (Intermediate System to Intermediate System). Así podrá intercambiar información con los demás nodos MPLS no solamente acerca de la topología y el estado de los enlaces sino también de los atributos administrativos de los enlaces y del ancho de banda disponible [5, 9].

Para poder establecer y mantener los LSPs dentro de la red MPLS es indispensable que los LSRs puedan intercambiar información acerca del significado de las etiquetas. Para ello utilizan protocolos de señalización, que pueden ser:

- LDP (Label Distribution Protocol)
- RSVP-TE (Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering)
- CR-LDP (Constraint-based Routing with LDP)

Los LSRs utilizan la información que transportan estos protocolos para construir sus tablas de envío [5, 9].

1.2 Atributos relacionados con los LSPs

Los protocolos RSVP-TE y CR-LDP incluyen entre sus extensiones para el soporte de ingeniería de tráfico la Prioridad de Retención (*HP, Holding Priority*) y la de Establecimiento (*SP, Setup Priority*). Estas dos prioridades se asocian a cada LSP y son utilizadas por el mecanismo de preemption para determinar la 'importancia' relativa entre los LSPs. Cada una de las prioridades puede tener un valor en el rango de 0 a 7 de manera que existen 8 niveles de prioridad. En el capítulo 2 se explica con más detalle la interacción de estas prioridades con el mecanismo de preemption.

1.3 Atributos relacionados con los recursos de los enlaces

El protocolo de pasarela interior (*IGP, Interior Gateway Protocol*) con extensiones para ingeniería de tráfico (OSPF-TE [10] – ISIS-TE [11]) distribuye información acerca de los recursos disponibles en los enlaces de la red: el ancho de banda máximo (B_{MAX}) y el ancho de banda máximo reservable (B_{max}). El ancho de banda máximo reservable no siempre es igual al ancho de banda real del enlace puesto que es posible que el administrador decida destinar sólo una porción del ancho de banda total a la ingeniería de tráfico.

La extensión más importante que tiene el IGP para la implementación de un mecanismo de preemption es aquella que le permite distribuir información indicando el ancho de banda que aún no ha sido reservado por cada una de las 8 prioridades en un enlace específico. La forma como se calculan los valores de ancho de banda no reservado por cada prioridad se explican más detalladamente en el capítulo 2.

Toda esta información relacionada con los recursos disponibles en la red de acuerdo a las prioridades, se almacena en los enrutadores de frontera o LERs dentro de una base de datos de ingeniería de tráfico (*TE-DB, Traffic Engineering Data Base*). El enrutamiento basado en restricciones (*CBR, Constraint-Based Routing*) utiliza la información que le suministra esta TE-DB para calcular trayectos.

1.4 El control de admisión y la decisión de hacer preemption

El control de admisión se realiza en cada uno de los enlaces por los que se va a establecer un nuevo LSP. Si en el enlace existe suficiente ancho de banda libre para satisfacer los requerimientos del nuevo LSP, este se admite. En una red en la que existe preemption es posible que no haya ancho de banda libre suficiente en el enlace pero que el ancho de banda en uso esté ocupado por LSPs que tienen prioridad inferior al nuevo LSP. En ese caso el nuevo LSP se admite y los LSPs de prioridad inferior se liberan. La selección de los LSPs que son liberados por preemption es entonces una decisión local, pues se realiza en cada enlace.

CAPÍTULO II. EL MECANISMO BÁSICO DE PREEMPTION

En el capítulo I se presentó el contexto que enmarca el presente trabajo de grado al describir los conceptos de MPLS y algunos conceptos de ingeniería de tráfico relevantes para el mecanismo de preemption. En el se mostró que la ingeniería de tráfico tiene como principal objetivo obtener el mayor provecho de los recursos de la red, maximizando el tráfico que puede circular por ella, al mismo tiempo que se transporta el tráfico de una manera más eficiente y confiable. Para lograrlo existen diferentes estrategias dentro del marco de la ingeniería de tráfico [2, 3], una de ellas es la estrategia de preemption. Este capítulo describe el mecanismo básico de preemption [3, 12, 13, 14] y explica detalladamente el proceso que tiene lugar al activar dicho mecanismo.

2.1 EL CONCEPTO DE PREEMPTION

En el momento previo al establecimiento de un LSP se hace un cálculo de la ruta por la que se va a enviar el tráfico, tradicionalmente cuando no se encontraba una ruta con recursos disponibles la petición para el establecimiento del LSP se rechazaba. Esta no es una medida deseable cuando el tráfico rechazado corresponde a un servicio de alta prioridad con requerimientos estrictos de QoS (pérdidas, retardos o jitter, entre otros). Como estrategia para evitar este comportamiento existe el mecanismo de preemption mediante el cual es posible que un LSP de alta prioridad que no encuentra recursos disponibles para su establecimiento, en lugar de ser rechazado, se *apropie* de los recursos que ya están siendo utilizados por LSPs de prioridad inferior dentro de una ruta determinada [3]. Estos últimos serán degradados a tráfico best effort o buscarán trayectos alternativos para reenrutarse y se espera que no se vean altamente afectados ya que su susceptibilidad ante eventos como pérdidas o retardos es reducida.

Puede decirse que en este proceso existe un LSP *apropiador* (el de alta prioridad) y un LSP *apropiado* (el de menor prioridad). Además, para aplicar la estrategia de preemption es necesario fijar una jerarquía que determine la prioridad relativa entre los LSPs, para lo cual se definen dos prioridades que se asocian a cada LSP:

Prioridad de Retención (*HP, Holding Priority*): Es la prioridad con la cual el LSP ya establecido mantiene los recursos [15].

Prioridad de Establecimiento (*SP, Setup Priority*): Es la prioridad con la cual un LSP puede *apropiarse* de los recursos de otro LSP [15].

Estas prioridades pueden tomar valores que van de 0 a 7, donde 0 es la máxima prioridad y 7 la menor prioridad.

Para tomar la decisión de hacer preemption se examina si la Prioridad de Establecimiento (*SP*) del nuevo LSP es mayor (numéricamente más pequeña) que la Prioridad de Retención (*HP*) del LSP candidato a ser *apropiado*, si se cumple esta condición se liberan los recursos usados por el LSP de menor prioridad para ser reasignados al nuevo LSP. En caso de que sean varios los LSPs candidatos a ser *apropiados*, se empieza seleccionando los LSPs de prioridad más baja y se va en orden ascendente hasta satisfacer el ancho de banda del LSP *apropiador*. El proceso finaliza cuando el LSP *apropiador* se establece exitosamente.

Siendo útil tanto a los objetivos orientados al tráfico como a los orientados al desempeño, la estrategia de preemption se usa principalmente cuando los recursos en la red no son suficientes para transportar la totalidad de tráfico demandado y existe congestión [14]. También se utiliza en caso de fallas en la red haciendo parte de una política de recuperación que permite el restablecimiento más rápido de los LSPs más prioritarios.

El mecanismo de preemption busca contribuir en la satisfacción de los requerimientos de QoS del tráfico de alta prioridad asegurando su envío por rutas relativamente favorables, de esta manera se logra un mejor tratamiento del tráfico de aplicaciones de tiempo real, las cuales son sensibles al retardo y a las pérdidas, brindando confiabilidad cuando se trabaja en un ambiente de servicios diferenciados junto con MPLS [15]; esto por supuesto a expensas de quitar los recursos al tráfico *apropiado*, que deberá degradarse a best effort o, en caso de que la red implemente políticas de reenrutamiento, interrumpirse hasta encontrar una ruta alternativa y podría incluso descartarse al no encontrarla [16].

2.1.1 IGP-TE Y EL MECANISMO DE PREEMPTION

Para poder aplicar el mecanismo de preemption es necesario que los enrutadores que determinan la ruta de un LSP tengan conocimiento del ancho de banda disponible en los enlaces de la red para cada una de las prioridades de preemption; con ese propósito, el IGP con extensiones para ingeniería de tráfico [10, 11] proporciona 8 valores para el ancho de

banda disponible en el enlace (Bu , *Bandwidth Unreserved*), uno por cada nivel de prioridad como lo muestra (2.1).

$$\mathbf{Bu} = [Bu(0), Bu(1), \dots, Bu(n) \dots, Bu(7)] \quad (2.1)$$

A cada enlace en la red le corresponde un vector \mathbf{Bu} , cada componente del vector ($Bu(n)$) expresa el ancho de banda disponible para la prioridad n , lo que significa que un nuevo LSP con ancho de banda B_L y prioridad de establecimiento $SP = n$ estará en capacidad de utilizar la cantidad de ancho de banda $Bu(n)$. Ahora bien, $Bu(n)$ es igual al ancho de banda total del enlace menos la suma de los anchos de banda reservados por LSPs de prioridad de retención (SP) igual o mayor (numéricamente menor) que n como se observa en (2.2).

$$Bu(n) = Be - \sum_{i=0}^n Br(i) \quad (2.2)$$

Be = Ancho de banda total del enlace

$Br(i)$ = Ancho de banda reservado por los LSPs con prioridad de retención $HP=i$

Solamente se considera para el cálculo de $Bu(n)$ el ancho de banda reservado por LSPs de la misma prioridad o de prioridades superiores y se comporta como si los LSPs menos prioritarios no existieran, puesto que el LSP de prioridad de establecimiento n podrá *apropiarlos* y utilizar el ancho de banda que ellos ocupan [17].

Una vez se ha establecido el LSP, para cada enlace de la ruta, el vector de ancho de banda disponible \mathbf{Bu} se actualiza basándose en su prioridad de retención HP (2.3):

$$\text{Si } n \geq hp, \quad \text{Entonces } Bu(n) = Bu(n) - B_L, \quad (0 \leq n \leq 7) \quad (2.3)$$

2.2 EL PROCESO DE PREEMPTION

Esta sección describe el proceso que se lleva a cabo al activar el mecanismo básico de preemption. Para ilustrarlo mediante un ejemplo se considera la figura 2.1, en ella se muestra una red MPLS con siete enrutadores (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7) y nueve enlaces bidireccionales. Cada enlace tiene una capacidad de 100 Mb.

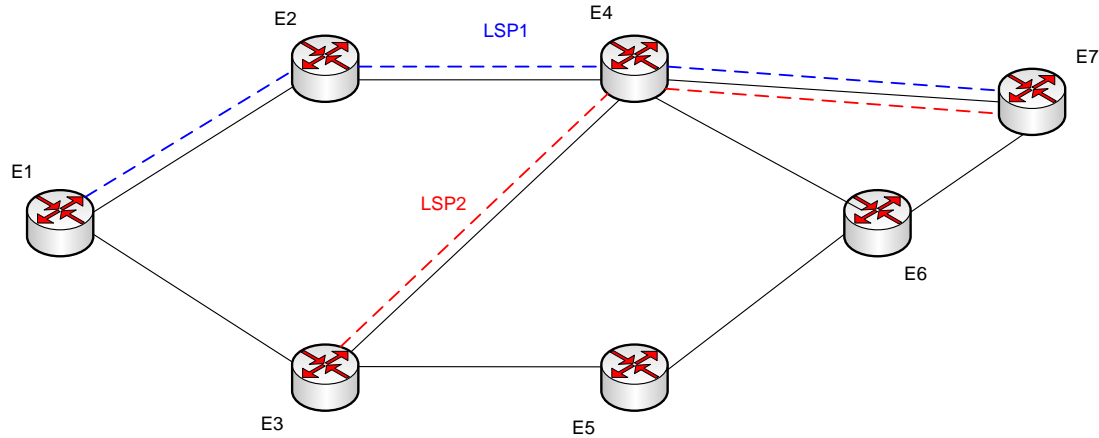


Figura 2.1 El proceso de preemption

Se tienen dos peticiones para el establecimiento de LSPs con los siguientes requerimientos:

LSP (L1): Del nodo E1 al nodo E7
 $BW_{L1} = 100 \text{ Mb}$
 $(sp_{L1}, hp_{L1}) = (7, 7)$

LSP (L2): Del nodo E3 al nodo E7
 $BW_{L2} = 100 \text{ Mb}$
 $(sp_{L2}, hp_{L2}) = (0, 0)$

La señalización para el establecimiento de los LSPs puede hacerse bien sea con CR-LDP [12] o con RSVP-TE [13] ya que ambos protocolos tienen extensiones para ingeniería de tráfico y una de sus características es que soportan preemption. Inicialmente se describirá cómo sucede preemption utilizando el protocolo CR-LDP y posteriormente utilizando RSVP-TE.

2.2.1 Preemption con CR-LDP

Se considera en primer lugar la petición para el LSP L1; cuando esta petición llega a E1, el algoritmo de enrutamiento calculará la ruta E1-E2-E4-E7 (que es la ruta más corta) y el protocolo CR-LDP iniciará la señalización para establecer el LSP. Los pasos son los siguientes:

1. Se transmite un mensaje REQUEST [12] desde el enrutador de origen hacia el enrutador de destino a lo largo de la ruta calculada. Si existen recursos disponibles en cada enlace de la ruta calculada que satisfagan la petición de L1, entonces:

2. Se transmite un mensaje MAPPING [12] desde el destino hacia el origen para distribuir las etiquetas y reservar el ancho de banda. A medida que pasa el mensaje MAPPING por cada enrutador se va creando el LSP L1.

Después de establecido L1, llega a E3 la petición para establecer el LSP L2. El algoritmo de enrutamiento calcula la ruta E3-E4-E7 para L2. Como la prioridad de establecimiento de L2 ($SP_{L2} = 0$) es superior (numéricamente inferior) a la prioridad de retención de L1 ($HP_{L1}=7$), entonces el enrutador E3 considera que hay 100Mb de ancho de banda disponible en el enlace E4-E7. Esto sucede porque durante el establecimiento de L1 se actualizan los anchos de banda del enlace E4-E7 y solamente se pone en cero el ancho de banda del nivel 7 del vector **Bu** y los otros niveles permanecen en 100Mb de ancho de banda libre. Cuando el enrutador E3 calcula la ruta para L2, solamente tiene en cuenta el ancho de banda disponible para el nivel 0 ($SP_{L2} = 0$) que es igual a 100Mb. E3 considera entonces que puede utilizar el enlace E4-E7 para establecer L2 y se inicia la señalización de L2 de la siguiente manera:

3. Se envía un mensaje REQUEST desde E3 con dirección a E7 por la ruta calculada.
4. E7 envía un mensaje MAPPING hacia E3. Cuando el mensaje MAPPING llega a E4 este detecta que no hay recursos disponibles para satisfacer los dos LSPs, entonces hará preemption sobre L1, que tiene una prioridad de retención inferior (numéricamente superior).
5. E4 envía un mensaje de error WITHDRAW hacia E1 (enrutador cabecera de L1) y un mensaje de RELEASE hacia E7 (enrutador destino) con un código de error específico para notificar que se hará preemption con lo cual se suprime L1.
6. El enrutador E1 recibe la notificación de preemption. Como el LSP L1 ha sido eliminado, el tráfico que por él se transportaba no tiene recursos reservados y pasa a ser tratado como best effort. Dependiendo de las políticas de red, es posible también reenrutar al LSP L1 por una ruta alternativa, en este caso L1: E1-E2-E4-E6-E7.

La figura 2.2 resume los seis pasos anteriores.

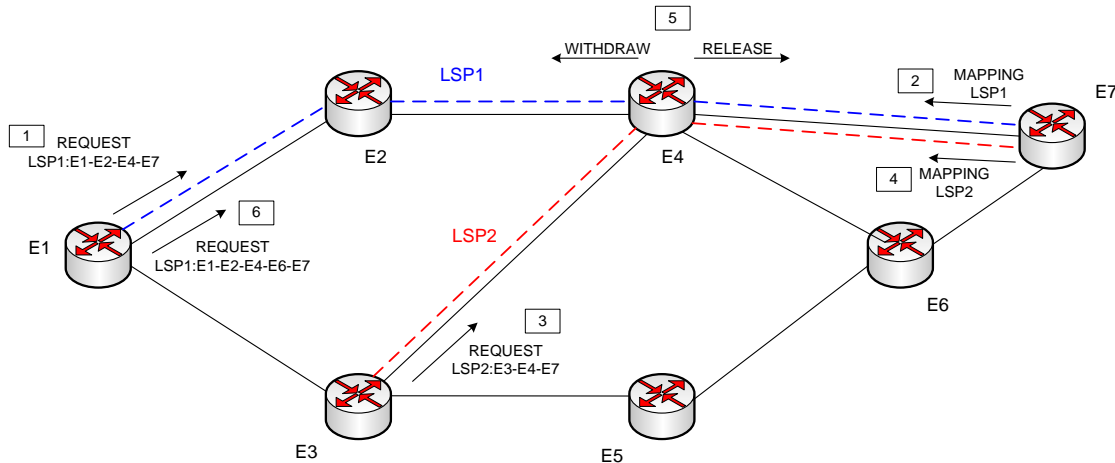


Figura 2.2 Preemption con CR-LDP

2.2.2 Preemption con RSVP-TE

El proceso de preemption con el protocolo RSVP-TE es básicamente el mismo que con CR-LDP, la única diferencia reside en que los mensajes de señalización varían para cada uno de los protocolos.

Se considera la misma topología y los LSPs L1 y L2 de la sección 2.2.1. Inicialmente llega a E1 la petición para establecer L1. Los pasos para la señalización con RSVP-TE son:

1. Se envía un mensaje PATH [13, 18] desde el origen hacia el destino a lo largo de la ruta calculada. Si existen recursos disponibles en cada enlace de la ruta calculada que satisfagan la petición de L1, entonces:
2. Se envía un mensaje RESV desde el destino hacia el origen para distribuir las etiquetas y reservar el ancho de banda. Con el paso del mensaje RESV por cada enrutador se va creando el LSP L1.

Después de establecido L1, llega a E3 la petición para establecer el LSP L2.

3. Se envía un mensaje PATH desde E3 con dirección a E7 por la ruta calculada.
4. E7 envía un mensaje RESV hacia E3. Cuando el mensaje RESV llega a E4 este detecta que no hay recursos disponibles para satisfacer los dos LSPs, entonces hará preemption sobre L1, que tiene una prioridad de retención inferior (numéricamente superior) que L2.
5. E4 envía un mensaje de error PATH_ERROR hacia E1 (enrutador cabecera de L1) y un mensaje RESV_ERROR hacia E7 (enrutador destino) con un código de error específico para notificar que se hará preemption, con lo cual se elimina el LSP L1.

- El enrutador E1 recibe la notificación de preemption. Como el LSP L1 ha sido eliminado, el tráfico que por él se transportaba no tiene recursos reservados y pasa a ser tratado como best effort. Dependiendo de las políticas de red, es posible también reenrutar al LSP L1 por una ruta alternativa, en este caso L1: E1-E2-E4-E6-E7

La figura 2.3 resume los seis pasos anteriores:

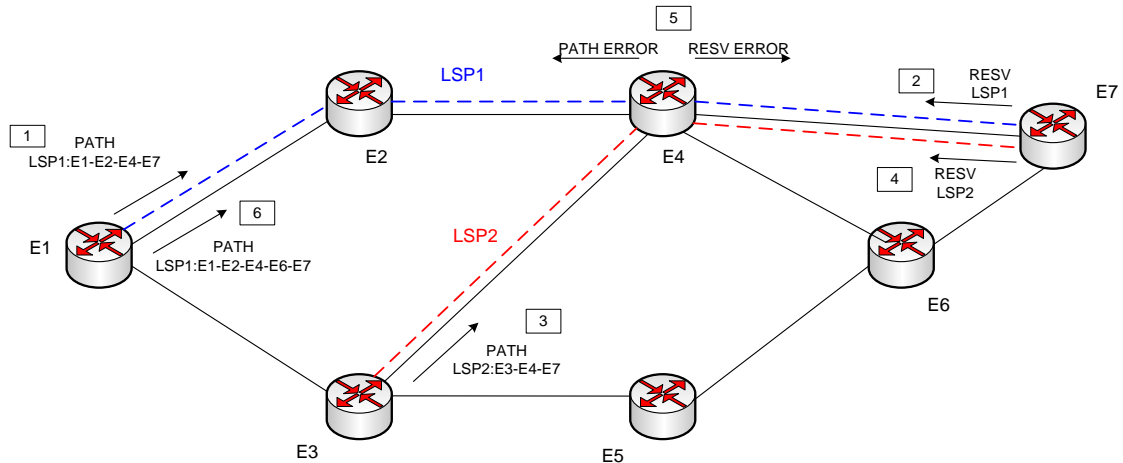


Figura 2.3 Preemption con RSVP-TE

2.3 Hard y Soft Preemption

De acuerdo al tratamiento que se le brinde al tráfico *apropiado* el proceso de preemption se puede realizar de dos formas:

2.3.1 Hard Preemption

En la sección 2.2 se describió el proceso que tiene lugar al activar el mecanismo básico de preemption. Puede observarse que, como resultado de dicho proceso, un LSP que ha sido objeto de preemption (LSP *apropiado*) se destruye inmediatamente. El nodo donde sucede preemption (el nodo E4 en la figura 2.1) destruye la información correspondiente en sus tablas de envío, envía un mensaje de error hacia el nodo cabecera y otro hacia el nodo destino eliminando el LSP. Cuando el enrutador cabecera se da cuenta de que el LSP ha sido destruido tratará de reenrutarlo por un trayecto alternativo, es decir, recibe el mismo tratamiento que un LSP destruido por fallas en la red. El tráfico transportado por el LSP *apropiado* se verá entonces interrumpido hasta que el LSP se restablezca por un trayecto alternativo. Lo anterior se conoce como preemption dura (*hard-preemption*).

2.3.2 Soft Preemption

Existe también la posibilidad de hacer preemption suave (*soft-preemption*) en la que el LSP *apropiado* no se destruye inmediatamente sino que primero se calcula una ruta alternativa para reenrutarlo basándose en la política de *make before break* [19]. El nodo que genera preemption mantiene el LSP y envía hacia su nodo cabecera un mensaje que le advierte que se va a realizar preemption. Esto deja un tiempo al nodo cabecera para calcular una nueva ruta por la cual reenrutar el LSP *apropiado* y/o para reducir el volumen de tráfico que circula por el LSP antes de destruirlo. En el enrutador que originó preemption se inicia también un temporizador, si el nodo de cabecera no ha destruido al LSP *apropiado* antes de la expiración del temporizador, entonces se pasa a modo hard-preemption y se elimina el LSP. Lo que se busca al hacer soft-preemption es evitar que se afecte el tráfico perteneciente al LSP *apropiado*. Sin embargo, durante un cierto tiempo el LSP *apropiado* y el *apropiador* cohabitan en el mismo enlace sin que haya suficiente ancho de banda en él para ambos, existe por consiguiente un riesgo de congestión y de pérdida de paquetes si no se redimensionan los LSPs, es decir si el ancho de banda que realmente circula por el LSP es igual al ancho de banda reservado. El modo de soft-preemption tiene una mayor utilidad en una red que pueda controlar esa congestión al nivel del plano de datos como por ejemplo una red que soporte Diff-Serv (*Differentiated Services*) asignando una clase de servicio Diff-Serv superior a los LSPs con altas prioridades [19]. La escogencia entre hard o soft preemption es un asunto de política de red [20].

2.4 Inconvenientes que se pueden presentar al realizar preemption

La aplicación de preemption puede acarrear efectos negativos, tales como un exceso en los procesos de reenrutamiento, establecimiento o supresión de LSPs, lo cual afectaría la estabilidad de la red a causa de la cantidad de mensajes de señalización que deben transportarse (plano de control) y también por la interrupción que genera en el tráfico suprimir y reenrutar LSPs (plano de datos). Entre otros efectos que pueden producirse por las mismas razones está el efecto de cascada o avalancha que significa que un LSP que ha sido eliminado por preemption, al reenrutarse, provoca preemption en otro LSP de aún más baja prioridad. Por ejemplo, un LSP con prioridad 0 provoca preemption a otro de prioridad 1, y este a uno de prioridad 2, y así sucesivamente generando un exceso de reenrutamiento. También puede ser perjudicial el efecto de bloqueo, que ocurre cuando un LSP que ha sido objeto de preemption no encuentra una ruta alternativa para reestablecerse [14].

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

En el capítulo dos se describió el mecanismo básico de preemption de acuerdo a los estándares existentes [3, 12, 13], en él se explica que éste puede utilizarse para asegurar la calidad de servicio del tráfico de alta prioridad en caso de que exista competición por los recursos, bien sea por congestión o por fallos en la red. Al finalizar dicho capítulo se exponen los aspectos negativos que conlleva la aplicación de este mecanismo.

Se han propuesto numerosas soluciones que buscan aplicar la estrategia de preemption al mismo tiempo que se reduce el impacto negativo que ella pueda generar, se trata de mecanismos de preemption que adicionan al mecanismo básico una o varias características de funcionamiento para optimizar los resultados. En su gran mayoría son desarrollos académicos o investigativos. Al considerarlos en conjunto, una de las conclusiones más sobresalientes es el hecho de que son todos diferentes entre sí. Como parte importante de este trabajo de grado se ha hecho un análisis de esos mecanismos orientado a identificar sus características de funcionamiento y, de acuerdo a ellas hacer una clasificación de los mismos.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

Para el análisis de los mecanismos de preemption y para determinar los aspectos y características relevantes de su funcionamiento, se seleccionó un grupo que fuera lo suficientemente diverso y representativo, también se tuvieron en cuenta aquellos que con más frecuencia se referencian en la literatura.

A continuación se describe cada uno de los mecanismos seleccionados. Algunos de ellos están estrechamente relacionados con algún mecanismo de enrutamiento, y en la literatura encontrada, se muestran muchas veces el mecanismo de enrutamiento y el de preemption como una sola unidad. Ya que el enrutamiento está por fuera del alcance de este proyecto, es importante aclarar que para la descripción de cada uno de los mecanismos que se muestran a continuación se han identificado las características propias de preemption para separarlas del enrutamiento.

3.1.1 V-PREPT (POLÍTICA VERSÁTIL PARA HACER PREEMPTION) [21]

Se considera una petición para establecimiento de un nuevo LSP con un ancho de banda B_L , una prioridad de establecimiento y un trayecto predeterminado. La petición irá recorriendo la ruta que tiene asignada y en algún momento llegará a un enlace en el que no haya recursos suficientes para establecer el nuevo LSP así que esta petición desencadena preemption. Una vez activado, este mecanismo examina el ancho de banda requerido por el nuevo LSP B_L y lo compara con el ancho de banda disponible en el enlace. La diferencia entre estas dos cantidades (r) indica la cantidad de ancho de banda que se necesita *apropiar*: $r = B_L - A_{bw}(l)$. Por lo tanto r es igual al ancho de banda de la petición menos el ancho de banda disponible en el enlace l : $A_{bw}(l)$.

El paso siguiente es escoger los LSPs que van a ser *apropiados*. Se define L como la cantidad de LSPs candidatos a ser *apropiados*. El algoritmo se encarga de seleccionar entre los L candidatos un grupo de LSPs que libere una cantidad de ancho de banda mayor o igual a r . Para ello define una función objetivo que busca alcanzar tres objetivos principales en el momento de hacer la selección:

- Minimizar la prioridad de LSPs *apropiados*.
- Minimizar el número de LSPs *apropiados*.
- Minimizar el ancho de banda *apropiado*.

Se define también \mathbf{z} como un vector compuesto por L variables binarias, cada una definida como se muestra en (3.1):

$$\mathbf{z}(l) = \begin{cases} 1, & \text{si el LSP va a ser } \textit{apropiado} \\ 0, & \text{si el LSP no va a ser } \textit{apropiado} \end{cases} \quad (3.1)$$

Este vector determina cuáles LSPs serán objeto de preemption: por cada LSP candidato existe un componente en el vector \mathbf{z} , si el componente es 1 el LSP será *apropiado* si el elemento es 0 el LSP no será *apropiado*. La función objetivo que permite encontrar los LSPs más adecuados es (3.2):

$$F(\mathbf{z}) = \alpha(\mathbf{z} \cdot \mathbf{y}^T) + \beta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{1}^T) + \gamma(\mathbf{z} \cdot \mathbf{b}^T) \quad (3.2)$$

Donde \mathbf{y}^T , $\mathbf{1}^T$ y \mathbf{b}^T son vectores transpuestos de manera que al multiplicar cada uno de ellos por el vector \mathbf{z} el resultado será un escalar, por lo tanto $F(\mathbf{z})$, es a su vez un escalar. La idea es encontrar un vector \mathbf{z} tal que minimice el valor de $F(\mathbf{z})$. Como se puede observar, $F(\mathbf{z})$ está compuesta por tres términos, cada uno de ellos representa los tres objetivos anteriormente

mencionados: el término $\mathbf{z} \cdot \mathbf{y}^T$ representa la prioridad de los LSPs *apropiados*, $\mathbf{z} \cdot \mathbf{1}^T$ representa el número de LSPs *apropiados* y $\mathbf{z} \cdot \mathbf{b}^T$ representa el ancho de banda *apropiado*. Los coeficientes α , β , γ son pesos que pueden configurarse para darle mayor o menor importancia a cada uno de los objetivos. Debe cumplirse la siguiente condición para satisfacer el ancho de banda requerido por el nuevo LSP: $\mathbf{z} \cdot \mathbf{b}^T \geq r$

Para cumplir con la función objetivo los autores desarrollan un algoritmo heurístico que se aproxime a un resultado óptimo y proponen la ecuación (3.3):

$$H(l) = \alpha y(l) + \beta \left(\frac{1}{b(l)} \right) + \gamma (b(l) - r)^2 \quad (3.3)$$

Por cada LSP candidato a ser *apropiado* l , se calcula un valor $H(l)$. Al igual que en la función objetivo, la ecuación está compuesta por tres términos, cada uno de ellos representa uno de los tres objetivos del algoritmo heurístico:

- El término $\alpha y(l)$ representa el costo de *apropiar* LSPs según su prioridad.
 $y(l) = 8 - p(l)$, donde $p(l)$ es la prioridad de retención del LSP l , y el 8 corresponde a las 8 prioridades de preemption. A mayor prioridad, este término tendrá un mayor valor.
- El término $\beta(1/b(l))$ representa la elección de un mínimo número de LSPs para *apropiar*, siendo $b(l)$ el ancho de banda del LSP candidato. A mayor ancho de banda del LSP, este término será más pequeño. Si se escogen LSPs con ancho de banda pequeño, será necesario hacer preemption de una mayor cantidad de LSPs para poder satisfacer r . Por el contrario, si se escogen LSPs con gran ancho de banda serán menos los LSPs que se *apropiarán*.
- $\gamma(b(l) - r)^2$ Este término se encarga de penalizar la escogencia de un LSP que llevaría a un excesivo desperdicio de ancho de banda. $(b(l) - r)$ expresa la diferencia entre el ancho de banda necesario para ser *apropiado* (r) y el ancho de banda del LSP candidato ($b(l)$); se eleva al cuadrado para obtener un valor positivo. Entre más pequeño sea este término, habrá menor diferencia entre el ancho de banda del LSP y el ancho de banda necesario, con lo cual se evita el desperdicio de ancho de banda *apropiado*.

Los coeficientes α , β , γ son valores que el administrador de la red puede configurar para dar mayor o menor peso a cada uno de los objetivos de la función. Por ejemplo, un valor de $\beta=0$ indica que el número de LSPs *apropiados* no es importante (esto sucede cuando el reenrutamiento no es muy costoso, por ejemplo en una topología pequeña).

Para hacer preemption se seleccionarán los LSPs que resulten en valores de H más pequeños en orden ascendente hasta que se alcance un valor mayor o igual a r .

En la literatura analizada, existen algunos mecanismos que se basan en V-PREPT y le adicionan ciertas características de funcionamiento. Este es el caso de los tres mecanismos que se describen a continuación.

3.1.2 V-PREPT MEJORADO [14]

Es un mecanismo creado por los mismos autores de V-PREPT [21] que le adiciona a este último un cuarto criterio para la selección de LSPs, el criterio de probabilidad de bloqueo. Al igual que en V-PREPT, para cada LSP candidato a ser *apropiado* l , se calcula un valor de $H(l)$ con (3.4):

$$H(l) = \alpha y(l) + \beta \left(\frac{1}{b(l)} \right) + \gamma (b(l) - r)^2 + \theta b(l) \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) se compone de cuatro términos, los tres primeros términos tienen el mismo significado que en V-PREPT (es decir cada uno representa uno de los tres criterios de selección respectivamente: prioridad de los LSPs, número de LSPs *apropiados* y ancho de banda desperdiciado), se seleccionará para preemption un grupo de LSPs que satisfagan el ancho de banda requerido y tales que minimicen el valor de $H(l)$. En este caso se busca reducir la probabilidad de bloqueo de los LSPs *apropiados*, el bloqueo se presenta cuando un LSP que ha sido eliminado por acción de un mecanismo de preemption no encuentra un trayecto alternativo para poder reenrutarse. De acuerdo a los autores, una petición para establecer un LSP con gran ancho de banda tendrá menos posibilidades de encontrar una ruta disponible que un LSP con ancho de banda reducido. Por lo tanto la forma de evitar el bloqueo en este mecanismo es seleccionar para preemption los LSPs con ancho de banda pequeño, de esta forma habrá mayores probabilidades de encontrar rutas alternativas para acomodar a los LSPs *apropiados*. Es por esto que añaden un cuarto término a (3.3): $\theta b(l)$ que captura el costo de *apropiar* LSPs con gran ancho de banda.

Los coeficientes $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ son pesos que determinan la importancia de cada criterio y, al igual que en V-PREPT, se dejan a elección del administrador. Sin embargo los autores recomiendan una configuración de estos coeficientes tal que $\theta = 0$ cuando $\gamma > 0$. Esto ocurre porque, al procurar minimizar la probabilidad de bloqueo, este algoritmo heurístico escogerá para su *apropiación* una gran cantidad de LSPs con ancho de banda pequeño que satisfagan la petición, por lo tanto γ que es el peso que busca minimizar el ancho de ancho de banda *apropiado* debe ser cero.

3.1.3 ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO [22]

El objetivo de este algoritmo es que se disminuya la insatisfacción experimentada por el usuario debido a la interrupción en la conexión cuando se realiza el proceso de preemption. De esta manera los LSPs que se escogen para ser *apropiados* son los que proporcionan menor satisfacción al usuario en el momento de aplicar preemption.

La insatisfacción experimentada por el usuario esta relacionada con la falta de continuidad de la transmisión y depende del tipo de aplicación y el tiempo que se lleva transmitiendo.

Para el algoritmo es fundamental el cálculo del término US (User Satisfaction - Satisfacción del usuario) que representa el nivel de satisfacción del usuario que se prevé obtener por el uso de la red a medida que avanza la transmisión, matemáticamente se define en la ecuación (3.5):

$$US = \begin{cases} e^{k\left(\frac{T}{D}-1\right)} & \text{si } T < D \\ 1 & \text{si } T \geq D \end{cases} \quad (3.5)$$

Donde T es el tiempo que se lleva transmitiendo antes de realizar el proceso de preemption, D es el tiempo promedio de duración de la transmisión y depende del tipo de aplicación, de esta manera este tiempo promedio es igual para aplicaciones del mismo tipo, k es un valor que depende también del tipo de servicio y permite hacer énfasis en la importancia que tiene la satisfacción del usuario para determinado servicio. De (3.5) se puede deducir que la satisfacción del usuario aumenta exponencialmente y es máxima cuando se encuentra por encima del tiempo promedio de la transmisión.

Para cumplir con su objetivo de minimizar el nivel de insatisfacción experimentado por el usuario este mecanismo, modifica la función objetivo V-PREPT [21], obteniendo la ecuación (3.6):

$$F(\mathbf{z}) = \alpha(\mathbf{z} \cdot \mathbf{y}^T) + \beta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{1}^T) + \gamma(\mathbf{z} \cdot \mathbf{b}^T) + \delta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{d}^T) \quad (3.6)$$

En (3.6) se observa que los tres primeros términos son los mismos términos de la función objetivo de V-PREPT, pero existe un nuevo término agregado: $\delta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{d}^T)$, donde \mathbf{d} es un vector compuesto de n elementos (con n igual al número de LSPs *apropiables*), cada uno de estos elementos representa el nivel de insatisfacción que generaría en el usuario *apropiar* ese LSP. Los componentes del vector \mathbf{d} se denotan d_i y se calculan como se muestra en (3.7):

$$d_i = 1 - US_i \quad (3.7)$$

Por tanto la solución consiste en que dados los valores de $\alpha, \beta, \gamma, y, b, d$ encontrar los componentes del vector z que disminuya el valor de $F(z)$.

Para encontrar cuáles LSPs son seleccionados se aplica un algoritmo heurístico que se determina por (3.8):

$$H(l) = \alpha y(l) + \beta + \gamma(b(l) - r)^2 + \delta(b(l) - r)^2 d(l) \quad (3.8)$$

En esta ecuación los tres primeros términos son los mismos del heurístico de V-PREPT [21], el cuarto es un nuevo término $\delta(b(l) - r)^2 d(l)$ y representa la incidencia de la insatisfacción experimentada por el usuario para un LSP determinado dentro de la función objetivo, con $d(l) = 1 - US$ que representa la insatisfacción del usuario cuando el LSP l es *apropiado*, y δ es el peso asignado por el administrador para hacer énfasis en la importancia que tiene el criterio dentro de (3.8).

De esta manera cuando se necesita aplicar el proceso de preemption, el algoritmo calcula el valor de $H(l)$ para cada LSP *apropiable*, luego se elegirán los LSPs *apropiados* iniciando con los que tengan el valor más bajo de $H(l)$, en forma ascendente, hasta completar el ancho de banda requerido por el LSP *apropiador*.

3.1.4 PNBR (MECANISMO CONSISTENTE CON LA PERSPECTIVA DE INGRESOS ECONÓMICOS) [23]

Un factor importante para los proveedores de red son los ingresos económicos que se reciben por prestar servicios a los clientes. Los ingresos esperados o perspectiva de ingresos están directamente relacionados con la satisfacción experimentada por el usuario por la continuidad del servicio. Cuando se realiza el proceso de preemption se causan interrupciones en el servicio y se generan repercusiones en la satisfacción del usuario y por ende en la perspectiva de ingresos.

En este contexto existen cuatro niveles de satisfacción del usuario:

- 1) Totalmente satisfecho.
- 2) Poco satisfecho.
- 3) Poco insatisfecho.
- 4) Totalmente insatisfecho.

Cada uno de ellos aporta una proporción diferente al índice de ingresos.

Este mecanismo tiene por objetivo minimizar la pérdida del índice de ingresos (Revenue Index - RI) causada por el procedimiento de preemption, para ello modifica la función objetivo de V-PREPT [21] con la cual se escogen los LSPs *apropiados*.

La selección de los LSPs *apropiados* se realiza utilizando la función objetivo mostrada en (3.9).

$$F(\mathbf{z}) = \alpha(\mathbf{z} \cdot \mathbf{y}^T) + \beta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{1}^T) + \gamma(\mathbf{z} \cdot \mathbf{b}^T) + \delta(\mathbf{z} \cdot \mathbf{x}^T) \quad (3.9)$$

Los tres primeros términos de la Ecuación (3.9) tienen el mismo significado que en V-PREPT. El cuarto término está relacionado con el índice de ingresos, donde \mathbf{x}^T es un vector compuesto por n elementos denotados como x_i e indican la pérdida estimada en RI, y δ es el coeficiente que se usa para darle mayor o menor peso al criterio de índice de ingresos. El objetivo es optimizar la función $F(\mathbf{z})$ encontrando los LSPs que minimicen dicha función. Esto se logra a través de la aplicación del algoritmo heurístico definido por la ecuación (3.10).

$$H(l) = \alpha y(l) + \beta + \gamma(b(l) - r)^2 + \delta(b(l) - r)^2 x(l) \quad (3.10)$$

$$\text{Con } x(l) = \frac{p(l)}{\sum_{i=1, \dots, m} p_i} (1 - R_l)$$

Donde R_l representa el índice de ingresos para el LSP l si es *apropiado*. R_l se calcula para cada LSP *apropiable* teniendo en cuenta en qué nivel se ubica la satisfacción del usuario en el instante en que se realiza preemption. A cada uno de los cuatro niveles de satisfacción del usuario le corresponde un valor de R_l determinado por el administrador de la red.

La variable p_i expresa el precio por unidad de ancho de banda para cada categoría o tipos de aplicaciones, m el número total de categorías de precio diferentes y $p(l)$ es el precio por unidad de ancho de banda de la categoría a la que pertenece l .

3.1.5 SERA (Service Ratio Based Preemption) [24]

Dentro del proceso de preemption los LSPs *apropiados* se terminan, en consecuencia se pierde el tiempo y el trabajo invertido en su establecimiento, causando que el throughput de la red disminuya, sobre todo en redes donde el throughput depende de que los servicios transmitidos se completen satisfactoriamente.

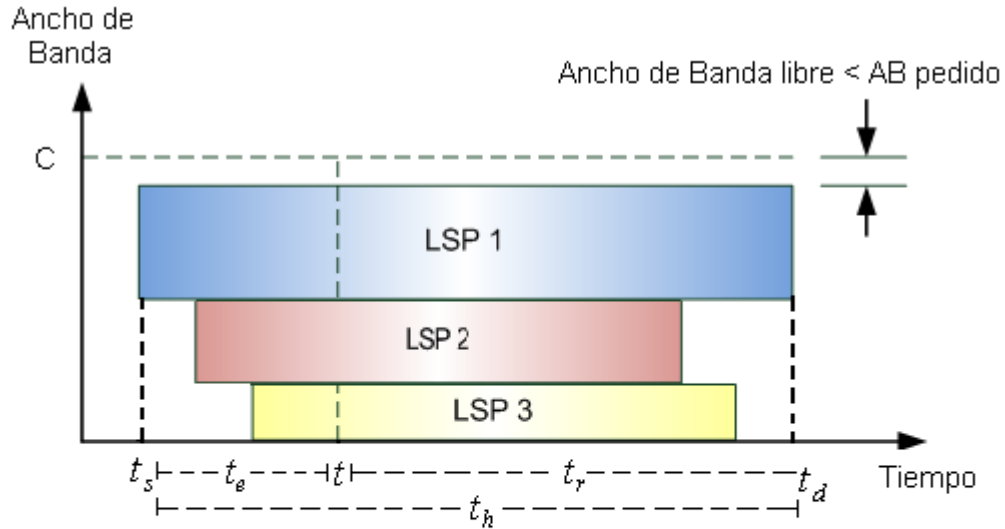
En este marco se creó el mecanismo de preemption SERA que tiene como objetivo seleccionar los LSPs *apropiados* que menos afecten el throughput de la red. Por ello es conveniente elegir los LSPs que apenas hayan iniciado su transmisión sobre otros LSPs que estén cercanos a terminarla.

Dentro del funcionamiento de SERA es importante definir los siguientes tiempos:

Tiempo de Retención (t_h): Es el tiempo que debe transcurrir desde el inicio de la emisión de tráfico en un LSP hasta que ésta se complete y finalice; en la figura 3.1 corresponde al periodo comprendido entre el tiempo de inicio t_s y el tiempo de finalización de la emisión t_d .

Tiempo Transcurrido (t_e): Es el intervalo de tiempo entre el inicio de la transmisión y el instante t donde se realiza el proceso de preemption.

Tiempo Restante de Retención (t_r): Es el tiempo entre el momento que se realiza preemption y el tiempo en que se finalizaría la transmisión del tráfico de un LSP. En la figura 3.1 se muestra como el intervalo entre t y t_d .



t_s = tiempo de inicio
 t_d = tiempo de finalización
 t_e = tiempo transcurrido
 t_h = tiempo de retención
 t_r = tiempo restante de retención
 C = Capacidad del enlace
 t = tiempo en el que se realiza preemption

AB pedido = Ancho de banda requerido por el LSP apropiador

Figura 3.1 Ancho de Banda demandado por los LSPs

La figura 3.1 muestra dos características, la primera es el ancho de banda utilizado por los LSPs dentro de un enlace de capacidad C y la segunda es el tiempo de retención de cada LSP dentro del enlace.

En un instante t se requiere establecer un nuevo LSP, si el ancho de banda libre no es suficiente para los requerimientos del LSP *apropiador*, se necesita realizar el proceso de preemption. Se escogerá como LSPs *apropiables* al conjunto de LSPs cuya prioridad de retención sea menor a la prioridad de establecimiento del LSP *apropiador*.

Con el propósito de ayudar a determinar los LSPs *apropiados* que cumplan con el objetivo de SERA se define el concepto de tasa de servicio de conexión ($\alpha(t)$) que representa el progreso de la transmisión del tráfico de los LSPs existentes para un tiempo t , y se calcula como el

cociente entre el tiempo restante de retención (t_r) y el tiempo transcurrido (t_e) más el tiempo de inicio (t_s) tal como se muestra en (3.11), donde w_1 y w_2 son pesos asignados por el administrador.

$$\alpha(t) = w_1 t_s + w_2 \frac{t_r}{t_e}, \quad t_e > 0 \quad (3.11)$$

De este modo para la selección de LSPs se calcula el valor de la tasa de servicio de conexión para los LSPs *apropiables*, eligiendo los LSPs que tengan mayor valor de $\alpha(t)$ hasta completar el ancho de banda necesario requerido por el LSP.

Entonces los LSPs *apropiados* son los que menos tiempo llevan transmitiendo tráfico, respecto al tiempo que les falta para completar exitosamente la transmisión. Por consiguiente los LSPs elegidos son los que menos afectan el throughput de la red, permitiendo que las transmisiones que estén cercanas a completarse continúen.

3.1.6 MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO [25]

El mecanismo funciona de la siguiente manera: Se considera un nuevo LSP que es el que desencadena preemption. El nuevo LSP tiene un ancho de banda y prioridad específicos y una ruta predeterminada. El nodo en donde sucede preemption es un nodo central que contiene información sobre la topología de toda la red y el ancho de banda reservado por los LSPs existentes en ella. Lo primero que hace el algoritmo es encontrar en la ruta dada los LSPs que son susceptibles de preemption, es decir los que tengan prioridades menores que la del nuevo LSP e introducirlos dentro de la lista de candidatos o *apropiables*. La lista estará compuesta entonces de todos los LSPs de prioridad inferior que compartan uno o más enlaces con la ruta del LSP *apropiador* y el ancho de banda ocupado por ellos se considera ancho de banda *apropiable*. Después de comprobar que en todos los enlaces de la ruta existe ancho de banda suficiente para el nuevo LSP (sumando el ancho de banda libre y el *apropiable*), el algoritmo empieza a optimizar la lista de LSPs candidatos eliminando de ella a los LSPs redundantes, es decir, los que al ser excluidos aún dejan espacio suficiente para el nuevo LSP. La lista que resulte después de eliminar los LSPs redundantes es la lista de LSPs *apropiados*.

Si la lista de candidatos se ordena en orden ascendente: del LSP más pequeño (con ancho de banda reducido) al más grande (con gran ancho de banda), el proceso de optimización eliminará primero los LSPs más pequeños dejando los más grandes en el grupo final para ser *apropiados*. Si por el contrario los candidatos se ordenan en forma descendente (del más

grande al más pequeño) el proceso de optimización dejará en la lista de *apropiados* a los LSPs pequeños. ¿Cuál es la diferencia? *Apropiar* LSPs grandes significa reducir el número de LSPs *apropiados* puesto que un número pequeño de LSPs satisface el ancho de banda requerido. Por otra parte, *apropiar* LSPs pequeños significa menor desperdicio de ancho de banda porque la suma de pequeños anchos de banda resulta en un valor cercano al requerido por el nuevo LSP. Este mecanismo proporciona la opción de escoger bien sea los LSPs más pequeños o los más grandes. También existe una tercera opción en la que no importa el tamaño (el ancho de banda) de los LSPs y los candidatos se ordenan aleatoriamente, lo cual produce un resultado intermedio entre los dos anteriores.

3.1.7 LIP (Limit Hop Count And Preempt) [26]

Esta estrategia tiene en cuenta para el cálculo de la ruta de un LSP la información del número de acciones de preemption que sucederían en una ruta debido al establecimiento de dicho LSP con el objetivo de reducir el impacto negativo que se ocasionaría al tráfico presente en la red.

Con LIP se selecciona cuál es la ruta por la que se establecerá el nuevo LSP dentro de un grupo de M posibles rutas, buscando siempre establecer el LSP por la ruta más corta aunque sea necesario realizar preemption. El conjunto de M rutas posibles se encuentra ordenado de forma ascendente de acuerdo al número de saltos que compone a cada ruta, de esta manera la primera ruta es la más corta.

En LIP primero se define un valor de umbral β que restringe el conjunto de posibles rutas a seleccionar con una longitud máxima. Por ejemplo para un valor de $\beta=1$ la selección se restringe a las rutas que tengan como máximo un salto más que la ruta más corta. La búsqueda finaliza cuando se encuentre una ruta con ancho de banda libre suficiente para establecer el LSP. Si no se escogiera el trayecto en que se necesite realizar menor cantidad de preemption en sus nodos. Si ninguna ruta es factible, el conjunto de búsqueda se extiende en un salto más incrementando β en uno hasta que se cubra todas las M rutas posibles. Si luego de revisar todas las M rutas en ninguna de ellas existe el ancho de banda *apropiable* necesario para establecer el nuevo LSP, no se podrá realizar su establecimiento.

LIP esta creado para el tráfico de alta prioridad, debido a que este tipo de tráfico tiene mayor oportunidad en la *apropiación* de recursos, y es mejor establecerlo por la ruta más corta posible para evitar un posterior bloqueo en los nodos de la red, debido a que si el tráfico de alta

prioridad se establece por una ruta larga es más difícil que luego pueda ser *apropiado* por otro LSP.

3.1.8 MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE [27]

Este mecanismo busca hacer preemption utilizando únicamente la información sobre el estado del enlace que transportan las extensiones de ingeniería de tráfico de los protocolos de pasarela interior: OSPF-TE [10] e ISIS-TE [11]. La información relevante que transportan estos protocolos es: ancho de banda máximo en el enlace (B_{MAX}), ancho de banda máximo reservable (B_{max}) y el ancho de banda sin reservar (B_u) para cada una de las prioridades. Este último parámetro es el más importante para un mecanismo de preemption y está dado por un vector \mathbf{B}_u cuyos componentes expresan el ancho de banda que aún no ha sido reservado para cada una de las ocho prioridades en un enlace específico. $\mathbf{B}_u = [B_{u0}, B_{u1}, B_{u2}, B_{u3}, B_{u4}, B_{u5}, B_{u6}, B_{u7}]$. Estos valores son acumulativos, por ejemplo B_{u0} es el ancho de banda que no ha sido reservado por la prioridad 0, B_{u1} es el ancho de banda que no ha sido reservado por la prioridad 0 ni 1, B_{u2} es el ancho de banda que no ha sido reservado por las prioridades 0, 1 y 2; así hasta B_{u7} que es el ancho de banda que no ha sido reservado por ninguna prioridad, es decir, el ancho de banda libre $B_{u7} = B_{ulibre}$.

Dada una petición para establecer un nuevo LSP que desencadena preemption, la información anterior, junto con el ancho de banda del nuevo LSP, es suficiente para calcular el vector $\mathbf{B}_p = (B_{p0}, B_{p1}, B_{p2}, B_{p3}, B_{p4}, B_{p5}, B_{p6}, B_{p7})$ cuyos componentes muestran el ancho de banda que es necesario *apropiar* para cada una de las ocho prioridades. El cálculo del vector \mathbf{B}_p se hace a partir de \mathbf{B}_u y, al igual que este último, se calcula para cada enlace dentro de un trayecto. Como se puede observar, a diferencia de los otros mecanismos analizados en este documento, este mecanismo no tiene información sobre el ancho de banda reservado por cada LSP existente en el enlace sino el ancho de banda reservado por cada prioridad en el enlace. Sin embargo la información que arroja el vector \mathbf{B}_p es útil para decidir cuál trayecto es más deseable para establecer el nuevo LSP.

Este mecanismo de preemption trabaja conjuntamente con un algoritmo CSPF (*Constrained Shortest Path First*) utilizado por la red MPLS, no obstante puede distinguirse fácilmente la parte que corresponde al enrutamiento de la parte que corresponde al mecanismo de preemption como se explica a continuación:

Frente a la llegada de una petición para un nuevo LSP, el CSPF calculará el trayecto más corto. La información de preemption se utiliza solamente cuando existen varios trayectos más cortos, entonces se utiliza el vector \mathbf{B}_p como una métrica de manera que se seleccionará el trayecto

que tenga una mayor cantidad de ancho de banda libre y que haga preemption sobre las prioridades más bajas.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

Se realizó un análisis en conjunto de los mecanismos descritos en la sección 3.1 orientado a proporcionar una visión más clara de cada uno de ellos abstrayendo sus características de funcionamiento más relevantes. Además, desde un punto de vista global, se identificaron características comunes que permitan agruparlos, así como también aquellas que establecen diferencias, dando pie a la construcción de una clasificación.

La identificación de dichas características se hace por medio de enfoques. Un enfoque es un punto de vista a través del cual se observa un mecanismo de preemption y a partir de esa observación se obtiene una o más características de funcionamiento. Por ejemplo, al considerar un mecanismo desde el punto de vista del lugar en el que opera, puede concluirse que el mecanismo es centralizado o descentralizado, según sea el caso.

Se determinaron diferentes enfoques mediante los cuales es posible analizar cada uno de los mecanismos de preemption:

- Variables de entrada requeridas por el mecanismo
- Criterios que utiliza el mecanismo para seleccionar los LSPs *apropiados*
- Lugar en que opera el mecanismo
- Momento en que opera el mecanismo
- Flexibilidad del mecanismo

3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENFOQUES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

A continuación se describe cada uno de los enfoques ya mencionados. Es importante notar que ellos podrán emplearse con cualquier mecanismo de preemption y no exclusivamente con los mecanismos considerados en este trabajo de grado.

3.2.1. 1 VARIABLES DE ENTRADA REQUERIDAS POR EL MECANISMO

Se trata de toda la información que el mecanismo necesita para funcionar correctamente. Este enfoque es importante porque no todos los mecanismos utilizan la misma información. Algunas de las variables de entrada que pueden ser requeridas por un mecanismo son: topología de la red, ruta y ancho de banda reservado por los LSPs existentes en la red, ruta del LSP *apropiador*, prioridad de establecimiento del LSP *apropiador*, ancho de banda del LSP *apropiador*.

3.2.1.2 CRITERIOS PARA SELECCIONAR LOS LSPs APROPIADOS

Después de considerar los mecanismos de preemption descritos, se concluyó que cada uno de ellos busca optimizar los resultados que se obtienen al realizar preemption y que para lograr esa optimización la principal tarea que desempeñan es seleccionar adecuadamente los LSPs que van a ser *apropiados* valiéndose de determinados criterios que son diferentes en cada mecanismo.

Los criterios para seleccionar el grupo de LSPs *apropiados* son un componente importante presente en todos los mecanismos de preemption y constituyen el elemento diferenciador más sobresaliente. Se ha encontrado que para tomar esta decisión un algoritmo de preemption seguirá uno de los criterios que se explican a continuación o una combinación de varios de ellos [14]. De este modo el grupo de LSPs escogidos varía de acuerdo al criterio de selección utilizado, y cada uno de los criterios busca favorecer en algún aspecto la eficiencia del algoritmo. Los criterios pueden ser vistos como objetivos para optimizar el mecanismo de preemption. El problema de seleccionar un conjunto de LSPs de manera óptima es un problema NP completo [28]; es decir que no existe una solución óptima que lo resuelva. Sin embargo, aún cuando el algoritmo no sea óptimo, puede tomar una decisión que se acerque lo más posible al resultado ideal, por eso se habla en este capítulo de algoritmos heurísticos. A continuación se explican los criterios de selección:

Prioridad de los LSPs *apropiados*

Este es el criterio básico para hacer preemption. Entre un conjunto de LSPs *apropiables* el algoritmo escogerá los LSPs de más bajas prioridades (numéricamente mayores). Esto conlleva a satisfacer la calidad de servicio del tráfico de alta prioridad. Aplicando este criterio también se reduce el efecto de cascada o avalancha.

Ancho de banda desperdiciado (Bandwidth Wastage)

El ancho de banda desperdiciado se refiere a la porción de ancho de banda que se liberó por acción de un mecanismo de preemption pero que no se reasignó al nuevo LSP. Esta porción de ancho de banda permanece inutilizada y puede decirse que se trata de ancho de banda liberado innecesariamente. Naturalmente es deseable que la cantidad de ancho de banda desperdiciado se mantenga lo más baja posible, sin embargo en la práctica no es posible evitar totalmente el desperdicio de ancho de banda, pues el mecanismo de preemption tendría que seleccionar LSPs que liberen exactamente el ancho de banda requerido y la posibilidad de encontrarlos es baja.

De cualquier manera, sí es posible minimizar el ancho de banda desperdiciado seleccionando adecuadamente los LSPs *apropiados*. Por lo tanto el objetivo de este criterio es seleccionar un conjunto de LSPs que liberen una cantidad de ancho de banda que sea lo más aproximada posible al ancho de banda que se requiere para el establecimiento del nuevo LSP de alta prioridad.

Número de LSPs *apropiados*

Se trata de la cantidad de LSPs que fueron liberados por acción del mecanismo de preemption. Este criterio puede ser importante ya que para algunas redes el hecho de remover un LSP y tener que reenrutarlo tiene un alto costo. En estos casos es deseable minimizar el número de LSPs *apropiados*.

Probabilidad de bloqueo

El bloqueo se da cuando un LSP que fue eliminado a causa de preemption debe reenrutarse pero no encuentra un trayecto para hacerlo. Por ello el objetivo de este criterio es minimizar la probabilidad de bloqueo al hacer preemption de los LSPs que puedan encontrar una ruta alterna. De esta manera se tiene preferencia sobre los LSPs que tengan mayor posibilidad de ser reenrutados.

Tiempo transcurrido de conexión

Con este criterio se determina qué tanto ha progresado la transmisión del tráfico de los LSPs existentes para un tiempo específico (t) en el que se va a realizar preemption. Este criterio es importante para las redes en las que se desea reducir el impacto en la pérdida del throughput de la red al aplicar preemption. También como política para minimizar las interrupciones en la transmisión del servicio que pueden afectar la satisfacción del usuario.

Índice de Ingresos

El índice de ingresos es una medida que permite relacionar la satisfacción del usuario con la perspectiva de ingresos económicos esperada por un proveedor de red. Con este criterio se tiene en cuenta las consecuencias en el nivel de ingresos cuando se realiza preemption de un LSP, por tanto se desea elegir los LSPs que minimicen las pérdidas originadas en la perspectiva de ingresos de la red.

3.2.1.3 LUGAR EN QUE OPERA EL MECANISMO DE PREEMPTION

Entre los mecanismos considerados para el análisis en este trabajo de grado se encontró que algunos trabajan de forma centralizada mientras que otros lo hacen de manera descentralizada, por lo tanto desde el punto de vista del lugar de operación, un mecanismo puede ser:

- **Descentralizado**

En este caso cada nodo de la red puede ejecutar el mecanismo de preemption. Se toman decisiones para determinar los LSPs que serán *apropiados* basándose en información local [29].

- **Centralizado**

Por el contrario en este caso el cálculo de los LSPs que serán *apropiados* se realiza en un nodo o servidor central que recoge información de la topología y del ancho de banda, ruta y nivel de prioridad de cada LSP de la red. Por lo general este tipo de cálculos tienen alta complejidad computacional [29].

3.2.1.4 MOMENTO EN QUE SE HACE PREEMPTION

Desde el punto de vista del momento en el cual actúa un mecanismo de preemption se identificaron dos clases de mecanismos:

- **Proactivo**

En términos generales un mecanismo proactivo se anticipa a las condiciones de la red y actúa antes de que ocurra un evento determinado para evitar estados futuros indeseables. En el caso de preemption, un mecanismo proactivo es aquel que actúa **antes** de que la ruta del LSP *apropiador* haya sido calculada y la acción que realiza es la de intervenir en el cálculo de su ruta con el fin de que el grupo de LSPs que van a ser *apropiados* sea el más óptimo. Un mecanismo proactivo permite por ejemplo calcular una ruta para el LSP

apropiador con la cual la cantidad de LSPs *apropiados* sea mínima. Esto es posible si el mecanismo de preemption modifica las métricas de los enlaces antes de lanzar el algoritmo de enrutamiento (generalmente CSPF).

- **Reactivo**

Por el contrario un mecanismo reactivo en términos generales actúa después de que ocurra un evento determinado como respuesta a las condiciones cambiantes ocurridas en la red. En este caso, la ruta del LSP *apropiador* ha sido determinada previamente y el mecanismo de preemption deberá seleccionar dentro de esa ruta los LSPs que van a ser *apropiados*. Por lo tanto un mecanismo de preemption reactivo actúa **después** de que la ruta del LSP *apropiador* ha sido calculada y no podrá intervenir en dicho cálculo.

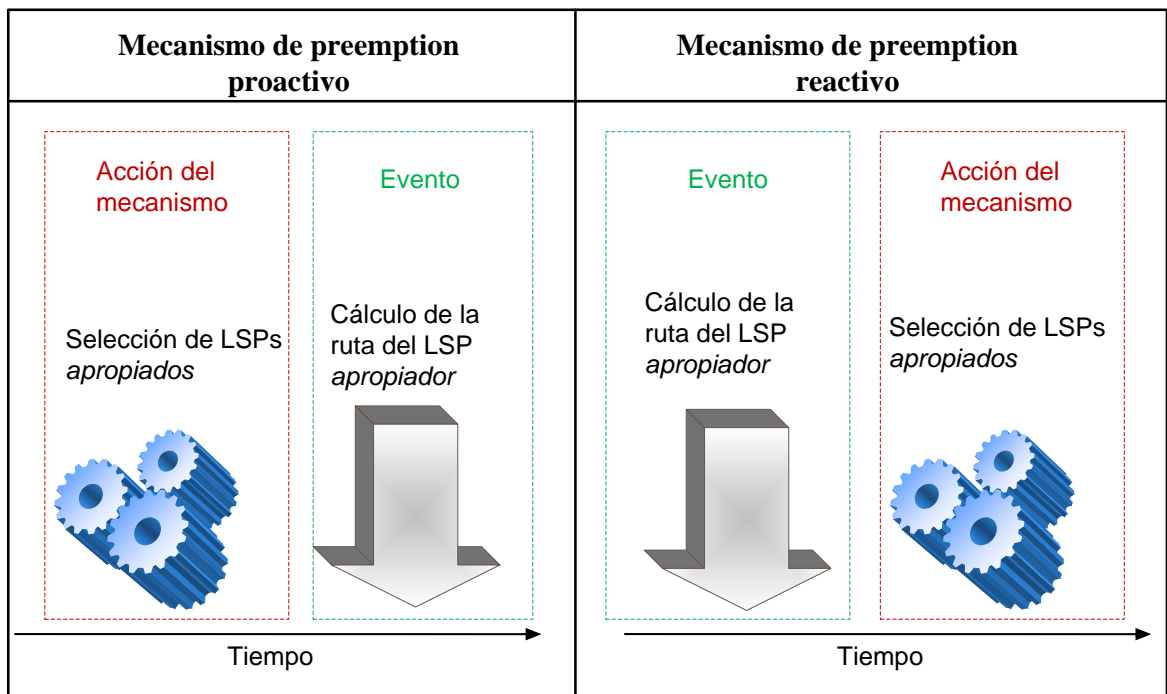


Figura 3.2 Mecanismos de preemption proactivo y reactivo

En el caso de los mecanismos de preemption, el evento que se toma como referencia es el cálculo de la ruta del LSP *apropiador*, y la acción del mecanismo es la de seleccionar los LSPs que serán *apropiados* como se muestra en la figura 3.2.

3.2.1.5 FLEXIBILIDAD DEL MECANISMO

Este enfoque determina si es posible o no que el administrador manipule el mecanismo de preemption de acuerdo a los requerimientos de la red.

Flexible

Es un mecanismo que permite al administrador de la red modificar o fijar ciertos parámetros con el fin de obtener un resultado específico al hacer preemption.

No flexible

Este mecanismo sigue procedimientos fijos y no ofrece la opción de modificar ningún parámetro. En consecuencia estos mecanismos siempre operan de la misma forma.

3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION DE ACUERDO A LOS ENFOQUES

En esta sección se consideran los mecanismos de preemption elegidos y se examina cada uno de ellos a través de los enfoques definidos en la sección 3.2.1. Como resultado se obtiene una abstracción de sus características de funcionamiento:

3.2.2.1 V-PREPT (POLÍTICA VERSÁTIL PARA HACER PREEMPTION) [21]

V-PREPT fue diseñado como un mecanismo descentralizado de manera que cualquier nodo de la red puede ejecutarlo. Es además un mecanismo reactivo ya que actúa después de que la ruta del LSP *apropiador* ha sido calculada, y utiliza esa ruta como una de sus variables de entrada. Para hacer la selección de LSPs *apropiados* utiliza tres criterios que pueden diferenciarse claramente en la función objetivo dada en (3.2): prioridad de los LSPs, número de LSPs *apropiados*, y ancho de banda desperdiciado. De la función objetivo también puede deducirse que es uno de los mecanismos más flexibles, pues cada uno de sus criterios de selección tiene asociado un peso que puede ser configurado por el administrador de red.

Las variables de entrada que necesita son: ancho de banda, prioridad de establecimiento y ruta del LSP *apropiador*, ancho de banda total del enlace en el que va a realizar preemption, prioridad de retención y ancho de banda ocupado por cada LSP en ese enlace.

También es importante mencionar que V-PREPT es el mecanismo de preemption más referenciado en la literatura encontrada y que muchos de los mecanismos encontrados se basan en V-PREPT y le adicionan ciertas características, como es el caso del ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO [22], PNBR [23], y V-PREPT MEJORADO [14].

La tabla 3.1 resume las características de funcionamiento de V-PREPT

V-PREPT	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> (B_L). • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> (sp_L). • Ruta del LSP <i>apropiador</i>. • Ancho de banda total del enlace. • Ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace. • Prioridad de retención de cada LSP en el enlace.
CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>. • Número de LSPs <i>apropiados</i>. • Ancho de banda desperdiciado.
LUGAR EN QUE OPERA	DESCENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.1 Características de V-PREPT

3.2.2.2 V-PREPT MEJORADO [14]

Este mecanismo, siendo una versión mejorada de V-PREPT [21] comparte con él las mismas características de funcionamiento, con la diferencia de que adiciona un criterio en la selección de LSPs *apropiados*. Por lo tanto se considera que es un mecanismo descentralizado y de tipo reactivo y que los criterios de selección de LSPs son: prioridad de los LSPs, número de LSPs *apropiados*, ancho de banda desperdiciado y probabilidad de bloqueo. Es un mecanismo bastante flexible, pues el administrador podrá dar mayor o menor importancia a cada uno de los criterios configurando los coeficientes $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ de acuerdo a las características de su red.

Las variables de entrada que necesita son: ancho de banda, prioridad de establecimiento y ruta del LSP *apropiador*, ancho de banda total del enlace en el que va a realizar preemption, prioridad de retención y ancho de banda ocupado por cada LSP en ese enlace.

La Tabla 3.2 resume de las características de funcionamiento de este mecanismo:

V-PREPT MEJORADO	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> (B_L). • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> (sp_L). • Ruta del LSP <i>apropiador</i>. • Ancho de banda total del enlace. • Ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace. • Prioridad de retención de cada LSP en el enlace.

CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>. • Número de LSPs <i>apropiados</i>. • Ancho de banda desperdiciado. • Probabilidad de Bloqueo.
LUGAR EN QUE OPERA	DESCENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.2 Características de funcionamiento de V-PREPT MEJORADO

3.2.2.3 ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO [22]

Este algoritmo tiene como variables de entrada el ancho de banda del LSP *apropiador*, su prioridad de establecimiento y su ruta, además del ancho de banda total del enlace, la prioridad y el ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace. Esta información es necesaria para calcular el ancho de banda que debe ser *apropiado*.

Otras variables de entrada son el tiempo de transmisión para cada LSP *apropiable* en el instante en que se realiza preemption, el tiempo promedio de duración de la transmisión en cada LSP *apropiable* (este valor depende del tipo de aplicación que se esta transportando). Estas variables permiten el cálculo de la satisfacción del usuario y por tanto el de la insatisfacción experimentada por el usuario.

En este mecanismo los criterios utilizados para la selección de LSPs son el de prioridad de los LSPs *apropiados*, número de LSPs *apropiados*, ancho de banda desperdiciado y el criterio de tiempo transcurrido de conexión orientado a disminuir la insatisfacción del usuario.

El mecanismo de satisfacción del usuario es descentralizado, hereda esta característica de V-PREPT [21], permitiendo ser ejecutado en cualquier nodo que lo necesite dentro de la red.

Es un mecanismo reactivo ya que la selección de los LSPs *apropiados* se realiza luego de conocer la ruta del LSP *apropiador*. Como ya esta definida la ruta, los nodos que la componen deben reaccionar y aplicar procedimientos de preemption cuando se lo necesite.

El algoritmo para la satisfacción del usuario es flexible porque se le añaden peso como $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ para determinar la importancia de los diferentes criterios dentro de la función objetivo.

Las principales características del algoritmo para la satisfacción del usuario se presentan en la tabla 3.3.

ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> • Ruta del LSP <i>apropiador</i> • Ancho de banda total del enlace • Ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace • Prioridad de retención de cada LSP en el enlace. • Tiempo de transmisión para cada LSP <i>apropiable</i> en el instante en que se realiza preemption. • Tiempo promedio de duración de la transmisión en cada LSP <i>apropiable</i>.
CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i> • Número de LSPs <i>apropiados</i>. • Ancho de banda desperdiciado. • Tiempo transcurrido de conexión
LUGAR EN QUE OPERA	DESCENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.3 Características de Funcionamiento del algoritmo para la satisfacción del usuario

3.2.2.4 PNBR (MECANISMO CONSISTENTE CON LA PERSPECTIVA DE INGRESOS ECONÓMICOS) [23]

Este mecanismo utiliza como variables de entrada el ancho de banda del LSP *apropiador*, su prioridad de establecimiento y su ruta, además del ancho de banda total del enlace, la prioridad y el ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace. Estas variables de entrada las utiliza el mecanismo de preemption para determinar el ancho de banda *apropiado*.

PNBR tiene otras variables de entrada como el tiempo de transmisión para cada LSP *apropiable* en el instante en que se realiza preemption, el tiempo promedio de duración de la transmisión en cada LSP *apropiable*, el precio por unidad de ancho de banda para las diferentes aplicaciones, los niveles de satisfacción del usuario.

Este mecanismo utiliza los tres criterios expuestos por V-PREPT [21] de la prioridad de los LSPs *apropiados*, el número de LSPs *apropiados*, el ancho de banda desperdiciado, y el nuevo criterio del índice de ingresos para minimizar la pérdida de ingresos económicos como

consecuencia de la interrupción en la transmisión experimentada por el usuario con el uso del procedimiento de preemption.

PNBR es un mecanismo descentralizado ya que el proceso de preemption puede ser aplicado por cualquier nodo de la red. Otra característica de PNBR es ser reactivo, debido a que la ruta esta calculada previamente y el mecanismo tiene que atenerse a ella, y cuando se necesite reaccionar ante la escasez de recursos realizando procedimientos de preemption en los nodos.

Este mecanismo es flexible porque el administrador puede variar el valor de los coeficientes α , β , γ , δ para acentuar la importancia de algún criterio específico.

La tabla 3.4 resume las principales características de PNBR.

PNBR	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> • Ruta del LSP <i>apropiador</i> • Ancho de banda total del enlace • Ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace. • Prioridad de retención de cada LSP en el enlace. • Tiempo de transmisión para cada LSP <i>apropiable</i> en el instante en que se realiza preemption. • Tiempo promedio de duración de la transmisión en cada LSP <i>apropiable</i>. • Precio por unidad de ancho de banda para las diferentes aplicaciones. • Niveles de satisfacción del usuario.
CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i> • Número de LSPs <i>apropiados</i>. • Ancho de banda desperdiciado. • Índice de ingresos.
LUGAR EN QUE OPERA	DESCENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.4 Características de funcionamiento de PNBR

3.2.2.5 SERA (Service Ratio Based Preemption) [24]

El mecanismo de preemption SERA tiene como variables de entrada el ancho de banda del LSP *apropiador*, su prioridad de establecimiento, y su ruta. El ancho de banda total del enlace, ancho

de banda ocupado por cada LSP en el enlace, y la prioridad de retención de cada LSP en el enlace. También información referente al tiempo transcurrido de transmisión y al tiempo restante de retención de cada LSP *apropiable*.

Los criterios utilizados para la selección de los LSPs *apropiados* son el de prioridad de los LSPs y el de tiempo transcurrido de conexión aplicado a la tasa de servicio de conexión. Este criterio permite que la selección de los LSPs se realice de acuerdo al progreso de la transmisión en el instante cuando se realiza preemption.

SERA es un mecanismo de preemption descentralizado ya que cualquier nodo de la red tiene la capacidad de ejecutarlo cuando se necesite llevar a cabo el proceso de preemption.

Este mecanismo es reactivo ya que la selección de los LSPs *apropiados* se realiza luego de conocer la ruta del LSP *apropiador*.

SERA es un mecanismo flexible porque el administrador puede asignar pesos dentro de (3.11) para influir en el cálculo de los LSPs *apropiados*. Por ejemplo para un valor alto de w_1 se resalta el valor de t_s en el calculo de la tasa de servicio de conexión.

En la tabla 3.5 se presentan las características de funcionamiento de SERA.

SERA	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> • Ruta del LSP <i>apropiador</i> • Ancho de banda total del enlace • Ancho de banda ocupado por cada LSP en el enlace • Prioridad de retención de cada LSP en el enlace. • Tiempo transcurrido de transmisión de cada LSP <i>apropiable</i> • Tiempo restante de retención de cada LSP <i>apropiable</i>
CITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i> • Tiempo transcurrido de conexión
LUGAR EN QUE OPERA	DESCENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.5 Características de Funcionamiento de SERA

3.2.2.6 MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO [25]

Se trata de un mecanismo centralizado puesto que existe un nodo central que almacena información de la topología de la red y que se encarga de decidir el grupo de LSPs *apropiados*. Las variables de entrada son: ancho de banda, ruta y prioridad de establecimiento del LSP *apropiador*; topología de la red, ancho de banda y prioridad de retención de todos los LSPs presentes en la red, ancho de banda total de los enlaces en la red.

Este mecanismo no interviene en el cálculo de la ruta del LSP *apropiador*, dicha ruta está previamente definida y es una de las variables de entrada del mecanismo por lo tanto se trata de un mecanismo reactivo.

En cuanto a los criterios de selección de LSPs, el mecanismo empieza por listar como candidatos a los de prioridad inferior al LSP *apropiador*, con lo cual se concluye que uno de sus criterios es el de prioridad de los LSPs. Posteriormente el mecanismo podrá seleccionar un grupo de LSPs con ancho de banda pequeño, o también (a opción del administrador de red) un grupo de LSPs con gran ancho de banda. El primero obedece al criterio de ancho de banda desperdiciado, y el segundo al de número de LSPs *apropiados*. Es un mecanismo flexible ya que proporciona al administrador de la red tres opciones: favorecer el criterio que minimiza el ancho de banda desperdiciado, favorecer el criterio que minimiza el número de LSPs *apropiados* y la última es favorecer ambos criterios.

La Tabla 3.6 resume las características de funcionamiento de este mecanismo

MECANISMO HEURÍSTICO CENTRALIZADO	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> (B_L). • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> (sp_L). • Ruta del LSP <i>apropiador</i>. • Topología de la red. • Ancho de banda total de los enlaces en la red. • Ancho de banda y prioridad de retención de todos los LSPs presentes en la red.
CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>. • Número de LSPs <i>apropiados</i>. • Ancho de banda desperdiciado.
LUGAR EN QUE OPERA	CENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	REACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.6 Características de funcionamiento del mecanismo heurístico centralizado

3.2.2.7 LIP (Limit Hop Count And Preempt) [26]

Este mecanismo utiliza como variables de entrada el ancho de banda requerido por el nuevo LSP, su prioridad de establecimiento y la información de la topología de la red, el ancho de banda libre y *apropiable* para este LSP en cada una de las M rutas.

Los criterios que utiliza LIP para la selección de los LSPs *apropiados* son el de la prioridad para garantizar la calidad de servicio al tráfico de alta prioridad ya establecido y el de menor número de LSPs *apropiados* con el fin de perturbar la menor cantidad de tráfico de la red.

LIP se ubica dentro de los mecanismos centralizados porque un único nodo servidor es el encargado de determinar los LSPs que serán *apropiados* dentro de la ruta seleccionada.

LIP es un mecanismo proactivo ya que cuando llega una petición de establecimiento de un LSP se selecciona la ruta teniendo en cuenta los procesos de preemption que se desencadenarían en los posibles trayectos. De esta manera se escoge la ruta mas corta tratando de minimizar el uso de preemption.

Otra característica importante de LIP es ser un mecanismo flexible. Su flexibilidad se debe a que el valor de umbral β se puede variar para lograr que los LSPs de alta prioridad puedan ser establecidos por las rutas mas cortas y los LSPs de baja prioridad por rutas mas largas.

El resumen de las características de funcionamiento de LIP se muestra en la tabla 3.7.

LIP	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> • Topología de la red • Ancho de banda libre y Ancho de banda <i>apropiable</i> para el nuevo LSP en cada una de las M rutas • Prioridad de retención de cada LSP en la red
CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>. • Número de LSPs <i>apropiados</i>
LUGAR EN QUE OPERA	CENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	PROACTIVO
FLEXIBILIDAD	SI

Tabla 3.7 Características de Funcionamiento de LIP

3.2.2.8 MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE [27]

Este es un mecanismo proactivo, pues los criterios que forman parte del mecanismo de preemption intervienen en el cálculo de la ruta del nuevo LSP. Es importante notar que no se hace directamente una selección de los LSPs que van a ser *apropiados* como ocurre con muchos de los mecanismos analizados en este documento, sino que se selecciona la ruta más adecuada para establecer el nuevo LSP utilizando los criterios de preemption. Sin embargo, al hacer una selección de la ruta utilizando al vector **Bp** como parámetro, se está haciendo indirectamente una selección de los LSPs que van a ser *apropiados*, por lo tanto se distinguen dos criterios de selección de LSPs: el primero es el número de LSPs *apropiados*, esto se logra seleccionando la ruta que tiene mayor ancho de banda libre. El segundo la prioridad de los LSPs, esto se logra seleccionando la ruta que haga preemption de las prioridades más bajas. El procedimiento que realiza esta selección es fijo y no tiene ningún parámetro que pueda ser modificado por el administrador de red, por lo tanto se trata de un mecanismo no flexible.

El cálculo de la ruta del LSP *apropiador* se realiza, valiéndose de la información del estado del enlace que proporciona el IGP-TE, en un nodo central, con lo cual se concluye que éste es un mecanismo centralizado.

Las variables de entrada que se requieren para tal cálculo son el ancho de banda y prioridad de establecimiento del LSP *apropiador*, topología de la red, ancho de banda total de los enlaces de la red y ancho de banda que aún no ha sido reservado por cada prioridad en los enlaces de la red (B_u).

La Tabla 3.8 resume las características de funcionamiento de este mecanismo:

MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE	
VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda del LSP <i>apropiador</i> (B_L). • Prioridad de establecimiento del LSP <i>apropiador</i> (sp_L). • Topología de la red. • Ancho de banda total de los enlaces en la red. • Ancho de banda que aún no ha sido reservado por cada prioridad en los enlaces de la red (B_u). • Prioridad de retención de cada LSP en la red
CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE LSPs	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>. • Número de LSPs <i>apropiados</i>.
LUGAR EN QUE OPERA	CENTRALIZADO
MOMENTO EN QUE OPERA	PROACTIVO
FLEXIBILIDAD	NO

Tabla 3.8 Características de funcionamiento del MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

Una vez definidas las características de los mecanismos, se realiza una clasificación de los mismos. Algunos de los enfoques utilizados para la caracterización (sección 3.2.1) pueden utilizarse como enfoques de clasificación como se muestra a continuación.

3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL LUGAR EN QUE OPERAN

Los mecanismos de preemption se pueden clasificar respecto a su lugar de operación en centralizados o descentralizados, como se muestra en la tabla 3.9:

CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL LUGAR EN QUE OPERAN	
MECANISMOS DESCENTRALIZADOS	MECANISMOS CENTRALIZADOS
<ul style="list-style-type: none"> • V-PREPT • V-PREPT MEJORADO • ALGORITMO PARA LA SATISFACCION DEL USUARIO • PNBR • SERA 	<ul style="list-style-type: none"> • MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE • MECANISMO HEURÍSTICO CENTRALIZADO • LIP

Tabla 3.9 Clasificación de los mecanismos estudiados de acuerdo al lugar en el que operan

Como se puede observar en la tabla 3.9 solo tres mecanismos son centralizados, mientras que la mayoría se clasifican como descentralizados. Esto se puede analizar teniendo en cuenta que tanto los mecanismos centralizados como los descentralizados tienen sus ventajas y sus desventajas. Un mecanismo centralizado, al tener conocimiento de la topología y el estado de la red, tomará una decisión más eficiente con respecto a cuáles LSPs *apropiar*. Por ejemplo, puede escoger un LSP que tenga varios enlaces en común con el LSP *apropiador* evitando hacer *apropiaciones* innecesarias que pueden ocurrir con un mecanismo descentralizado. Sin embargo, un mecanismo centralizado necesita almacenar una gran cantidad de información y actualizarla frecuentemente, lo que puede acarrear problemas de escalabilidad. Además la implementación de un mecanismo descentralizado resulta más fácil debido a la naturaleza distribuida de los protocolos de Internet. Puede observarse que un mecanismo descentralizado

será más eficaz en una red dinámica en la que los LSPs se establecen y se eliminan de forma frecuente y la información del estado de la red podría estar desactualizada y no ser muy confiable. Por el contrario en una red en la que los LSPs son mayormente estáticos, la mejor opción será un mecanismo centralizado.

3.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL MOMENTO EN EL QUE OPERAN

Los mecanismos de preemption pueden clasificarse también de acuerdo al momento en que operan. Se distinguen dos grupos: los proactivos y los reactivos como se muestra en la tabla 3.10.

CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO AL MOMENTO EN EL QUE OPERAN	
MECANISMOS PROACTIVOS	MECANISMOS REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • LIP • MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE 	<ul style="list-style-type: none"> • V-PREPT • V-PREPT MEJORADO • ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO • PNBR • SERA • MECANISMO HEURÍSTICO CENTRALIZADO

Tabla 3.10 Clasificación de los mecanismos de preemption de acuerdo al momento en el que operan

Como se muestra en la tabla 3.10, se encontró que la mayoría de mecanismos trabajan de forma reactiva y solamente dos son proactivos: LIP [26] y el mecanismo que utiliza IGP-TE [27] (secciones 3.1.7 y 3.1.8 respectivamente). Esto se debe a que los mecanismos reactivos tienen la ventaja de ser independientes de cualquier procedimiento de enrutamiento que se esté utilizando en la red, lo que favorece su universalidad. Además, los mecanismos reactivos generalmente manejan menores cantidades de información y realizan menos cálculos, esto los hace más eficientes en términos computacionales con relación a los proactivos. Las desventajas son por supuesto que deben adaptarse a la ruta que ha sido calculada para el LSP *apropiador*, y no pueden evitar rutas indeseables, como aquellas que desencadenan gran cantidad de *apropiaciones*.

Por su parte, los mecanismos proactivos tienen como ventaja que pueden intervenir en el cálculo de la ruta del LSP *apropiador*. Utilizan sus propios criterios de selección de LSPs para determinar esa ruta, calculando por ejemplo una que minimice el número de *apropiaciones* y en la que los LSPs que es necesario *apropiar* tengan prioridades bajas. Este es el caso por ejemplo del mecanismo que utiliza IGP-TE [27], este mecanismo selecciona una ruta cuyos enlaces tengan mayor cantidad de ancho de banda libre y en la que las prioridades afectadas por preemption sean las más bajas. Sin embargo, los mecanismos proactivos necesitan almacenar grandes cantidades de información con relación al estado de la red (topología, estado de los enlaces, LSPs activos) y además esa información debe estar actualizada correctamente, esto puede ocasionar problemas de escalabilidad.

3.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO A SU FLEXIBILIDAD

Otra clasificación posible de los mecanismos de preemption es la que tiene en cuenta su flexibilidad. Los mecanismos que brindan al administrador la posibilidad de modificar alguno de sus parámetros de funcionamiento están dentro del grupo de mecanismos flexibles. Aquellos que siguen procedimientos rígidos y que no ofrecen la posibilidad de configurar ningún parámetro son considerados no flexibles. Esta clasificación se muestra en la tabla 3.11.

CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE ACUERDO A SU FLEXIBILIDAD	
MECANISMOS FLEXIBLES	MECANISMOS NO FLEXIBLES
<ul style="list-style-type: none"> • V-PREPT • SERA • ALGORITMO PARA LA SATISFACCION DEL USUARIO • PNBR • MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO • LIP • V-PREPT MEJORADO 	<ul style="list-style-type: none"> • MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE

Tabla 3.11 Clasificación de los mecanismos de preemption de acuerdo a su flexibilidad

Se observa que la gran mayoría de mecanismos de preemption considerados son flexibles porque tienen uno o varios parámetros que pueden ser manipulados por el administrador. Esta flexibilidad está generalmente relacionada con los criterios de selección de LSPs. Para ilustrar la importancia de la flexibilidad de un mecanismo se considera V-PREPT [21] que es uno de los más flexibles. Este mecanismo tiene tres criterios de selección de LSPs: prioridad de los LSPs *apropiados*, número de LSPs *apropiados* y ancho de banda desperdiciado. Puede suceder por ejemplo que en determinada red el costo de reenrutar LSPs sea muy alto; en ese caso, gracias a la flexibilidad del mecanismo, el administrador podrá configurar los criterios de V-PREPT para dar mayor importancia al criterio de número de LSPs *apropiados*, incluso a expensas del desperdicio de ancho de banda. En otro escenario en el que la disponibilidad de ancho de banda sea crítica el mecanismo podrá configurarse para dar mayor importancia al desperdicio de ancho de banda. En general, la ventaja de los mecanismos flexibles es la posibilidad que ofrecen para adaptarse a las condiciones de la red, aunque algunos mecanismos tienen mayor grado de flexibilidad que otros.

Por otro lado, los mecanismos no flexibles generalmente realizan cálculos menos complejos, lo que los hace computacionalmente más eficientes con relación a los flexibles.

3.4 AGRUPACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION DE ACUERDO A LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs

Los criterios de selección de LSPs están presentes en todos los mecanismos de preemption consultados y son diferentes en cada uno de ellos. Se encontraron seis criterios diferentes. Cada mecanismo de preemption utiliza su propia combinación de criterios para tomar la decisión de los LSPs *apropiados* como se muestra en la tabla 3.12.

	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs					
	PRIORIDAD DE LOS LSPs	BW DESPERDICADO	# LSPs PREEMPTED	PROBABILIDAD BLOQUEO	TIEMPO TRANSCURRIDO DE CONEXIÓN	ÍNDICE DE INGRESOS
V-PREPT	✓	✓	✓			
V-PREPT MEJORADO	✓	✓	✓	✓		
ALGORITMO PARA LA SATISFACCION DEL USUARIO	✓	✓	✓		✓	
PNBR	✓	✓	✓			✓
SERA	✓				✓	
MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO	✓	✓	✓			
LIP	✓		✓			
MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE	✓		✓			

Tabla 3.12 Criterios de selección de los mecanismos de preemption

3.5 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MECANISMOS DE PREEMPTION

La tabla 3.13 muestra un resumen de las características de funcionamiento de los mecanismos de preemption, en la que se puede visualizar de forma global el grupo de mecanismos analizados.

	LUGAR EN EL QUE OPERA		MOMENTO EN QUE OPERA		FLEXIBILIDAD		CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LSPs					
	CENTRALIZADO	DESCENTRALIZADO	PRO-ACTIVO	RE-ACTIVO	FLEXIBLE	NO FLEXIBLE	PRIORIDAD DE LOS LSPs	BW DESPERDICIAO	# LSPs APROPIADOS	PROBABILIDAD DE BLOQUEO	TIEMPO TRANCURRIDO DE CONEXIÓN	ÍNDICE
V-PREPT		✓		✓	✓		✓	✓	✓			
V-PREPT MEJORADO		✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓		
ALGORITMO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO		✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓	
PNBR		✓		✓	✓		✓	✓	✓			✓
SERA		✓		✓	✓		✓				✓	
MECANISMO HEURISTICO CENTRALIZADO	✓			✓	✓		✓	✓	✓			
LIP	✓		✓		✓		✓		✓			
MECANISMO QUE UTILIZA IGP-TE	✓		✓			✓	✓		✓			

Tabla 3.13 Características de funcionamiento de los mecanismos de preemption

3.6 RECOMENDACIONES A LA HORA DE ELEGIR UN MECANISMO DE PREEMPTION

Si se va a adoptar alguno de los diversos mecanismos de preemption existentes o si se va a diseñar uno nuevo, es conveniente que éste se adapte a las características de la red. Se presentan algunas sugerencias:

- En una red dinámica en la que los LSPs se establecen y se eliminan de forma frecuente, la información del estado de la red podría estar desactualizada y no ser muy confiable por lo tanto la mejor opción será utilizar un mecanismo descentralizado. Por el contrario, en una red en la que los LSPs son mayormente estáticos es posible aprovechar las ventajas que ofrece un mecanismo centralizado sin que se presenten problemas de escalabilidad.
- Si se requiere que el mecanismo de preemption sea independiente del proceso de enrutamiento es conveniente utilizar un mecanismo reactivo ya que estos tienen la característica de ser universales con respecto a los procesos de enrutamiento.
- Los mecanismos proactivos tienen la ventaja de optimizar los resultados que se obtienen al hacer preemption pero su implementación sólo es conveniente en redes en las que sea posible manejar de forma centralizada grandes cantidades de información acerca del estado de la red y mantenerla siempre actualizada.
- En una red con condiciones cambiantes es recomendable que el mecanismo de preemption sea flexible, de esta manera el administrador de red podrá ajustar sus parámetros de funcionamiento de acuerdo a los cambios que se presenten.
- En una red en la que el tiempo de respuesta del mecanismo es un factor crítico se recomienda utilizar mecanismos reactivos, puesto que estos hacen una menor cantidad de cálculos para seleccionar los LSPs *apropiados*. Los mecanismos no flexibles también tienen un menor tiempo de respuesta en comparación con los flexibles.
- También es importante que los criterios de selección de LSPs empleados por el mecanismo de preemption se ajusten a las características de la red. Por ejemplo: una red en la que el costo de reenrutar LSPs es muy alto (una red muy extensa por ejemplo) debe utilizar el criterio que reduce el número de LSPs *apropiados*, de igual manera en una red en la que la disponibilidad de ancho de banda es crítica es conveniente utilizar el criterio de ancho de banda desperdiciado.

CAPÍTULO 4.

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Este capítulo muestra los resultados de las pruebas realizadas para evaluar el impacto del mecanismo de preemption en el desempeño de una red MPLS.

La finalidad de las pruebas descritas a continuación es evaluar el mecanismo básico de preemption definido en el capítulo 2 mediante el cual la selección de LSPs *apropiados* se realiza basándose únicamente en sus prioridades. Además una vez *apropiado*, el LSP simplemente se elimina (no se reenruta) por lo tanto el tráfico que por él se transportaba pasa a ser tratado por la red como tráfico Best-Effort. Siguiendo estas disposiciones se determinaron los parámetros relevantes en la evaluación del desempeño de una red MPLS, se seleccionó una herramienta de simulación y se definieron los escenarios que permitieran probar concluyentemente el mecanismo básico de preemption. Posteriormente se procedió a realizar las pruebas que conducen a la obtención y análisis de resultados.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

Por medio de la selección, medida y correcta interpretación de los parámetros de desempeño se puede establecer el rendimiento de la red. Para determinar el impacto del mecanismo de preemption sobre una red MPLS se eligieron los siguientes parámetros de desempeño:

4.1.1 Throughput

Se define como el volumen de datos que se transfieren entre dos nodos a través de la red, en un periodo de tiempo determinado. Generalmente se mide en *bps* (bits por segundo) o a veces en paquetes de datos por segundo.

Este parámetro es importante dentro de la simulación porque permite determinar la cantidad de volumen de información recibida satisfactoriamente para los diferentes flujos de datos que circulan por la red MPLS durante el tiempo de simulación y de esta manera visualizar cuándo y qué tanto se degrada el tráfico *apropiado* o se favorece al tráfico *apropiador*.

4.1.2 Pérdida de paquetes

Se define como el porcentaje de paquetes que se han perdido en un intervalo dado [30], y se calcula por la ecuación (4.1):

$$P\acute{e}rdida\ de\ paquetes = \left(\frac{1 - Paquetes\ recibidos}{Paquetes\ enviados} \right) * 100 \quad (4.1)$$

La aplicaci3n del mecanismo de preemption b3sico puede introducir p3rdidas en el tr3fico del LSP *apropiado*, ya que sus recursos son usados para transmitir el tr3fico del LSP *apropiador*, de esta manera conocer la p3rdida de paquetes es muy importante dentro del an3lisis del impacto del mecanismo de preemption.

4.1.3 Retardo de paquete

Es el tiempo que tarda un paquete en atravesar la red. Se compone de los retardos que el paquete experimenta al pasar por cada uno de los elementos que integran la red. Este es un par3metro cr3tico para aplicaciones de tiempo real como el de voz [30]. Cuando se aplica el mecanismo b3sico de preemption el retardo puede variar para los diferentes tipos de tr3fico, por ello es importante medir este par3metros.

4.1.4 Jitter

Es un par3metro muy relevante para las aplicaciones de tiempo real y se define como la variaci3n del retardo en los paquetes recibidos en un intervalo de tiempo determinado. El transmisor env3a los paquetes con un espaciamiento entre ellos ya determinado, por causa de la congesti3n en la red, o el mal manejo de las colas, el retardo entre cada paquete puede variar y no permanecer constante.

El c3lculo del jitter se realiza a partir del retardo de paquete tal como lo muestra la ecuaci3n (4.2):

$$Jitter\ del\ paquete = Retardo\ del\ paquete - Valor\ m3s\ bajo\ del\ retardo\ del\ paquete \quad (4.2)$$

4.2 SELECCI3N DE LA HERRAMIENTA

Se realiz3 la b3squeda de una herramienta de simulaci3n que ofreciera la posibilidad de simular el mecanismo b3sico de preemption en una red MPLS y que adem3s proporcionara resultados lo suficientemente confiables para obtener conclusiones v3lidas y consistentes. Se encontraron tres herramientas que cumplen con estas caracter3sticas: Opnet Modeler (*OPTimized Network Engineering*), T3tem (*TOolbox for Traffic Engineering Methods*) y NS-2 (*Network Simulator*).

Opnet Modeler es un potente simulador de eventos discretos desarrollado por Opnet Technologies Inc. que cuenta con un módulo exclusivo para la simulación de redes MPLS con características de ingeniería de tráfico. Tiene las ventajas de ofrecer una interfaz gráfica amena y fácil de usar, además de generar una buena variedad de datos y gráficas. El inconveniente de este simulador es que no se cuenta con las licencias de operación que requieren tanto el modeler como el módulo de MPLS.

Tótem es un simulador desarrollado en el marco del proyecto totem [31] por la Universidad Católica de Louvain (*Université Catholique de Louvain*) en colaboración con la Universidad de Liège (*Université de Liège*). Fue diseñado específicamente para la simulación de redes con ingeniería de tráfico y tiene licencia GPL (GNU General Public License) versión 2.0. Se realizaron algunas pruebas con este simulador comprobando que es una herramienta potente que proporciona diversas posibilidades en cuanto a la simulación de técnicas de ingeniería de tráfico. La interfaz gráfica es amigable y fácil de usar, sin embargo es un simulador orientado a flujos y no a paquetes de manera que brinda información de estado estacionario como por ejemplo el estado de un LSP o su carga, pero no proporciona datos que son importantes para este proyecto como paquetes recibidos o enviados.

NS-2 es una de las herramientas de simulación de redes más utilizadas en el ámbito mundial. Esto le permite ser reconocida por su fiabilidad y por haber evolucionado sustancialmente en los últimos años, contando con la contribución de muchos desarrolladores. Es un proyecto desarrollado por la Universidad de California con sede en Berkeley (*UC at B*) [32] y cuenta con un módulo específico para redes MPLS llamado MNS. Es un simulador de eventos discretos con el que es posible obtener todos los datos que se plantearon como resultados relevantes para el presente proyecto. La interfaz gráfica que ofrece es amigable. Después de realizar pruebas y comprobar la posibilidad de obtener datos confiables, se seleccionó NS-2 como la herramienta de simulación más eficaz para el desarrollo de las pruebas planteadas en el presente proyecto. El módulo adicional empleado para la simulación de MPLS es MNS v.2.0 y una de sus particularidades es que la señalización para distribución de etiquetas se hace con el protocolo LDP. Una descripción más detallada que incluye características e instalación del simulador NS-2 y del módulo MNS v2.0 se encuentra en los Anexos A y B.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

4.3.1 Descripción de los dos escenarios de simulación

Se definieron dos escenarios de red: el primero representa una red MPLS en la que no está habilitado el mecanismo de preemption y el segundo una red en la que si lo está. Posteriormente se realizará una comparación entre los resultados obtenidos en ambos escenarios para confrontar el desempeño en cada uno de ellos y así determinar el impacto de la aplicación de preemption en redes MPLS. Como condición para la comparación, la topología, parámetros de red y de tráfico son iguales en ambos escenarios como se define a continuación.

Ya que una red extensa es básicamente un agregado de cuellos de botella [22], se definió para los escenarios de simulación la topología de la figura 4.1. Se trata de una topología simple de cuello de botella que representa un enlace core MPLS al que se inyecta una cantidad de tráfico cada vez mayor con el fin de generar congestión. Bajo estas condiciones, se evalúan los parámetros de desempeño que se obtienen en un escenario sin preemption y en uno con preemption. Se seleccionó esta topología puesto que el mecanismo básico de preemption realiza *apropiaciones* de LSPs y no de rutas y la selección de LSPs *apropiados* se realiza de forma local en un solo enlace. Por lo tanto el análisis del tráfico en un enlace core es una extracción suficientemente representativa de lo que sucede en una red MPLS.

La topología está compuesta por 8 nodos, 6 nodos IP (nodo0, nodo1, nodo2, nodo5, nodo6, nodo7) que funcionan como nodos de entrada y salida del tráfico de voz, datos y video; y dos LSRs (LSR3, LSR4) que representan el núcleo del dominio MPLS.

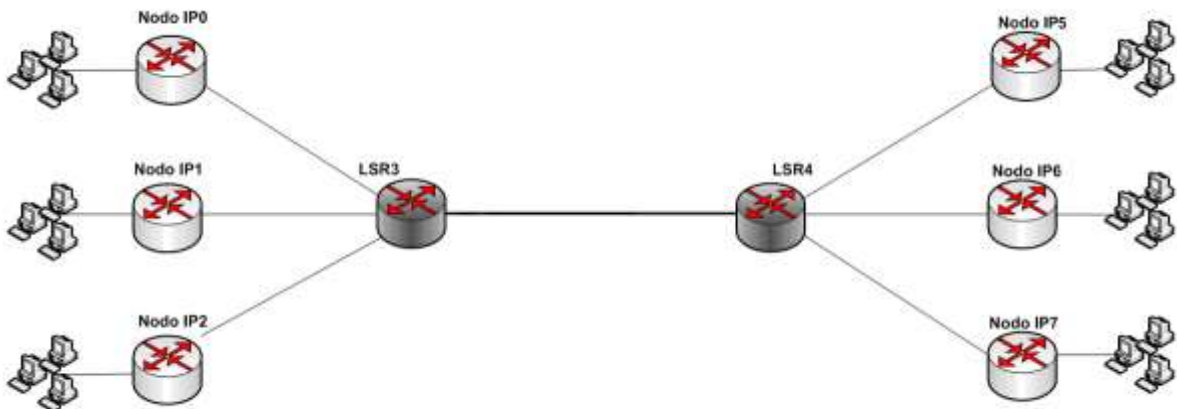


Figura 4.1 Topología de la simulación

El tipo de cola empleado en ambos escenarios es DropTail. El ancho de banda del enlace entre los nodos MPLS es de 11Mbps y su retardo es de 20ms. El retardo de los enlaces IP es de 10ms. Se definieron tres tipos de tráfico: datos, video y voz. La diferencia entre un escenario y otro es la existencia o no del mecanismo de preemption así que en el escenario 1, en donde no opera el mecanismo de preemption, los tres tipos de tráfico tienen la misma prioridad. En el escenario dos en cambio se asigna una prioridad de preemption a cada tipo de tráfico siendo voz el de más alta prioridad seguido de video que tiene una prioridad media y datos con baja. Se realizó esta asignación de prioridades de acuerdo a las exigencias en los parámetros de desempeño para estos tipos de tráfico dispuesto en la recomendación G1010 [33]. La tasa de envío para el tráfico de voz es de 512 Kbps correspondiente a 8 llamadas de 64 Kbps, para el video es de 2000kbps correspondiente a 4 aplicaciones de video de 500 kbps y finalmente para datos 800 Kbps compuesto por dos aplicaciones de transferencia de datos de 400 Kbps [33].

Los parámetros de red y las características del tráfico para la simulación se resumen en la tabla 4.1 y 4.2 respectivamente.

Parámetros de Red	
Escenario 1: Sin Preemption	Escenario 2: Con Preemption
Mecanismo de preemption: Deshabilitado	Mecanismo de preemption: Habilitado
Topología: Cuello de botella (fig. 4.1)	
BW del enlace: 11Mb	
Retardo del enlace: 20ms	
Tipo de cola: DropTail	
Carga de la red: Variable	

Tabla 4.1 Parámetros de red de los escenarios

Parámetros del tráfico				
Tipo de tráfico	Tasa de envío	Tamaño del paquete	Prioridad del LSP	
			En el escenario sin preemption	En el escenario con preemption
Datos	800Kbps	1500 Bytes	La misma para todo el tráfico	Baja
Video	2000Kbps	1500 Bytes		Media
Voz	512Kbps	80 Bytes		Alta

Tabla 4.2 Parámetros del tráfico

En ambos escenarios se establecen inicialmente 9 LSPs (3 de voz, 3 de video y 3 de datos) ocupando un ancho de banda que no excede el ancho de banda total del enlace de manera que transitan por él en condiciones normales. Posteriormente se establece un LSP de prueba que genera congestión, con el fin de observar el comportamiento de ambos escenarios cuando no existen recursos suficientes para satisfacer la demanda de tráfico. Se realizan 14 pruebas; en cada una de ellas se simula una red en la que el LSP de prueba tiene un ancho de banda diferente que irá aumentando progresivamente a intervalos constantes de 512Kbps como se muestra en la tabla 4.3.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7
BW del LSP de prueba (Kb)	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584
Prueba	8	9	10	11	12	13	14
BW del LSP de prueba (Kb)	4096	4608	5120	5632	6144	6656	7168

Tabla 4.3 Ancho de banda del LSP de prueba

4.3.2 Descripción de los casos de estudio

Ya que el LSP de prueba puede ser de tres tipos (datos, video o voz) en cada uno de los escenarios existen tres casos de estudio. En el primer caso de estudio el LSP de prueba es de voz, en el segundo el LSP de prueba es de video y en el tercero de datos. Un resumen de los tres casos de estudio se muestra en la tabla 4.4.

Con el fin de realizar una comparación coherente, tanto los casos de estudio como las pruebas son iguales para el escenario 1 y 2.

Escenarios 1 y 2		
Caso de estudio 1	Caso de estudio 2	Caso de estudio 3
LSP de prueba: Voz	LSP de prueba: Video	LSP de prueba: Datos
Pruebas: Para cada caso de estudio se realizan 14 pruebas variando el ancho de banda del LSP de prueba a intervalos de 512 Kb		

Tabla 4.4 Casos de estudio para los dos escenarios

4.3.3 Descripción de las pruebas

La sucesión de eventos es la misma para las 14 pruebas pero el ancho de banda del LSP de prueba es diferente en cada una de ellas como se muestra en la tabla 4.3.

4.3.3.1 Sucesión de eventos en cada prueba

- Como primer evento, en el instante 0.2 se crean los 9 LSPs correspondientes a nueve flujos de tráfico: tres de datos (LSP1, LSP4, LSP7), tres de video (LSP2, LSP5, LSP8) y tres de voz (LSP3, LSP6, LSP9), y se inicia su transmisión.

En la figura 4.2 puede verse el mensaje de petición o LDP REQUEST con dirección al nodo destino generado para establecer el primero de los 9 LSPs. Posteriormente se envía un mensaje LDP MAPPING hacia el nodo origen que reserva los recursos del LSP como se ve en la figura 4.3. Esto sucede con cada uno de los 9 LSPs.

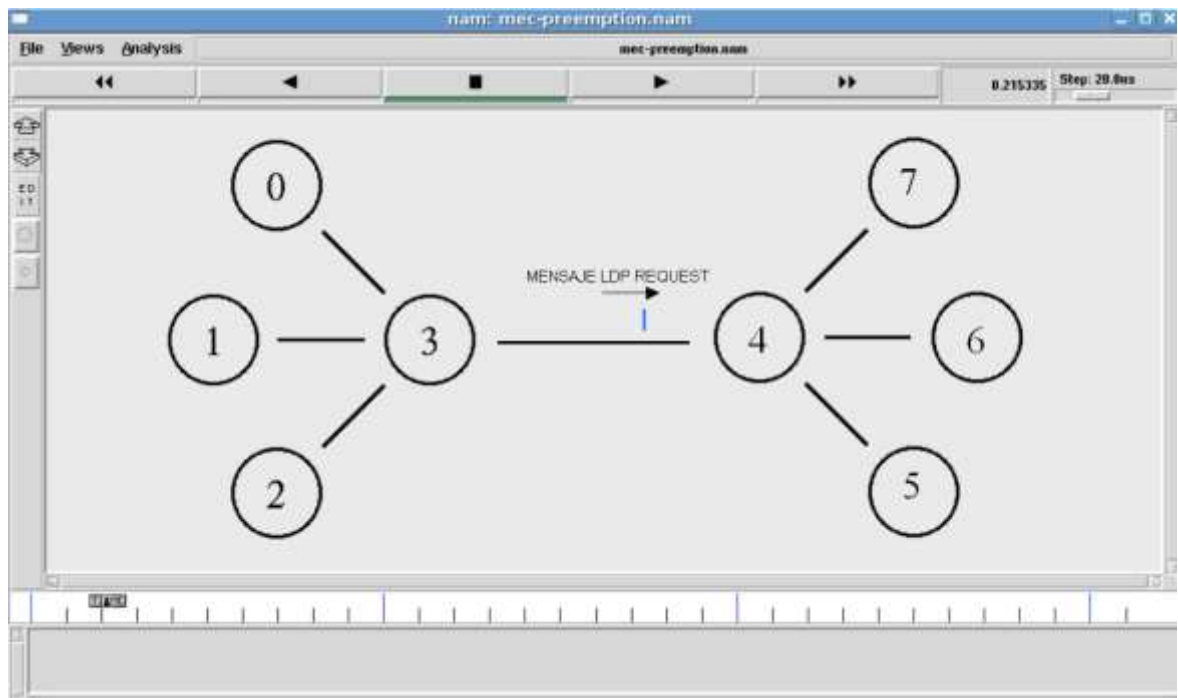


Figura 4.2 Mensaje LDP REQUEST

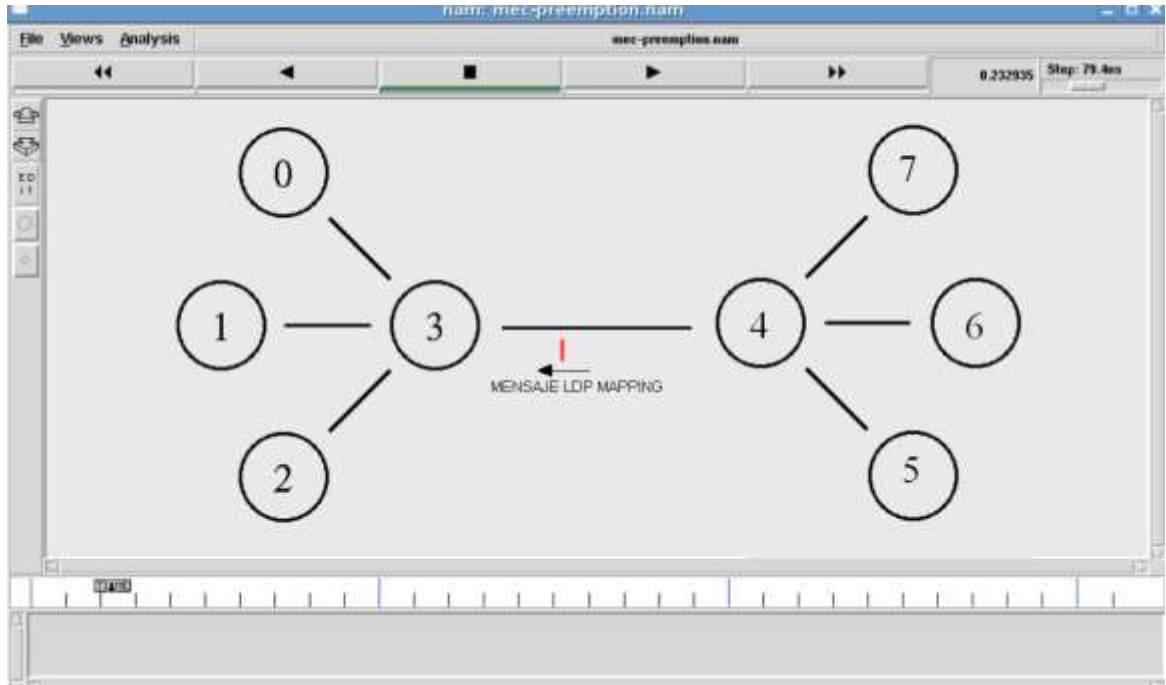


Figura 4.3 Mensaje LDP MAPPING

La figura 4.4 muestra el tráfico en tránsito de los 9 LSPs ya establecidos. En este momento de la simulación cada uno de los LSPs de voz, video y datos en curso ocupan 512Kb, 2000Kb y 800Kb respectivamente, por lo tanto en total ocupan un ancho de banda de 9936 Kb. Dado que el ancho de banda del enlace es de 11Mb aún no existe congestión en la red y el tráfico no se ve degradado. El ancho de banda libre una vez establecidos los 9 LSPs es de 1064 Kb.

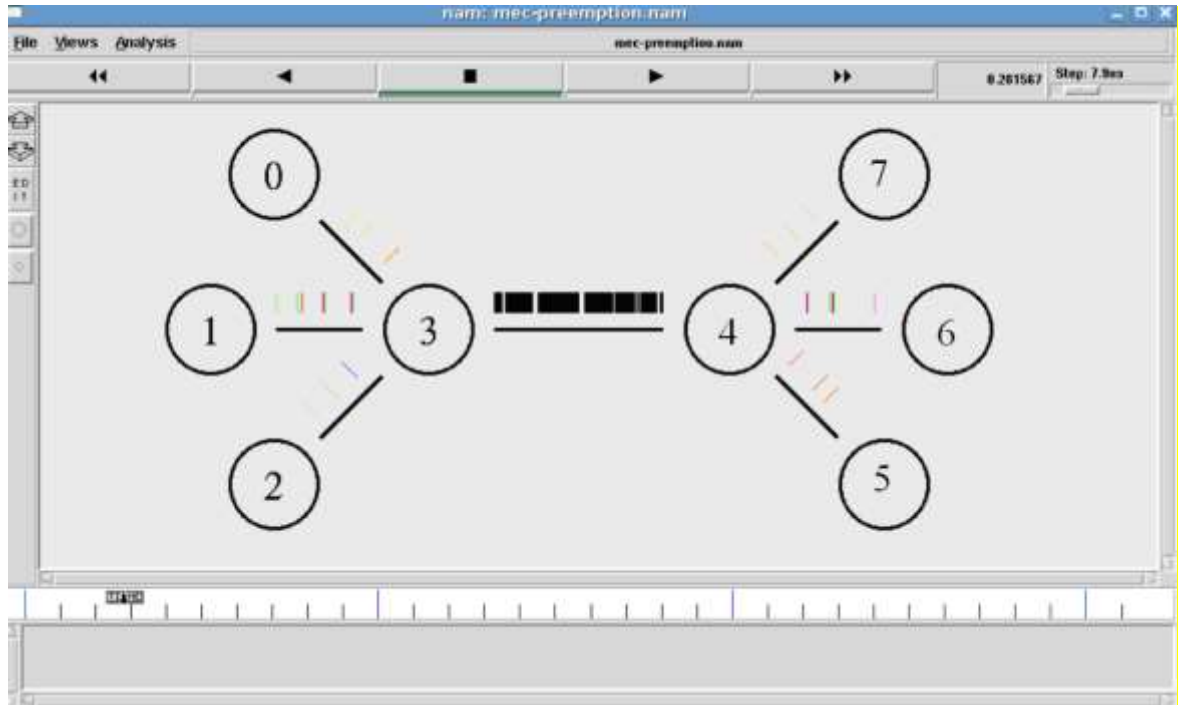


Figura 4.4 Tráfico en curso de los 9 LSPs

- El segundo evento en el instante 0.4 consiste en crear un nuevo LSP por el que se envía el LSP de prueba (en el caso de estudio 1 de voz, en el caso de estudio 2 de video y en el 3 de datos). Para poder establecer el LSP el nodo cabecera envía la petición: un mensaje LDP REQUEST hacia el nodo destino con la información del ancho de banda requerido por el nuevo LSP. Este ancho de banda es diferente para cada una de las 14 pruebas como se muestra en la tabla 4.3.

4.4 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para los tres casos de estudio, cada uno de ellos con y sin preemption.

4.4.1 CASO DE ESTUDIO 1. LSP de prueba de voz

Este caso de estudio consiste en evaluar un enlace MPLS cargado con tráfico de diferentes tipos (voz video y datos) al que empieza a llegar un tráfico de voz que genera congestión. Se muestran los resultados de este caso de estudio para ambos escenarios: con y sin preemption.

4.4.1.1 Comportamiento escenario1: sin preemption

Como es de esperarse, el comportamiento de la red para cada una de las pruebas es diferente. En las pruebas número 1 y 2 por ejemplo, el ancho de banda del enlace es suficiente para satisfacer los 512Kb y 1024Kb necesarios respectivamente y el LSP de prueba se establece satisfactoriamente; la figura 4.5 muestra el mensaje MAPPING que confirma el establecimiento del LSP de prueba.

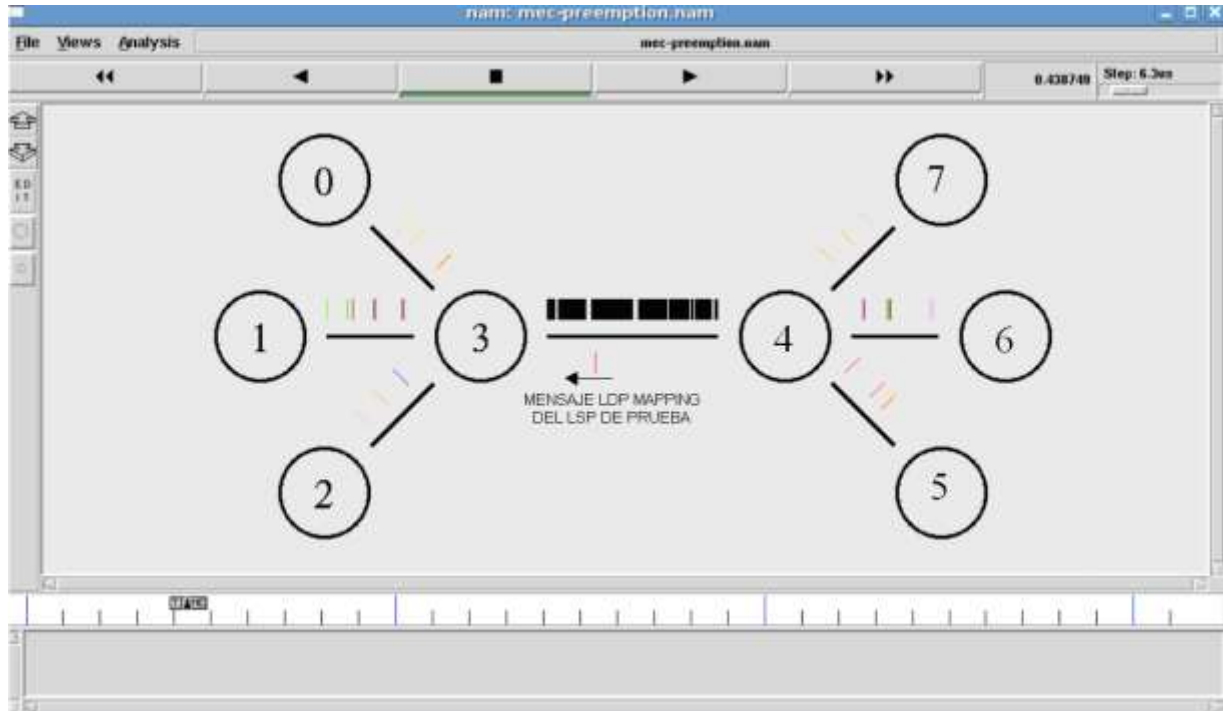


Figura 4.5 Mensaje LDP MAPPING del LSP de prueba

Por medio de la herramienta graficadora de NS-2 llamada x-graph y con base en los archivos de trazas generados para cada LSP se realiza la figura 4.6, que muestra el throughput correspondiente a cada LSP respecto al tiempo para la prueba 2 en la que el ancho de banda del LSP de prueba es 1024Kb.

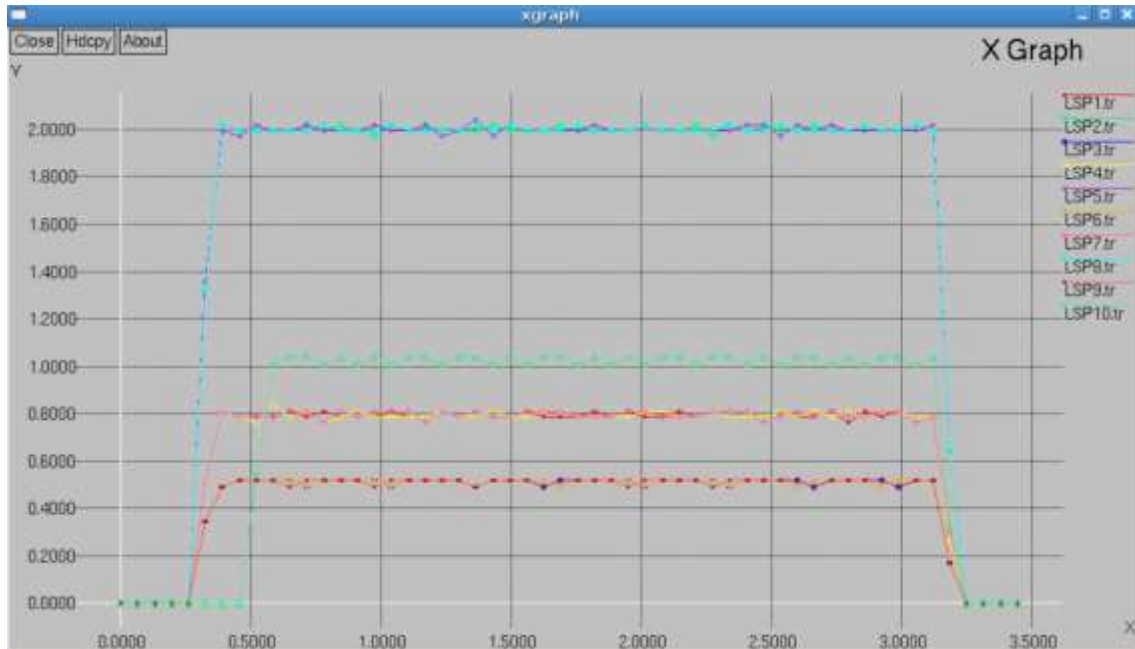


Figura 4.6 Throughput vs Tiempo para los LSPs en la prueba 2 sin preemption

La figura 4.6 muestra que efectivamente se estableció el LSP10 correspondiente al de prueba (de color verde), con un throughput de 1024 Kbps. Las 3 líneas de la parte superior muestran un throughput de 2000 Kbps para cada uno de los 3 LSPs con tráfico de video. Las 3 líneas de la parte media muestran un throughput de 8000 Kbps para cada uno de los 3 LSPs con tráfico de datos y las 3 líneas de la parte inferior muestran un throughput de 512 Kbps para cada uno de los 3 LSPs con tráfico de voz. De esta manera se observa que el tráfico de la red no se degrada con el establecimiento del LSP de prueba.

Desde la tercera prueba en adelante el ancho de banda del enlace empieza a ser insuficiente y el control de admisión rechaza al LSP de prueba que no podrá establecerse generando pérdidas en el tráfico de voz que ha sido rechazado. La figura 4.7 muestra el mensaje que aparece en el Terminal indicando que los recursos son insuficientes y que el LSP de prueba es rechazado.

```

Terminal
Archivo  Editar  Ver  Terminal  Solapas  Ayuda

debian:/home/mario/Desktop/escenario2-clave#
debian:/home/mario/Desktop/escenario2-clave# ns mec-preemption.tcl
  o The CR-LSP of lspid 1100 has been just established at 0.24017163636363639
  o The CR-LSP of lspid 1200 has been just established at 0.2402167272727273
  o The CR-LSP of lspid 1300 has been just established at 0.24026181818181822
  o The CR-LSP of lspid 1400 has been just established at 0.24030690909090913
  o The CR-LSP of lspid 1500 has been just established at 0.24035200000000004
  o The CR-LSP of lspid 1600 has been just established at 0.24039709090909095
  o The CR-LSP of lspid 1700 has been just established at 0.24044218181818186
  o The CR-LSP of lspid 1800 has been just established at 0.24048727272727277
  o The CR-LSP of lspid 1900 has been just established at 0.24053236363636368
nodeid=3 : status=RcUnavailable lspid=11000 tr=*_*_*_*_1536000.0_2.0_*

```

Figura 4.7 Rechazo del LSP de prueba

La figura 4.8 muestra que efectivamente el tráfico de prueba correspondiente al LSP10 tiene un throughput de 0 Kbps.

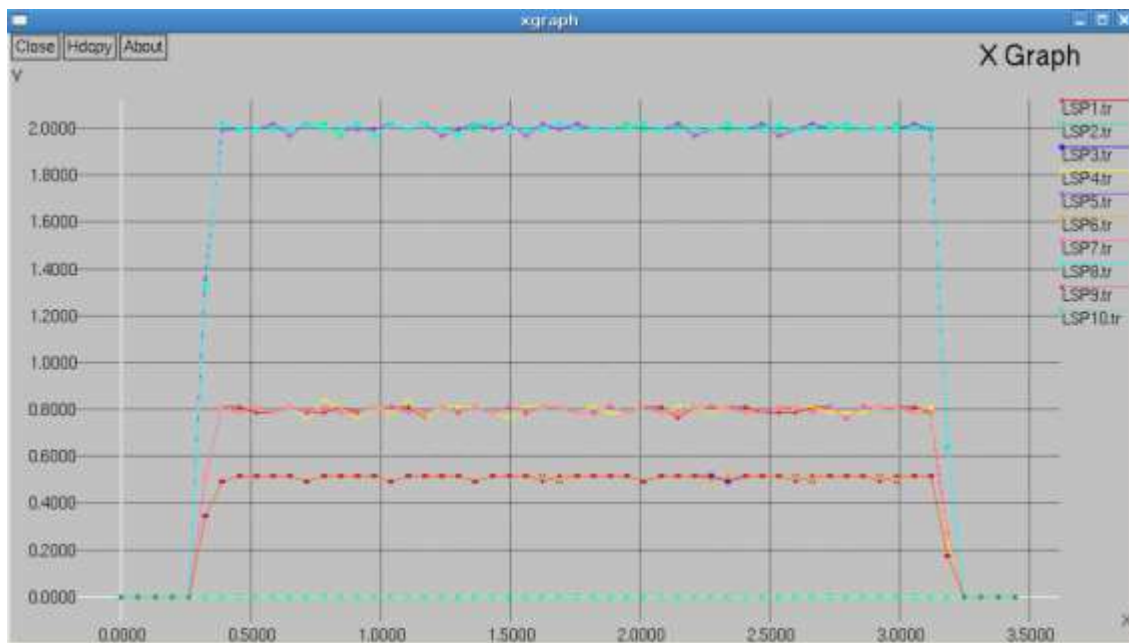


Figura 4.8 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 sin preemption

En las pruebas sucesivas realizadas para el escenario sin preemption, a medida que el ancho de banda de prueba aumenta, el control de admisión sigue rechazando la petición.

4.4.1.2 Comportamiento escenario2: con preemption

Una vez descrito el comportamiento que tiene una red sin preemption para el caso de estudio 1, se procede a explicar el comportamiento obtenido para el escenario con preemption.

En las primeras dos pruebas (con ancho de banda del LSP de prueba de 512 y 1024 Kb respectivamente) el ancho de banda del enlace es suficiente para establecer el LSP de prueba exitosamente sin degradar visiblemente ninguno de los LSPs en curso. La diferencia se presenta desde la prueba 3, en la que el ancho de banda del LSP de prueba es de 1536 Kb y se supera el ancho de banda disponible en el enlace. A diferencia del escenario 1 en el que el nuevo LSP se rechazaba, en este escenario el LSP se establece, *apropiando* a su paso a uno de los LSPs de baja prioridad (datos). La figura 4.9 muestra el momento en que se envía un mensaje LDP REQUEST correspondiente al LSP de prueba acompañado de un mensaje LDP RELEASE que es el que destruye uno de los 3 LSPs de datos. Inmediatamente después de que el mensaje LDP REQUEST llega al último nodo MPLS, éste envía un mensaje LDP MAPPING hacia el nodo origen que puede verse en la figura 4.10 reservando los recursos del nuevo LSP.

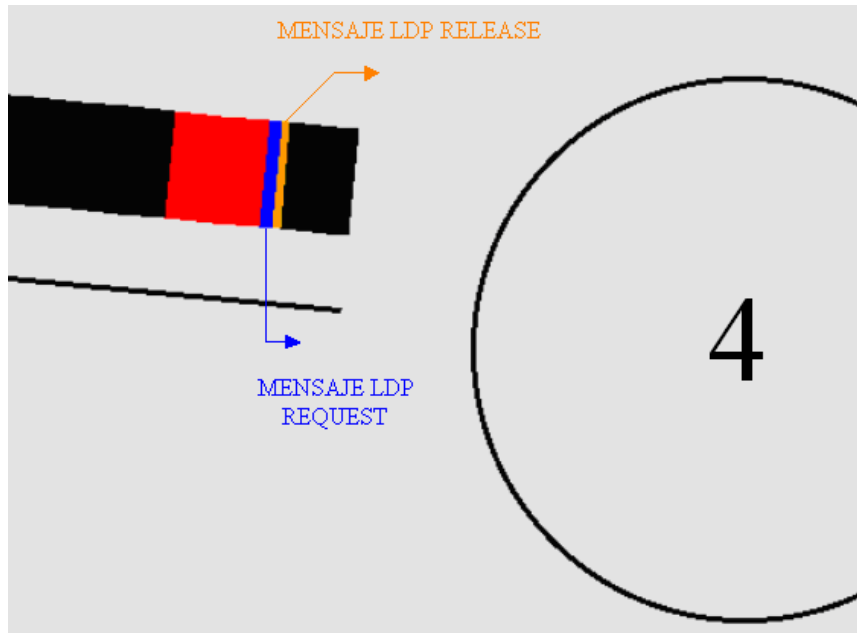


Figura 4.9 Mensajes LDP REQUEST y LDP RELEASE

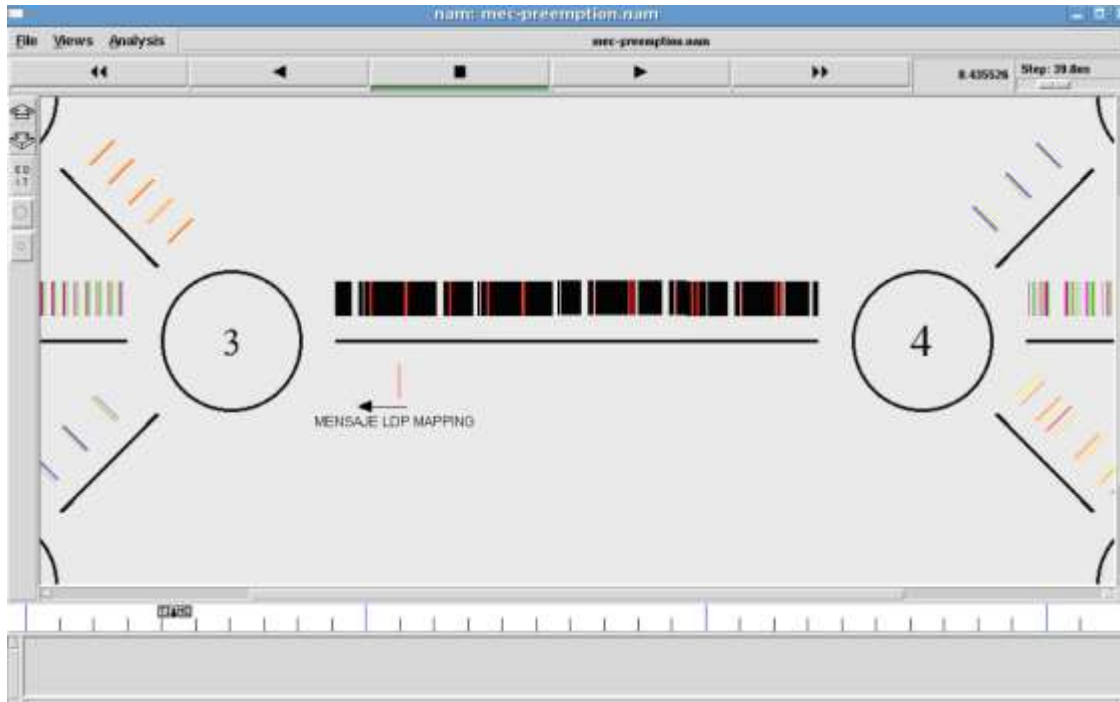


Figura 4.10 Mensaje LDP MAPPING

La figura 4.11 muestra el throughput en la red para la prueba 3. En el instante 0.4 segundos, cuando se establece el LSP de prueba de voz, se reduce el throughput del LSP1 correspondiente al tráfico de datos disminuyendo de 800 Kbps a 400 Kbps. Esto se debe a que el ancho de banda libre es de 1064 Kb y la petición del LSP de prueba es de 1536 Kb, pero como éste transporta tráfico de voz (prioridad alta), se *apropia* de los recursos usados por el LSP1 de datos (prioridad baja). El mecanismo básico de preemption elimina el LSP1 y su tráfico pasa a ser tratado como tráfico best effort, lo que equivale a que ya no se reservan recursos para él y entonces tendrá que utilizar el ancho de banda que 'sobra': en la figura 4.11 puede verse el throughput de este tráfico degradado a un valor cercano a 400Kbps correspondiente a la porción de ancho de banda que aún no ha sido reservado por otros LSPs en el enlace.

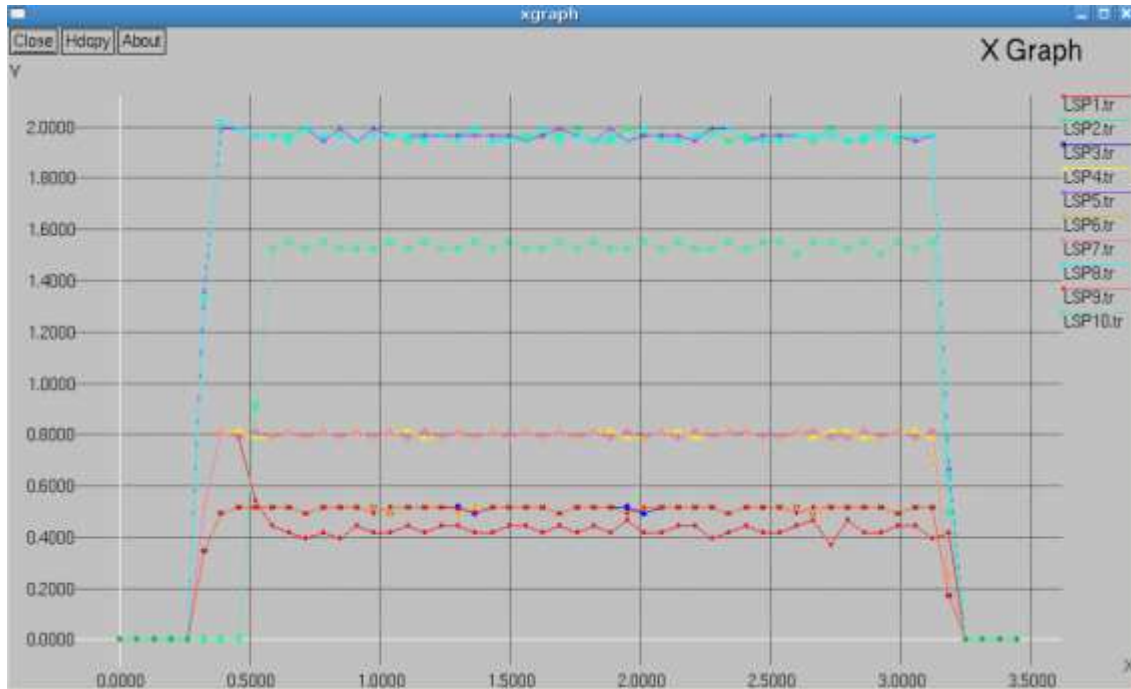


Figura 4.11 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 con preemption

En las pruebas sucesivas, a medida que se va incrementando el ancho de banda del LSP de prueba (LSP *apropiador*) el número de LSPs *apropiados* también aumenta. En las primeras pruebas los LSPs *apropiados* son los de baja prioridad y posteriormente el LSP de prueba empieza a *apropiar* LSPs de prioridad media. La cantidad de LSPs *apropiados* en cada una de las pruebas y sus prioridades pueden observarse en la tabla 4.5.

Caso de estudio 1				
Escenario 2				
LSPs apropiados				
Prueba	BW LSP de prueba(Kb)	BW que es necesario apropiar* (Kb)	Cantidad de LSPs apropiados	Prioridad de los LSPs apropiados**
1	512	0	0	--
2	1024	0	0	--
3	1536	472	1	B
4	2048	984	2	B,B
5	2560	1496	2	B,B
6	3072	2008	3	B,B,B
7	3584	2520	2	B,M
8	4096	3032	3	B,B,M
9	4608	3544	4	B,B,B,M
10	5120	4056	4	B,B,B,M
11	5632	4568	4	B,B,M,M
12	6144	5080	5	B,B,B,M,M
13	6656	5592	5	B,B,B,M,M
14	7168	6104	5	B,B,B,M,M

*BW LSP de prueba – BW libre

**B=Baja M=Media

Tabla 4.5 LSPs apropiados en el caso de estudio 1

La figura 4.12 muestra cómo se incrementa la cantidad de LSPs apropiados a medida que aumenta el ancho de banda del LSP de prueba.

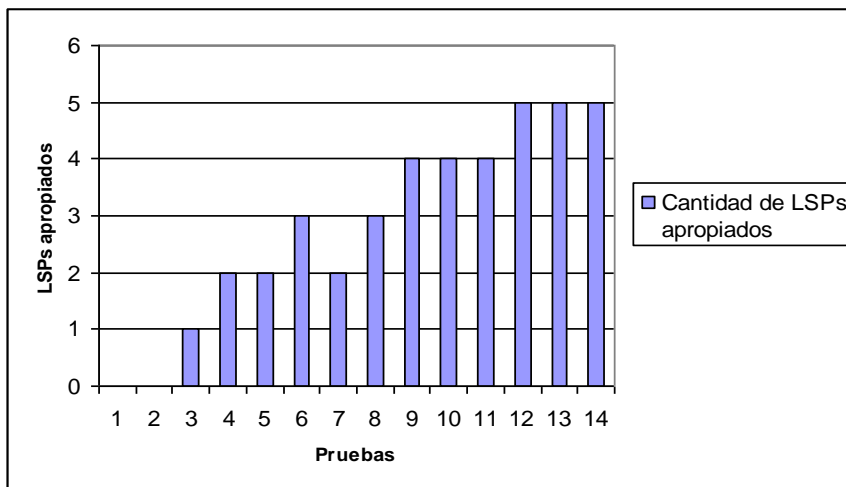


Figura 4.12 Cantidad de LSPs apropiados en cada prueba para el caso de estudio 1

4.4.1.3 Evaluación del desempeño

En este caso de estudio y en los dos siguientes se realizaron mediciones de throughput, pérdida de paquetes, retardo y jitter que permiten evaluar el desempeño de la red MPLS con y sin preemption.

4.4.1.3.1 Evaluación del desempeño para el tráfico de datos

Las medidas de desempeño obtenidas para el tráfico de datos en las 14 pruebas se muestran en las tablas 4.6 y 4.7.

Caso de estudio 1					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de datos			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	2365,24	0	41,04	0,49
2	1024	2365,24	0	41,15	0,51
3	1536	2365,24	0	40,96	0,44
4	2048	2365,24	0	40,96	0,44
5	2560	2365,24	0	40,96	0,44
6	3072	2365,24	0	40,96	0,44
7	3584	2365,24	0	40,96	0,44
8	4096	2365,24	0	40,96	0,44
9	4608	2365,24	0	40,96	0,44
10	5120	2365,24	0	40,96	0,44
11	5632	2365,24	0	40,96	0,44
12	6144	2365,24	0	40,96	0,44
13	6656	2365,24	0	40,96	0,44
14	7168	2365,24	0	40,96	0,44

Tabla 4.6 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario sin preemption

Caso de estudio 1					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de datos			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	2365,24	0	42,02	0,86
2	1024	2355,31	0,41	43,23	0,9
3	1536	2024,27	14,41	52,36	1,17
4	2048	1515,03	35,94	56,08	1,07
5	2560	1080,82	54,30	76,04	2,43
6	3072	904,82	61,74	124,9	17,33
7	3584	1751,72	25,93	50,66	1,40
8	4096	1613,24	31,79	81,88	6,25
9	4608	1340,68	43,31	69,54	9,62
10	5120	1059,86	55,19	70,93	9,62
11	5632	2162,20	8,58	43,88	0,69

12	6144	1727,44	26,96	45,15	0,97
13	6656	1409,10	40,42	46,82	1,1
14	7168	1051,03	55,56	48,98	1,24

Tabla 4.7 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario con preemption

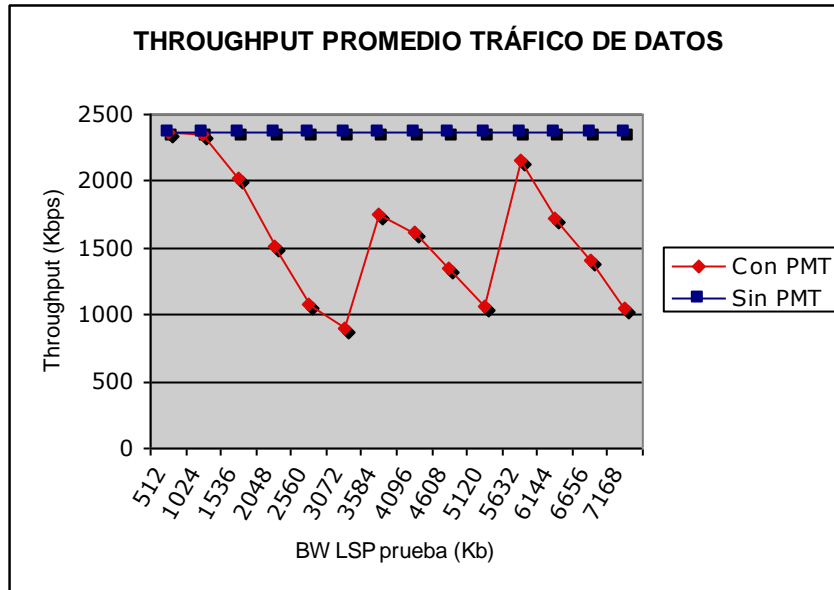


Figura 4.13 Throughput promedio del tráfico de datos. Caso de estudio 1

La figura 4.13 muestra una comparación del throughput del tráfico de datos (prioridad baja) en ambos escenarios. Se observa que el mecanismo de preemption influye notoriamente en el throughput del tráfico de datos degradándolo casi en la totalidad de las pruebas. Por un lado, en el escenario sin preemption puede observarse que el throughput del tráfico de datos permanece constante en un valor de 2365 Kbps (ver tabla 4.6) que corresponde al tráfico de los 3 LSPs de datos establecidos en el primer evento. En este escenario, cuando los recursos del enlace no son suficientes para aceptar el LSP de prueba, el control de admisión simplemente lo rechaza y entonces los LSPs de datos existentes en la red no se ven afectados en ninguna de las pruebas. Por otro lado, en el escenario con preemption, para un ancho de banda del LSP de prueba menor que 1024 Kb (pruebas 1 y 2), el throughput del tráfico de datos es igual al del escenario sin preemption porque el LSP de prueba aún no supera al ancho de banda libre en el enlace de manera que se establece normalmente sin degradar el tráfico existente en la red. Sin embargo para anchos de banda del LSP de prueba superiores a 1536 Kb el ancho de banda libre en el enlace ya no es suficiente y, para poder establecerse, el LSP de prueba (que es de voz y por lo tanto de prioridad alta) empieza a *apropiar* cada vez más LSPs de datos cuyo tráfico pasa a ser tratado como best effort; esto disminuye visiblemente su throughput a medida

que van avanzando las pruebas. En los valores 3584 Kb y 5632 Kb se observan unos picos hacia arriba a causa de que en esos valores se presenta una nueva *apropiación* de un LSP de prioridad media (ver tabla 4.5), y entonces la cantidad de LSPs de datos *apropiados* disminuye. Además los datos y el video que pasaron a tratarse como best effort empiezan a competir por los recursos en igualdad de condiciones compartiendo las pérdidas. Esto puede observarse también en la figura 4.14.

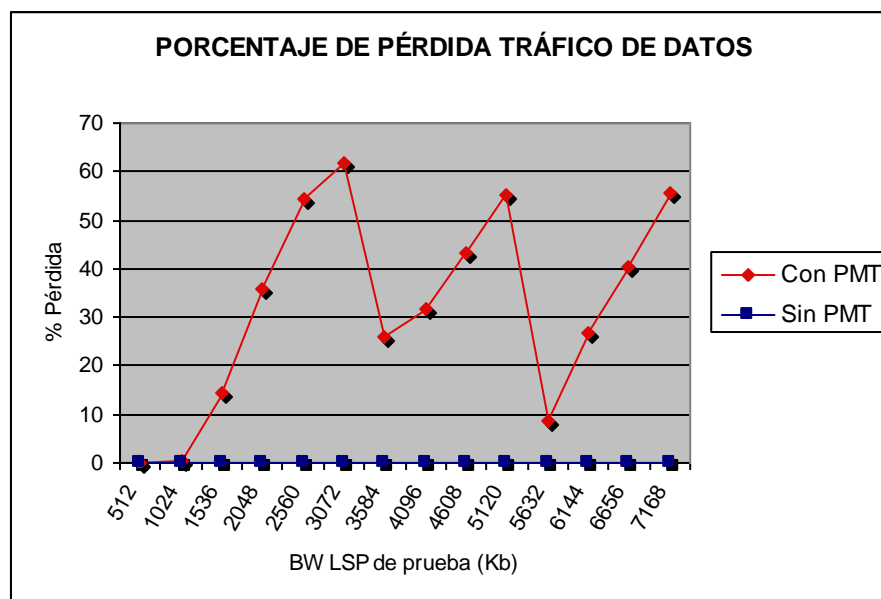


Figura 4.14 Porcentaje de pérdida de paquetes del tráfico de datos. Caso de estudio 1

Al igual que sucede con el throughput, las pérdidas del escenario sin preemption permanecen constantes, como lo muestra la figura 4.14 puesto que en este escenario el tráfico de datos establecido en la red no se afecta y entonces las pérdidas son nulas.

Por el contrario, en el escenario con preemption es notorio que el tráfico de datos se ve altamente afectado presentando pérdidas que se incrementan a medida que pasan las pruebas. Las pérdidas se reducen presentando picos hacia abajo en los mismos valores en que se presentaban picos en el throughput, es decir para anchos de banda del LSP de prueba de: 3584 Kb y 5632 Kb por las razones ya mencionadas.

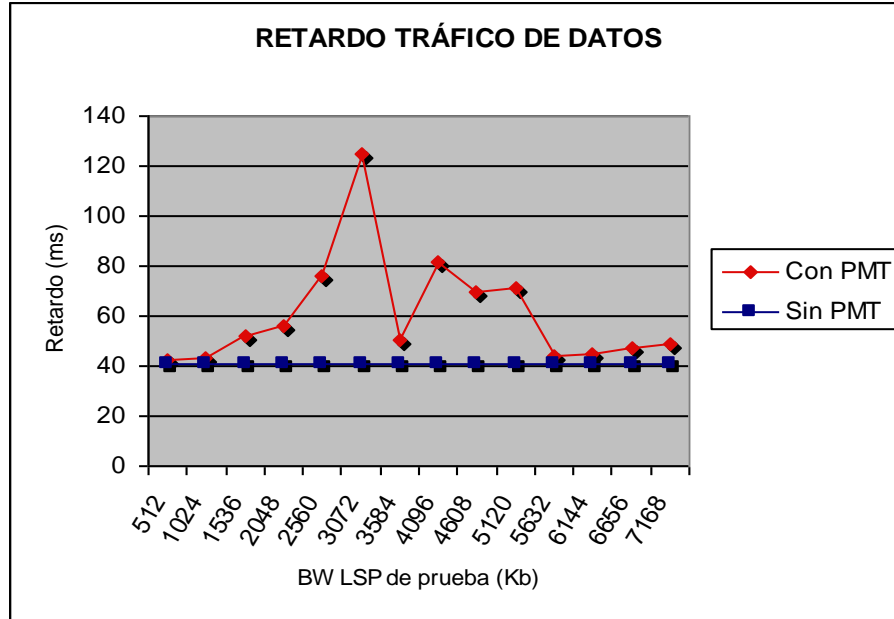


Figura 4.15 Retardo en el tráfico de datos. Caso de estudio 1

El mecanismo de preemption afecta también el retardo del tráfico de datos como se ve en la figura 4.15 que muestra el retardo promedio obtenido en cada una de las pruebas para el tráfico de datos. En todas las pruebas el retardo del escenario con preemption es mayor en comparación al escenario sin preemption presentando su valor más alto de 124,9 ms cuando el ancho de banda del LSP de prueba de 3072 Kb (prueba 6). Esto sucede porque para ese valor, el LSP de prueba *apropia* 3 LSPs de datos y ninguno de video, por lo tanto todas las pérdidas recaen en el tráfico de datos, lo que afecta altamente al retardo.

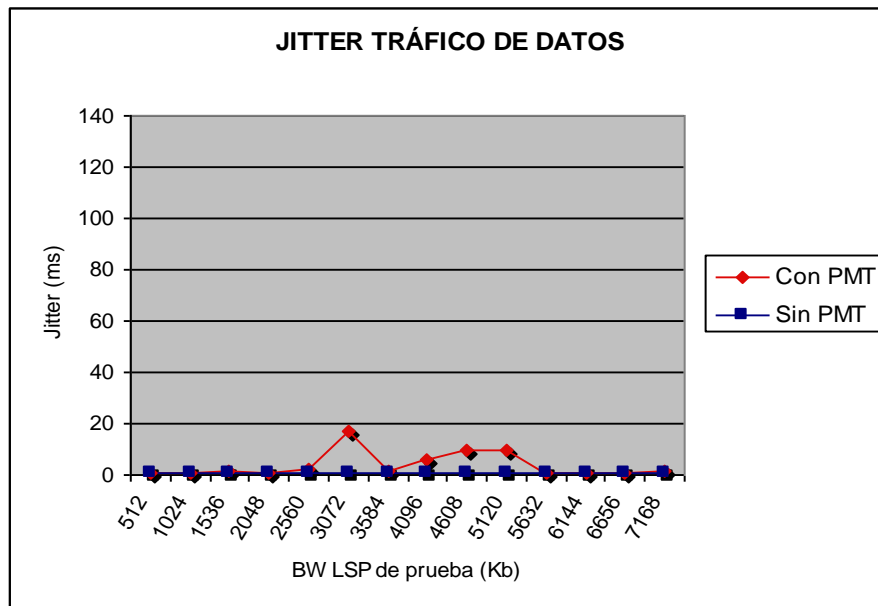


Figura 4.16 Jitter del tráfico de datos. Caso de estudio 1

En la figura 4.16 se muestra el jitter promedio obtenido en cada una de las pruebas para el tráfico de datos, mientras en el escenario sin preemption existe un jitter casi constante de 0.44 ms, en el escenario con preemption el jitter es más alto en todas las pruebas y presenta fluctuaciones alcanzando su valor máximo de 17,33 ms en la prueba 6, que es cuando se presenta la *apropiación* de los 3 LSPs de datos existentes en la red.

4.4.1.3.2 Evaluación del desempeño para el tráfico de video

Caso de estudio 1					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de video			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	5894,62	0	41,53	0,27
2	1024	5874,20	0,69	41,62	0,26
3	1536	5912,82	0,04	41,28	0,28
4	2048	5912,82	0,04	41,28	0,28
5	2560	5912,82	0,04	41,28	0,28
6	3072	5912,82	0,04	41,28	0,28
7	3584	5912,82	0,04	41,28	0,28
8	4096	5912,82	0,04	41,28	0,28
9	4608	5912,82	0,04	41,28	0,28
10	5120	5912,82	0,04	41,28	0,28
11	5632	5912,82	0,04	41,28	0,28
12	6144	5912,82	0,04	41,28	0,28
13	6656	5912,82	0,04	41,28	0,28
14	7168	5912,82	0,04	41,28	0,28

Tabla 4.8 Desempeño para el tráfico de video en el escenario sin preemption

Caso de estudio 1					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de video			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	5915,58	0	40,93	0,26
2	1024	5915,58	0	41,01	0,26
3	1536	5829,51	1,45	41,63	0,31
4	2048	5868,13	0,80	41,58	0,31
5	2560	5831,72	1,41	41,72	0,31
6	3072	5543,17	6,29	41,88	0,3
7	3584	4328,27	26,83	49,88	0,9
8	4096	4098,2	30,72	51,24	1,74
9	4608	4084,41	30,95	65,07	3,73
10	5120	4084,41	30,95	65,12	3,73
11	5632	2251,58	61,93	75,66	7,15

12	6144	2251,58	61,93	75,66	7,17
13	6656	2251,58	61,93	75,66	7,17
14	7168	2251,58	61,93	75,66	7,19

Tabla 4.9 Desempeño para el tráfico de video en el escenario con preemption

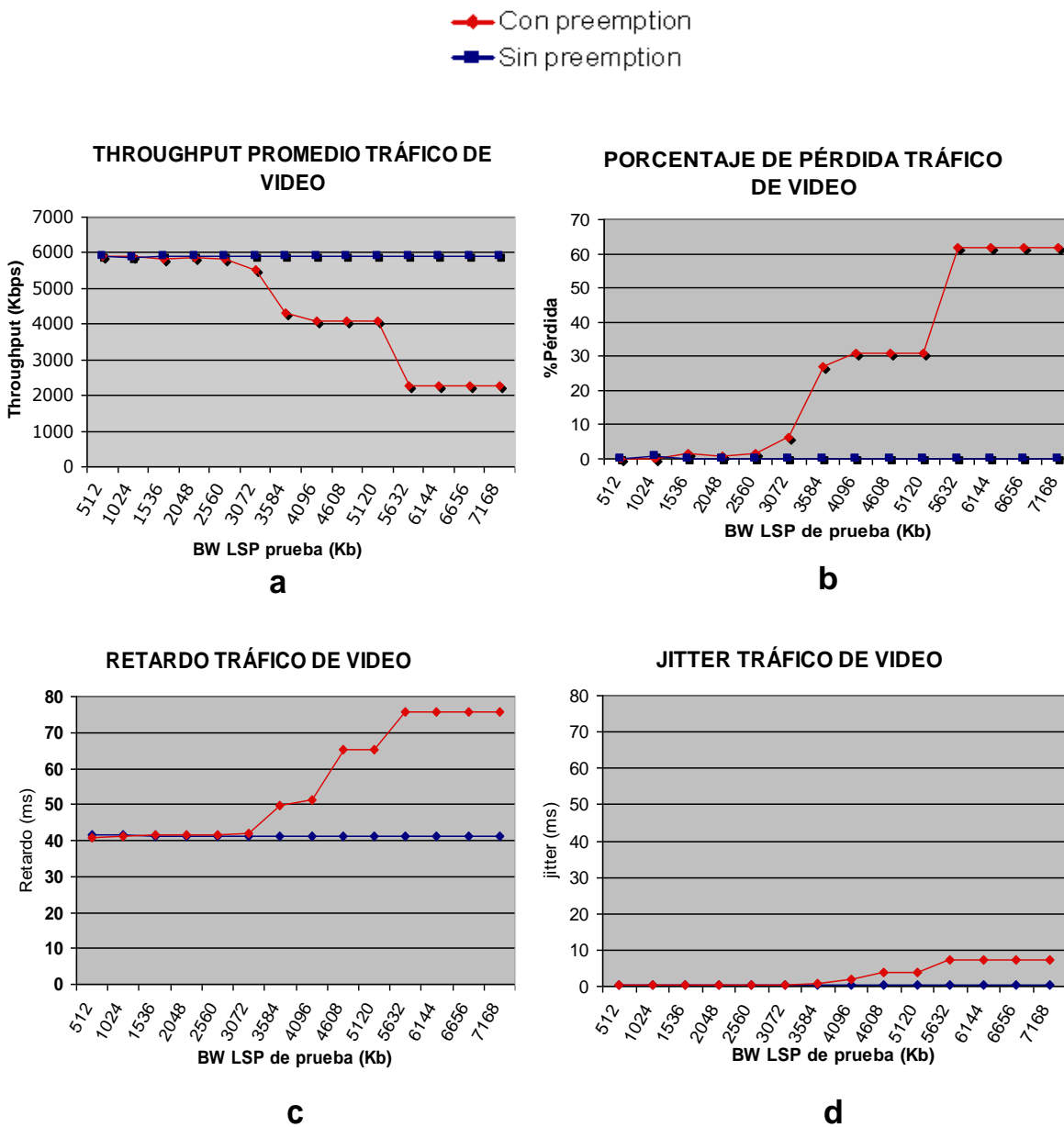


Figura 4.17 Parámetros de desempeño del tráfico de video. Caso de estudio 1

En las tablas 4.8 y 4.9 y en la figura 4.17 pueden observarse los parámetros de desempeño obtenidos en ambos escenarios para el tráfico de video. En el escenario sin preemption el desempeño del tráfico de video no se ve afectado en ninguna de las pruebas: El throughput

(figura 4.17a) tiene un valor casi constante cercano a los 6000 Kbps que corresponde a los 3 LSPs de video establecidos en el primer evento. Las pérdidas son casi nulas en todas las pruebas, y el retardo y jitter tienen valores bajos y estables.

En el escenario con preemption, para un ancho de banda del LSP de prueba menor a 3072 Kb el desempeño del tráfico de video no se ve afectado y es similar al del escenario sin preemption, pues el tráfico de video no se ha visto *apropiado* hasta ese punto y tiene sus recursos reservados. Sin embargo, a partir de 3584 Kb el LSP de prueba empieza a *apropiar* a los LSPs de video (ver tabla 4.5) y el desempeño de ese tráfico se afecta cada vez más a medida que el ancho de banda del LSP de prueba aumenta. Para un ancho de banda de 3584 Kb el LSP de prueba *apropia*, además de los LSPs de datos, a uno de video y para un ancho de banda de 5632 Kb *apropia* 2 de video. Es por esto que en estos valores ocurren cambios abruptos en el throughput como puede verse en la figura 4.17a. Este comportamiento también se ve reflejado en las pérdidas que en el rango que va de 3584 hasta 5120 Kb alcanzan un valor cercano al 30%. Posteriormente, en el rango de 5632 hasta 7168 Kb se genera un incremento aún mayor en las pérdidas que suben casi a un 62% como lo muestra la figura 4.17b. El jitter y retardo se afectan de manera similar presentando subidas abruptas en los mismos puntos con un valor máximo de 75,66 ms para el retardo y 7,19 ms para el jitter.

4.4.1.3.3 Evaluación del desempeño para el tráfico de voz

Caso de estudio 1					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de voz			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	1984	0	41,1	0,55
2	1024	2453,51	0	41,19	0,55
3	1536	1514,48	48,16	40,99	0,47
4	2048	1514,48	55,35	40,99	0,47
5	2560	1514,48	60,78	40,99	0,47
6	3072	1514,48	65,03	40,99	0,47
7	3584	1514,48	68,45	40,99	0,47
8	4096	1514,48	71,26	40,99	0,47
9	4608	1514,48	73,61	40,99	0,47
10	5120	1514,48	75,61	40,99	0,47
11	5632	1514,48	77,32	40,99	0,47
12	6144	1514,48	78,81	40,99	0,47
13	6656	1514,48	80,12	40,99	0,47
14	7168	1514,48	81,27	40,99	0,47

Tabla 4.10 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario sin preemption

Caso de estudio 1					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de voz			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	1982,89	0	40,65	0,15
2	1024	2451,86	0	40,68	0,17
3	1536	2921,93	0	40,7	0,21
4	2048	3390,89	0,04	40,7	0,21
5	2560	3859,86	0,05	40,71	0,2
6	3072	4329,37	0,05	40,78	0,21
7	3584	4691,86	2,27	40,72	0,2
8	4096	5043,31	4,31	40,74	0,2
9	4608	5328	7,17	40,74	0,2
10	5120	5617,1	9,54	40,81	0,17
11	5632	6357,51	4,83	40,7	0,14
12	6144	6794,48	4,96	40,69	0,17
13	6656	7108,41	6,70	40,67	0,18
14	7168	7469,24	7,65	40,68	0,19

Tabla 4.11 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario con preemption

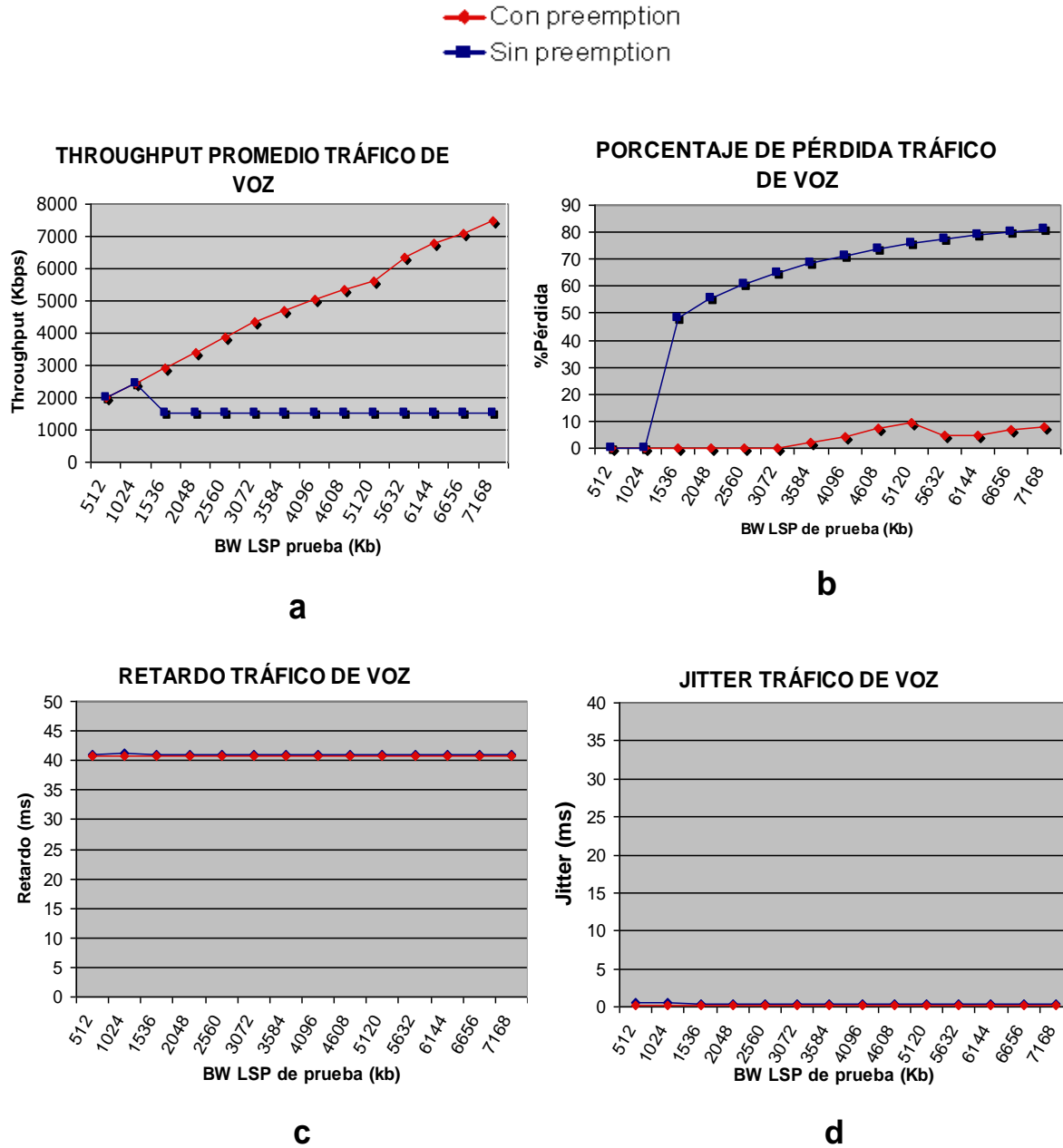


Figura 4.18 Parámetros de desempeño del tráfico de voz. Caso de estudio 1

Las tablas 4.10 y 4.11 y la figura 4.18 muestran las medidas del desempeño para el tráfico de voz obtenidas en ambos escenarios. Es bastante notorio el hecho de que una red con preemption favorece en gran medida al tráfico de alta prioridad.

En este caso de estudio el LSP de prueba es de voz, de manera que si éste se establece exitosamente, se favorece el desempeño del tráfico de voz. Si por el contrario, el LSP de prueba

se rechaza, el desempeño del tráfico de voz se ve afectado. En el escenario sin preemption sólo se presenta un incremento en el throughput (figura 4.18a) para valores de ancho de banda del LSP de prueba menores que 1024 Kb, ya que para ese rango el ancho de banda libre del enlace es suficiente y el control de admisión acepta al LSP de prueba de voz. Sin embargo a partir de un ancho de banda de 1536 Kb el throughput del escenario sin preemption cae a 1514,48 Kbps (ver tabla 4.10) debido a que la petición del LSP de prueba empieza a ser rechazada porque supera el límite de ancho de banda del enlace. Los 1514 Kbps que permanecen constantes en las siguientes pruebas para el escenario sin preemption se deben a los 3 LSPs de voz establecidos previamente en el primer evento. Las pérdidas del tráfico de voz en el escenario sin preemption (figura 4.18 b), presentan valores muy altos en todas las pruebas a partir de un ancho de banda del LSP de prueba de 1536 Kb y se incrementan a medida que avanzan las pruebas en razón de que en todas ellas el LSP de prueba se rechaza y entonces todo el tráfico que éste intentaba transportar pasa a engrosar las pérdidas del tráfico de voz.

En contraste, en el escenario con preemption el throughput del tráfico de voz se incrementa considerablemente ya que el LSP de prueba de voz no se rechaza en ninguna de las pruebas sino que por el contrario se establece utilizando los recursos de los LSPs que han sido *apropiados*, es por esto que a medida que el ancho de banda del LSP de prueba aumenta, el throughput del tráfico de voz aumenta también en la misma proporción (figura 4.18a). Las pérdidas del tráfico de voz (figura 4.18b) son muy reducidas en el escenario con preemption; se presenta sin embargo un ligero incremento que no llega a alcanzar el 10% producto del elevado volumen de tráfico que llega al enlace.

Es importante notar que, mientras en el escenario sin preemption, las pérdidas totales en el enlace corresponden en su gran mayoría al tráfico de voz que no fue aceptado, en el escenario con preemption las pérdidas totales del enlace corresponden en parte al tráfico de video y en mayor medida al tráfico de datos.

4.4.1.3.4 Comparación del desempeño de los tres tipos de tráfico

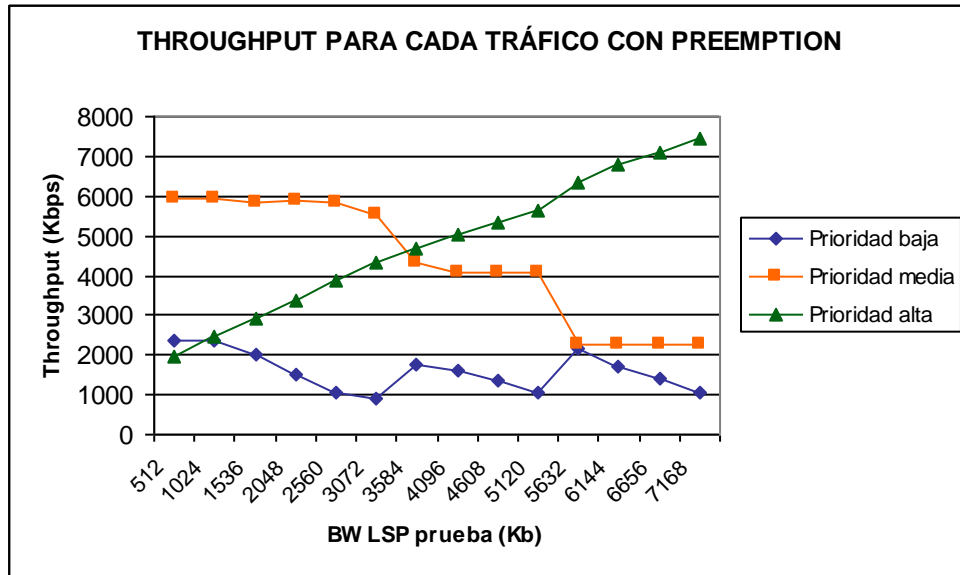


Figura 4.19 Comparación del throughput de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1

La figura 4.19 ofrece una visión más general del throughput de los distintos tipos de tráfico en el escenario con preemption. Inicialmente el throughput más pequeño es el de alta prioridad (Voz) debido a que los LSPs de este tipo tienen la tasa de bit más pequeña (512 Kbps cada uno) seguido por el throughput de prioridad baja (datos con 800 Kbps cada uno) y alta (video con 2000 Kbps cada LSP). A medida que avanzan las pruebas puede observarse cómo el throughput del tráfico de prioridad alta se incrementa constantemente mientras el de las demás prioridades disminuye, siendo el mayor afectado el de prioridad baja que ve reducido su throughput en casi todas las pruebas.

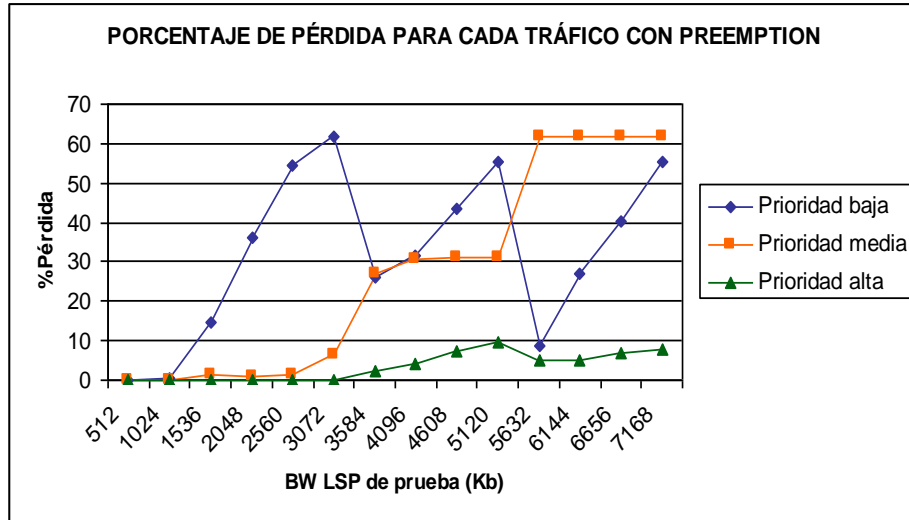


Figura 4.20 Comparación de las pérdidas de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1

Si se comparan las pérdidas experimentadas por cada tipo de tráfico como lo muestra la figura 4.20 puede comprobarse cómo el mecanismo de preemption favorece notoriamente el tráfico de alta prioridad que genera pérdidas muy reducidas en todas las pruebas. El tráfico más afectado es el de prioridad baja que tiene pérdidas en casi todas las pruebas seguido por el de media que ve incrementadas sus pérdidas a partir de la sexta prueba.

4.4.1.3.5 Evaluación del desempeño en el enlace

Las tablas 4.12 y 4.13 muestran el throughput y pérdida de paquetes totales que se obtuvieron para todo el tráfico que circula por el enlace en ambos escenarios: con y sin preemption

Caso de estudio 1			
Escenario 1: sin preemption			
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño en el enlace	
		Throughput total en el enlace (Kbps)	% Pérdidas Totales en el enlace
1	512	10243,86	0
2	1024	10692,95	0,37
3	1536	9792,54	12,58
4	2048	9792,54	16,11
5	2560	9792,54	19,35
6	3072	9792,54	22,35
7	3584	9792,54	25,14
8	4096	9792,54	27,73
9	4608	9792,54	30,15
10	5120	9792,54	32,41
11	5632	9792,54	34,54
12	6144	9792,54	36,53
13	6656	9792,54	38,41
14	7168	9792,54	40,17

Tabla 4.12 Medidas del desempeño en la red en el escenario sin preemption

Caso de estudio 1			
Escenario 2: con preemption			
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño en el enlace	
		Throughput total en el enlace (Kbps)	% Pérdidas Totales en el enlace
1	512	10263,71	0
2	1024	10722,75	0,09
3	1536	10775,71	3,81
4	2048	10774,05	7,70
5	2560	10772,4	11,28
6	3072	10777,36	14,54
7	3584	10771,85	17,65
8	4096	10754,75	20,63
9	4608	10753,09	23,30
10	5120	10761,37	25,73
11	5632	10771,29	28,00
12	6144	10773,5	30,17
13	6656	10769,09	32,27
14	7168	10771,85	34,19

Tabla 4.13 Medidas del desempeño en la red en el escenario con preemption

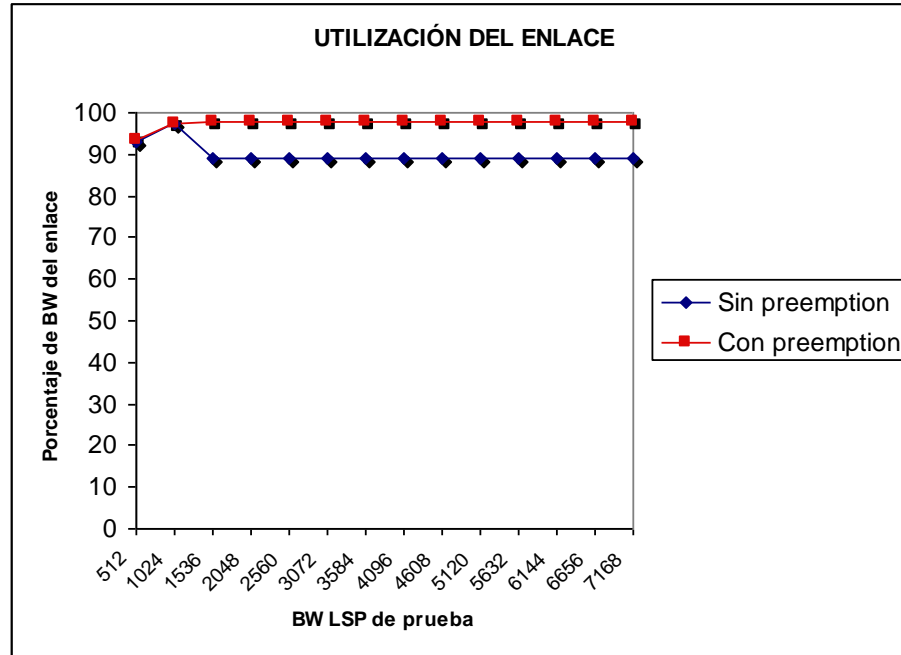


Figura 4.21 Utilización de los recursos del enlace. Caso de estudio 1

Las tablas 4.12 y 4.13 muestran el throughput total en el enlace para las 14 pruebas en ambos escenarios. En ellas puede verse que cuando los recursos libres de la red no son suficientes para aceptar un LSP que quiere establecerse, el escenario sin preemption prefiere rechazar la petición, aún si eso significa dejar una porción de ancho de banda libre sin utilizar. En cambio el escenario con preemption acepta la nueva petición y utiliza todos los recursos del enlace. El escenario con preemption hace un uso máximo de los recursos, como lo muestra la figura 4.21, a expensas de la degradación del tráfico de prioridades media y baja. Por esta razón en el escenario con preemption, el throughput total del enlace aumenta y las pérdidas disminuyen (ver tablas 4.12 y 4.13) en comparación al escenario sin preemption puesto que se aprovechan al máximo los recursos del enlace.

4.4.1.4 Conclusiones para el caso de estudio 1

En este caso de estudio se analiza el comportamiento de un enlace ocupado con tráfico de diferentes tipos al que llega un LSP de alta prioridad que quiere establecerse. Las pruebas realizadas permiten hacer una comparación entre el comportamiento de un escenario en el que no está habilitado el mecanismo de preemption con el comportamiento de un escenario en el que sí lo está.

En condiciones en las que los recursos libres en la red no son suficientes para satisfacer al nuevo LSP, mientras la red sin preemption lo rechaza, la red con preemption lo acepta. Esto tiene incidencias en el desempeño de ambas redes en términos generales y también afecta el desempeño de cada uno de los tipos de tráfico circulando en la red.

En cuanto al comportamiento general de todo el tráfico en el enlace, puede apreciarse que los resultados del throughput y las pérdidas indican un mejor desempeño del escenario con preemption, pues presenta mayor throughput y menores pérdidas. Esto sucede a causa de que en el escenario sin preemption existe una porción de ancho de banda libre que no se utiliza porque el LSP de prueba no se establece. Por su parte el escenario con preemption admite al LSP de prueba y entonces ocupa la totalidad de los recursos del enlace, pero degrada el tráfico ya existente.

Si se tiene en cuenta por separado el desempeño de cada uno de los tipos de tráfico se observa que la aplicación de un mecanismo de preemption reduce notoriamente el desempeño del tráfico de baja prioridad que es el más afectado presentando pérdidas retardo y jitter altos en casi todas las pruebas (ver figuras 4.13 a 4.16).

Por su parte el desempeño del tráfico de prioridad media sólo se ve degradado cuando el ancho de banda del LSP de prueba supera cierto valor, de manera que puede decirse que un mecanismo de preemption 'protege' al tráfico de prioridad media hasta cierto punto, pero existe un umbral para el cual el mecanismo de preemption afecta a la prioridad media y se presenta cuando el ancho de banda del LSP de prueba supera el ancho de banda de todos los LSPs de prioridad baja que están establecidos en la red.

El tráfico de alta prioridad mejora radicalmente su desempeño en un escenario con preemption obteniendo pérdidas casi nulas en todas las pruebas y un retardo y jitter reducido (ver figura 4.18).

En este caso de estudio se realizaron 14 pruebas; en el escenario sin preemption el LSP de prueba de voz sólo pudo establecerse en 2 de ellas. En cambio en el escenario con preemption el LSP de prueba de voz pudo establecerse exitosamente en la totalidad de las pruebas. Con esto se concluye que cuando se aplica preemption la probabilidad de bloqueo del tráfico de alta prioridad se reduce considerablemente. En un escenario con preemption un LSP de alta

prioridad sólo se rechazaría en el caso de que la totalidad del tráfico de menor prioridad establecido en el enlace no fuera suficiente para satisfacer su ancho de banda.

En cuanto al comportamiento del mecanismo de preemption, las pruebas realizadas para este caso de estudio permiten concluir que un mecanismo básico de preemption tendrá siempre como primeros opcionados para ser *apropiados* a los LSPs de prioridad baja, escogiéndolos por encima de cualquier otra prioridad; esto se evidencia por ejemplo en la prueba 6 (ver tabla 4.5) en la que la *apropiación* de un solo LSP de prioridad media habría sido suficiente para satisfacer el requerimiento de ancho de banda del LSP de prueba, sin embargo el mecanismo prefiere *apropiar* a tres LSPs de prioridad baja. Siguiendo este comportamiento el mecanismo de preemption *apropiará* tantos LSPs de baja prioridad como existan en la red si esto satisface sus requerimientos de ancho de banda. Cuando la totalidad de LSPs de prioridad baja existentes en la red no son suficientes, entonces el mecanismo empieza a *apropiar* a los LSPs que les siguen en prioridad, es decir a los de media.

4.4.2 CASO DE ESTUDIO 2: LSP de prueba de video

Este caso de estudio consiste en evaluar un enlace MPLS cargado con tráfico de diferentes tipos (voz video y datos) al que llega un tráfico de video que genera congestión. Se muestran los resultados de este caso de estudio para ambos escenarios:

4.4.2.1 Comportamiento escenario 1: sin preemption

Para este caso de estudio el escenario sin preemption se comporta predeciblemente con la llegada del tráfico de video. En la primera y segunda prueba cuando el ancho de banda del LSP de prueba es de 512Kb y 1024Kb respectivamente, el control de admisión lo acepta, ya que existe suficiente ancho de banda libre en el enlace, como lo muestra la figura 4.22 que ilustra el throughput en la red para la prueba 2. El tráfico de prueba correspondiente al LSP10 es de 1024 Kbps, durante toda la simulación, sin degradar ninguno de los tráficos que se encuentran en la red.

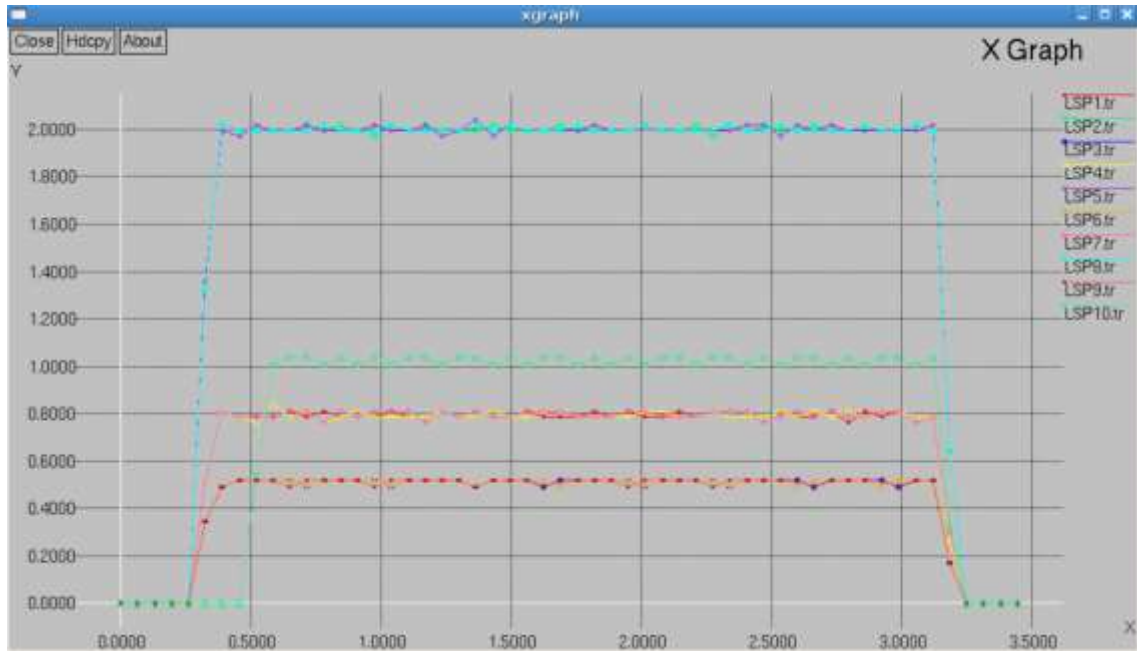


Figura 4.22 Throughput vs. Tiempo en la prueba 2

Para la tercera prueba cuando el ancho de banda requerido por el tráfico de video es de 1536 Kb no existe ancho de banda libre suficiente en el enlace. Puesto que en este escenario el mecanismo de preemption no está habilitado, se rechaza la petición de establecimiento del nuevo LSP y el tráfico no se envía. En la figura 4.23 se observa el tráfico de prueba (de color verde) con una tasa de transmisión de 0 Kbps.

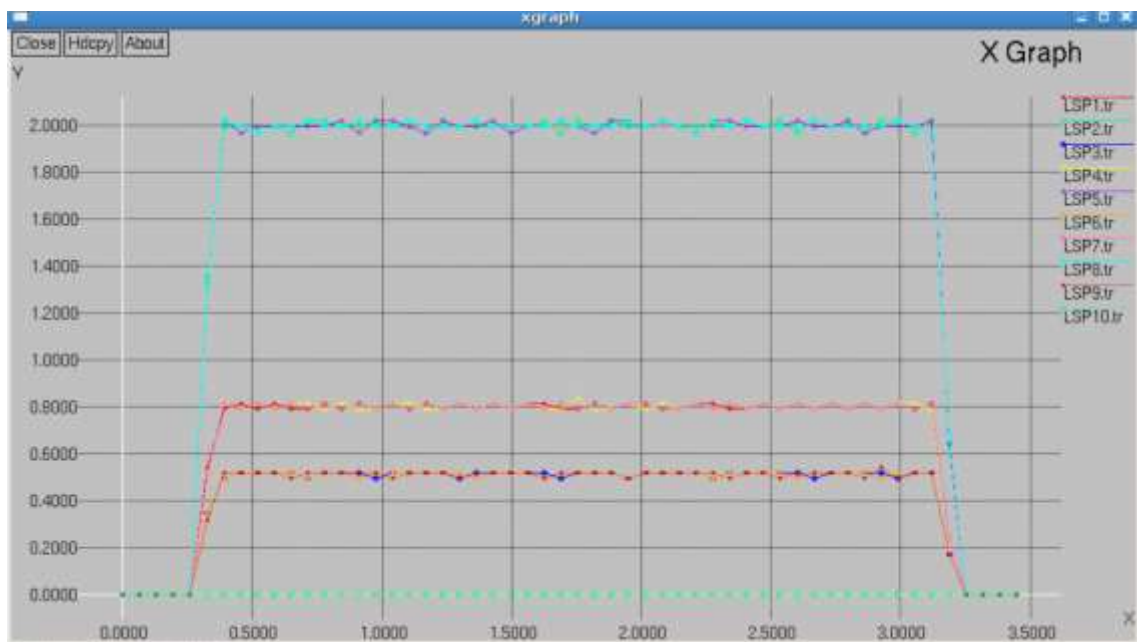


Figura 4.23 Throughput vs. Tiempo en la prueba 3 sin preemption

A partir de la tercera prueba y en todas las pruebas posteriores el comportamiento del escenario sin preemption se repite: el nuevo LSP no se puede establecer ya que cada vez necesita más ancho de banda y el enlace no se lo puede brindar. Los resultados respecto a la pérdida de paquetes, el throughput el retardo, el jitter y el análisis correspondiente se muestran en la sección 4.4.2.3.

4.4.2.2 Comportamiento escenario 2: con preemption

Después de haber observado el comportamiento del escenario sin preemption se procede a describir lo que sucede en el escenario con preemption.

En las pruebas 1 y 2 el comportamiento es similar al escenario 1: el ancho de banda disponible en el enlace es suficiente para satisfacer la petición del LSP de prueba y lo establece sin necesidad de *apropiar* ningún LSP ya existente. En la prueba 3 el ancho de banda del LSP de prueba es de 1536 Kb sobrepasando el ancho de banda disponible en el enlace, así que el LSP de prueba que es de video y por lo tanto de prioridad media, pasa a *apropiar* uno de los LSPs de datos que son de baja prioridad. Lo anterior puede apreciarse en la figura 4.24 que muestra cómo el LSP 10 correspondiente al de prueba alcanza su throughput satisfactoriamente al mismo tiempo que se disminuye el throughput del LSP 1 correspondiente al tráfico de datos de baja prioridad, esto se debe a que el LSP10 se *apropia* de los recursos del LSP 1, el LSP1 se elimina y su tráfico queda degradado a best effort.

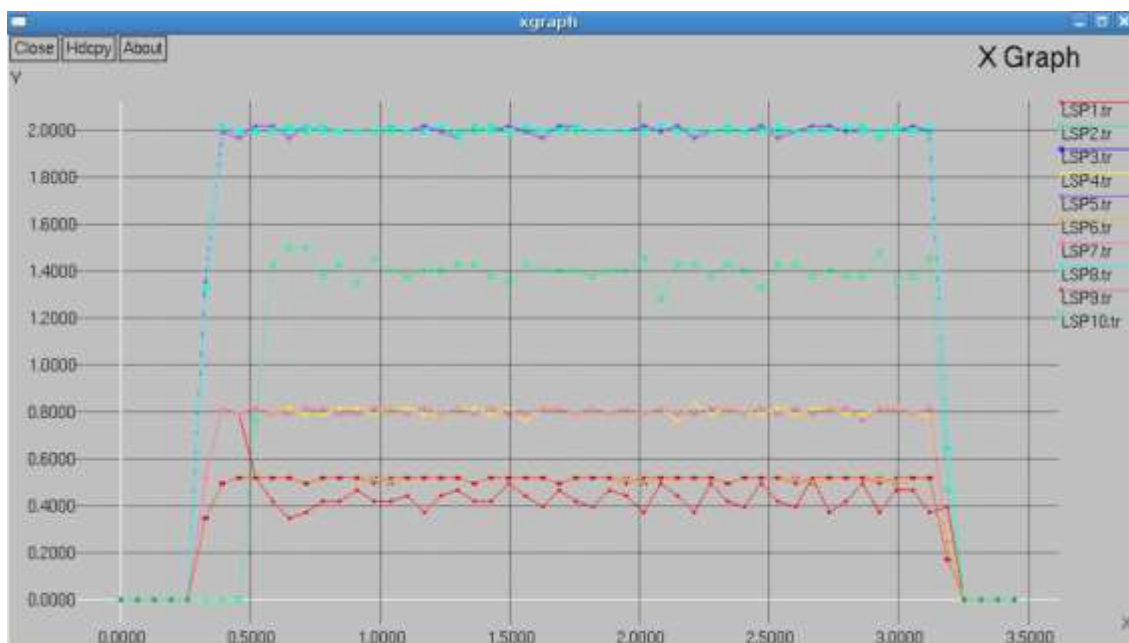


Figura 4.24 Throughput vs tiempo prueba 3 con preemption

En las pruebas sucesivas, a medida que su ancho de banda aumenta, el LSP de prueba de video *apropia* a los de baja prioridad para satisfacer sus requerimientos. Esto sucede hasta la prueba número 7 en la que el ancho de banda del LSP de prueba es de 3584 Kb y entonces el ancho de banda en el enlace no es suficiente aún eliminando los tres LSPs de datos, además un LSP de prioridad media no puede *apropiar* a otro LSP de su misma prioridad¹ por lo tanto el control de admisión rechaza la petición del LSP de prueba indicando que no existen recursos disponibles. En todas las pruebas posteriores el LSP de prueba seguirá siendo rechazado generando pérdidas en el tráfico de video. La tabla 4.14 y la figura 4.25 muestran los LSPs *apropiados* en este caso de estudio

Caso de estudio 2				
Escenario 2				
LSPs apropiados				
Prueba	BW LSP de prueba(Kb)	BW que es necesario <i>apropiar</i> * (Kb)	Cantidad de LSPs <i>apropiados</i>	Prioridad de los LSPs <i>apropiados</i>
1	512	0	0	--
2	1024	0	0	--
3	1536	472	1	B
4	2048	984	2	B,B
5	2560	1496	2	B,B
6	3072	2008	3	B,B,B
7	3584	2520	0	--
8	4096	3032	0	--
9	4608	3544	0	--
10	5120	4056	0	--
11	5632	4568	0	--
12	6144	5080	0	--
13	6656	5592	0	--
14	7168	6104	0	--

*BW LSP de prueba – BW libre

**B=Baja

Tabla 4.14 LSPs *apropiados* en el caso de estudio 2

¹ De acuerdo a lo recomendado en [12], para evitar inestabilidad en la red un LSP no puede *apropiar* a otro de su misma prioridad

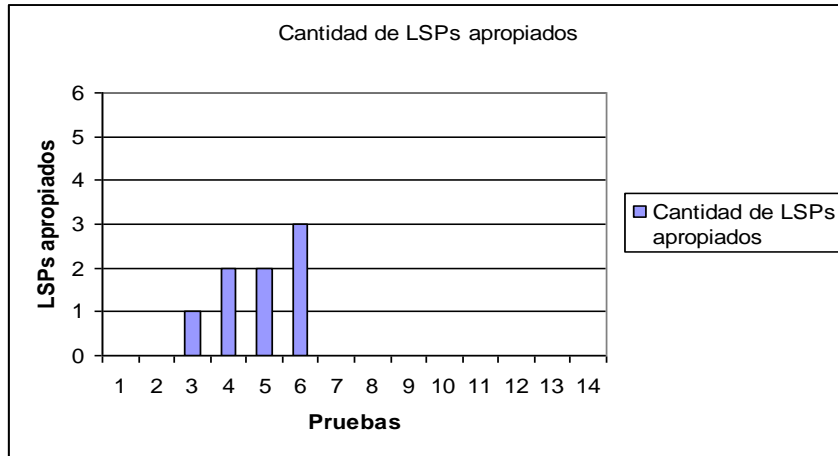


Figura 4.25 LSPs apropiados en el caso de estudio 2

4.4.2.3 Evaluación del desempeño

Para el caso de estudio 2 se realizaron medidas de throughput pérdida de paquetes, retardo y jitter para cada tipo de tráfico, con el fin de evaluar el desempeño de la red MPLS dentro de un escenario sin preemption y de un escenario con preemption.

4.4.2.3.1 Evaluación del desempeño para el tráfico de datos

Luego de realizar las catorce pruebas para el caso de estudio dos se obtuvieron las tablas 4.15 y 4.16 que muestran las medidas de desempeño del tráfico de datos correspondientes a cada escenario:

Caso de estudio 2					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de datos			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	2365,24	0	41,04	0,49
2	1024	2365,24	0	41,15	0,51
3	1536	2365,24	0	40,96	0,44
4	2048	2365,24	0	40,96	0,44
5	2560	2365,24	0	40,96	0,44
6	3072	2365,24	0	40,96	0,44
7	3584	2365,24	0	40,96	0,44
8	4096	2365,24	0	40,96	0,44
9	4608	2365,24	0	40,96	0,44
10	5120	2365,24	0	40,96	0,44
11	5632	2365,24	0	40,96	0,44
12	6144	2365,24	0	40,96	0,44
13	6656	2365,24	0	40,96	0,44
14	7168	2365,24	0	40,96	0,44

Tabla 4.15 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario sin preemption

Caso de estudio 2					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de datos			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	2365,24	0	42,12	0,85
2	1024	2355,86	0,39	43,11	0,88
3	1536	2024,27	14,41	52,05	1,43
4	2048	1515,03	35,94	53,41	1,33
5	2560	1080,82	54,30	59,16	2,43
6	3072	904,82	61,74	62,29	3,81
7	3584	2365,24	0	41,58	0,81
8	4096	2365,24	0	41,58	0,81
9	4608	2365,24	0	41,58	0,81
10	5120	2365,24	0	41,58	0,81
11	5632	2365,24	0	41,58	0,81
12	6144	2365,24	0	41,58	0,81
13	6656	2365,24	0	41,58	0,81
14	7168	2365,24	0	41,58	0,81

Tabla 4.16 Desempeño para el tráfico de datos en el escenario con preemption

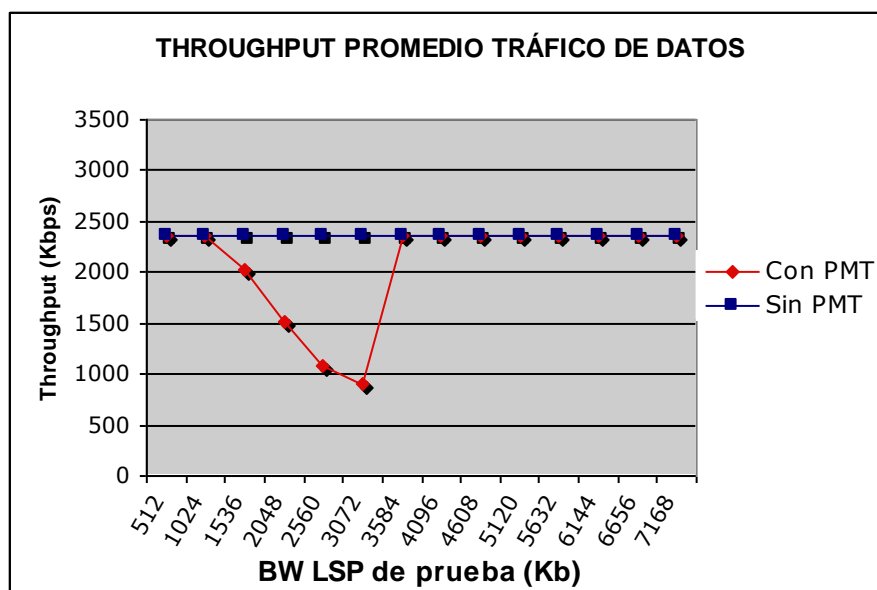


Figura 4.26 Throughput promedio para el tráfico de datos. Caso de estudio 2

La figura 4.26 muestra el throughput promedio para el tráfico de datos en el caso de estudio dos en cada una de las 14 pruebas. Se analiza que en el escenario sin preemption para el tráfico de datos el throughput permanece constante ya que al no estar habilitado el mecanismo de preemption, el LSP de prueba no se puede *apropiar* de los LSPs de datos. Por el contrario en el

escenario con preemption se observa que el throughput del tráfico de datos comienza a descender a medida que se originan procedimientos de preemption ya que estos LSPs son los únicos que pueden ser *apropiados* por el LSP de prueba (de video), de esta forma el throughput para el tráfico de datos llega a su valor más bajo cuando son *apropiados* los tres LSPs que transportan datos. A partir de la séptima prueba cuando el ancho de banda del LSP de prueba es 3584 Kb (ver tabla 4.16), dicho LSP no se puede establecer porque el ancho de banda *apropiable* ya no es suficiente para sus requerimientos, por tanto ya no se realiza preemption y los LSPs de datos ya no son degradados.

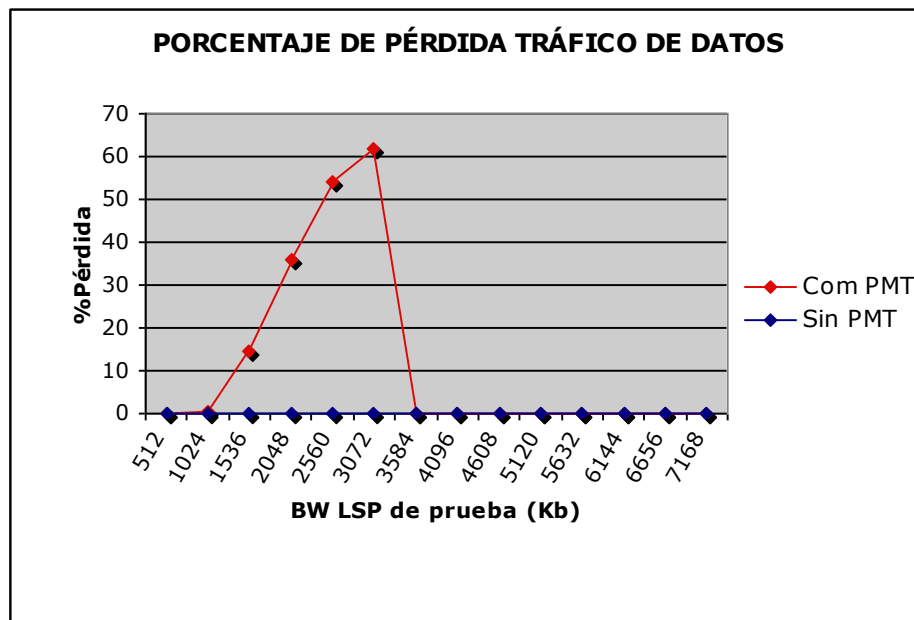


Figura 4.27 Porcentaje de pérdida de paquetes del tráfico de datos. Caso de estudio 2

La figura 4.27 muestra el porcentaje de pérdida de paquetes para el tráfico de datos en cada prueba dentro del caso de estudio dos. En el escenario sin preemption, como es de esperarse, las pérdidas son nulas porque el tráfico existente en la red no se ve afectado.

Se observa que el porcentaje de pérdida de paquetes aumenta significativamente en el escenario con preemption para aquellas pruebas en las que ocurren *apropiaciones*, es decir desde un ancho de banda del LSP de prueba de 1536 Kb hasta 3072 Kb. Para éste último valor las pérdidas del tráfico de datos alcanzan casi el 62%. En las pruebas posteriores no ocurren *apropiaciones* y las pérdidas del tráfico de datos son nulas.

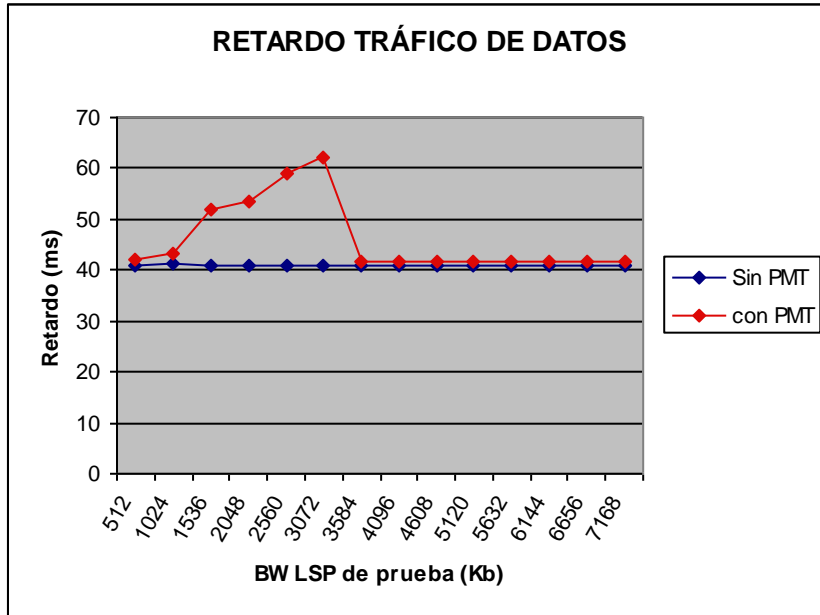


Figura 4.28 Retardo en el tráfico de datos. Caso de estudio 2

La figura 4.28 muestra que el mecanismo de preemption también afecta el retardo del tráfico de datos. Se obtiene el mayor valor de retardo de 62,29 ms cuando se realiza la *apropiación* de los tres LSPs de datos (para un ancho de banda del LSP de prueba de 3072 Kb) ya que en esta prueba las pérdidas son muy altas repercutiendo directamente en el incremento del retardo.

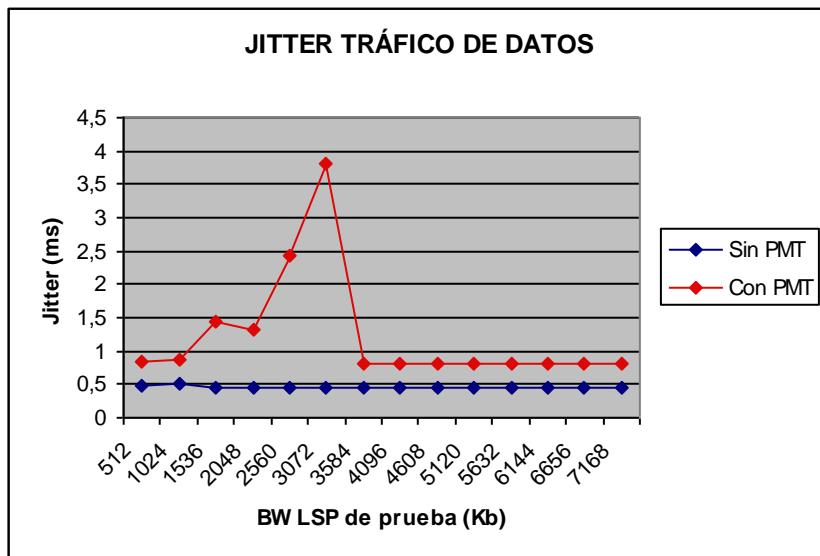


Figura 4.29 Jitter del tráfico de datos. Caso de estudio 2

La figura 4.29 muestra que el jitter para el tráfico de datos presenta un incremento en las pruebas cuando se realiza preemption y se presenta un valor máximo de 3,81 ms (ver tabla 4.16) para la prueba seis, cuando se realiza la *apropiación* de los tres LSPs de datos.

4.4.2.3.2 Evaluación del desempeño para el tráfico de video

Caso de estudio 2					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de video			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	6364,13	0,32	41,4	0,33
2	1024	6813,24	0,57	41,5	0,33
3	1536	5912,82	19,26	41,28	0,28
4	2048	5912,82	24,13	41,28	0,28
5	2560	5912,82	28,44	41,28	0,28
6	3072	5912,82	32,29	41,28	0,28
7	3584	5912,82	35,74	41,28	0,28
8	4096	5912,82	38,86	41,28	0,28
9	4608	5912,82	41,69	41,28	0,28
10	5120	5912,82	44,27	41,28	0,28
11	5632	5912,82	46,64	41,28	0,28
12	6144	5912,82	48,79	41,28	0,28
13	6656	5912,82	50,81	41,28	0,28
14	7168	5912,82	52,65	41,28	0,28

Tabla 4.17 Desempeño para el tráfico de video en el escenario sin preemption

Caso de estudio 2					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de video			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	6384	0	40,91	0,26
2	1024	6852,96	0	41,02	0,38
3	1536	7236,96	1,18	41,17	0,4
4	2048	7744,55	0,63	41,05	0,35
5	2560	8177,10	1,04	41,06	0,34
6	3072	8358,06	4,28	41,08	0,34
7	3584	5915,58	35,71	40,87	0,26
8	4096	5915,58	38,83	40,87	0,26
9	4608	5915,58	41,66	40,87	0,26
10	5120	5915,58	44,24	40,87	0,26
11	5632	5915,58	46,61	40,87	0,26
12	6144	5915,58	48,76	40,87	0,26
13	6656	5915,58	50,78	40,87	0,26
14	7168	5915,58	52,63	40,87	0,26

Tabla 4.18 Desempeño para el tráfico de video en el escenario con preemption

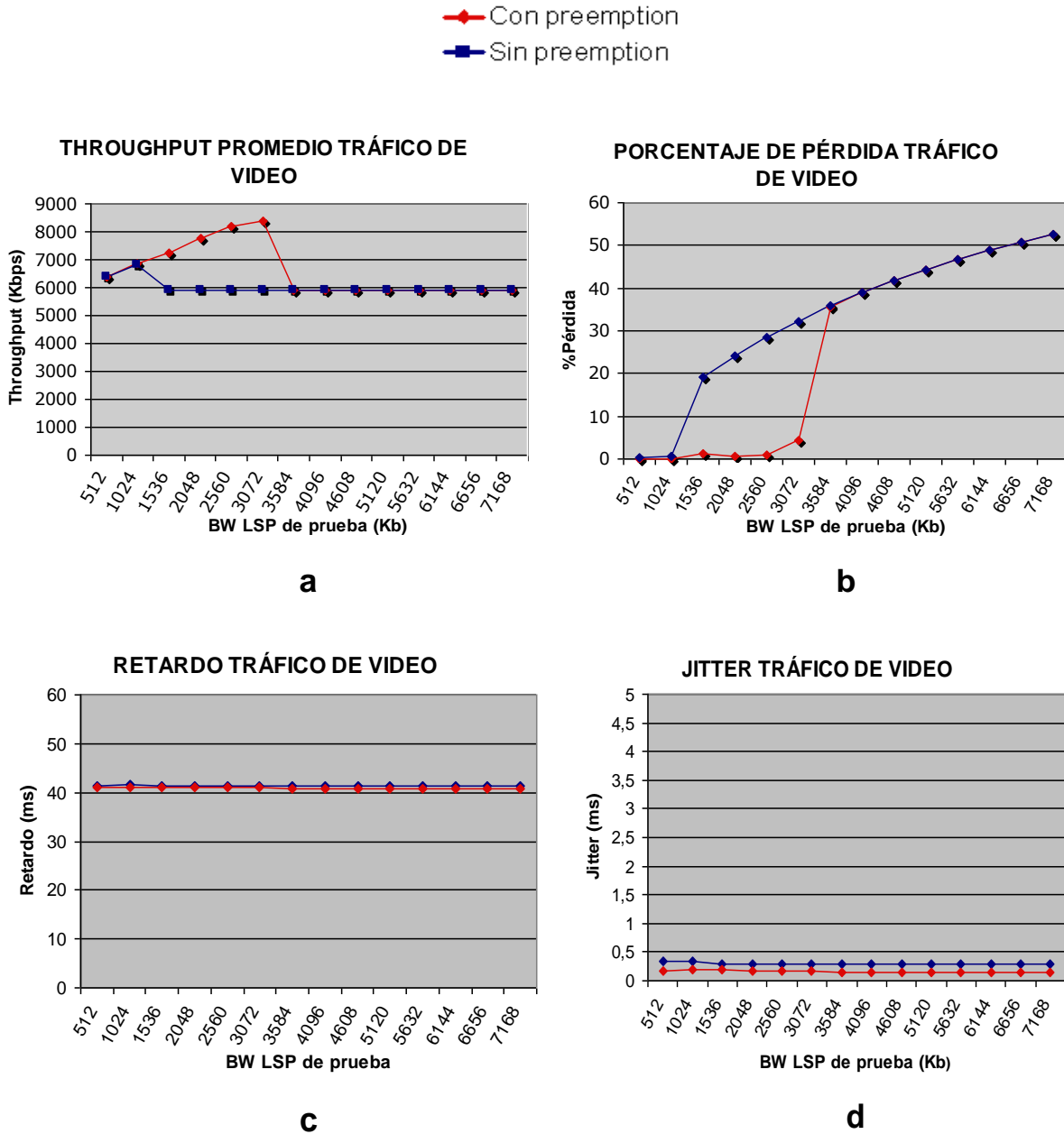


Figura 4.30 Parámetros de desempeño del tráfico de video. Caso de estudio 2

Los parámetros de desempeño medidos en ambos escenarios para el tráfico de video en el caso de estudio 2 pueden observarse en las tablas 4.17 y 4.18 y en la figura 4.30. Se debe tener en cuenta que en este caso de estudio el LSP de prueba es de video (prioridad media) de manera que si éste se establece exitosamente se favorece el desempeño del tráfico de video. En cambio, si el LSP de prueba se rechaza, el desempeño del tráfico de video se degrada. En el escenario sin preemption solamente existe un incremento en el throughput (figura 4.30a) para

valores de ancho de banda del LSP de prueba menores que 1024Kb, ya que por debajo de este valor el ancho de banda libre del enlace es suficiente y el control de admisión acepta al LSP de prueba de video normalmente. Posteriormente, a partir de un ancho de banda del LSP de prueba de 1536 Kb el control de admisión empieza a rechazar la petición del LSP de prueba y entonces el throughput del escenario sin preemption cae a un valor cercano a 6000Kbps que es el correspondiente a los 3 LSPs de video establecidos previamente en el primer evento. Las pérdidas del tráfico de video en el escenario sin preemption (figura 4.30b), son bastante altas en todas las pruebas a partir de un ancho de banda del LSP de prueba de 1536 Kb y se incrementan a medida que avanzan las pruebas debido a que en todas ellas el LSP de prueba se rechaza y entonces todo el tráfico que éste intentaba transportar pasa a engrosar las pérdidas del tráfico de video.

Por otra parte, en el escenario con preemption se observa que el throughput del tráfico de video (figura 4.30a) se incrementa constantemente y las pérdidas (figura 4.30b) son cercanas a cero en todas las pruebas en las que el ancho de banda del LSP de prueba es inferior a 3072 Kb puesto que para ese rango el LSP de prueba de video puede establecerse *apropiando* los recursos de los LSPs de baja prioridad. Hasta ese punto el mecanismo de preemption favorece al tráfico de prioridad media que obtiene un mejor desempeño en comparación al escenario sin preemption. Sin embargo cuando el ancho de banda del LSP de prueba supera los 3584 Kb el control de admisión empieza a rechazarlo puesto que el ancho de banda libre en el enlace no es suficiente ni siquiera eliminando a los 3 LSPs de datos existentes; esto hace que la gráfica de throughput caiga a un valor cercano a 6000 Kbps y las pérdidas empiecen a incrementarse comportándose de igual manera que en el escenario sin preemption. En cuanto al retardo y jitter (figuras 4.30 c y d): estos parámetros solo se midieron para los LSPs de video que pudieron establecerse y por tanto tienen sus recursos reservados, de manera que los resultados de retardo y jitter del escenario con preemption son similares a los del escenario sin preemption.

Se puede concluir que el mecanismo de preemption es conveniente para el tráfico de prioridad media siempre y cuando existan en la red LSPs establecidos con tráfico de prioridad baja a los cuales *apropiarles* los recursos. Además puede observarse que el LSP de prueba se establece exitosamente en algunas pruebas, pero en otras no y que esto depende directamente de su ancho de banda.

4.4.2.3.3 Evaluación del desempeño para el tráfico de voz

Caso de estudio 2					
Escenario 1: sin preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de voz			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	1514,48	0	41,14	0,56
2	1024	1514,48	0	41,19	0,55
3	1536	1514,48	0	40,99	0,47
4	2048	1514,48	0	40,99	0,47
5	2560	1514,48	0	40,99	0,47
6	3072	1514,48	0	40,99	0,47
7	3584	1514,48	0	40,99	0,47
8	4096	1514,48	0	40,99	0,47
9	4608	1514,48	0	40,99	0,47
10	5120	1514,48	0	40,99	0,47
11	5632	1514,48	0	40,99	0,47
12	6144	1514,48	0	40,99	0,47
13	6656	1514,48	0	40,99	0,47
14	7168	1514,48	0	40,99	0,47

Tabla 4.19 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario sin preemption

Caso de estudio 2					
Escenario 2: con preemption					
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño para el tráfico de voz			
		Throughput promedio (Kbps)	% Pérdida de paquetes	Retardo (ms)	Jitter (ms)
1	512	1514,48	0	40,67	0,16
2	1024	1514,48	0	40,69	0,183
3	1536	1514,48	0	40,63	0,20
4	2048	1514,48	0	40,69	0,18
5	2560	1514,48	0	40,7	0,18
6	3072	1514,48	0	40,7	0,18
7	3584	1514,48	0	40,65	0,15
8	4096	1514,48	0	40,65	0,15
9	4608	1514,48	0	40,65	0,15
10	5120	1514,48	0	40,65	0,15
11	5632	1514,48	0	40,65	0,15
12	6144	1514,48	0	40,65	0,15
13	6656	1514,48	0	40,65	0,15
14	7168	1514,48	0	40,65	0,15

Tabla 4.20 Desempeño para el tráfico de voz en el escenario con preemption

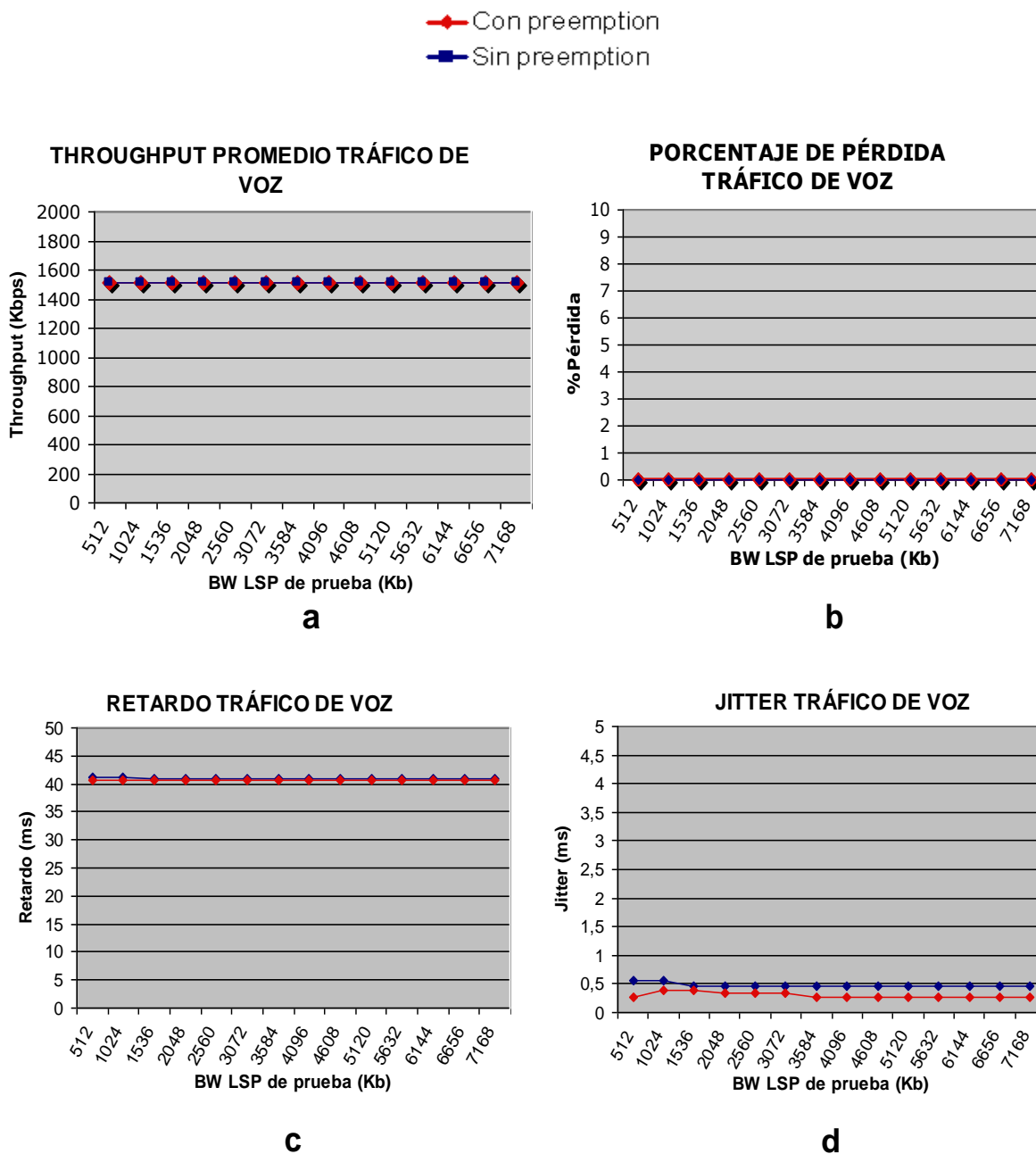


Figura 4.31 Parámetros de desempeño del tráfico de voz. Caso de estudio 2

El tráfico de voz no se ve afectado por el mecanismo de preemption como lo muestran las tablas 4.19 y 4.20 y la figura 4.31. Las medidas obtenidas respecto a los parámetros de desempeño de este tráfico son similares con o sin preemption para todas las variaciones de ancho de banda del LSP de prueba. En ambos escenarios el throughput tiene un valor constante de 1514,48 Kbps correspondiente a los 3 LSPs de voz establecidos en el primer evento, no se ocasionan pérdidas y el retardo y jitter permanecen estables y con valores bajos.

Esto se debe a que el LSP de prueba es de video (prioridad media), por lo tanto cuando necesita *apropiarse* de recursos de la red, no puede realizar preemption sobre los LSPs de voz (prioridad alta) que permanecen inalterados.

4.4.2.3.4 Comparación del desempeño de los tres tipos de tráfico

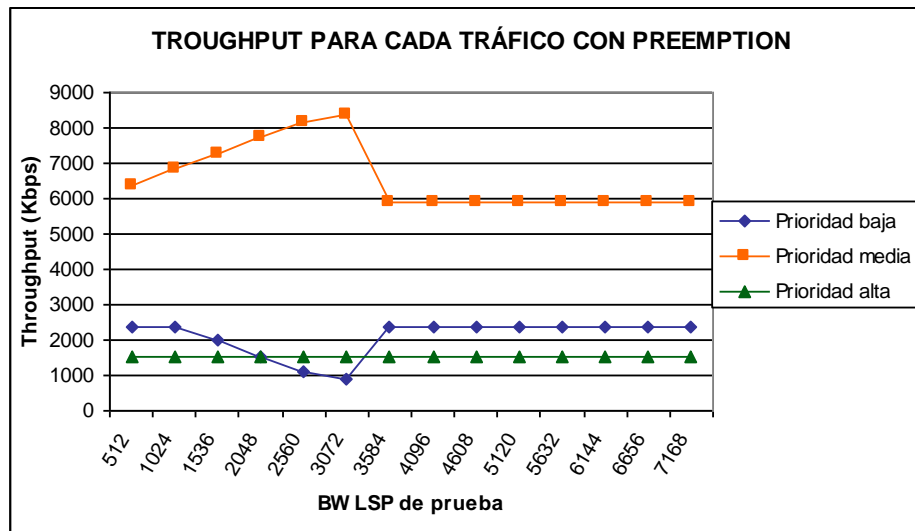


Figura 4.32 Comparación del throughput de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1

La figura 4.32 muestra el throughput de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption para todas las pruebas realizadas. Se observa que, en aquellas pruebas en las que se realizaron *apropiaciones* (ver tabla 4.14), el throughput de prioridad media se incrementa al mismo tiempo que el de baja prioridad se degrada en la misma proporción. Mientras tanto el throughput de prioridad alta no se ve afectado en ninguna de las pruebas.

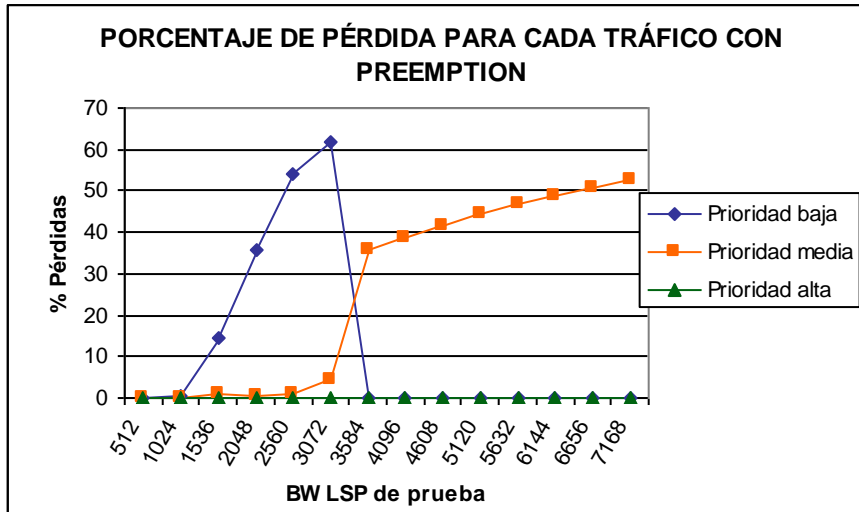


Figura 4.33 Comparación de las pérdidas de los tres tipos de tráfico en el escenario con preemption. Caso de estudio 1

También es útil realizar una comparación entre las pérdidas obtenidas para cada tipo de tráfico en el escenario con preemption. La figura 4.33 comprueba que en el escenario con preemption el tráfico mejor librado es el de alta prioridad cuyas pérdidas son cero en la totalidad de las pruebas. También es visible que, para aquellas pruebas en las que hubo *apropiaciones* el tráfico afectado fue el de baja prioridad, pero en las pruebas posteriores para anchos de banda en los que el LSP de prueba no se puede establecer, las pérdidas de la prioridad media sufren un incremento constante.

4.4.2.3.5 Evaluación del desempeño en el enlace

Las tablas 4.21 y 4.22 muestran las medidas de throughput y pérdida de paquetes que se obtuvieron en el enlace para este caso de estudio en ambos escenarios: con y sin preemption

Caso de estudio 2			
Escenario 1: sin preemption			
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño en el enlace	
		Throughput total en el enlace (Kbps)	% Pérdidas Totales en el enlace
1	512	10243,85	0,19
2	1024	10692,96	0,32
3	1536	9792,54	12,58
4	2048	9792,54	16,10
5	2560	9792,54	19,34
6	3072	9792,54	22,35
7	3584	9792,54	25,14
8	4096	9792,54	27,73
9	4608	9792,54	30,15
10	5120	9792,54	32,41
11	5632	9792,54	34,54
12	6144	9792,54	36,52
13	6656	9792,54	38,41
14	7168	9792,54	40,17

Tabla 4.21 Medidas del desempeño en la red en el escenario sin preemption

Caso de estudio 2			
Escenario 2: con preemption			
Prueba	BW del LSP de prueba	Medidas del desempeño en el enlace	
		Throughput total en el enlace (Kbps)	% Pérdidas Totales en el enlace
1	512	10263,72	0,005
2	1024	10723,30	0,06
3	1536	10775,71	3,80
4	2048	10774,06	7,69
5	2560	10772,40	11,27
6	3072	10777,36	14,54
7	3584	9795,3	25,12
8	4096	9795,3	27,71
9	4608	9795,3	30,13
10	5120	9795,3	32,39
11	5632	9795,3	34,52
12	6144	9795,3	36,50
13	6656	9795,3	38,39
14	7168	9795,3	40,15

Tabla 4.22 Medidas del desempeño en la red en el escenario con preemption

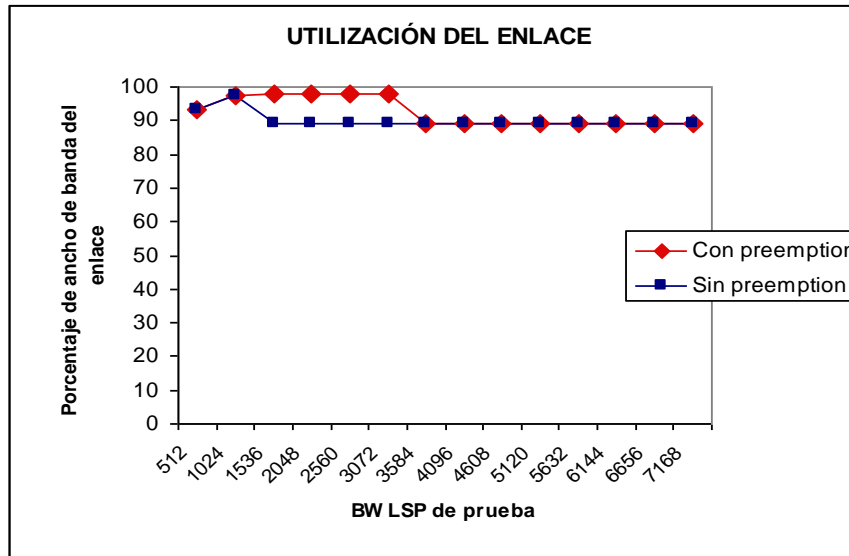


Figura 4.34 Utilización de los recursos del enlace. Caso de estudio 2

En la figura 4.34 se observa el consumo de recursos en el enlace para todas las pruebas en ambos escenarios. En las pruebas en las que ocurrieron *apropiaciones* el consumo de los recursos del enlace es máximo puesto que, aunque los recursos libres del enlace no son suficientes, el mecanismo de preemption admite el establecimiento del LSP de prueba y, una vez establecido, utiliza la porción de ancho de banda restante que aún no ha sido reservado en el enlace para transportar el tráfico de baja prioridad que ha sido *apropiado*. Por el contrario el escenario sin preemption rechaza al LSP de prueba cuando los recursos libres en el enlace no son suficientes, y entonces existe una porción de ancho de banda no reservado en el enlace que permanece inutilizada. Para las pruebas en las que no ocurren *apropiaciones* el consumo de ancho de banda en el enlace es el mismo en ambos escenarios. De este comportamiento puede concluirse que cuando se realiza preemption, el throughput total del enlace aumenta y las pérdidas disminuyen en comparación a un escenario sin preemption (ver tablas 4.21 y 4.22) puesto que se aprovechan al máximo los recursos del enlace.

4.4.2.4 Conclusiones para el caso de estudio 2

En este caso de estudio se observa lo que sucede en un enlace ocupado con tráfico de tres tipos (voz, video y datos) al que llega un LSP de video que quiere establecerse y se comparan los resultados de los escenarios con y sin preemption.

En términos del desempeño general en el enlace para este caso de estudio, al igual que para el caso de estudio anterior, el escenario con preemption obtiene un mejor desempeño en términos

de throughput total y pérdidas (ver tablas 4.21 y 4.22) porque se hace un uso máximo de los recursos del enlace; pero esto sucede solamente en aquellas pruebas en las que ocurren *apropiaciones*, o sea cuando el ancho de banda de los LSPs *apropiables* (prioridad baja) establecidos en el enlace es suficiente para satisfacer los requerimientos de ancho de banda del LSP de prueba de video que es el *apropiador* en este caso. Para valores de ancho de banda del LSP de prueba que superen este rango, el desempeño en el enlace con preemption es el mismo del enlace sin preemption, pues en ambos casos el LSP de prueba se rechaza y entonces se desperdicia una porción de ancho de banda libre.

Si se tiene en cuenta por separado el desempeño de cada uno de los tipos de tráfico se observa que en este caso de estudio al igual que en el anterior el mecanismo de preemption es perjudicial para el desempeño del tráfico de baja prioridad que presenta pérdidas, retardo y jitter altos debido a que éste tráfico es degradado a best effort cuando suceden *apropiaciones*.

El tráfico de prioridad alta es de nuevo el más favorecido presentando pérdidas casi nulas en la totalidad de las pruebas, al igual que retardo y jitter muy bajos

El mecanismo de preemption favorece en algunas ocasiones al tráfico de prioridad media, ya que evita que se rechace realizando *apropiaciones* de los LSPs de prioridad baja, sin embargo cuando el ancho de banda del LSP de prioridad media es demasiado grande, el mecanismo de preemption no puede evitar que el LSP se rechace y entonces el desempeño del tráfico de prioridad media se ve degradado.

En este caso de estudio se realizaron 14 pruebas; en el escenario sin preemption el LSP de prueba de video sólo pudo establecerse en dos de ellas. En el escenario con preemption el LSP de prueba pudo establecerse en 6 pruebas. Por lo tanto se observa que el mecanismo de preemption reduce en alguna medida la probabilidad de bloqueo de los LSPs de prioridades intermedias. Esta observación permite también concluir que la probabilidad establecimiento de un LSP que llega a una red congestionada no depende solamente de su prioridad, sino también de su ancho de banda, sobretodo cuando el LSP que quiere establecerse es de una prioridad intermedia.

4.4.3 CASO DE ESTUDIO 3: LSP de prueba de datos

Este caso de estudio consiste en evaluar una red MPLS cargada con tráfico de diferentes tipos (voz video y datos) a la que empieza a llegar un tráfico de datos que genera congestión. Se muestran los resultados de este caso de estudio para ambos escenarios: con y sin preemption.

El objetivo de incluir este caso de estudio es comprobar que el LSP de prueba (de datos) de baja prioridad no puede realizar preemption de ningún LSP establecido en la red, por tanto las medidas de los parámetros de desempeño para cada tipo de tráfico serán similares en el escenario con preemption y sin preemption.

Las pruebas realizadas en este caso de estudio permiten comprobar que cuando se va a establecer un LSP (que transporta datos) de baja prioridad en una red MPLS, el desempeño de una red con preemption es idéntico al de una red sin preemption. La red con preemption no favorece al tráfico de baja prioridad de manera que se rechaza la petición de establecimiento de la misma manera que lo hace una red con preemption. Se espera por lo tanto que los resultados de desempeño sean los mismos para ambos escenarios. Los resultados para este caso de estudio son predecibles y por lo tanto la descripción del comportamiento, los datos obtenidos y las gráficas se incluyen en el anexo C.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto al Trabajo Mismo

- Los parámetros de desempeño que se ven afectados al usar mecanismos de preemption son el retardo, el jitter, la pérdida de paquetes y el consumo de ancho de banda.
- Los resultados obtenidos mediante simulación permiten observar que los mecanismos de preemption ayudan a garantizar QoS para los flujos de alta prioridad al *apropiar* recursos utilizados por tráficos de menor prioridad que satisfagan sus demandas. Se optimizan los parámetros de desempeño del tráfico de alta prioridad y se reduce en gran medida su probabilidad de bloqueo.
- Cuando se hace uso de mecanismos de preemption los tráficos que más se afectan son aquellos de menor prioridad, esto puede ser justificable en la medida en que este tráfico regularmente no demanda requerimientos estrictos de QoS y es mucho más probable que se adapte a los recursos residuales de la red.
- El mecanismo básico de preemption mejora la utilización del recurso ancho de banda de los enlaces, porque ajusta el ancho de banda de los flujos de tráfico ya establecidos para dar cabida a los flujos de tráfico entrantes de alta prioridad.
- En una red con preemption la probabilidad de establecimiento exitoso de un LSP depende de su prioridad y de sus requerimientos de ancho de banda.
- Debe ser claro que un mecanismo de preemption es útil en el contexto de las redes de paquetes, donde se tienen diferentes tipos de tráfico, y donde es posible apropiar recursos de tráficos de baja prioridad. En el caso de una red donde todos sus tráficos sean de la misma prioridad el mecanismo de preemption carece de utilidad.
- Un buen mecanismo de preemption debería trabajar de la mano con el enrutamiento basado en restricciones, para evitar en muchos casos impactar de forma negativa los tráficos de baja prioridad.

- Existen en la actualidad numerosos mecanismos de preemption muy diferentes entre sí. Es posible caracterizarlos extrayendo de cada uno de ellos sus rasgos más relevantes y también construir una clasificación basándose en esas características.
- Los mecanismos de preemption pueden clasificarse de acuerdo al lugar en el que operan en centralizados y distribuidos. De acuerdo al momento en que se hace preemption en proactivos y reactivos y de acuerdo a la posibilidad de modificar su comportamiento en flexibles y no flexibles.
- Uno de los elementos diferenciadores más sobresalientes entre los mecanismos de preemption es el de los criterios que cada mecanismo tiene en cuenta para seleccionar a los LSPs que serán eliminados por preemption. Entre los criterios que pueden encontrarse están: prioridad de los LSPs, ancho de banda desperdiciado, cantidad de LSPs *apropiados*, tiempo transcurrido de conexión, índice de ingresos, etc.

Respecto a la Simulación y las Herramientas

- Se encontraron 3 herramientas con las que es posible simular redes MPLS obteniendo resultados confiables: Opnet Modeler (*OPTimized Network Engineering*), Tótem (*TOolbox for Traffic Engineering Methods*) y NS-2 (*Network Simulator*). De acuerdo al contexto de la simulación y a los requerimientos planteados para este trabajo de grado se seleccionó NS-2 con el módulo MNS v2.0 como la herramienta más apropiada para el proyecto.
- Con el uso de la herramientas de simulación de software libre NS-2 y el modulo MNS v2.0 se posibilita la investigación de redes MPLS por medio de simulación, sobretodo en ambientes académicos en los que es necesario contar con herramientas sin restricciones de licenciamiento.

TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

- Para que el mecanismo de preemption funcione de una manera más global, considerar su integración con un esquema de protección contra fallas.

- Incorporar al mecanismo básico de preemption un módulo de reenrutamiento para optimizar la distribución de los recursos cuando se ejecuta preemption.
- Al realizar pruebas con el módulo MNS v2.0 el mecanismo de preemption sólo se activa cuando se definen rutas explícitas. Se sugiere modificar éste módulo para que el mecanismo de preemption pueda activarse cuando se hace enrutamiento basado en restricciones.
- Considerar la adquisición por parte de la Universidad del Cauca de herramientas de simulación integradas con módulos que permitan simular aspectos de la ingeniería de tráfico en redes MPLS y que brinden una buena cantidad de datos acerca de los parámetros de desempeño del tráfico, como es el caso de Opnet Modeler.

REFERENCIAS

- [1] Luc De Ghein, "MPLS Fundamentals: A Comprehensive Introduction to MPLS Theory and Practice", Cisco Press – Cisco Systems, 2007, Pags: 248 – 266.
- [2] D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao, "Overview and principles of Internet traffic engineering", IETF RFC 3272, Mayo 2002.
- [3] D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, J. McManus, "Requirements for traffic engineering over MPLS", IETF RFC 2702, Septiembre 1999.
- [4] Wei Sun, P. Bhaniramka, R. Jain, "Quality of service using traffic engineering over MPLS: an analysis", Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. LCN. Proceedings. 25th, 2000, pags: 238 – 241.
- [5] Vivek Alwayn, "Advanced MPLS Design and Implementation", Cisco Press, Septiembre 2001.
- [6] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture". IETF RFC 3031, Enero 2001.
- [7] Xipeng Xiao; Hannan, A.; Bailey, B.; Ni, L.M., "Traffic engineering with MPLS in the Internet", IEEE Network, Volume 14, Issue 2, Marzo/Abril 2000 Pags: 28 – 33.
- [8] G. Armitage, "MPLS: The Magic Behind the Myths", IEEE Communications Magazine, Volumen 38, Issue 1, Enero 2000, Pags: 124 – 131.
- [9] Pascal Lorenz, "QoS in next generation networks", 26th International Conference on Information Technology Interfaces, Junio 2004 Pag: 13 - 18 Vol.1.
- [10] Katz, D. Kompella, K. y D. Yeung, "Traffic Engineering (TE) Extensions o OSPF Version 2", IETF RFC 3630, Septiembre 2003.

- [11] Smit, H., T. Li, "Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions for Traffic Engineering (TE)", IETF RFC 3784, June 2004.
- [12] B. Jamoussi, L. Andersson, R. Callon, R. Dante, L. Wu, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette, M. Girish, E. Gray, "Constraint-Based LSP Setup using LDP, CR-LDP", IETF RFC 3212, Enero 2002.
- [13] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow, "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels", IETF RFC 3209, Diciembre 2001.
- [14] J. de Oliveira, JP. Vasseur, L. Chen, C. Scoglio, "Label Switched Path (LSP) Preemption Policies for MPLS Traffic Engineering", IETF RFC 4829, Abril 2007.
- [15] Agilent Technologies, "MPLS LSP Tunnel Preemption", Junio 2001.
- [16] Zhen Zhao, Bryan Willman, Steven Weber, Jaudelice C. de Oliveira, "Performance analysis of a parallel link network with preemption", Conference on Information Sciences and Systems, Princeton University, Marzo 2006.
- [17] Chaieb, I., Le Roux, J. L., Cousin, B., "Improved MPLS-TE LSP Path Computation using Preemption", First International Global Information Infrastructure Symposium GIIS 2007, Julio 2007.
- [18] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, "Resource Reservation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification", IETF RFC 2205, Septiembre 1997.
- [19] M. R. Meyer, J. P. Vasseur, C. Villamizar, A. Birjandi, "MPLS Traffic Engineering Soft Preemption", IETF Internet Draft, Febrero 2009.
- [20] A. Farrel, "Draft Farrel MPLS Preemption Interim", IETF Internet Draft, Abril 2004.
- [21] J. C. de Oliveira, C. Scoglio, F. Akyildiz, "New preemption policies for DiffServ-aware traffic engineering to minimize rerouting in MPLS networks", Networking, IEEE/ACM Transactions, Volumen 12, Issue 4, Pags: 733 – 745, Agosto 2004.

- [22] I. Ahmad, J. Kamruzzaman, S. Aswathanarayanan, "An Improved Preemption Policy for Higher User Satisfaction", IEEE 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2005.
- [23] I. Ahmad, J. Kamruzzaman, S. Aswathanarayanan, "Revenue Aware Preemption Policy In Multimedia Communication Networks", 2005.
- [24] L. Hau, B. Soong, S. K. Bose, "SERA: Service Ratio Based Preemption for Minimizing Throughput Loss in Networks", Nanyang Technological University, 2005.
- [25] Sylwester Kaczmarek, Krzysztof Nowak, "A new Heuristic Algorithm for effective preemption in MPLS Networks", Workshop on High Performance Switching and Routing 2006, IEEE Volume Issue 7-9, Junio 2006.
- [26] C. H. Lau, B. Soong, S. K. Bose "Path selection with preemption and re-routing control for multi-protocol label switching networks", Junio 2006.
- [27] B. Szviatovszki, Á. Szentesi, A. Jüttner, "Minimizing rerouting in MPLS networks with preemption-aware constraint-based routing", International Symposium of Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems, 2002.
- [28] J.A. Garay, I.S. Gopal, Call Preemption in Communication Networks, Proc. INFOCOM '92, pp. 1043-1050, Florence, Italy, Mayo 1992.
- [29] Xiaoming He, Qingxin Chu, Mingying Zhu, "Minimizing preemption cost for path selection in Diffser-ware MPLS networks", Guangzhou Research Institute, China Telecom Corporation, Julio 2006.
- [30] J. Shin, D. C. Lee, J. Kuo, "Quality of Service for Internet Multimedia", IMSC Press Multimedia Series, 2003.
- [31] Simon Balon, Selin Cerav-Erbas, Olivier Delcourt, Jean Lepropre, Gaël Monfort, Bruno Quoitin, Fabian Skivée, Hakan Umit, "TOTEM 3.2 - User Guide", Bélgica, 2004.

- [32] Information Sciences Institute, University of Southern California, “ Home page - The Network Simulator – NS2 ”, disponible en <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [33] ITU-T, “Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. Quality of service and performance”, Rec. G 1010, 2001.