

*Estudio de Propuestas para Soportar
Ingeniería de Tráfico en Internet¹*

*Study of Proposals for Supporting Internet
Traffic Engineering*

Line Yasmin Becerra Sánchez

*PhD (c) en Ingeniería
Magíster en Ingeniería Área de Telecomunicaciones
Especialista en Telecomunicaciones
Ingeniera Electrónica
Docente Investigadora Universidad Católica de Pereira
Grupo de Investigación TICS
line.becerra@ucp.edu.co*

Jhon Jairo Padilla Aguilar

*PhD en Telemática
MSc en Informática
Ingeniero Electrónico
Docente Investigador Universidad Pontificia Bolivariana Sede Bucaramanga
Grupo de Investigación GITEL
jhon.padilla@upbbga.edu.co*

Recibido Febrero 10 2012 – Aceptado Mayo 30 de 2012

RESUMEN

La ingeniería de tráfico es un proceso de suma importancia para la evaluación y optimización del rendimiento de redes IP en operación. Este es un problema abierto pues aún no hay soluciones definitivas en las normas actuales de Internet. Por tanto, en este artículo se presenta un estudio riguroso sobre diferentes recomendaciones dadas por la IETF y aproximaciones propuestas por diferentes investigadores en la última década, tendientes a especificar y dar soporte al proceso de ingeniería

¹ Producto derivado de la propuesta doctoral denominada " Desarrollo de una solución para soportar ingeniería de tráfico en redes IPv6", Universidad Pontificia Bolivariana Medellín.

de tráfico sobre Internet. Con la investigación realizada se provee una contextualización general sobre el modelo de un sistema de ingeniería de tráfico, la taxonomía y las diferentes problemáticas que han sido estudiadas, con el fin de mejorar el rendimiento en dichas redes, además esta información es un insumo valioso como punto de partida para la generación de una nueva propuesta que permita soportar ingeniería de tráfico sobre Internet.

Palabras clave: Internet, ingeniería de tráfico, rendimiento.

ABSTRACT

Traffic engineering is an important process for the evaluation and performance in the optimization of operational IP networks. This article provides a rigorous study of several recommendations made by the IETF and other approaches proposed by researchers in the last decade; they are related to specify and support the process of Internet traffic engineering. This study provides a contextualization of a traffic engineering system, the taxonomy and several problems that have been studied in order to improve performance in these networks. This information will be a valuable input to generate a new proposal in order to support Internet traffic engineering.

Key words: Internet, traffic engineering, performance.

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Tráfico (TE, Traffic Engineering) de Internet se encarga del problema de evaluación de rendimiento y optimización de redes IP durante su operación. El problema principal que se enfrenta en la ejecución de técnicas de Ingeniería de Tráfico es que el enrutamiento de los paquetes en Internet está basado en el algoritmo del camino más corto, lo cual hace que estos se congestionen, mientras que otras rutas alternativas permanecen sub-utilizadas. Con el fin de mejorar el rendimiento de la red, la ingeniería de tráfico incluye la aplicación de tecnologías y principios científicos para la medición, caracterización, modelado y control del tráfico de Internet (Awduche D. et al., 2002). Con la aparición de las diferentes tecnologías de redes fijas y móviles, la ingeniería de tráfico ha jugado un rol importante y ha sido tema de investigación, dando como resultado un número importante de propuestas que analizan desde diferentes frentes los problemas existentes con el fin de ofrecer soluciones y aportes que contribuyan a dar soporte de ingeniería de tráfico de Internet.

En este artículo se presenta el estudio realizado sobre las recomendaciones dadas por la IETF y las diferentes aproximaciones realizadas por investigadores alrededor el proceso de ingeniería de tráfico sobre internet. En la sección 2, se introduce una contextualización general, el modelo y la taxonomía de la ingeniería de tráfico. En la sección 3, las recomendaciones y especificaciones publicadas por la IETF para el soporte de ingeniería de tráfico. En la sección 4, se describen las aproximaciones más relevantes realizadas por investigadores alrededor de la ingeniería de tráfico. En la sección 5, se relacionan las conclusiones y trabajos futuros, y finalmente en la sección 6, se listan las referencias bibliográficas.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DE INGENIERÍA DE TRÁFICO EN INTERNET

La Ingeniería de Tráfico de Internet se encarga del problema de optimización y evaluación del rendimiento de redes IP en operación, el objetivo es mejorar el rendimiento de la red optimizando el uso de los recursos y del tráfico mediante la aplicación de tecnologías y principios científicos que permitan la medición, caracterización, modelado y control del tráfico de Internet (Awduche D. et al., 2002).

El proceso de ingeniería de tráfico consta de un modelo general que incluye tres componentes o subsistemas claves a desarrollar a saber: un subsistema de medición, un subsistema de análisis, modelado y simulación; y finalmente un subsistema de optimización, tal como se aprecia en la figura 1. El subsistema de medición provee datos brutos relacionados con los parámetros y variables de estado de los elementos de red monitorizados. La medición provee información importante que puede ser usada para originar características a nivel de paquete, de flujo, de cliente o usuario, de tráfico agregado, de componente y características en general de la red.

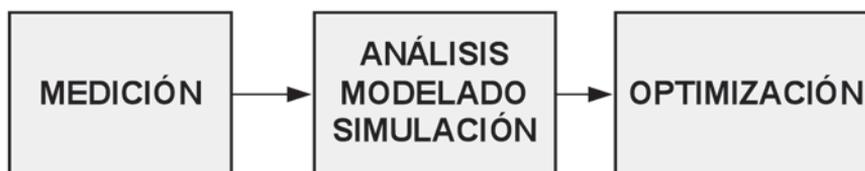


Figura 1. Modelo general del proceso de ingeniería de tráfico

El subsistema de análisis, modelado y simulación, involucra la construcción de una representación abstracta que muestra características relevantes y atributos de la red, que luego podría ser interpretada por una herramienta de simulación para su análisis posterior. Y el subsistema de optimización, permite mejorar el rendimiento y por lo tanto, el funcionamiento de la red.

Por otro lado, la taxonomía de los sistemas de ingeniería de tráfico se construye con base en puntos de vista y estilos de ingeniería de tráfico (ver figura2). Como primera medida la ingeniería de tráfico puede ser Intradominio o Interdominio, dependiendo de su ejecución: dentro de un dominio o entre dominios. Puede ser En línea (Online) o Fuera de línea (Offline), dependiendo de la necesidad de planes de enrutamiento: en tiempo real o no respectivamente.

Puede ser centralizada o distribuida, si los planes de enrutamiento se hacen desde un ente central en nombre de cada router o si la selección de la ruta se realiza por cada router autónomamente. También podría ser Local o Global, si el procedimiento de ingeniería de tráfico utiliza información del estado de una porción del dominio o si utiliza información del estado del dominio entero. De lazo abierto o lazo cerrado, si la acción de control usa o no, información de retroalimentación correspondiente al estado actual de la red, entre otros (Awduche D. et al., 2002).

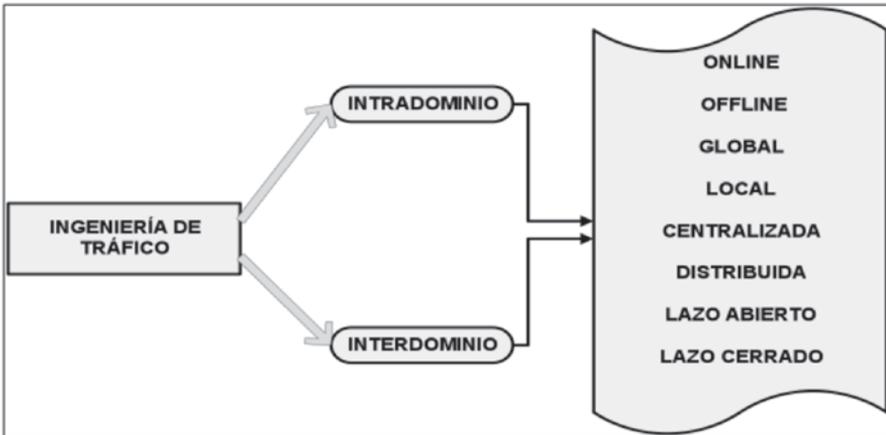


Figura 2. Taxonomía de la Ingeniería de Tráfico

3.ESPECIFICACIONESDELAIETFRELACIONADAS CON LA INGENIERÍA DE TRÁFICO

La IETF (Internet Engineering Task Force) que es la entidad que regula

las propuestas y estándares de Internet, ha realizado varias publicaciones mediante RFCs (Request For Comments) cuyas recomendaciones y especificaciones están referidas a la ingeniería de tráfico en Internet. Estas publicaciones están relacionadas con arquitecturas para soportar nuevas definiciones de servicios, protocolos de enrutamiento, protocolos de señalización, métricas de rendimiento entre otros.

En cuanto a arquitecturas que permitan soportar diferentes servicios se encuentran la de “Servicios Integrados” y la de “Servicios Diferenciados”. La arquitectura de Servicios Integrados está especificada en la RFC6133 (Braden R.; Clark D. and Shenke S., 1999), nace con la finalidad de gestionar los recursos necesarios para garantizar calidad de servicio. Incluye componentes adicionales a los usados en el modelo best-effort tales como clasificadores de paquetes, planificadores y control de admisión. El modelo Intserv requiere reservar recursos a priori, tales como ancho de banda y espacio en buffers para un flujo de tráfico particular, con el fin de asegurar que la calidad de servicio solicitada por el flujo de tráfico sea suficiente. Se han definido dos servicios bajo el modelo de servicios integrados: Servicio Garantizado y Servicio de carga controlada los cuales están especificados en RFC2211 (Shenke S.; Partridge C. and Guerin R., 1997) y RFC2211 (Wroclawski J., 1997) respectivamente. El problema principal con el modelo de servicios integrados ha sido la escalabilidad (Yavatka R.; Pendaraki D. and Guerin R., 2000). Un protocolo que desarrolla la función de señalización y es un componente importante del modelo de servicios integrados, es el protocolo de reserva de recursos RSVP RFC2205 (Braden R. et al., 1997) junto con la extensión para ingeniería de tráfico RSVPTE, cuya especificación se encuentra en la RFC3209 (Awduche D. et al., 2001).

La arquitectura de Servicios Diferenciados esta descrita en la RFC2475 (Blak S. et al., 1998), una de las motivaciones primarias para el trabajo de la IETF con Diffserv fue idear mecanismos alternativos para diferenciación de servicios en la Internet, que atenuara los problemas de escalabilidad encontrados con el modelo Intserv. La meta fue crear mecanismos escalables para la categorización de tráfico dentro de cada comportamiento agregado, los cuales permiten que cada uno de estos sea tratado de forma diferente, especialmente cuando hay escasez de recursos tales como ancho de banda y espacio de buffer. Lo que se hizo fue definir un campo de Servicios Diferenciados en la cabecera IP, este campo consta de seis bits de la parte de la cabecera IP y es formalmente conocido como octeto TOS; es usado para indicar el tratamiento que un paquete debe recibir en un nodo al ser retransmitido.

Por otro lado, la IETF desarrolló un conjunto de métricas estándar que pueden ser usadas para monitorear la calidad, el rendimiento y la confiabilidad de la Internet. Estas métricas pueden ser aplicadas por operadores de red, usuarios finales, y grupos de prueba independientes para entregar tanto a proveedores de servicio como a usuarios, un entendimiento común del rendimiento y confiabilidad de caminos end-to-end a través de la Internet y de "nubes IP" específicas, que comprenden porciones de estos caminos RFC2330 (Paxson V.; Almes G.; Mahdavi J. and Mathis M., 1998.). Ejemplos de métricas de rendimiento incluyen pérdidas de paquete en una vía RFC2680 (Almes G.; Kalidindi S. and Zekauskas M., 1999a), retardo en una vía RFC2679 (Almes G.; Kalidindi S. and Zekauskas M., 1999b), y medidas de conectividad entre dos nodos RFC2678 (Mahdavi J. and Paxson V., 1999.). Otras métricas incluyen medidas de segundo orden de pérdidas de paquete y retardo.

El grupo de trabajo de la IETF de Medición de flujos en tiempo real (RTFM) construyó un documento de la arquitectura para la medición de flujo de tráfico, el cual define un método para especificar flujos de tráfico, también como un número de componentes para medición de flujos (contadores, lectores de contador, gestores) en la RFC2722 (Brownlee N.; Mills C. and Ruth G., 1999.). Un sistema de medición de flujo permite que los flujos de tráfico de red sean medidos y analizados en el nivel de flujo para una variedad de propósitos. Un sistema de medición de flujo puede ser útil en la planeación para el desarrollo y expansión de la red, para la cuantificación del rendimiento de la red, para verificar la calidad de servicio de la red y para permitir el uso de la red a usuarios.

Mediante la RFC3124 (Balakrishnan H. and Seshan S., 2001), la IETF provee un conjunto de mecanismos de control de congestión que pueden usar los protocolos de transporte. Un gestor de congestión monitorea continuamente el estado del camino para cada grupo de congestión bajo su control y usa la información obtenida para dar órdenes a un planificador sobre la forma de distribuir el ancho de banda entre las conexiones de ese grupo de congestión.

En cuanto a protocolos de enrutamiento, la IETF ha venido desarrollando especificaciones evolutivas de acuerdo a los cambios que se han presentando en el protocolo IP y de acuerdo a la arquitectura de la Internet. La Internet es una red formada por sistemas autónomos interconectados, cada sistema autónomo puede escoger su propio protocolo de enrutamiento para intercambiar información de enrutamiento con otros sistemas autónomos. Al conjunto de protocolos que se ejecutan dentro

de un sistema autónomo se les denomina protocolos de pasarela interior (Interior Gateway Protocol, IGP) y a los que se ejecutan entre sistemas autónomos, protocolos de pasarela exterior (Exterior Gateway Protocol, EGP). Los IGP's están basados en protocolos de tipo vector distancia y protocolos de estado de enlace; en la tabla 1, se enuncian dichos protocolos, al igual que su especificación correspondiente.

Tabla No.1. Protocolos de Enrutamiento

| TIP | CLASE | PROTOCOLO | ESPECIFICACIÓN |
|----------|-------------------------|-----------------|----------------|
| IGP s | Vector Distanci a | RIPv1 | RFC1058 |
| | | RIPv2 | RFC2453 |
| | | RIPng para IPv6 | RFC2080 |
| | Estado de enlace | OSPFv1 | RFC1245 |
| | | OSPFv2 | RFC2328 |
| | | OSPFv2-TE | RFC3630 |
| | | OSPFv3 para | RFC5340 |
| | | OSPFv3-TE | RFC5329 |
| | | IS-IS | RFC1195 |
| | | IS-IS para IPv6 | RFC5308 |
| IS-IS-TE | RFC5305 | | |
| EG P | Vector Camino | BGP | RFC4271 |
| | | BGP para IPv6 | RFC5701 |
| | | BGP-TE | RFC5543 |

Como una extensión al modelo de enrutamiento de internet, mejora el envío de paquetes y control del camino, la IETF especifica a MPLS (Multiprotocol label Switching) en la RFC3031(Rosen E.; Viswanathan A. and Callon R., 2001). En un dominio MPLS, los routers de conmutación de etiquetas (LSR-Label Switching Router) clasifican paquetes IP en clases de equivalencia de envío FECs (Forwarding Equivalence Class) basados en

una variedad de factores, incluyendo una combinación de la información llevada en la cabecera IP de los paquetes y la información de enrutamiento local mantenida por los LSRs. Una etiqueta MPLS es luego antepuesta a cada paquete de acuerdo a su FEC. Un LSR examina la etiqueta y usa esta información para tomar decisiones de envío del paquete. Un LSR toma decisiones de envío mediante el uso de la etiqueta ubicada en los paquetes como el índice dentro de una entrada de la NHLFE (Next Hop Label Forwarding Entry). El paquete es luego procesado como está especificado en la NHLFE. La etiqueta entrante puede ser remplazada por una etiqueta saliente, y el paquete puede ser conmutado al próximo LSR. Antes de que un paquete deje un dominio MPLS, su etiqueta MPLS debe ser removida. Un LSP (Label Switched Path) es el camino entre un LSR de ingreso y uno de egreso, el cual es atravesado por paquetes etiquetados. El camino de un LSP explícito está definido desde el nodo de ingreso origen del LSP. MPLS puede usar un protocolo de señalización tal como RSVP (Braden R. et al., 1997) o LDP (Andersson L; Minei I. and Thomas B., 2007) para establecer LSPs. Los requerimientos para ingeniería de tráfico sobre MPLS están descritos en la RFC2702(Awduch D. et al., 1999).

De la misma forma, extensiones para soportar instanciación de LSPS explícitos, son discutidas en la RFC3209(Awduche D. et al., 2001). Finalmente, extensiones para LDP, variante conocida como CR-LDP, para soportar LSPs explícitos están descritas en la RFC3212(Jamoussi B.; Andersson L.; Collon R. and Dantu R., 2002).

4. OTRAS APROXIMACIONES DE INGENIERÍA DE TRÁFICO

En la última década se han desarrollado varias propuestas producto de investigaciones alrededor de la ingeniería de tráfico, cuyo objetivo ha sido mejorar el rendimiento en las redes IP en operación. Con el estudio de estas propuestas se ha detectado que se pueden categorizar en tres líneas de trabajo: las soluciones basadas en IP, las que están basadas en MPLS y las hacen una combinación o híbrido entre MPLS+IP (ver figura 3). A continuación se presenta el conjunto de propuestas que se han realizado en cada una de estas categorías mostrando las problemáticas investigadas en cada una de ellas.

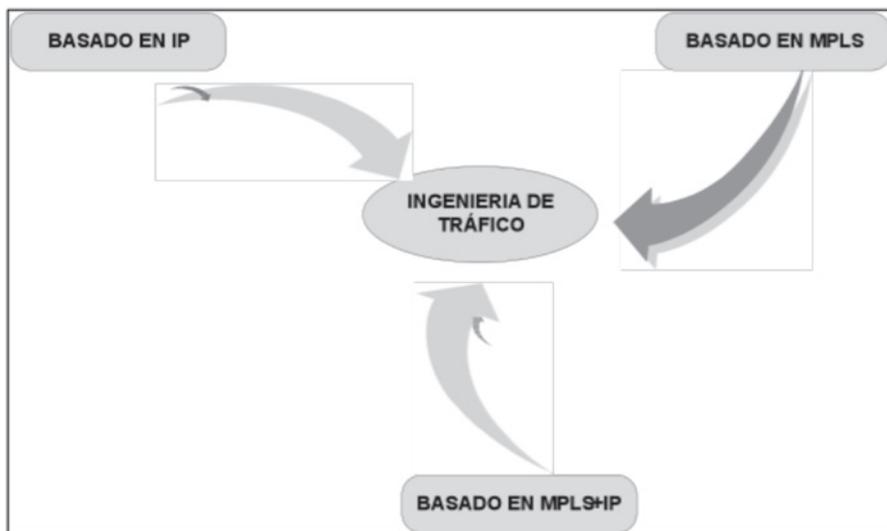


Figura 3. Líneas de trabajo en Ingeniería de tráfico

Propuestas de Ingeniería de tráfico basadas en MPLS. Una de las primeras propuestas de ingeniería de tráfico basada en MPLS fue expuesta en (Awduche Daniel O., 1999), en este artículo el autor presenta la aplicación de MPLS para hacer ingeniería de tráfico en redes IP enfocándose especialmente en aquellas de proveedor de servicios. Primero hizo una conceptualización sobre ingeniería de tráfico, los desafíos para redes IP, el modelo del proceso de ingeniería de tráfico y los objetivos. También describió el proceso de ingeniería de tráfico con el modelo Overlay clásico y finalmente explicó el modelo de ingeniería de tráfico de MPLS.

El modelo expuesto en (Awduche Daniel O., 1999) consiste en cuatro componentes funcionales: gestión del camino, asignación de tráfico, disseminación de información de estado de red y gestión de red. La gestión del camino comprende todos los aspectos relacionados con la selección de rutas explícitas y la instanciación y mantenimiento de túneles LSP. Este componente consta de tres funciones principales que son: selección, ubicación y mantenimiento del camino. La primera función, la selección del camino especifica la ruta explícita para un túnel LSP en el nodo origen del túnel. El enrutamiento basado en restricciones (Younis O.; and Fahmy S., 2003) es usado para calcular rutas que satisfacen un conjunto de requerimientos, un subconjunto de restricciones impuestas por la red y políticas administrativas.

La segunda función, la ubicación del camino, usada para instanciar túneles LSP usando un protocolo de señalización como RSVP (Braden R. et al., 1997) y un protocolo de distribución de etiquetas LDP (Andersson L; Minei I. and Thomas B., 2007). La tercera función, es el mantenimiento del camino, que sostiene y termina túneles LSPs ya establecidos. En la asignación de tráfico, coinciden todos los aspectos relacionados con la ubicación de tráfico para establecer túneles LSP. La disseminación de información de estado de red está relacionada con la distribución de datos relevantes sobre el estado de topología a través del dominio MPLS, esto se lleva a cabo mediante las extensiones de IGP. Y finalmente la gestión de red, incluye un conjunto de funciones de gestión de configuración, funciones de gestión de rendimiento y cálculos y funciones de gestión de fallas.

En otro estudio en (Xiao X.; Hannan A.; Bailey B. and Ni L., 2000), se enumeran los problemas generales de diseño de un sistema MPLS para ingeniería de tráfico y los inconvenientes que se presentan con los protocolos IGPs, luego se presenta el diseño de un sistema MPLS para una red nacional y basado en las experiencias, se propone un procedimiento genérico para el despliegue de un sistema MPLS. Este procedimiento genérico está conformado por 4 pasos, el primero es la colección de estadísticas usando LSPs MPLS, el segundo el despliegue de LSPs con restricción de ancho de banda, el tercero es la actualización periódica del ancho de banda del LSP y el cuarto, el enrutamiento basado en restricciones offline. Los autores argumentan que es posible la implementación de un sistema de ingeniería de tráfico MPLS para una red ISP grande, además sugieren que MPLS, el enrutamiento basado en restricciones CBR (Younis O.; and Fahmy S., 2003) y algunas extensiones de IGP tienen que ser desarrollados en todos los routers que participan del sistema MPLS. Los autores concluyen que un sistema MPLS es muy útil para hacer ingeniería de tráfico, porque se alcanza el comportamiento deseado del tráfico y se evita significativamente el trabajo tedioso para los administradores de red de la manipulación de métricas de enrutamiento.

Con el desarrollo de servicios diferenciados (Diffserv) (Blak S. et al., 1998), se presentaron algunas propuestas de ingeniería de tráfico basadas en MPLS-Diffserv como aparece en (Trimintzios P. et al., 2003) y (Tabatabaee V. et al., 2005). En (Trimintzios P. et al., 2003), los autores propusieron un marco general para aprovisionamiento de QoS intradominio a través de TE basada en MPLS en redes Diffserv, y en (Tabatabaee V. et al., 2005) se propuso una solución de TE diferenciada en la cual utilizaron

las técnicas de optimización Simulated Annealing (Pioro M. and Medhi D., 2004) y método de proyección gradiente (Pioro M. and Medhi D., 2004). En (Barakovic J.; Bajric H. and Husic A., 2007), los autores hacen una discusión de la integración Diffserv- MPLS para alcanzar QoS en redes MPLS y la ingeniería de tráfico MPLS para mejorar la eficiencia del backbone independientemente de QoS. También realizan una simulación con el fin de evaluar que tan bien la ingeniería de tráfico MPLS y la QoS pueden mejorar el desempeño de las redes actuales, para identificar oportunidades para el mejoramiento y desarrollo de nuevos mecanismos que aseguren la provisión de tráfico; también identifican las características de calidad de servicio en redes futuras.

Un gestor de ingeniería de tráfico automatizado (TEAM, Traffic Engineering Automated Manager) para redes MPLS/Diffserv es propuesto en (Scoglio C. et al., 2004), es un gestor adaptativo que provee la calidad de servicio requerida para los usuarios y reduce la congestión en la red. TEAM está compuesta de una herramienta de ingeniería de tráfico TET (Traffic Engineering Tool), la cual maneja las rutas y el ancho de banda adaptativamente en la red, una herramienta de medición y evaluación de desempeño MPET (Measurement/Performance Evaluation Tool), la cual mide parámetros importantes en la red y una herramienta de simulación ST (Simulation Tool) que puede ser usada por (TET) para consolidar sus decisiones. Los autores concluyen que TEAM es un eficiente gestor de red en diferentes y no predecibles condiciones de tráfico a expensas de un incremento limitado en complejidad computacional y costo. Otra propuesta basada en Diffserv, donde se propone una nueva política de preferencia de LSP está en (Oliveira J.; Scoglio C.; Akyildiz F.; and Uhl G., 2004), conocida como V-Prept.

Lo que se intenta es evitar el reenrutamiento de LSPs. De forma similar al esquema TEAM, la optimización para preferencia de LSP considera múltiples criterios, incluyendo prioridad de LSP, el número de LSPs, y el ancho de banda preferido.

Teniendo en cuenta que una de las desventajas de MPLS es la baja escalabilidad, en algunos artículos se han propuesto modelos alternativos para aliviar los problemas de escalabilidad en construcción y mantenimiento de LSP, tales como el modelo embudo (multipunto a punto, MP2P) en (Saito H.; Miyao Y.; and Yoshida M., 2000), (Urvoy-Keller G.; Hébuterne G.; and Dallery Y., 2002), (Bhatnagar S.; Ganguly S.; and Nath B., 2005) y el modelo manguera punto a multipunto P2MP en (Trimintzios P. et al., 2001).

Con el objetivo de reducir el número total de LSPs y etiquetas necesarias, en (Saito H.; Miyao Y.; and Yoshida M., 2000) se propone un esquema de TE usando múltiples LSPs Multipunto a punto MP2P; esta aproximación consiste en dos procedimientos distintos: Construcción de LSP MP2P y asignación de flujo. El problema de asignación de flujo es formulado como un problema de programación entera mezclada, en el cual la carga de enlace máxima es minimizada. Los autores hacen comparaciones numéricas con la aproximación convencional de LSP punto a punto y muestran que la aproximación MP2P puede reducir el número de LSPs requeridos y etiquetas. De igual manera hacen comparaciones numéricas entre el esquema de asignación de flujo el esquema convencional de SPF (Shortest Path Fast) basado en asignación de flujo y concluyen que el esquema de asignación de flujo propuesto reduce la carga de enlace máxima. En (Urvoy-Keller G.; Hébuterne G.; and Dallery Y., 2002) la solución MP2P es usada para TE con garantías de QoS end-to-end determinística, además se incluyen dos algoritmos de control de admisión a nivel de paquete. En (Bhatnagar S.; Ganguly S.; and Nath B., 2005) la ingeniería de tráfico de MP2P fue también estudiada con el fin de dar solución a los problemas de escalabilidad.

De acuerdo con (Wang N.; Ho K.; Pavlou G. and Howarth M., 2008), la ingeniería de tráfico basada en MPLS online se clasifica en dos categorías: en el tipo de ajuste dinámico de la tasa de división de tráfico entre LSPs estáticos pre-construidos y el en el tipo que hace cálculo dinámico sobre la marcha de cada nueva demanda de troncales de tráfico.

En la primera categoría, está la propuesta de (Elwalid A.; Jin C.; Low S.; and Widjaja I., 2001), en la cual, los autores describen un mecanismo de ingeniería de tráfico adaptativo multi-camino para redes MPLS, llamado MATE (MPLS Adaptive Traffic Engineering). El objetivo de MATE es evitar la congestión de red balanceando adaptativamente la carga entre múltiples caminos basados en la medición y análisis de congestión de camino. La aproximación presenta un modelo analítico de balanceo de carga, y genera una clase de algoritmos MATE asincrónicos y prueba su estabilidad y optimización mediante simulación. Los resultados indican que MATE elimina los desbalances de tráfico que pueden ocurrir entre múltiples LSPs. Los autores concluyen que las altas tasas de pérdidas de paquetes pueden ser reducidas significativamente mediante el desplazamiento apropiado de porciones de tráfico a LSPs menos cargados.

En la segunda categoría están (Aukia P. et al., 2000; Boutaba R.; Szeto W.;

and Iraqi Y., 2002; Kar K.; Kodialam M.; and Lakshman V., 2000; Kodialam M.;an Lakshman V., 2000; Oliveira J.; Martinelli F.; and Scoglio C., 2002; Oliveira J.; Scoglio C.; Akyildiz F.; and Uhl G., 2004; Walkowiak K., 2004), en (Boutaba R.; Szeto W.; and Iraqi Y., 2002) los autores proponen un algoritmo de enrutamiento online dinámico para la construcción de caminos de ancho de banda garantizado en redes MPLS denominada DORA (Dynamic Online Routing Algoritm). El objetivo es ubicar caminos con ancho de banda reservado uniformemente a través de la red para permitir que más caminos futuros sean aceptados dentro de la red y para balanceo de carga, la clave de operación de DORA (la propuesta de los autores) es primero evitar enrutamiento sobre enlaces que tengan una alta probabilidad de ser parte de otro camino y segundo tener bajo ancho de banda residual disponible. La evaluación del algoritmo DORA la realizan los autores mediante NS-2 ("Network Simulator NS-2,") comparándola con otras propuestas, cuyo resultado es que durante fallas de enlace, DORA requiere menos caminos a ser reenrutados y es más económico computacionalmente.

En (Kar K.; Kodialam M.; and Lakshman V., 2000; Kodialam M.;an Lakshman V., 2000) se enfocan en el problema de interferencia de LSPs. La Interferencia se presenta por la competencia de los LSPs sobre los enlaces críticos que no tienen suficiente ancho de banda disponible para soportar todas las demandas de LSP. Los autores expresan que debido al establecimiento directo de LSPs (usando CSPF, Constrained Shortest Path First) sin consideración de la ubicación de los nodos de ingreso/egreso para troncos de tráfico entrantes, se presenta congestión en algunos enlaces críticos que usan LSPs múltiples. En (Kar K.; Kodialam M.; and Lakshman V., 2000; Kodialam M.;an Lakshman V., 2000), los autores presentan un algoritmo para enrutamiento dinámico de túneles de ancho de banda garantizado, donde el enrutamiento del túnel, solicita llegar uno por uno y no hay conocimiento a priori de las solicitudes futuras. En (Aukia P. et al., 2000), se propuso un software denominado servidor de ingeniería de tráfico y enrutamiento RATES (Routing and Traffic Engineering Server), desarrollado para ingeniería de tráfico MPLS.

En (Walkowiak K., 2004), se considera un esquema de supervivencia en redes MPLs con ingeniería de tráfico online, el cual construye LSPs dinámicamente mediante la aplicación del algoritmo de camino más corto a la métrica de peso de enlace dedicado que refleja el requerimiento de TE específico.

Por otro lado, en (Li Ch.; Li P. and Mohammed T., 2007) los autores proponen una solución óptima para balanceo de carga dinámico (ODLB) donde los resultados son comparados con otros algoritmos y se evidencia un mejoramiento en cuanto a uso de ancho de banda y reenrutamiento de tráfico saliente. ODLB es garantizado para proveer la solución de enrutamiento óptimo a las redes con rutas paralelas.

Y por último en (Mohamad I.; Wan T.; Alzyoud F. and Sumari P., 2009), se propone una aproximación llamada MPLS-PHS que adapta el concepto de la técnica de supresión de cabecera de carga útil (PHS, Supression Header Payload) para ser aplicable para LSPs de un dominio MPLS, en el cual se encuentran conexiones multipunto a multipunto (Nodos de ingreso a nodos de egreso), los resultados descritos por los autores muestran un incremento en el throughput de datos para flujos IPv6 de tiempo real.

Propuestas de Ingeniería de tráfico basadas en IP. La aparición de soluciones de ingeniería de tráfico basadas en IP han desafiado las propuestas basadas en MPLS teniendo en cuenta que el tráfico de internet puede también ser adaptado a través de enrutamiento basado en el mecanismo original salto por salto, sin la complejidad y costo asociado a MPLS.

Unas de las primeras propuestas para ingeniería de tráfico intradominio basada en IP fue expuesta por Fortz en (Fortz B. and Thorup M., 2000) y (Fortz B.; Rexford J. and Thorup M., 2002). Dichas propuestas trabajan con los protocolos de Gateway interior IGP, tales como OSPF e IS-IS. En estas soluciones los autores proponen un modelo de enrutamiento para hacer ingeniería de tráfico mediante los protocolos IGP como OSPF e IS-IS y hacen comparaciones con el modelo de enrutamiento óptimo. En (Fortz B. and Thorup M., 2000), se propone la optimización del establecimiento de pesos mediante la solución de un problema de programación lineal y un método heurístico denominado HeurOSPF, del cual concluyen que los pesos obtenidos pueden ser utilizados “universalmente”, ya que estos no son ajustados a una función costo particular y demuestran que los resultados obtenidos con HeurOSPF están muy cercanos a los resultados de la optimización ideal. También exponen que un algoritmo de ajuste de peso inteligente para el enrutamiento OSPF es una poderosa herramienta para aumentar la capacidad de una red, con el fin de satisfacer el aumento de demandas de tráfico y para hacer ingeniería de tráfico. En (Fortz B.; Rexford J. and Thorup M., 2002), los mismos autores describen una aproximación para ingeniería de tráfico intradominio en redes IP mediante la

monitorización del tráfico y la topología y realizan la optimización de pesos de los enlaces; los autores concluyen que los protocolos tradicionales de enrutamiento son efectivos para ingeniería de tráfico en redes grandes.

Se han propuesto algunas herramientas que facilitan la ejecución de procesos de ingeniería de tráfico, tales como las descritas en (Feldmann A. et al., 2000) y (Feldmann A. and Rexford J., 2001). En (Feldmann A. et al., 2000), los autores hacen la descripción de una herramienta denominada NetScope de Laboratorios AT&T, la cual comprende un conjunto de herramientas de software unificadas para gestionar el rendimiento en redes backbone IP. Con esta herramienta se puede generar una visión global de la red mediante la configuración y uso de datos asociados a los elementos individuales de red, para luego poder inferir y visualizar las implicaciones de cambios locales de red amplia en tráfico, configuración y control, la cual es útil a los proveedores de red para experimentar con cambios en la configuración de red en un ambiente simulado, en lugar de hacerlo en una red en operación. Los autores demostraron las capacidades de la herramienta mediante un ejemplo de ingeniería de tráfico con un enlace fuertemente cargado, identificando las demandas de flujo de tráfico y cambios de configuración de enrutamiento intradominio que reducen la congestión. Y en (Feldmann A. and Rexford J., 2001), los autores presentan un estudio de interconexión IP desde el punto de vista de un proveedor de servicio IP (ISP) y describen las clases de errores que pueden aparecer dentro y a través de archivos de configuración de routers. Luego presentan un caso de estudio de una herramienta prototipo que desarrollaron en colaboración con AT&T para chequear la configuración del backbone IP de AT&T y proveer entradas a otros sistemas como NetScope para visualización de la red y hacer ingeniería de tráfico.

Para el establecimiento de pesos de enlace se han propuesto algunos algoritmos en (Abrahamsson H. and Bjorkman M., 2009; Ericsson M.; Resende M. and Pardalos P., 2002; Gojmerac I.; Ziegler T.; Ricciato F. and Reichl P., 2003; Wang J. et al., 2005). En (Ericsson M.; Resende M. and Pardalos P., 2002), los autores presentan un algoritmo genético denominado GAOSPF, para resolver los problemas de establecimientos de pesos de OSPF, que buscan encontrar un conjunto de pesos que optimice el rendimiento de la red. El algoritmo fue probado sobre varias redes y se compararon los resultados obtenidos con aproximaciones heurísticas, así como el límite más bajo obtenido mediante programación lineal. En (Gojmerac I.; Ziegler T.; Ricciato F. and Reichl P., 2003), se planteó un algoritmo para ingeniería de tráfico dinámica dentro de sistemas autónomos denominado AMP (Adaptative Multi-Path). El algoritmo AMP

fue simulado en NS-2 y los autores lo compararon con estrategias de enrutamiento estándar en un escenario de simulación real. Por otro lado, en (Wang J. et al., 2005) se hizo una propuesta denominada Método de Ingeniería de Tráfico de K-conjuntos, para desarrollar ingeniería de tráfico en redes OSPF mediante la partición de tráfico desigual en k-conjuntos, el cual se hace solo en redes de borde. Los autores proponen también un algoritmo heurístico y lo evalúan usando simulación. En (Abrahamsson H. and Bjorkman M., 2009), los autores presentan un método de búsqueda heurística para encontrar el establecimiento de pesos balanceados-l; este método le permite a los operadores aplicar reglas para controlar la máxima utilización de enlace y controlar la cantidad de capacidad disponible necesaria para manejar variaciones de tráfico repentinas.

En (Wang Y.; Wang Z. and Zhang L., 2001), los autores propusieron una aproximación para desarrollar ingeniería de tráfico en backbones (núcleos de red) ejecutando el enrutamiento nativo IP sobre una topología física, en lugar de una topología virtual controlando la distribución de flujos de tráfico a través del establecimiento de pesos de enlace apropiados para enrutamiento del camino más corto. La propuesta presentada es denominada propuesta integrada, la cual permite ingeniería de tráfico sin superposición de malla completa en contraposición a la aproximación de superposición (Overlay).

También se han presentado estudios que pretenden organizar conceptos teóricos respecto a los problemas de ingeniería de tráfico en redes IP, tal como lo descrito en (Rétvári G. and Cinkler T., 2004); allí los autores formulan los requerimientos básicos de una arquitectura de ingeniería de tráfico, práctica construida sobre OSPF y presentan un marco teórico reuniendo estos requerimientos prácticos. En (Rétvári G.; Szabó R.; and Bíró J., 2004), se establece la teoría fundamental y algoritmos de representatividad de caminos más cortos, y concluyen que en general es mucho más difícil la tarea de calcular caminos representables de caminos más cortos, que calcular los pesos de los enlaces para tales caminos. Bernard Fortz en (Fortz B., 2002), presenta el estudio del problema de cálculo de la fiabilidad de una red en operación usando el protocolo OSPF donde los enlaces fallan con probabilidades independientes dadas. De otra parte, en (Lad M.; Han Park J.; Refice T and Zhang L., 2008) se presenta un estudio de la estabilidad de enrutamiento en internet como un todo, usando los cambios observados en el número de rutas sobre cada enlace AS-AS como una métrica y medida de tales cambios desde múltiples monitores sobre un periodo de un año.

En (Bessa Maia J.; Da Silva A.; Silva J. and Cunha P., 2009), los autores investigan una metodología para ingeniería de tráfico basada en el tráfico origen-destino (OD) y enfocándose en la etapa de predicción de tráfico de termino corto, para lo que usan un modelo lineal local y el análisis de componentes principales. En (Xu K.; Liu H.; Liu J. and Shen M., 2011), se muestran los resultados de la exploración al problema de alcanzar la ingeniería de tráfico óptima en redes IP intradominio, modelando la ingeniería de tráfico óptima como la maximización de la utilidad de flujos multi-commodity. Teóricamente se muestra que un conjunto dado de rutas optimas corresponden a una función objetivo particular que puede ser convertida a caminos más cortos, con respecto a un conjunto de enlaces positivos, los cuales pueden ser directamente configurados sobre protocolos basados en OSPF.

Finalmente en (Gunnar A., 2011), el autor hace contribuciones en lo que respecta a ingeniería de tráfico proactivo en redes IP. Estas contribuciones están referidas a problemas relacionados con ingeniería de tráfico proactivo en redes IP backbone grandes. También se hacen contribuciones de investigación sobre técnicas de estimación de matrices de tráfico, desarrollo de técnicas de optimización de enrutamiento, implementación de técnicas de optimización en redes MPLS y estudio de procedimientos de establecimiento de pesos para enrutamiento de estado de enlace. Todas estas contribuciones se encuentran resumidas en (Gunnar A. and Johansson M., 2011; Gunnar A.; Abrahamsson H. and Soderqvist M., 2005; Gunnar A.; and Johansson M., 2010; Gunnar A.; Johansson M. and Telkamp T., 2004; Johansson M. and Gunnar A., 2006).

Todas las propuestas de ingeniería de tráfico basada en IP enunciadas anteriormente corresponden a soluciones intradominio; en lo que se refiere a ingeniería de tráfico interdominio las aproximación planteadas se basan en el protocolo BGP. La TE interdominio es desarrollada tomando en cuenta la información de enrutamiento anunciada por dominios adyacentes. El cambio de configuración de TE en un dominio podría afectar las decisiones de enrutamiento de otros ASs cercanos y esto puede propagarse en cascada; por lo general introduce problemas de inestabilidad de ruta a través de internet donde un solo camino interdominio puede tomar mucho tiempo para converger (Gao L. and Rexford J., 2001; Wang N.; Ho K.; Pavlou G. an Howarth M., 2008). Por tanto, la TE interdominio debe considerar la preservación de su predictibilidad como también la estabilidad para asegurar distribución estable y una convergencia de enrutamiento (Yang et al., 2005), para esto, algunas investigaciones han

propuesto varias directrices para realizar ingeniería de tráfico interdominio como en (Feamster N. et al., 2003; Gao L. and Rexford J., 2001; Yang et al., 2005).

Existen varias propuestas para realizar ingeniería de tráfico interdominio. En (Quoitin B.; Pelsser C. and Swinnen L., 2003), los autores describen varias técnicas que son usadas para controlar flujos de paquetes en la Internet global, también explican como es afinado BGP para la ingeniería de tráfico interdominio. Por otra parte, en (Uhlig S. and Quoitin B., 2005) propusieron una herramienta denominada “Tweak-it” de fuente abierta para ingeniería de tráfico interdominio en redes ISP grandes, la cual consiste en un heurístico de múltiples objetivos acoplado con un simulador BGP. Y en (Guo H.; Gao S. and Zhang H., 2009) los autores presentan ITER, un primer paso hacia un diseño sistemático para un escalable y eficiente protocolo de enrutamiento de ingeniería de tráfico interdominio.

Propuestas de Ingeniería de tráfico basadas en metodologías híbridas MPLS+IP. A continuación se describen las propuestas encontradas que utilizan metodologías híbridas de ingeniería de tráfico basadas en MPLS+IP.

En (Pham H. and Lavery B., 2003), se presenta un método de enrutamiento híbrido para ingeniería de tráfico de una red IP, el cual enruta un número limitado de flujos de tráfico usando MPLS y enruta el tráfico restante usando protocolos de enrutamiento IGP (tales como OSPF e IS-IS). El método fue utilizado para proponer una herramienta de ingeniería de tráfico HMR que permite a los operadores visualizar y manejar tráfico para evitar congestión, así como decidir dónde ubicar routers y túneles MPLS.

Por otro lado Bagula en (Bagula A., 2004, 2005), expone un modelo de ingeniería de tráfico online el cual usa una aproximación de enrutamiento híbrida IGP+MPLS que combina optimización de la ruta y selección del camino, con el fin de alcanzar un enrutamiento eficiente de flujos en redes IP. El modelo de optimización de la ruta combina confiabilidad y optimización para enrutar menos flujos bajo falla de enlace y rechazar menos flujos bajo condiciones de carga pesada. El enrutamiento IGP es alcanzado mediante el establecimiento de la métrica de enlace OSPF, inversamente proporcional a la capacidad del enlace.

Una técnica heurística escalable para ingeniería de tráfico IGP+MPLS se presenta en (Skivée F.; Balon S. and Leduc G., 2006), para optimizar las métricas de enlace. El método está basado en el meta-heurístico

de templanza simulada (Annealing Simulation) y puede ser usado para seleccionar LSPs que optimicen cualquier objetivo operacional dado. Por último en (Zhang M.; Liu B. and Zhang B., 2010), los autores hacen una formulación del problema de ingeniería de tráfico como un problema de flujo multi-commodity de programación lineal con enrutamiento MPLS/OSPF(MCFTE). El resultado es que la mayoría de tráfico es enrutado por OSPF, mientras solo un pequeño número de túneles MPLS son necesarios para afinar la distribución de tráfico.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La Ingeniería de Tráfico en Internet es un tema de gran interés en investigación y su finalidad principal es buscar soluciones que permitan mejorar el funcionamiento de las redes IP en operación, mediante técnicas y principios científicos que permitan evaluar y optimizar su rendimiento. En este artículo se presentó una recopilación de aproximaciones que intentan dar respuesta al problema de rendimiento, basadas en tres líneas de trabajo, propuestas basadas en IP, en MPLS y en el híbrido MPLS-IP. A partir del análisis realizado en estas propuestas se pudo observar que aún no se ha dicho la última palabra al respecto, ni la forma estandarizada completa de cómo realizar ingeniería de tráfico en Internet. Por otro lado, la mayoría de las propuestas han sido pensadas en el protocolo IPv4, lo que abre una nueva perspectiva en lo que se refiere a soluciones basadas en el protocolo IPv6, con todos los cambios que este nuevo protocolo sugiere. Por tanto, trabajos futuros podrían estar enfocados en propuestas que proporcionen soluciones para soportar ingeniería de tráfico en redes IPv6 tanto fijas como móviles, teniendo como base la información compilada y suministra en este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamsson H. and Bjorkman M. (2009). ***Robust Traffic Engineering using L-balanced Weight-Settings in OSPF/IS-IS***. *Broadband Communications, Networks, and Systems*, 2009. BROADNETS 2009. Sixth International Conference 1-8.
- Almes G.; Kalidindi S. and Zekauskas M. (1999a). ***A One-way Packet Loss Metric for IPPM***. IETF RFC2680.
- Almes G.; Kalidindi S. and Zekauskas M. (1999b). ***A One-way Delay Metric for IPPM***. IETF RFC2679.

- Andersson L; Minei I. and Thomas B. (2007). **LDP Specification**. IETF RFC5036.
- Aukia P. et al. (2000). **RATES: A Server for MPLS Traffic Engineering**. IEEE Network, 14(2), 34-41.
- Awduch D. et. al. (1999). **Requirements for Traffic Engineering Over MPLs**. IETF RFC2702.
- Awduche D. et al. (2001). **RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels**. IETF RFC3209.
- Awduche D. et al. (2002). **Overview and Principles of Internet Traffic Engineering**. IETF RFC3272.
- Awduche Daniel O. (1999). **MPLS and Traffic Engineering in IP Networks**. IEEE communications Magazine, 37(12), 42-47.
- Bagula A. (2004). **Online Traffic engineering: A Hybrid IGP+MPLS Routing Approach**. QofIS 2004, LNCS 3266, pp. 134-143. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bagula A. (2005). **Hybrid IGP+MPLS Routing in Next Generation IP Networks: An Online Traffic Engineering Model**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 325-338.
- Balakrishnan H. and Seshan S. (2001). **The Congestion Manager**. IETF RFC3124.
- Barakovic J.; Bajric H. and Husic A. (2007). **QoS Design Issues and Traffic Engineering in Next Generation IP/MPLS Network**. 9th International Conference on Telecommunications, 203-209.
- Bessa Maia J.; Da Silva A.; Silva J. and Cunha P. (2009). **A Methodology of Traffic Engineering to IP Backbone**. Computer Science
- Bhatnagar S.; Ganguly S.; and Nath B. (2005). **Creating Multipoint-to-Point LSPs for Traffic Engineering**. IEEE communications Magazine, 43(1), 95-100.
- Blak S. et al. (1998). **An Architecture for Differentiated Services**. IETF RFC2475.
- Boutaba R.; Szeto W.; and Iraqi Y. (2002). **DORA: Efficient Routing for MPLS Traffic Engineering**. J. Network and Sys. Mgmt, 10(3), 309-325.
- Braden R. et al. (1997). **Resource ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Functional Specification**. IETF RFC2205.
- Braden R.; Clark D. and Shenke S. (1999). **Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview**. IETF RFC1633.

- Brownlee N.; Mills C. and Ruth G. (1999.). **Traffic Flow Measurement: Architecture**. IETF RFC2722.
- Elwalid A.; Jin C.; Low S.; and Widjaja I. (2001). **MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering**. Proc. IEEE INFOCOM, 1300-1309.
- Ericsson M.; Resende M. and Pardalos P. (2002). **A Genetic Algorithm for the Weight Setting Problem in OSPF Routing**. J. Combinatorial Optimization, 6(3), 299-333.
- Feamster N. et al. (2003). **Guidelines for Interdomain Traffic Engineering**. ACM SIGCOMM, 33(5), 19-30.
- Feldmann A. and Rexford J. (2001). **IP Network Configuration for Intradomain Traffic Engineering**. IEEE Network, 15(5), 46-57.
- Feldmann A. et al. (2000). **NetScope: Traffic Engineering for IP Networks**. IEEE Network, 14(2), 11-19.
- Fortz B. (2002). **On the evaluation of the reliability of OSPF routing in IP networks**.
- Fortz B. and Thorup M. (2000). **Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights**. Proc. IEEE INFOCOM, 519-528.
- Fortz B.; Rexford J. and Thorup M. (2002). **Traffic Engineering with Traditional IP Routing Protocols**. IEEE communications Magazine, 40(10), 118-124.
- Gao L. and Rexford J. (2001). **Stable Internet Routing without Global Coordination**. IEEE/ACM Trans. Networking, 9(6), 681-692.
- Gojmerac I.; Ziegler T.; Ricciato F. and Reichl P. (2003). **Adaptive Multipath Routing for Dynamic Traffic Engineering**. Proc. IEEE GLOBECOM, 3058-3062.
- Gunnar A. (2011). **Aspects of Proactive Traffic Engineering in IP Networks**. Thesis Doctoral, Stockholm Sweden.
- Gunnar A. and Johansson M. (2011). **Cautious Weight Tuning for Link State Routing Protocols**. SICS Technical Report T2011:01 ISSN1100-3154.
- Gunnar A.; Abrahamsson H. and Soderqvist M. (2005). **Performance of Traffic Engineering in Operational IP-Networks - an experimental Study**. Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on IP Operations and Management IPOM 2005, Barcelona Spain.
- Gunnar A.; and Johansson M. (2010). **Robust load balancing under**

traffic uncertainty-tractable models and efficient algorithms. Telecommunications Systems Journal, In Press.

- Gunnar A.; Johansson M. and Telkamp T. (2004). **Traffic Matrix Estimation on a Large IP Backbone - a Comparison on Real Data.** Proceedings of the third ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurements IMC 2004, Taormina, Sicily, Italy
- Guo H.; Gao S. and Zhang H. (2009). **Inter-Domain Routing With As Number: A Traffic Engineering Perspective.** IEEE, 1-4.
- Jamoussi B.; Andersson L.; Collon R. and Dantu R. (2002). **Constraint-Based LSP Setup using LDP.** IETF RFC3212.
- Johansson M. and Gunnar A. (2006). **Data-driven traffic engineering: techniques, experiences and challenges.** Proceedings of the third International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems Broadnets, California.
- Kar K.; Kodialam M.; and Lakshman V. (2000). **Minimum Interference Routing of Bandwidth Guaranteed Tunnels with MPLS Traffic Engineering Applications.** IEEE JSAC, 18(12), 2566-2579.
- Kodialam M.; and Lakshman V. (2000). **Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering.** 884-893.
- Lad M.; Han Park J.; Refice T and Zhang L. (2008). **A Study of Internet Routing Stability Using Link Weight.** Technical Report Computer Science Department, University of California.
- Li Ch.; Li P. and Mohammed T. (2007). **An Optimal MPLS-TE Solution to Route Selection and Redistribution on Congested Networks.** IEEE computer Society. International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS 2007), 69-76.
- Mahdavi J. and Paxson V. (1999.). IPPM Metrics for Measuring Connectivity. IETF RFC2678.
- Mohamad I.; Wan T.; Alzyoud F. and Sumari P. (2009). **Optimizing the MPLS Support for Real Time IPv6-Flows using MPLS-PHS Approach.** TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference 1-6.
- Network Simulator NS-2. from http://nstram.isi.edu/nstram/index.php/Main_Page
- Oliveira J.; Martinelli F.; and Scoglio C. (2002). **SPeCRA: A Stochastic Performance Comparison Routing Algorithm for LSP Setup in MPLS Networks.** Proc. IEEE GLOBECOM, 2190-2194.

- Oliveira J.; Scoglio C.; Akyildiz F.; and Uhl G. (2004). ***New Preemption Policies for Diffserv-Aware Traffic Engineering to Minimize Rerouting in MPLS Networks.*** IEEE/ACM Trans. Networking, 12(4), 733-745.
- Paxson V.; Almes G.; Mahdavi J. and Mathis M. (1998.). ***Framework for IP Performance Metrics.*** IETF RFC2330.
- Pham H. and Lavery B. (2003). ***Hybrid Routing for Scalable IP/ MPLS Traffic Engineering.*** IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03., 1, 332-337.
- Pioro M. and Medhi D. (2004). ***Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer networks.*** Morgan Kaufmann Publishers, ELSEIVER, 170.
- Quoitin B.; Pelsser C. and Swinnen L. (2003). ***Interdomain Traffic Engineering with BGP.*** IEEE Communications Magazine, 41(5), 122-128.
- Rétvári G. and Cinkler T. (2004). ***Practical OSPF Traffic Engineering.*** IEEE communications Letters, 8(11), 689-691.
- Rétvári G.; Szabó R.; and Bíró J. (2004). ***On the Representability of Arbitrary Path Sets as Shortest Paths: Theory, Algorithms and Complexity.*** Proc. IFIP NETWORKING, 1180-1191.
- Rosen E.; Viswanathan A. and Callon R. (2001). ***Multiprotocol Label Switching Architecture.*** IETF RFC3031.
- Saito H.; Miyao Y.; and Yoshida M. (2000). ***Traffic Engineering using Multiple Multipoint-to-Point LSPs.*** Proc. IEEE INFOCOM, 894-901.
- Scoglio C. et al. (2004). ***TEAM: A Traffic Engineering Automated Manager for DiffServ Based MPLS Networks.*** IEEE communications Magazine, 42(10), 134-145.
- Shenke S.; Partridge C. and Guerin R. (1997). ***Specification of Guaranteed Quality of Service.*** IETF RFC2212.
- Skivée F.; Balon S. and Leduc G. (2006). ***A Scalable Heuristic for Hybrid IGP/MPLS Traffic Engineering- Case Study on an Operational Network.*** Networks, 2006. ICON '06. 14th IEEE International Conference on Telecommunications, 2, 1-6.
- Tabatabaee V. et al. (2005). ***Differentiated Traffic Engineering for QoS Provisioning.*** Proc. IEEE INFOCOM, 2349-2359.
- Trimintzios P. et al. (2001). ***Engineering the Multi-Service Internet:***

- MPLS and IP-based Techniques.** Proc. of the IEEE International Conference on Telecommunications (ICT'2001), Bucharest, Romania, 3, 129-134.
- Trimintzios P. et al. (2003). **Quality of service provisioning through traffic engineering with applicability to IP-based production networks.** Computer Communications, 26(8), 845-860.
 - Uhlig S. and Quoitin B. (2005). **Tweak-it: BGP-based Interdomain Traffic Engineering for transit ASs.** IEEE, 75-82.
 - Urvoy-Keller G.; Hébuterne G.; and Dallery Y. (2002). **Traffic Engineering in a Multipoint-to-Point Network.** IEEE JSAC, 20(4), 834-849.
 - Walkowiak K. (2004). **Survivable Online Routing for MPLS Traffic Engineering.** Proc. QoFIS, 288-297.
 - Wang J. et al. (2005). **Edge Based Traffic Engineering for OSPF Networks.** Comp. Networks, 48(4), 605-625.
 - Wang N.; Ho K.; Pavlou G. and Howarth M. (2008). **An overview of routing optimization for internet traffic engineering.** IEEE Communications 1st Quarter 10 No 1, 36-56.
 - Wang Y.; Wang Z. and Zhang L. (2001). **Internet Traffic Engineering without Full Mesh Overlaying.** INFOCOM2001, 565-571.
 - Wroclawski J. (1997). **Specification of the Controlled-Load Network Element Service.** IETF RFC2211.
 - Xiao X.; Hannan A.; Bailey B. and Ni L. (2000). **Traffic Engineering with MPLS in the Internet.** IEEE Network, 14(12), 28-33.
 - Xu K.; Liu H.; Liu J. and Shen M. (2011). **One More Wight is Enough: Toward the Optimal Traffic engineering with OSPF.** IEEE Computer Society. 31st International Conference on Distributed Computing Systems, 836-846.
 - Yang et al. (2005). **On Route Selection for Interdomain Traffic Engineering.** IEEE Network, 19(6), 20-27.
 - Yavatka R.; Pendaraki D. and Gueri R. (2000). **A Framework for Policy-based Admission Control.** IETF RFC2753.
 - Younis O.; and Fahmy S. (2003). **Constraint-Based Routing in the Internet: Basic Principles and Recent Research.** IEEE communications Surveys and Tutorials.
 - Zhang M.; Liu B. and Zhang B. (2010). **Multi-Commodity Flow Traffic Engineering with Hybrid MPLS/OSPF Routing.** Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE, 1-6.