

Un estudio sobre algoritmos basados en restricciones: objetivos ingeniería de tráfico y calidad de servicio¹

A survey on constraints-based routing algorithms: objectives traffic engineering and quality of service

Um estudo sobre algoritmos baseados em restrições: objetivos engenharia de trafego e qualidade de serviço.

L. Y. Becerra, J. L. Bañol, J. J. Padilla

Recibido: Octubre 25 de 2016 - Aceptado: enero 13 de 2017

Resumen— El enrutamiento en Internet está basado en la dirección destino y en un algoritmo del camino más corto, esto conlleva a que se congestionen ciertos enlaces debido a que se seleccionan los mismos caminos para muchas comunicaciones. Por otro lado, los algoritmos basados en restricciones toman las decisiones de selección del camino con base en un conjunto de requerimientos que permite escoger el camino más óptimo para un conjunto de restricciones específico, resolviendo el problema del enrutamiento del camino más corto y proporcionando ventajas adicionales como el soporte de calidad de servicio e ingeniería de tráfico. En la literatura se ha demostrado que los procesos de los objetivos de ingeniería de tráfico son NP-difícil, y los de calidad de servicio son NP-completo, esto conduce a que sea un tema abierto para hacer propuestas de algoritmos heurísticos. Por tanto, en este artículo se presenta una revisión general de los algoritmos basados en restricciones propuestos como solución al problema de enrutamiento convencional de Internet en los últimos 15 años, los cuales se han organizado en tres categorías según los objetivos trazados en cada uno de ellos. Estas categorías están enfocadas a las problemáticas actuales en Internet que son la provisión de ingeniería de tráfico y calidad de servicio. Se presenta una breve descripción de cada uno, resaltando las restricciones utilizadas y los objetivos trazados. Un conocimiento de la taxonomía de estos algoritmos y sus

objetivos permite plantear nuevas alternativas al enrutamiento para redes de nueva generación, con nuevas exigencias en sus servicios.

Palabras Clave— algoritmos basados en restricciones, enrutamiento, calidad de servicio, ingeniería de tráfico.

Abstract— Internet routing is based on the destination address and a shortest path algorithm, this leads to some links are congested because the same paths are selected for many communications. On the other hand, constraint based algorithms select the path based on a set of requirements that allows choosing the most optimal path for a specific set of constraints, solving the problem of the shortest path routing and providing additional benefits such as support QoS and traffic engineering. In the literature, it has been shown that the processes with traffic engineering objectives are NP-hard, and for quality of service are NP-complete, it allows making heuristic algorithms proposals because this is an open issue. Therefore, this article provides an overview of the constraint based algorithms proposed as a solution to the problem of conventional Internet routing in the last 15 years. This study has been organized into three categories according to the goals for each proposal. These categories were targeted in Internet current issues that are Traffic Engineering and Quality of Service support. A brief description of each algorithm is presented, highlighting their objectives and constraints. It is very important to highlight that to propose solutions to these issues remains a challenge and is an open issue, for this reason to have a knowledge of the taxonomy of these algorithms and objectives allows us to propose new alternatives to routing for next generation networks, with new demands on their services.

Key words— constraint based algorithms, routing, QoS, traffic engineering.

Producto derivado del proyecto de investigación “Una contribución al soporte de Ingeniería de tráfico en Internet” perteneciente al grupo de investigación “Entre Ciencia e Ingeniería” de la Universidad Católica de Pereira.

L. Y. Becerra Sánchez, Universidad Católica de Pereira, Pereira (Colombia); email: line.becerra@ucp.edu.co.

J. L. Bañol, Universidad Católica de Pereira, Pereira (Colombia); email: Jorge.banol@ucp.edu.co.

J. J. Padilla Aguilar, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia); email: jhon.padilla@upb.edu.co

Resumo: O roteamento na Internet está baseado no endereço destino e num algoritmo do caminho mais curto, isto ocasiona uma congestão em certos enlaces devido a que são seleccionados os mesmos caminhos para muitas comunicações. Por sua vez os algoritmos baseados em restrições decidem a seleção do caminho com base em um conjunto de requerimientos que permitem escolher o melhor caminho para um conjunto de restrições específico, resolvendo o problema de roteamento do caminho mais curto e proporcionando vantagens adicionais como o suporte de qualidade de serviço e engenharia de trafego. Na literatura se demonstrou que os processos dos objetivos da engenharia de trafego são NP-difícil, e os de qualidade de serviço são NP-completo, mostrando que é um tema aberto para fazer propostas de algoritmos heurísticos. Portanto, neste artigo se apresenta uma revisão geral dos algoritmos baseados em restrições propostos como una solução ao problema de roteamento convencional de internet nos últimos 15 anos, que foram organizados em três categorías de acordo com os objetivos traçados em cada um deles. Estas categorías estão voltadas às problemáticas atuais na Internet que são a prestação de engenharia de tráfico e qualidade de serviço. Se apresenta una breve descrição de cada um, ressaltando as restrições utilizadas e os objetivos traçados. Um conhecimento da taxonomia destes algoritmos e seus objetivos permite propor novas alternativas ao roteamento para redes de nova geração, com novas exigências em seus serviços.

Palavras Chave— algoritmos baseados em restrições, roteamento, qualidade de serviço, engenharia de tráfico.

I. INTRODUCCIÓN

En la Internet actual el envío de paquetes está basado en la dirección destino; las decisiones de enrutamiento se realizan mediante algoritmos que seleccionan el camino más corto o de mínimo coste. Los algoritmos más utilizados para este tipo de enrutamiento son el Dijkstra y Bellman-Ford [1]. Estos algoritmos de enrutamiento tradicionales proveen un servicio “best effort” [2], el cual hace su mejor esfuerzo para enviar los flujos de tráfico pero no ofrece garantías con respecto a pérdida de paquetes, ancho de banda, retardos, etc. Por tanto, el problema del enrutamiento de Internet es que se hace seleccionando la ruta más corta, esto trae como consecuencia que algunos caminos se congestionen porque son sobre-utilizados y mientras que otros son subutilizados, lo que conlleva a la congestión de la red. Esta problemática conduce a que se propongan soluciones que permitan seleccionar los caminos más apropiados, no necesariamente el más corto, dependiendo por ejemplo del tipo de tráfico, ancho de banda requerido o de umbrales de retardos. Surgen entonces, numerosas propuestas de algoritmos que tienen como objetivo seleccionar un camino de acuerdo a una serie de condiciones especiales o restricciones, proporcionando calidad de servicio e Ingeniería de Tráfico o ambas. Estos algoritmos son denominados “*Algoritmos de enrutamiento basados en restricciones*”.

Los algoritmos basados en restricciones CBR (*Constraint-based Routing*), seleccionan la mejor ruta que corresponde a las restricciones establecidas. Las restricciones pueden ser impuestas por políticas administrativas, requerimientos de calidad de servicio o requerimientos de ingeniería de tráfico [3]. El proceso de un CBR puede ser incorporado en la capa 3, es decir, en la capa de red, dentro de un router y co-existir con los procesos de los protocolos de enrutamiento intradominio.

Por otro lado, la complejidad de este tipo de enrutamiento se estudia en función del número de nodos y arcos de la red [4]. La utilización de modelos matemáticos o de simple heurística para disminuir el tiempo de respuesta en la resolución de problemas de gran complejidad es una alternativa que puede ser planteada en la planificación de redes de datos. Aunque realizar este tipo de enrutamiento tiene una gran dificultad computacional, numerosas propuestas enfocadas a evitar congestión y a mejorar la provisión de calidad de servicio apuntan también a reducir dicha complejidad [3]. Algunos estudios previos sobre las diferentes propuestas de algoritmos basados en restricciones están en [3] [5], los cuales se enfocan principalmente en la provisión de calidad de servicio.

Este artículo presenta un estudio sobre diferentes algoritmos basados en restricciones propuestos con el objetivo dar solución al problema de enrutamiento del camino más corto. Las aproximaciones presentadas se enfocan en las problemáticas de Internet actuales, que son: el soporte de ingeniería de tráfico y calidad de servicio. Es importante resaltar que proponer soluciones a estas problemáticas sigue siendo un desafío y es un tema abierto, por tanto contar con una visión general de los algoritmos existentes, es un aporte valioso para el diseño de nuevas propuestas. Es por esto, que el estudio presentado de los algoritmos CBR encontrados en la literatura, se ha organizado en tres categorías teniendo en cuenta sus objetivos. La primera categoría son los algoritmos de enrutamiento basados en restricciones que están enfocados a la provisión de Ingeniería de Tráfico, la segunda son los que contribuyen al soporte de calidad de servicio y la tercera incluye los algoritmos que tienen objetivos híbridos que están enfocados tanto al soporte de ingeniería de tráfico como a la calidad de servicio.

El artículo está organizado en las siguientes secciones: en la sección II, se presentan las diferentes propuestas organizadas en tres categorías y en la sección III, se dan las conclusiones y trabajos futuros.

II. PROPUESTAS DE ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO BASADOS EN RESTRICCIONES

En los últimos 15 años el enrutamiento basado en restricciones ha sido un tema de gran interés y abierto en la comunidad de Internet. La búsqueda por soluciones que permitan resolver el problema de congestión y carencia de calidad de servicio en Internet ha permitido que se propongan gran cantidad de aproximaciones cuyos objetivos están enfocados a resolver estos problemas. En esta sección se presenta una revisión de propuestas de algoritmos de enrutamiento encontrados en la literatura. Los algoritmos se han organizado en tres categorías de acuerdo a sus funcionalidades: La primera categoría son los algoritmos de enrutamiento basados en restricciones para soportar ingeniería de tráfico, la segunda son los que contribuyen al soporte de calidad de servicio y la tercera incluye los híbridos, es decir, combina objetivos hacia el soporte tanto de ingeniería de tráfico como calidad de servicio. En la literatura se ha demostrado que los algoritmos cuyos objetivos apuntan al soporte de ingeniería de tráfico son NP-hard [6], [7] y los que se enfocan en soporte de calidad de servicio son NP-completo [3] [4], esto conduce a que sea un tema abierto y permite que investigadores propongan nuevas soluciones heurísticas para resolver las problemáticas mencionadas.

A. Algoritmos de enrutamiento basados en restricciones cuyo objetivo es el soporte de Ingeniería de Tráfico

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 [8]. El problema del enrutamiento de Internet es que este se hace seleccionando la ruta más corta o de mínimo coste. Los algoritmos más utilizados son Dijkstra y Bellman Ford [1]. Este tipo de enrutamiento trae como consecuencia que algunos caminos se congestionen porque son sobre-utilizados y otros sean sub-utilizados, lo que conlleva a la congestión de la red. Para evitar estos problemas de congestión surgen numerosas propuestas y mecanismos para el soporte de Ingeniería de Tráfico [9]. Dentro de estas propuestas surge MPLS [10], como tecnología que proporciona ingeniería de tráfico y calidad de servicio. Para el enrutamiento y el soporte de ingeniería de tráfico, MPLS se apoya en un algoritmo basado en restricciones; muchos algoritmos han sido propuestos para este fin, pero el más sencillo y más utilizado es el denominado CSPF (Constraint Shortest Path First), el cual es una extensión del algoritmo Dijkstra, ya que implementa una modificación, que se refiere a la adición de restricciones de ancho de banda [1]. Las restricciones, cuyo objetivo es el de contribuir al soporte de ingeniería e tráfico se enfocan en requerimientos de ancho de banda, balanceo de carga, utilización eficiente de los recursos de red, enrutamiento multicamino y minimización del costo de enrutamiento.

La gran mayoría de soluciones que se han propuesto han sido pensadas para trabajar con MPLS [11]. Las primeras propuestas para CBR (*Constraint-Based Routing*) incluyen WSP [11] (*Widest Shortest Path – Ruta más Corta más Amplia*) y SWP [12] (*Shortest-Widest Path, Ruta más Amplia más Corta*). WSP y SWP utilizan un algoritmo del camino más corto, *Dijkstra* o *Bellman-Ford*, para los cálculos de la ruta. WSP selecciona un camino con máxima capacidad de ancho de banda entre los que tienen una longitud de saltos dada. SWP optimiza primero en conteo de saltos y cuando existen múltiples caminos con la misma cantidad de saltos, selecciona entre ellos uno con máximo ancho de banda [7].

El algoritmo MIRA (*Minimum Interference Routing Algorithm*) [6], es un algoritmo de enrutamiento de interferencia mínima que fue propuesto para balanceo de carga. Opera en los router de ingreso y establece una sola ruta para una petición. Durante la construcción de un camino el algoritmo MIRA busca la minimización de interferencia con los caminos potenciales entre todos los otros pares de ingreso y egreso. Para hacer esto, el algoritmo intenta minimizar las cargas de los enlaces críticos en la red. Un enlace crítico es aquel que se encuentra en un cruce potencial de tráfico del dominio [7]. MIRA tiene dos versiones, el S-MIRA (involucra un criterio de suma ponderada) y el L_MIRA (involucra un criterio lexicográfico). En ambas versiones se intenta minimizar la interferencia que se está formando con el

resto de las rutas respetando la importancia administrativa en S-MIRA y la capacidad de ruta residual de L_MIRA [6].

FRA (*Fuzzy Routing Algorithm*) [13], opera en lógica difusa. FRA busca tres objetivos: El primero es maximizar el Maxflow, es decir, la capacidad del enlace cuello de botella en el camino. FRA primero optimiza para seleccionar la ruta con recurso residual máximo sobre su enlace cuello de botella. El segundo objetivo es maximizar el ancho de banda residual en los enlaces diferentes al del enlace cuello de botella. Y el tercero es minimizar la longitud de la ruta por su número de saltos. El algoritmo aplica una función a un conjunto de miembros difusos combinando estos tres objetivos dentro un criterio para elegir incrementalmente entre los enlaces y establecer la ruta comenzando a partir del router de Ingreso [13], [7].

PBR (*Profile Based Routing*) [14]. Es un algoritmo de enrutamiento restringido orientado a control de admisión, está basado en el pre-conocimiento de clases de flujos nombrados como perfiles que esperan solicitar entrada al dominio. La aproximación es la división de recursos de dominio dentro de los perfiles entre pares de ingreso y egreso conocidos a priori, lo cual se hace en la primera fase del algoritmo. En la segunda fase, los flujos son admitidos uno a la vez con base en las solicitudes de recursos y la capacidad restante en la clase de tráfico que se asignó. El objetivo principal del PBR es maximizar el flujo de admisión. La complejidad computacional es la principal debilidad del algoritmo. PBR ha sido comparado con MIRA y WSP, en topologías restringidas, y también con el enrutamiento del camino más corto, proporcionando mejores resultados [7].

PPF (*Primary Path First*) y M-AIMD (*Multipath-Additive Increase Multiplicative Decrease*), se proponen para el control de admisión y ajuste de tráfico en rutas preestablecidas [15]. Ambas versiones tienen como objetivo el consumo primario de los recursos de la ruta y distribuir el tráfico global de manera equitativa con base en la demanda declarada y la capacidad primaria de las fuentes [7]. En PPF, esta equidad se logra mediante el uso de un parámetro umbral fijado en la distribución de la carga actual. En M-AIMD, los parámetros externos se utilizan para el control de admisión. El rendimiento de M-AIMD/PPF es insignificante comparado con M-AIMD.

V-PREPT en [16], tiene como objetivo la minimización de re-enrutamiento causado por preferencia. El algoritmo formula este objetivo como tres factores combinados aditivamente, cada uno tiene coeficientes de afinación que son entradas al algoritmo. Estos factores son: *i*) Minimizar el número de LSPs anticipados: la correlación directa con el objetivo, *ii*) Minimizar la cantidad de ancho de banda anticipado: destinado a reducir el desperdicio de ancho de banda por la anticipación del LSP con la menor cantidad de ancho de banda que satisfaga la solicitud, *iii*) Minimizar sobre la prioridad del LSP: de manera que, entre los LSPs cuyas prioridades lo permitan, sus prioridades relativas son aún consideradas [7]. En [16], también se describe Adapt-V-PREPT, una versión de V-PREPT que también considera las preferencias para las tasas de ancho de banda. Los algoritmos son probados en distintas solicitudes de ancho de banda y su funcionamiento es bastante cerca de lo óptimo [7].

TABLA I
 ESPECIFICACIÓN DE LOS ALGORITMOS QUE CONTRIBUYEN AL SOPORTE DE
 INGENIERÍA DE TRÁFICO

Aproximación	Restricciones	Objetivo
[6]MIRA	Bw	Balaneo de Carga.
[13] FRA	Bw Número de saltos	Utilización eficiente de los recursos. Minimizar la longitud de la ruta.
[14] PBR	Bw	Maximizar el flujo de admisión.
[15] PPF & M-IMD	Bw	Utilización eficiente de los recursos. Balaneo de Carga.
[16] V-PREPT	Bw	Utilización eficiente de recursos. Minimización de LSPs anticipados. Minimizar el ancho de banda por anticipación de LSPs. Minimizar sobre la prioridad de LSPs
[17]	Bw	Balaneo de carga
[18] PPBS-FBLB	Bw	Caminos Paralelos Balaneo de Carga
[19]	Costo Bw	Minimizar Costo de enrutamiento Balaneo de Carga
[20]	Costo Bw	Utilización eficiente de los recursos Equilibrio de Tráfico-Balaneo de carga

Entre otras propuestas, en [17], los autores proponen dos algoritmos de enrutamiento basados en restricciones de ancho de banda multicamino para TE usando MPLS. Estos algoritmos dividen las restricciones de ancho de banda en múltiples sub-restricciones y encuentran un camino restringido para cada sub-restricción. Este enfoque se da como solución a que en el algoritmo CSPF hay una alta probabilidad de no encontrar el camino factible para restricciones de un ancho de banda grande, la cual es una de las restricciones más importantes para ingeniería de tráfico.

En [18], los autores proponen dos algoritmos que contribuyen al soporte de ingeniería de tráfico en redes MPLS en dos áreas: enrutamiento basado en restricciones y balanceo de carga. El primer algoritmo denominado “*parallel-path-based bandwidth scheme (PPBS)*”, esquema de ancho de banda basado en camino paralelo, que hace uso de LSPs paralelos en la escogencia de caminos paralelos con restricciones de ancho de banda. El segundo, es un algoritmo de balanceo de carga basado en retroalimentación (FBLB, *feedback-based loadbalancing algorithm*) para distribuir tráfico sobre los LSPs paralelos determinados por PPBS. Los resultados demuestran un mejoramiento en la probabilidad de bloqueo de los flujos usando PPBS con respecto a la carga promedio de los enlaces, los saltos a lo largo del camino y el número posible de LSPs paralelos. También demuestran la efectividad y estabilidad del algoritmo FBLB para la distribución de tráfico y balanceo de carga.

Un algoritmo heurístico basado en NSGA-II [21], es propuesto en [19] para el problema de ingeniería de tráfico multi-objetivo en las redes backbone de Internet que utilicen MPLS. El objetivo es distribuir las demandas de tráfico sobre la red de tal forma que simultáneamente minimice el costo de enrutamiento y el balanceo de carga. El rendimiento de la propuesta es comparada con la solución exacta generada usando el método Chevyshev lexicográfico.

Finalmente, en [20], proponen un algoritmo de optimización de enrutamiento, para alcanzar equilibrio de tráfico, mientras reduce la penalidad que deben pagar a los usuarios los operadores de red debido a la interrupción de los servicios. Los experimentos realizados muestran que el algoritmo alcanza el equilibrio de tráfico y reducen efectivamente la penalidad potencial de los operadores de red.

En la tabla I, se da un resumen de los algoritmos que apuntan al soporte Ingeniería de tráfico, con las restricciones y objetivos propuestos.

B. Algoritmos enrutamiento basado en restricciones cuyo objetivo es el soporte de Calidad de Servicio

En esta categoría se han incluido aquellos algoritmos cuyo objetivo es seleccionar el camino que satisfaga un conjunto de restricciones que apuntan al soporte de calidad de servicio. Los objetivos de estos algoritmos están enfocados a restricciones de ancho de banda, delay, jitter y pérdidas de paquetes. Este problema es conocido como NP-complete [4], [22], [23] y esto ha conducido a que se realicen muchas propuestas de algoritmos heurísticos [4].

En [5], se presenta un estudio de los algoritmos para enrutamiento de calidad de servicio basado sobre métricas, las cuales son restringidas u optimizadas durante el proceso de selección del camino. El estudio presentado está enfocado a los problemas de enrutamiento MCP (*Multi-Constrained Path Problem*) y MCOP (*Multi-Constrained Optimal Path Problem*). El problema MCOP es una abstracción y extensión del enrutamiento de QoS. El problema MCOP intenta encontrar el camino de costo mínimo que satisface las restricciones y es NP-complete aún para una sola restricción. Por su parte, MCP es el problema MCOP sin optimización del camino y también es NP-complete para más de una restricción.

En [24], Jaffe propone dos algoritmos para el problema MCP bajo dos restricciones (uno polinomial y otro pseudo-polinomial). En esta aproximación las dos restricciones son combinadas dentro de una sola métrica usando una función lineal. Usa el algoritmo del camino más corto Dijkstra y encuentra un camino factible.

El Algoritmo Iwata en [25], es propuesto como solución al problema MCP. El algoritmo primero calcula un camino más corto basado en una medida de QoS y luego revisa si otras restricciones son encontradas. Si existe una ruta más corta, que de acuerdo a cierta medida de QoS cumple con todas las restricciones, el algoritmo se detiene, de lo contrario el algoritmo se repite con otra medida hasta que un camino factible sea encontrado. La complejidad del peor caso de este algoritmo es “m” veces la del algoritmo Dijkstra. Un inconveniente con esta aproximación es que no hay garantía que la optimización

de la selección de la ruta con respecto a alguna medida única que conduzca a un camino factible. [5], [4].

TAMCRA (*Tuneable Accuracy Multi-Constrained Routing Algorithm*, Algoritmo de Enrutamiento Multi-Restringido de Precisión Sintonizable) [26] y SAMCRA (*Self-Adaptive Multi-Constrained Routing Algorithm*, Algoritmo de enrutamiento Multi-Restringido Auto-Adaptativo) en [27], están basados en tres conceptos fundamentales: *i)* Una medida no lineal de la longitud de la ruta, *ii)* Un enfoque de ruta k-shortest, *iii)* Principio de rutas no-dominadas [5]. SAMCRA es el sucesor de TAMCRA, incluye los tres conceptos fundamentales de TAMCRA y agrega otro más “Mirar hacia adelante”. La ventaja de SAMCRA sobre TAMCRA es que el espacio de búsqueda se reduce por el pre-cálculo del camino más corto hacia el destino [5].

Chen and Nahrstedt [28], proponen dos algoritmos basados en programación dinámica el EDSP (*Extended Dijkstra's Shortest Path*) y el EBF (*Extended Bellman-Ford*). Cuando el grafo es escaso y el número de nodos relativamente grandes, se espera que EBF pueda dar un mejor rendimiento que EDSP en términos de tiempo de ejecución. Sin embargo, para lograr un buen desempeño se necesitan grandes restricciones, lo cual hace que este enfoque tenga bastante complejidad computacional para fines prácticos [4]. En estos algoritmos el problema MCP es simplificado reduciendo el tamaño del peso de los enlaces [5].

El Algoritmo Aleatorio descrito en [29], es propuesto para el problema MCP. Este algoritmo se compone de dos partes, la fase de iniciación y la búsqueda aleatoria. El algoritmo inicia desde la fuente y explora el grafo usando un algoritmo aleatorio BFS (*Breadth-First Search*). Mediante el uso de la información obtenida en la fase de inicialización, el algoritmo aleatorio BFS puede comprobar si existe una posibilidad de éxito antes de descubrir el nodo. Si no hay ninguna posibilidad, el algoritmo prevé la trampa y no vuelve considerar tales nodos. En el peor de los casos la complejidad del algoritmo aleatorio es mayor que el Dijkstra [4]. La ventaja principal de este algoritmo es que trabaja bajo cualquier número de restricciones.

En el algoritmo H_MCOP, La búsqueda del camino viable se hace mediante la aproximación de la función no lineal, igual a como se hace en TAMCRA [30]. Para cumplir estos objetivos, H_MCOP (*Multi-Constrained Optimal Path*) ejecuta dos versiones modificadas del algoritmo Dijkstra en direcciones atrás y adelante [4]. Dado que el algoritmo considera rutas completas antes de llegar al destino, se puede prever algunos caminos viables durante la búsqueda. Si se utiliza este algoritmo sólo para el problema MCP, la ejecución termina cuando encuentra o prevé un camino factible, lo que reduce el tiempo de ejecución del algoritmo.

El algoritmo A*Prune [31] considera el hecho de encontrar no sólo uno, sino múltiples caminos más cortos que están dentro de las restricciones. La función de longitud lineal usada en este algoritmo es la misma utilizada en el algoritmo Jaffe's. Si no hay caminos factibles presentes, el algoritmo retornará aquellos que están dentro de las restricciones. Para cada medida de QoS, el algoritmo calcula los caminos más cortos. Los pesos de estos caminos serán utilizados para evaluar si una sub-ruta puede convertirse en un camino viable, algo similar a como lo

realiza el algoritmo H_MCOP. El nodo con el peso más corto seleccionado de extremo a extremo es extraído de la pila y luego todos sus vecinos son analizados. Los vecinos que causan un bucle o una violación de las restricciones son dados de baja [4]. En el peor de los casos la complejidad del algoritmo A*Prune crece exponencialmente con el tamaño de la red [5], es posible implementar un algoritmo A*Prune limitado, el cual corre en tiempo polinomial con el riesgo de perder exactitud.

El algoritmo MPMP (*Multi-Pre Paths Multi-Post Paths*) en [34] tiene como objetivo principal reducir el tiempo de complejidad y reducir la EDR (*Erroneous Decision Rate*) en comparación con TAMCRA y H_MCP. MPMP busca la ruta correcta usando el algoritmo Dijkstra modificado con una nueva métrica llamada “Margen Mínima Normalizada” (Nm_{\min}). A diferencia de TAMCRA y H_MCOP, MPMP selecciona múltiples pre-rutas y múltiples post-rutas en cada nodo. La medida de “Margen Mínima Normalizada” reduce el tiempo de ejecución mediante la detección muy rápida de la ruta factible [5].

En [32], el algoritmo de enrutamiento NLR_MCP (*Non linear Lagrange*) para resolver el problema MCP ejecuta dos veces el algoritmo Dijkstra, una en dirección de reversa y otra en dirección hacia adelante [32]. El algoritmo Dijkstra en dirección inversa trata de buscar el camino desde cualquier otro nodo que minimice la función de coste. Si el algoritmo Dijkstra en dirección de reversa puede encontrar el camino deseado, el algoritmo se detiene y retorna esta ruta. Si no, continúa ejecutando el algoritmo Dijkstra en dirección hacia adelante. El resultado de las simulaciones muestra que el coste de NLR_MCP comparado con el de H_MCP puede ser mucho mejor sin sacrificar tiempo de complejidad [5].

Un algoritmo exacto llamado A*_MCSP (*Multi Constraint Shortest Path*) es propuesto en [33], el cual introduce la noción de estado y la relación de dominio entre los estados. A*_MCSP es un algoritmo de búsqueda primero en amplitud que utiliza una estrategia de búsqueda muy conocida en la inteligencia artificial. A*_MCSP elimina el coste de mantener los caminos parciales similar a como lo hace el algoritmo A*Prune [5].

Por otro lado, DCLC (Delay Constrained Least Cost – Menor Costo Restringido de Retardo) que tiene como fin encontrar un camino p desde la fuente hasta el destino, de tal manera que el mínimo costo sea alcanzado y que satisfaga la restricciones de retraso [28] [34].

El algoritmo SF-DCLC (*Selection Function -Delay Constraint Least Cost*) [35], es un algoritmo basado sobre la función de selección para los problemas de costo mínimo de restricciones de retardo, requiere información de red limitada en cada nodo y es capaz de encontrar un camino que satisface el retraso dado, si existe tal camino. El mayor problema que tiene este algoritmo es que encuentra una ruta de menor costo con respecto al retraso que no es más que el límite autorizado [5].

En [36], se describe LCLD (Least Cost Least Delay), que es una versión modificada de SF-DCLC. Este algoritmo utiliza una función de peso, que siempre es capaz de encontrar un camino basado en menor costo y menor retraso satisfaciendo el retraso dado si existe tal camino. El objetivo de este algoritmo es satisfacer los requerimientos

de QoS para cada conexión admitida y para lograr una mejor eficiencia en la utilización de recursos [5].

El algoritmo FPSA en [37], propuesto para el problema MCP tiene como objetivo encontrar una ruta viable si hay más de una ruta viable dentro de la red. La ruta viable es seleccionada de tal manera que debería consumir menos recursos de red entre los múltiples caminos viables disponibles. La optimalidad puede ser considerada por la selección del número de saltos contados, menor retraso, rendimiento y ancho de banda. El algoritmo FPSA encuentra la ruta viable mediante la adopción de dos restricciones, ancho de banda y retardo. Los resultados de la simulación presentados muestran que ofrece una tasa de éxito mayor en comparación a H_MCOP [5].

Algoritmo híbrido (DCCR+SSR) es propuesto en [38], y combina los algoritmos de enrutamiento de restricción Costo-Retardo DCCR (*Delay-Cost-Constraint Routing*) y Reducción de espacio de búsqueda SSR (*Search Space Reduction*) [39]. DCCR es una variante del enrutamiento del camino más corto K-ésimo. Es un problema DCLC convertido a DCC (Delay Cost-Constraint. La diferencia entre DCCR y DCLC es que tanto el costo como también el retardo es limitado a dos restricciones diferentes. Como un resultado de la búsqueda el espacio es reducido, tanto como los caminos no satisfagan ambas restricciones se eliminan.

Por su parte, el algoritmo heurístico de Camino limitado, presenta dos heurísticas para el problema MCP: la heurística “granularidad limitada” y la LPH (*Limited Path Heuristic*, Heurística Ruta Limitada) [40]. LPH tiene altas probabilidades de encontrar una ruta viable, siempre y cuando la ruta exista. LPH está basado en el algoritmo *Bellman-Ford* y usa dos de los conceptos fundamentales de TAMCRA, que son el no-dominio y el almacenamiento en la mayoría de las k rutas por cada nodo [4]. Sin embargo, mientras TAMCRA usa una k-shortest como enfoque, LPH guarda la primera ruta k, que no es necesariamente la más corta. LPH no comprueba si una ruta obedece a unas restricciones dadas, lo hace cuando encuentra el destino.

El algoritmo HAMCRA, es un algoritmo híbrido que combina los conceptos de los algoritmos SAMCRA y TAMCRA. HAMCRA usa la misma función no lineal y los mismos conceptos agregando uno nuevo LB (*Lower Bound*, Límite Inferior), que permite la reducción del espacio de búsqueda. El concepto de LB, se incluye para para calcular y comprobar si la ruta de extremo a extremo cumple con las restricciones [41]. HAMCRA encuentra caminos factibles muy rápido, pero la complejidad aumenta cuando las restricciones están estrictamente relacionadas con el peso de las rutas multidimensionales de caminos más cortos y los pesos de los enlaces están negativamente relacionados [5].

En [42], presentan un algoritmo de enrutamiento para encontrar caminos factibles que minimicen el costo incurrido por una red MPLS para soportar las solicitudes de ancho de banda del usuario. El costo es atribuido al transporte de ancho de banda, esfuerzos de señalización y conmutación para la conexión solicitada. El algoritmo de enrutamiento es escalable y opera bajo información de red inexacta. El rendimiento del algoritmo fue comparado con el algoritmo

de enrutamiento del camino más corto, encontrando un rendimiento superior.

Un algoritmo heurístico es propuesto en [43], TS_MCOP, que opera mediante la aplicación de búsqueda tabú al algoritmo Dijkstra. Este heurístico primero traslada múltiples restricciones de QoS en una única métrica y luego encuentra un camino factible mediante búsqueda tabú. Los resultados presentados por los autores muestran que el algoritmo tiene buenas características de rendimiento y de optimización de costo.

Un algoritmo de enrutamiento eficiente para mejorar la calidad de servicio en Internet es propuesto en [44], es una clase de algoritmo de enrutamiento multi-restringido. Para evitar el problema NP-complete y el incremento de la eficiencia computacional, adicionaron algunas mejoras, que incluye la definición del camino no lineal donde los sub-caminos pueden no ser los caminos más cortos. Los autores concluyen que aunque es una metodología efectiva se encontraron algunas pérdidas de exactitud en el cálculo del sub-camino.

En [45], ofrece una solución para enrutamiento de QoS jerárquico mediante la introducción del protocolo llamado Macro-enrutamiento multi-restringido. Este protocolo usa el protocolo de Macro-enrutamiento con la técnica de agregación de malla completa extendida para determinar múltiples rutas de QoS jerárquicas. Las pruebas presentadas por los autores muestran que el protocolo de multi-enrutamiento multi-restringido supera cualquier otro protocolo de enrutamiento jerárquico que use la agregación de malla completa, encontrando mejores y más caminos de QoS.

Un método para resolver el enrutamiento de múltiples restricciones es propuesto en [46]. Primero establece un modelo de enrutamiento de QoS multi-restringido y construye una función de valor de conveniencia mediante la transformación de restricciones de calidad de servicio con una función de penalidad. Luego, varias fórmulas iterativas del original PSO (Particles Swarm Optimization) son mejoradas para adaptar el espacio de búsqueda no continuo del problema de enrutamiento. Las mutaciones de ideas y selección natural de los algoritmos genéticos GA (Genetic Algorithm) son aplicadas al PSO para mejorar el desempeño convergente. Los autores mencionan que combinan PSO y GA, teniendo en cuenta que PSO es un algoritmo de optimización que ha sido aplicado para encontrar caminos más cortos en la red, sin embargo este puede caer en la solución óptima local y no ser capaz de resolver el enrutamiento basado en múltiples restricciones.

En [47], proponen un algoritmo de enrutamiento multi-restringido bidireccional BMCOP, el cual emplea los conceptos de no dominancia, búsqueda bidireccional, enrutamiento independiente, manejo de diferentes métricas, los cuales se ha demostrado que son útiles para abordar los problemas MCOP. Los resultados de simulación de BMCOP y los detalles teóricos, demostraron que puede alcanzar rendimiento cerca al óptimo para ambos algoritmos MCP y MCOP.

Un algoritmo de enrutamiento heurístico con

restricciones de ancho de banda y retardo, denominado HRABDC (*Heuristic Routing Algorithm with Bandwidth Delay Constraints*), es propuesto en [48]. La meta del algoritmo es aceptar tantas solicitudes de enrutamiento como sea posible. El algoritmo calcula relativamente los pesos de enlace basado en los anchos de banda de los enlaces. Luego la idea heurística es aplicada al algoritmo Dijkstra para encontrar un camino que satisfaga restricción de retardo y con los pesos más bajos posibles. Los experimentos sobre diferentes topologías dieron mejores resultados con respecto a la relación de admisión y bajo tiempo de cómputo.

En la tabla II, se resume los algoritmos basados en restricciones de QoS.

C. Algoritmos de enrutamiento basados en restricciones híbridos, para el soporte de Ingeniería de tráfico y Calidad de servicio.

En esta sección se describen algunos algoritmos encontrados en la literatura en donde se confirma su gran interés en soportar tanto ingeniería de tráfico como QoS. Es importante resaltar aquí que aunque en los algoritmos presentados en la anterior categoría, la literatura mencione que sus metas están solamente enfocadas al soporte de QoS, podrían estar en esta categoría si alguna de sus restricciones están enfocadas al ancho de banda y eso conduzca a balanceo de carga, ya que eso permitiría una mejor utilización de los recursos y contribuiría a reducir la congestión, que son los intereses principales de la ingeniería de tráfico.

TABLA II
ESPECIFICACIÓN DE LOS ALGORITMOS QUE CONTRIBUYEN A LA CALIDAD DE SERVICIO.

Aproximación	Restricciones	MCP	MCOP
[24] Jaffe's	Pesos, Longitud	x	
[25] Iwata's	Costos, delay	x	
[26] TAMCRA	Longitud, Costos	x	
[27] SAMCRA	Longitud, Costos	x	
[28] EDSP	Costos	x	
[28] EBF	Costos	x	
[29] Algoritmo Aleatorio	Amplitud, Peso, Costo, Retardo	x	
[30] H_MCOP	Pesos		x
[31] Algoritmo A*Prune	Pesos	x	
[33] Algoritmo MPMP	Margen mínima normalizada	x	
[32] NLR MCP	Costos	x	
[33] A*MCSP	Costos	x	
[34] DCLC	Costo, Retardo		x
[35] SF-DCLC	Costo, Retardo		x
[36] LCLD	Costo, Retardo		x
[37] FPSA	Retardo, Bw		x
[38] DCCR+SSR	Costo, Retardo		x
[40] LPH	Delay, Jitter, Bw	x	
[41] HAMCRA	Delay, jitter	x	
[42]	Bw, Retardo, Distancia		
[43] TS_MCOP	costo		x
[44]	Retardo, jitter, Bw	x	
[45]	Costo, Conteo de Saltos y Retardo	x	
[46] GA-PSO	Bw, retardo, pérdida de paquetes, jitter		x
[47] BMCOP	Costo	x	x
[48] HRABDC	Bw, Retardo	x	

Un algoritmo que optimiza la utilización de la red, mientras ofrece garantías de calidad de servicio, denominado Q-BATE es propuesto en [49]. Presenta una nueva función de longitud del camino para perseguir tales objetivos. El algoritmo se basa en una fase de pre-análisis y estrategia de primero-profundidad para encontrar eficientemente el camino factible con longitud más pequeña. Q-BATE supera en cuanto a relación de admisión y rendimiento a otros con los cuales fue comparado.

BGMRA en [50], es un algoritmo de enrutamiento de LSP de ancho de banda garantizado para redes MPLS. Entre los objetivos del algoritmo están balanceo de cargas de tráfico a través de caminos sub-utilizados con el fin de reducir la congestión de la red, optimizar la utilización de recursos de la red usando el algoritmo Dijkstra y minimizar niveles de interferencia entre origen-destino para reservar más recursos para futuras demandas de ancho de banda. En los experimentos realizados se observa que BGMRA tiene mejor rendimiento en redes complejas en cuanto a la razón de bloqueo.

Proponen un algoritmo híbrido denominado HMTA (*Hybrid MPLS tunneling Algorithm*) en [51], el cual comprende de técnicas de diferenciación de ancho de banda y retardo como también con base en bits de prioridad contenidos en cada paquete. La diferenciación de enlaces está basada en umbrales de ancho de banda y retardo, lo cual es llamado también como información de estado de enlace. La diferenciación es hecha para reducir la probabilidad de bloqueo y el número de intercambios de estados de calidad de servicio que se llevan a cabo resultando en incremento de sobrecarga de QoS.

En la tabla III, se resumen los algoritmos presentados en esta categoría, las restricciones utilizadas y los objetivos involucrados.

TABLA III
ESPECIFICACIÓN DE LOS ALGORITMOS QUE CONTRIBUYEN AL SOPORTE DE INGENIERÍA DE TRAFICO Y CALIDAD DE SERVICIO

Aproximación	Restricciones	Objetivo
[49] Q-BATE	Longitud del camino	Utilización eficiente de los recursos QoS
[50] BGMRA	Bw	Balanceo de Carga Utilización eficiente de los recursos Minimizar niveles de interferencia
[51] HMTA	Bw, Retardo	Probabilidad de Bloqueo Utilización Eficiente de los recursos QoS

III. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se presentó una visión general sobre las diferentes propuestas existentes de algoritmos de enrutamiento basado en restricciones, que han sido publicados por investigadores, buscando aportar soluciones que resuelvan el problema del enrutamiento convencional de Internet. Como resultado del estudio, estas propuestas se organizaron en tres categorías que corresponden a las problemáticas actuales en las redes de nueva generación, que son: el soporte de calidad de

servicio, de ingeniería de tráfico y los híbridos que dan soporte tanto a ingeniería de tráfico como a QoS. Este estudio encontró que la mayor parte de estas propuestas son modificaciones a los algoritmos involucrados en el enrutamiento convencional, donde los más utilizados son Dijkstra y Bellman Ford. Siendo el primero en el que se enfocaron la mayoría de estas propuestas.

En la literatura también se encontró que los algoritmos basados en restricciones cuyos objetivos apuntan al soporte de calidad de servicio se enfocan en resolver ya sea el problema de enrutamiento MCP o MCOP y sus restricciones involucran retardos, jitter, pérdida de paquetes, ancho de banda y costos. Por otro lado, los algoritmos encontrados cuya meta es el soporte de ingeniería de tráfico, apuntan principalmente al balanceo de carga, enrutamiento multicamino, mejor utilización de los recursos y minimización del costo de enrutamiento. Por otro lado, en cuanto a la categoría de híbridos en este artículo, se describieron solo aquellas propuestas que en la literatura encontrada confirman sus objetivos tanto hacia el soporte de calidad de servicio como el de ingeniería de tráfico. Sin embargo, aunque no lo enfatice la literatura algunos algoritmos de los presentados en la segunda categoría (para el soporte de QoS) y que alguna de sus restricciones involucra el ancho de banda, podrían ser considerados a pertenecer en la tercera categoría de híbridos, debido a que de alguna manera también contribuyen a evitar congestión y a utilizar mejor los recursos las cuales son metas de la ingeniería de tráfico.

Aunque no es objetivo de este artículo el estudio de la complejidad de los algoritmos CBR, es importante resaltar que la mayor preocupación de los algoritmos basados en restricciones es su complejidad computacional. Y es importante resaltar que este es un tema que aún sigue abierto y que genera un gran desafío de seguir proponiendo soluciones que apunten a alguna de las categorías presentadas en este documento; teniendo en cuenta las tendencias emergentes y los nuevos servicios que crecen con gran rapidez. Trabajos futuros podrían estar enfocados a propuestas que permitan la provisión de ingeniería de tráfico y calidad de servicio con nuevas arquitecturas trabajando con IPv6.

Para finalizar, es importante resaltar que el problema del enrutamiento del camino más corto en internet sigue siendo un tema abierto, que permite seguir aportando soluciones mediante los algoritmos basados en restricciones. Por tanto, el estudio presentado es un aporte muy valioso para la investigación de nuevas aproximaciones de algoritmos basados en restricciones en cualquiera de las categorías mencionadas.

REFERENCIAS

- [1] D. Medhi, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, San Francisco, EE.UU: Morgan Kaufmann, 2007.
- [2] S. Floyd and M. Allman, "Comments on the Usefulness of Simple Best-Effort Traffic," *IETF RFC5290*, 2008.
- [3] Y. Ossama and S. Fahmi, "Constraint-Based Routing in the Internet: Basic Principles and Recent Research," *IEEE Communications Surveys*, vol. 5, no. 1, pp. 2-13, 2003.
- [4] F. Kuipers, P. Van Mieghem, T. Korkmaz and M. Krunz, "An Overview of Constraint-Based Path Selection Algorithms for QoS Routing," *IEEE Communications Magazine*, pp. 50-55, 2002.
- [5] P. Nayak and G. R. Murthy, "Survey on Constrained Based Path Selection QoS Routing Algorithms: MCP and MCOP Problems," *Journal of Information Systems and Communication*, pp. 384-390, 2013.
- [6] M. Kodialam y T. V. Lakshman, «Minimum interference routing of bandwidth guaranteed tunnels with MPLS traffic engineering applications.» *IEEE Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. INFOCOM 2000*, vol. 2, pp. 884 - 893, 2000.
- [7] A. Karaman, "Constraint-Based Routing in Traffic Engineering," *Computer Networks*, pp. 49-54, 2006.
- [8] D. Awduche y e. al, « Overview and Principles of Internet Traffic Engineering.» *IETF RFC3272*, 2002.
- [9] L. Y. Becerra and J. Padilla, "Estudio de Propuestas para Soportar Ingeniería de tráfico en Internet," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 6, no. 11, pp. 53-76, 2012.
- [10] E. Rosen, A. Viswanathan and R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture," *IETF RFC3031*, 2001.
- [11] R. Guerin, A. Orda and D. Williams, "QoS routing mechanisms and OSPF extensions," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1903-1908, 1997.
- [12] Z. Wang and J. Crowcroft, "Quality-of-Service Routing for Supporting Multimedia Applications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vols. Vol. 14,, no. Issue 7, pp. pp.1228--1234, 1996.
- [13] J. A. Khan and H. M. Alnuweir, "A Fuzzy Constraint-Based Routing Algorithm for Traffic Engineering," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1366-1372, 2004.
- [14] S. Suri, M. Waldvogel, D. Bauer and P. Ramesh Warkhede, "Profile-based routing and traffic engineering," *Computer Communications*, pp. 351-365, 2003.
- [15] J. Wang, S. Patek, H. Wang and J. Liebeherr, "Traffic Engineering with AIMD in MPLS Networks," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 192-210, 2002.
- [16] J. C. d. Oliveira, C. Scoglio, I. F. Akyildiz and G. Uhl, "New preemption policies for DiffServ-aware traffic engineering to minimize rerouting in MPLS networks," *Journal IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 733-745, 2004.
- [17] H. Y. Cho, J. Y. Lee y B. C. Kim, «Multi-path Constraint-based Routing Algorithms for MPLS Traffic Engineering.» *IEEE International Conference on Communications*, 2003.
- [18] J. Tang, C. Siew and G. Feng, "Parallel LSPs for constraint-based routing and load balancing in MPLS networks," *IEEE Proceedings - Communications*, vol. 152, no. 1, pp. 6-12, 2005.
- [19] E.-S. M. El-Alfy, «Flow-Based Path Selection for Internet Traffic Engineering with NSGA-II.» *IEEE 17th International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 621 - 627, 2010.
- [20] Y. Zeng and Y. Luo, "A Multi-Constrained Routing Optimization Algorithm in the IP Networks," *11th International Conference on Natural Computation (ICNC) IEEE*, pp. 314 - 318, 2015.
- [21] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, and y T. Meyarivan, «A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA-II.» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, n° 2, p. 182-197., 2002.
- [22] P. V. Mieghem and F. A. Kuipers, "Concepts of exact QoS routing algorithms," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 5, pp. 851 - 864, 2004.
- [23] T. Korkmaz and M. M. Krunz, "Routing multimedia traffic with QoS guarantees," *IEEE Transactions on Multimedia* , vol. 5, no. 3, pp. 429 - 443, 2003.
- [24] J. M. Jaffè, "Algorithms for finding paths with multiple constraints," *Networks: An International Journal*, pp. 95-116, 1984.
- [25] A. Iwata, R. Izmailov, D.-S. Lee, B. Sengupta, G. Ramamurthy and H. Suzuki, "ATM routing algorithm with multiple QoS requirements for multimedia," *IEICE Transactions and Communications*, pp. 999-1006, 1996.
- [26] H. D. Neve and P. V. Mieghem, "TAMCRA: A Tunable Accuracy Multiple Constraints Routing Algorithm," *Computer Communications*, pp. 667-679, 2000.
- [27] P. V. Mieghem, H. D. Neve and F. A. Kuipers, "Hop-by-Hop Quality of Service Routing," *Computer Networks*, pp. 407-423, 2001.
- [28] S. Chen and K. Nahrstedt, "On Finding Multi-constrained Paths," *IEEE*, pp. 874-879, 1998.
- [29] T. Korkmaz and M. Krunz, "A randomized algorithm for finding a

- path subject to multiple QoS constraints,” *Computer Networks*, pp. 251-268, 2001.
- [30] T. Korkmaz and M. Krunz, “Multi Constrained Optimal Path Selection,” *IEEE INFOCOM*, pp. 834-843, 2001.
- [31] G. Liu and K. Ramakrishnan, “A*Prune: an algorithm for finding K shortest paths subject to multiple constraints,” *IEEE INFOCOM*, pp. 743-749, 2001.
- [32] G. Feng, “The revisit of QoS routing based on non-linear Lagrange relaxation,” *International Journal of Communication Systems*, pp. 9-22, 2005.
- [33] Y. Li, J. Harms and R. Holte, “Fast Exact MultiConstraint Shortest Path Algorithms,” *Proceedings of IEEE ICC*, pp. 123-130, 2007.
- [34] S. Chen, M. Song and S. Sahni, “Two Techniques for Fast Computation of Constrained Shortest Paths,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 105-115, 2008.
- [35] W. Liu, W. Low and Y. Fang, “An efficient quality of service routing algorithm for delay-sensitive,” *Computer Networks*, no. 47, pp. 87-104, 2005.
- [36] M. Baradaran and M. H. Yaghmaee, “A Constraint Based Routing Algorithm For Multimedia Networking,” *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 33, no. 2, p. 8, 2007.
- [37] P. Prakash and S. Selvan, “A Feasible Path Selection QoS Routing Algorithm with two Constraints in Packet Switched Networks,” *World Academy of Science: Engineering and Technology*, pp. 444-450, 2008.
- [38] G. Y. Handler y I. Zang, «A dual algorithm for the constrained shortest path problem,» *Networks*, pp. 293-310, 1980.
- [39] L. Guo and I. Matta, “Search space reduction in QoS routing,” *Computer Networks*, pp. 73-88, 2003.
- [40] X. Yuan and X. Liu, “Heuristic algorithms for multi-constrained quality of service routing,” *IEEE INFOCOM*, pp. 844-853, 2001.
- [41] F. A. Kuipers and P. V. Mieghem, “Bi-directional Search in QoS Routing,” *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 102-111, 2003.
- [42] T. Anjali and C. Scoglio, “Traffic Routing in MPLS Networks Based on QoS Estimation and Forecast,” *IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 2, pp. 1135 - 1139, 2004.
- [43] H. Lin, D. Xue-wu and X. Jin, “Multi-Constrained Routing Based on Tabu Search,” *IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 157 - 161, 2007.
- [44] G. Vincent and T. Sasipraba, “An Efficient Routing Algorithm for Improving the QoS in Internet,” *International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT)*, *International Conference on*, pp. 381 - 387, 2010.
- [45] S.-M. Dragos, “Hierarchical QoS Routing by Using Multi-Constrained Macro-Routing,” *7th International Conference on Next Generation Web Services Practices (NWeSP)*, pp. 105 - 112, 2011.
- [46] H. Cui, J. Li, X. Liu and Y. Cai, “Particle Swarm Optimization for Multi-constrained Routing in Telecommunication Networks,” *I.J. Computer Network and Information Security*, pp. 10-17, 2011.
- [47] B. Zhang, J. Hao and H. T. Mouftah, “Bidirectional Multi-Constrained Routing Algorithms,” *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*, vol. 63, no. 9, pp. 2174 - 2186, 2014.
- [48] C. T. PhuongThanh, H. H. Nam and T. C. Hung, “A heuristic algorithm for bandwidth delay constrained routing,” *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, pp. 99 - 104, 2014.
- [49] S. Avallone and G. Ventre, “Q-BATE: A QoS Constraint-based Traffic Engineering Routing Algorithm,” *IEEE-2nd Conference on Next Generation Internet Design and Engineering*, p. 8pp., 2006.
- [50] S. Kulkarni, R. Sharma and I. Mishra, “New Bandwidth Guaranteed QoS Routing Algorithm for MPLS Networks,” *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 384-389, 2012.
- [51] V. Kher, A. Arman and D. S. Saini, “Hybrid evolutionary MPLS Tunneling Algorithm based on high priority bits,” *International conference on futuristic trend in computational analysis and knowledge management*, pp. 495-499, 2015.



Line Yasmín Becerra Sánchez, Es Ingeniera Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana (1999). Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana (2005). Magíster de la Universidad Pontificia Bolivariana (2009). Actualmente es estudiante de doctorado en ingeniería en el área de telecomunicaciones de la misma universidad, es docente de la Universidad Católica de Pereira y Pertenece al Grupo de Investigación Entre Ciencia e Ingeniería de la Universidad Católica de Pereira. Sus áreas de interés son: Ingeniería de tráfico, Enrutamiento, Redes Móviles, Simulación de Redes, Internet, IPv6, MIPv6, HMIPv6.



Jorge Leonardo Bañol, Nació en Riosucio, Caldas, Colombia el 2 de noviembre de 1989. Es Ingeniero de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Pereira-UCP. Trabaja en el área de Gestión Tecnológica de la Información de la Biblioteca UCP Coordinador de GTI. Sus áreas de interés son: Telecomunicaciones, Ingeniería de tráfico, Redes de Datos, Ingeniería del Software.



Jhon Jairo Padilla Aguilar, Es ingeniero Electrónico de la Universidad del Cauca (1993). Obtuvo su grado de Maestría en Informática de la Universidad Industrial de Santander (1998) y es Doctor en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña (2008). Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana y coordina el Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL) de dicha universidad. Sus áreas de interés son: Ingeniería de tráfico, Internet, Calidad de Servicio en Internet, redes inalámbricas, IPv6.