

Estudio de la movilidad IP en redes de acceso inalámbricas MPLS con ingeniería de tráfico

J. Carmona-Murillo, J. L. González-Sánchez, M. Domínguez-Dorado
Departamento de Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos (DISIT)
Universidad de Extremadura
Cáceres, SPAIN
{jcarmur, jlgs, mdomdor}@unex.es

Abstract— Las redes inalámbricas son una de las tecnologías de comunicaciones más demandadas en la actualidad. Mobile IPv6 es un protocolo de gestión de la movilidad desarrollado por el IETF (*Internet Engineering Task Force*) para ofrecer movilidad transparente a los nodos en Internet, que se ha convertido en el núcleo de los sistemas *All-IP* de 4G. Sin embargo, Mobile IPv6 tiene aún varias limitaciones que están frenando su despliegue global. Para solventarlos, muchas organizaciones están proponiendo el funcionamiento conjunto del protocolo Mobile IPv6 y MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*). En este artículo realizamos un repaso de los principales trabajos relacionados con el soporte de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) en redes Mobile IP-MPLS y proponemos una arquitectura que computa caminos MPLS articulados y permite la provisión de QoS en redes Mobile IPv6 a través de mecanismos de ingeniería de tráfico. Se presentan, además, restricciones de QoS que deben tenerse en cuenta en un entorno de movilidad y que permiten optimizar el rendimiento global de la red.

Keywords- Mobile IPv6, MPLS, ingeniería de tráfico, restricciones de QoS, arquitectura articulada.

I. INTRODUCCIÓN

En el diseño de las redes inalámbricas de próxima generación (NGWN, *Next Generation Wireless Networks*) dos objetivos sobresalen por encima del resto. En primer lugar, mantener la conectividad durante el movimiento de los usuarios entre redes heterogéneas. En segundo lugar, ofrecer a los nodos móviles un nivel de QoS similar mientras van moviéndose de una red a otra.

El escenario que se plantea con las redes inalámbricas de cuarta generación (4G) supone la coexistencia de distintas arquitecturas y tecnologías de acceso inalámbricas que se complementan. Esta heterogeneidad hace necesaria una infraestructura común que pueda interconectar múltiples redes de acceso diferentes. El protocolo IP es el candidato ideal para convertirse en el núcleo de los sistemas *All-IP* [1]. Así, para el funcionamiento conjunto de tecnologías de comunicaciones diferentes, se han desarrollado técnicas de gestión de movilidad inteligentes capaces de ofrecer movimiento global a través de redes heterogéneas [2]. Los protocolos de gestión de la movilidad resuelven el primero de los retos planteados anteriormente, ya que ofrecen movilidad transparente a los nodos de la red durante el movimiento entre distintas subredes.

La gestión de la movilidad está formada por dos componentes principales. En primer lugar la gestión de la ubicación (*location management*), que permite descubrir el punto de conexión actual a la red de un nodo móvil para poder hacerle llegar la información. En segundo lugar, la gestión del movimiento (*handover management*), que permite a una red mantener la conexión cuando un nodo móvil realiza un movimiento y cambia su punto de conexión a la red [3].

De entre todos los protocolos de gestión de movilidad existentes, el que se está desarrollando con más fuerza es Mobile IPv6 [4] (en adelante MIPv6), que ha sido propuesto por el IETF. Una de las principales limitaciones de este protocolo es la alta latencia consumida en el proceso de *handover* [5]. Este problema ha sido tratado en muchos trabajos y queda fuera del objetivo de este artículo.

Por otra parte, y con respecto al segundo de los retos, es necesario que durante los movimientos de los nodos móviles éstos reciban una calidad de servicio similar en ambas redes para que el usuario no perciba una degradación en el servicio que está recibiendo. La provisión de QoS en la red visitada requiere de mecanismos de ingeniería de tráfico que puedan mapear los atributos específicos de QoS de una red a otra [6]. Este requerimiento es nuevo en las redes de comunicaciones móviles ya que, aunque la QoS es un tema que ha sido muy estudiado en las redes fijas, las necesidades que imponen los nodos móviles hacen que los mecanismos tradicionales tengan que ser adaptados a un entorno de movilidad.

Actualmente existen varios paradigmas que abordan el soporte de QoS en Internet. Los servicios integrados (IntServ) y los servicios diferenciados (DiffServ) son dos tecnologías que tratan el problema de la distinción de los servicios mediante la reserva de recursos. Por otra parte, MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) con ingeniería de tráfico (TE) es una tecnología propuesta para mejorar el rendimiento del modelo de datagramas de Internet en términos de gestión y entrega.

Hoy en día, MPLS es la tecnología que se utiliza en los *backbone* de red ya que es una solución que mejora el rendimiento en la entrega de paquetes y permite crear caminos en los que se garantiza la QoS. Recientemente, el interés por utilizar MPLS junto con Mobile IP se basa en las posibilidades que puede ofrecer MPLS a la hora de reservar recursos, utilizar mecanismos de ingeniería de tráfico y permitir un *handover* más rápido [7].

Con estas premisas, en este artículo presentamos una visión general de la gestión de la movilidad y la QoS en redes de acceso inalámbricas basadas en MPLS. Además, se presenta un trabajo preliminar de investigación en el que se propone una arquitectura de movilidad basada en MPLS con ingeniería de tráfico. Se describen, además, las restricciones y parámetros que pueden resultar más determinantes a la hora de ofrecer QoS en una red cuyos nodos finales son terminales móviles.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la segunda sección se presenta el trabajo relacionado y comparamos nuestro trabajo con los que existen en la literatura. El apartado tercero se centra en las restricciones y parámetros de QoS que hay que tener en cuenta en un entorno de movilidad. La sección cuarta presenta la arquitectura de movilidad propuesta en este trabajo. Finalmente en el quinto apartado aparece el trabajo futuro.

II. TRABAJO RELACIONADO

A. Mobile IP.

La convergencia hacia arquitecturas “All-IP” en las redes inalámbricas de próxima generación, donde todo el tráfico (datos, control, etc.) es transportado en paquetes IP, ha hecho que el IETF adopte Mobile IP como el protocolo de referencia para el soporte de movilidad en Internet [8].

Mobile IP se ha diseñado en dos versiones siguiendo las dos ramas de desarrollo de IP. En la fase de diseño de IPv4 no se consideró la movilidad, por tanto Mobile IPv4 es un añadido para que las redes IPv4 soporten esta característica. Sin embargo, MIPv6 es la solución de la capa de red sobre la que se basan la mayor parte de propuestas de movilidad, ya que IPv6 tuvo en cuenta esta capacidad desde el diseño inicial, evitando problemas que aparecían en la versión anterior. MIPv6 introduce nuevos términos y entidades funcionales que se observan en la Fig.1 y que se describen a continuación.

El nodo móvil (*Mobile Node*, MN) es el elemento principal del protocolo y corresponde al usuario que se mueve a través de Internet; la red origen (*Home Network*, HN) es aquella desde donde parte el nodo móvil y cuyo prefijo coincide con el de la dirección permanente (*Home Address*, HoA) del nodo; el agente origen (*Home Agent*, HA) es un router IPv6 situado en la red origen responsable de interceptar y de hacer llegar al nodo móvil aquellos paquetes dirigidos a él mientras se encuentra fuera de su red origen; la red visitada (*Foreign Network*, FN) es otra red distinta a la origen en la que se encuentra actualmente el nodo móvil y en la cual ha adquirido una dirección IP auxiliar (*Care-of Address*, CoA) a través de uno de los mecanismos clásicos de IPv6; el nodo con el que el nodo móvil se comunica se denomina CN (*Correspondant Node*); finalmente, la caché de vínculos (*Binding Cache*) es una estructura de datos que juega un papel importante en el funcionamiento del protocolo para tareas de localización, ya que mantiene las correspondencias entre la dirección permanente de un nodo móvil y su dirección auxiliar actual.



Figura 1. Entidades funcionales en MIPv6

MIPv6 tiene 2 modos de operación: Funcionamiento básico (o túnel bidireccional) y funcionamiento optimizado. La diferencia fundamental es el camino que siguen los paquetes entre los dos extremos de la comunicación (nodo móvil y CN). Con el funcionamiento básico, se establece un túnel entre el nodo móvil y su agente origen y la información sigue ese camino, mientras que con el funcionamiento optimizado los paquetes IP se envían directamente de uno a otro. Sin embargo, en este caso el CN debe tener soporte para MIPv6, además de ser necesaria la ejecución de mecanismos adicionales de seguridad como RR (*Return Routability*).

Cuando un nodo móvil cambia su punto de conexión a la red al realizar un movimiento puede que, durante un corto periodo de tiempo, la comunicación se interrumpa y se aumente el retardo en la entrega de paquetes o, incluso, que se pierdan los datagramas enviados al nodo móvil. Este proceso de movimiento de una red a otra se denomina *handover*, *handoff* o, simplemente, traspaso. Proporcionar un *handover* transparente para un nodo móvil que se mueve a una nueva subred IP mientras su sesión permanece activa, junto con mantener la QoS durante este movimiento, son los principales objetivos del protocolo MIPv6.

B. MPLS-TE

MPLS (Multi-Protocol Label Switching) [9] es una técnica de reenvío de tráfico. Hasta ahora se ha utilizado ampliamente en redes troncales y ofrece orientación a circuitos a redes que no lo son, como las redes IP. Se le considera una tecnología de nivel 2 al estar una capa por debajo del nivel de red. MPLS permite establecer un camino llamado LSP desde un extremo a otro de un dominio, por el que el tráfico va a ser enviado. Según las características del tráfico y de la situación de la red, este camino puede ser adaptado en función de las necesidades y de los recursos de la red.

MPLS con ingeniería de tráfico (MPLS-TE) [10] tiene un funcionamiento similar a MPLS con la diferencia que los protocolos de encaminamiento interior (OSPF e IS-IS) han sido extendidos para soportar la ingeniería de tráfico. Del mismo modo, el funcionamiento de RSVP también ha sido extendido para permitir a MPLS la creación de túneles LSP con ingeniería de tráfico.

Por tanto, cuando nos referimos a MPLS-TE son varias las tecnologías que funcionan de manera conjunta. Además de MPLS se necesita un protocolo de encaminamiento interior y un protocolo de reserva de recursos, cada uno con extensiones de ingeniería de tráfico. La situación más común es encontrarnos: MPLS, RSVP-TE [11] y OSPF-TE [12], aunque también podría ser MPLS, RSVP-TE e IS-IS-TE [13] si en lugar de utilizar el protocolo OSPF-TE, el encaminamiento se calcula con el protocolo *Intermediate System to Intermediate System* con extensiones de ingeniería de tráfico. De los dos protocolos de encaminamiento interior, OSPF-TE es el más utilizado, por esta razón, éste es el protocolo considerado a lo largo de este trabajo. A continuación se explica brevemente cada uno de los componentes de MPLS-TE y su funcionamiento conjunto:

- MPLS: Se encarga de clasificar el tráfico, reparte las etiquetas y organiza los FEC (*Forwarding Equivalence Class*).
- RSVP-TE: Reserva los recursos necesarios y crea los túneles LSP rellenando las tablas FIB (*Forwarding Information Base*) de cada conmutador MPLS de la red.
- OSPF-TE: Ofrece a MPLS la capacidad de calcular rutas con restricciones de TE. Rellena las tablas de encaminamiento de cada router.

El funcionamiento conjunto de una red MPLS con ingeniería de tráfico es la siguiente: Un LER (*Label Edge Router*) utiliza OSPF-TE para calcular una ruta con restricciones de ingeniería de tráfico. Tras calcular esta ruta, las tablas de encaminamiento se rellenan con la información de nivel 3 que se obtiene del protocolo de encaminamiento. Una vez calculada la ruta, se utiliza RSVP-TE para reservar recursos en el camino calculado por OSPF-TE y para repartir las etiquetas con las que se rellenan las tablas FIB, de forma que el túnel LSP está creado. El LER finalmente clasifica el tráfico, lo etiqueta y lo reenvía por el túnel LSP establecido (Fig 2).

Una de las ventajas fundamentales que se consiguen con la extensión de ingeniería de tráfico en OSPF es que se extiende el número de restricciones a utilizar durante cálculo de las rutas.

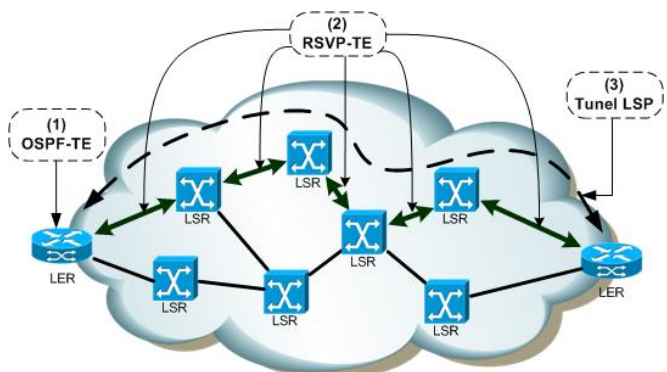


Figura 2. Funcionamiento básico de MPLS-TE

C. MPLS-TE y MIPv6

Desde que se comenzaron a desarrollar los primeros protocolos de gestión de la movilidad, uno de los principales retos ha sido mantener la conectividad durante el movimiento del usuario. Sin embargo, desde nuestro punto de vista, un protocolo de gestión de la movilidad eficiente debe ser capaz, además, de proporcionar los recursos que el usuario espera de la red.

Con este planteamiento, existen trabajos que tratan de ofrecer calidad de servicio en redes de comunicaciones móviles, extendiendo los mecanismos que resuelven esta situación en las redes cableadas. Los primeros trabajos que trataban de ofrecer QoS en redes móviles se centraron en extensiones a RSVP [14-18]. Hasta ahora todas estas propuestas suponen que existe un agente de movilidad en la red visitada, es decir, se basan en soluciones para MIPv4. Con respecto a los servicios diferenciados, también se han realizado propuestas como [19], que introduce 3 nuevos mensajes ICMP, mientras que [20] y [21] describen otra arquitectura DiffServ para usuarios MIP y se basan en un *Bandwidth Broker* (BB) para movimientos intradominio.

Sin embargo, MPLS es la tecnología que actualmente, trata de forma más eficiente los recursos de la red, ya que proporciona una solución que mejora el rendimiento en el reenvío de paquetes y garantiza la QoS en determinados caminos. Con respecto a la Mobile IP, MPLS puede ser visto como una tecnología de *tunneling* que supera las técnicas propuestas en Mobile IP (por ejemplo IP sobre IP) o como una tecnología con la que mejorar el *handover* de Mobile IP. Por ejemplo, el problema del establecimiento de LSPs tras un *handover* es, más o menos, similar al problema de restaurar las reservas en RSVP [22].

Por esto, la tendencia que se está siguiendo es la de introducir MPLS en entornos inalámbricos [7]. Los principales organismos de normalización como IETF, ITU-T (*Internacional Union's Telecommunication Standardization Sector*) o el MPLS Forum están trabajando en propuestas en las que Mobile IP y MPLS interactúan en un entorno de movilidad.

En el caso de ITU-T, Mobile IP sobre MPLS ha sido elegido como el núcleo de la próxima generación del Internet móvil [23]. La recomendación [24] describe las posibilidades de movilidad, basadas en MPLS, en las redes de próxima generación (NGN).

Desde el MPLS Forum se ha estado trabajando en la primera especificación integral para solventar el principal obstáculo en el despliegue de los servicios móviles y que han definido como el *Mobile Backhaul*. (Fig. 3). En esta especificación, se proporciona un entorno basado en MPLS para los operadores móviles y se establece un conjunto de requisitos para el acceso inalámbrico y para el total de redes que utilizan diferentes interfaces de radio y protocolos como GSM, UMTS, HSPA, LTE o Mobile WiMAX. [25].

Por su parte, algunos grupos de trabajo del IETF han estado trabajando en propuestas relacionadas con la movilidad y MPLS desde hace varios años [26-29], lo que da muestras del interés que suscita la inclusión de MPLS en los entornos de movilidad.

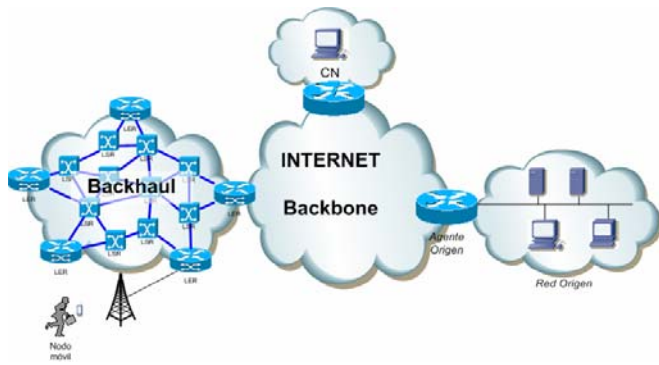


Figura 3. Mobile Backhaul

Además del trabajo realizado por las organizaciones de estandarización, existen varios trabajos de investigación que tratan este tema y que utilizan los mecanismos propios de MPLS para ofrecer una garantía en la QoS, mejora en la señalización y una baja interrupción durante el proceso de *handover*.

El trabajo que se presenta en este artículo tiene varios aspectos que lo diferencian con respecto al trabajo previo expuesto. Estos puntos son:

- Hasta ahora la mayor parte de las propuestas se han basado en Mobile IPv4 como protocolo de gestión de la movilidad, considerando que existe un agente de movilidad (FA, *Foreign Agent*) en la red visitada. En este trabajo nos basamos en Mobile IPv6.
- La ingeniería de tráfico resulta fundamental para realizar tareas de control de los recursos de la red, capacidades de reencaminamiento o de optimización de LSPs. En este trabajo la ingeniería de tráfico en la red MPLS juega un papel fundamental.
- Al trabajar con ingeniería de tráfico en la red MPLS, se hace un repaso de las restricciones que podrían resultar más interesantes en una red de comunicaciones móviles. Esta discusión no es fácil de encontrar en los trabajos previos, sin embargo una red móvil tiene características que la diferencian de una red cableada y, por tanto, es necesario discutir acerca de los parámetros y restricciones que deben utilizarse en OSPF-TE para definir un túnel LSP en un entorno de movilidad.

En el siguiente apartado se identifican las restricciones más adecuadas y las necesidades de QoS a resolver para una red basada en MPLS-TE en un entorno de movilidad.

III. RESTRICCIONES DE INGENIERÍA DE TRÁFICO Y NECESIDADES DE QoS EN UN ENTORNO DE MOVILIDAD IP

Como se identificó en la primera sección del artículo, las redes móviles de próxima generación requieren que la red ofrezca una QoS estricta. Para poder garantizar estas demandas, es necesario establecer caminos con los recursos necesarios, de forma que se pueda controlar el movimiento del tráfico para que no fluya por caminos diferentes. MPLS permite que todo el flujo siga un mismo camino, ya que se puede crear un LSP

cuando se necesite, del mismo modo que se puede restringir el *throughput* de dicho flujo cuando sea necesario.

Hasta ahora, gran parte de la investigación en las redes MPLS se ha centrado en el *routing* de los LSP, es decir, en cómo se encamina el LSP a lo largo de la red [30]. Sin embargo, son pocos los trabajos que plantean la posibilidad de que los nodos finales sean móviles.

De este modo, resulta necesario computar caminos en la red MPLS, para un determinado flujo de tráfico, basándonos en diferentes restricciones. Muchas de las aplicaciones multimedia actuales no sólo necesitan del control del *throughput*, sino que además requieren una garantía en otros parámetros de QoS como el retardo (*delay*), la variabilidad del retardo (*jitter*), la tasa de pérdida de paquetes (*packet loss rate*), disponibilidad del servicio (*service availability*) y conservación de la secuencia por flujo (*per flow sequence preservation*).

Estas restricciones han sido muy utilizadas para determinar caminos óptimos en redes MPLS, siempre considerando que los nodos finales de donde parte el tráfico o a donde llega son nodos fijos. Sin embargo, esta situación está cambiando y muchos de los terminales extremos de la conexión están en continuo movimiento. Parece claro que la movilidad impone ciertas restricciones propias, bien debido a la naturaleza de las tecnologías inalámbricas o bien para limitar las debilidades de los protocolos de gestión de la movilidad, es decir, la alta latencia del *handover*, el *overhead* de la señalización o la pérdida de paquetes.

En este apartado se presentan las principales restricciones que hay que tener en cuenta a la hora de computar caminos óptimos en una red MPLS en la que los nodos finales van a ser móviles y el protocolo de la gestión de la movilidad que gobierna la comunicación es Mobile IPv6. Este estudio es importante para poder formular el problema de la provisión de la QoS mediante programación lineal [31], de forma que se encuentre una solución óptima a un problema tipo MDP (*Markov Decision Process*) [31]. El paso previo a realizar esta formulación matemática ha sido determinar las restricciones específicas en un entorno de movilidad para ofrecer QoS.

Por otra parte, dado que estaremos tratando con QoS en Mobile IPv6, es necesario identificar las recomendaciones que se han dado desde organizaciones como el IETF. El documento [32], establece los requisitos principales impuestos sobre una solución que ofrezca QoS para Mobile IP. Así que en primer lugar analizamos estos requisitos.

Cuando un nodo móvil, utilizando el protocolo Mobile IP, realiza un *handover* a un nuevo router de acceso (AR, *Access Router*), el camino que atraviesa el flujo de paquetes en la red puede cambiar. Este cambio puede estar limitado a una pequeña parte del camino cerca de uno de los extremos, o puede suponer un cambio extremo a extremo. Además los paquetes que pertenecen a la sesión en curso pueden comenzar a utilizar la nueva dirección auxiliar CoA después del *handover* y, por tanto, puede que algunas de las funciones de los nodos que pertenecen al camino que no ha sido alterado no reconozcan dicha dirección. Por último, hay que tener en cuenta también el problema de que el *handover* se produzca entre subredes que estén bajo distintos dominios

administrativos. En un escenario como este, es necesario establecer un mecanismo de QoS para el flujo de paquetes en el nuevo camino.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el servicio de Internet puede ser proporcionado únicamente por un ISP, pero generalmente son necesarios varios ISP concatenados. Cada proveedor puede tener su propia arquitectura de red y su política. Las soluciones de QoS extremo a extremo no sólo deben considerar la provisión local de QoS, sino los acuerdos de QoS entre los distintos sistemas autónomos. Si todos los proveedores de servicio ofrecen QoS local y se establecen acuerdos entre ellos, se puede garantizar la QoS extremo a extremo. De forma similar, un usuario móvil puede utilizar QoS extremo a extremo si la red móvil soporta QoS y existen acuerdos con otras redes [33].

Según el documento [32], al resolver el problema de la QoS para Mobile IP, se definen cuatro pasos:

- Lista de requisitos que MIP establece para los mecanismos de QoS.
- Evaluar las soluciones actuales de QoS en IP para esos requisitos.
- Decidir si las soluciones actuales tienen que ser extendidas o si hay que definir algunas nuevas.
- Dependiendo del resultado del paso anterior, definir nuevas soluciones o corregir las ya existentes.

El documento [32] aborda tan sólo el primero de los puntos anteriores y, por tanto, define los requisitos que debe cumplir una solución de QoS para Mobile IP.

- Requisitos del comportamiento:
 - Minimizar la interrupción de la QoS en un handover.
 - Limitar alcance del re-establecimiento de la QoS en el segmento del camino afectado.
 - Liberar, tras el handover, el estado de la QoS (si lo había) en el camino antiguo.
- Requisitos de interoperabilidad:
 - Interoperabilidad con protocolos de movilidad.
 - Interoperabilidad con paradigmas de QoS heterogéneos.
- Otros requisitos:
 - Soporte de la QoS a través de múltiples caminos
 - Interacción con el nivel de enlace inalámbrico para el soporte de la QoS.

La solución de QoS para MIP debería satisfacer requisitos como escalabilidad, seguridad, conservación del ancho de banda inalámbrico, baja sobrecarga de procesamiento en los terminales, proporcionar facilidades para la autorización o el *accounting* y robustez ante fallos.

Si tenemos en cuenta los requisitos que plantea el IETF en este documento junto con los propuestos en otros trabajos, al final las restricciones de QoS que se utilicen para ofrecer los requisitos necesarios por cada usuario tienen que resolver los siguientes problemas:

- Problema de movilidad: Cuando un nodo móvil (utilizando Mobile IP) realiza un *handover* y cambia su router de acceso, el camino que atraviesan los paquetes del nodo móvil en la red pueden cambiar, por lo que una serie de paquetes se verán afectados.
- Problema del alto error de bit: El enlace inalámbrico es no fiable (la longitud óptima de paquetes tiene que ser pequeña).
- Problema de la limitación del ancho de banda inalámbrico: Normalmente, el ancho de banda de los enlaces inalámbricos que conectan al nodo móvil con la parte fija de la red es menor que los enlaces cableados, lo que supone una degradación del rendimiento, especialmente en las aplicaciones en tiempo real.
- Problema de la limitación de los recursos en el terminal: Los dispositivos móviles tienen una limitación de batería que tiene que ser gestionada de forma eficiente. La interfaz de red consume aproximadamente un 14% del total. El envío y la recepción de los paquetes consume batería y debe ser controlada, evitando el envío de excesivo tráfico de señalización.
- Problema del *tunneling* IP.

Para satisfacer estos requisitos, una de las propuestas de este trabajo es la inclusión de MPLS-TE y Mobile IP, que resuelve ya alguno de ellos por el propio funcionamiento de MPLS, sin embargo, para llegar a resolver otros es necesario que los túneles LSP que se creen sean óptimos. Las restricciones que se proponen a continuación [34] tienen como objetivo maximizar el rendimiento de la red y garantizar la QoS.

- Probabilidad de pérdida de paquetes durante el handover: Al tratar con esta restricción, en la n -ésima etapa, la probabilidad de pérdida durante el handover (P_{ph}) debe ser menor que el valor establecido. TP_{ph} representa la probabilidad de pérdida máxima permitida. Así, esta restricción puede ser formulada de la siguiente forma:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{n=0}^N P_{ph}(s_n) \tau_n}{\sum_{n=0}^N \tau_n} \leq TP_{ph}, (1)$$

donde τ_n es el intervalo de tiempo entre las etapas.

- *Throughput* medio asignado: Esta segunda restricción se refiere al *throughput* medio de la clase i (AB^i). Normalmente, una comunicación cambia su *throughput* durante el tiempo en el que se transmite la información, de forma que el *throughput* puede fluctuar para adaptarse al flujo de la transferencia.

Considerando que hay K clases en la red, una clase i utiliza velocidades entre $\{t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{iN_i}\}$ donde $t_{ij} < t_{i(j+1)}$ para $i=1, 2, \dots, K$ y $j=1, 2, \dots, N_i$, siendo N_i el mayor *throughput* que puede utilizarse para la clase i .

Si denominamos T_i al *throughput* asignado a la clase i , AB^i puede identificarse como el promedio de T_i/t_{iN_i} sobre todas las clases i .

$$AB^i = \text{media} \left\{ \frac{T_i}{t_{iN_i}} \right\} \quad (2)$$

Este valor debería ser mayor que el valor establecido TAB^i .

$$AB^i \geq TAB^i, \quad i=1, \dots, K \quad (3)$$

Así, utilizando estas restricciones, junto con las restricciones clásicas de QoS, se puede optimizar el rendimiento en el encaminamiento en una arquitectura de movilidad como la que se propone en este artículo, y que se describe en el apartado siguiente.

IV. ARQUITECTURA ARTICULADA DE MOVILIDAD BASADA EN MPLS

En esta sección presentamos una arquitectura diseñada para ofrecer un encaminamiento optimizado en una red MPLS, donde los nodos finales son dispositivos móviles que irán cambiando de subred durante el tiempo de la conexión. Tal y como se indicó al inicio del artículo, esta arquitectura forma parte de un trabajo de investigación en curso. Por tanto, en esta sección se muestra el diseño a alto nivel. Uno de los objetivos principales de la investigación es plantear mecanismos de encaminamiento con QoS sobre esta arquitectura utilizando técnicas de ingeniería de tráfico con las restricciones planteadas en el apartado anterior.

La base de esta arquitectura es considerar que el dominio que da servicio a los nodos móviles sea MPLS. En un entorno donde se producen gran cantidad de movimientos entre subredes, es común que un nodo móvil cambie de router de acceso y, por tanto, que el LSP que estuviera establecido se liberara y se creara otro hasta el nuevo router de acceso. El hecho de liberar un LSP y crear otro nuevo en cada movimiento resulta muy costoso y no parece ser la mejor solución cuando uno de los objetivos es minimizar el tiempo que tarda en reestablecerse la comunicación durante el proceso de *handover*.

Por esta razón, la posibilidad de que un túnel LSP tenga una parte fija y otra móvil que sea la que va modificándose en cada movimiento, sí que puede solventar muchas de las limitaciones que plantea Mobile IPv6 ya que el *handover* será mucho más rápido de forma que se minimiza la pérdida de paquetes durante el movimiento y la provisión de la QoS tan sólo se tendrá que renegociar en una parte del nuevo túnel. Por otra parte, al utilizar mecanismos de ingeniería de tráfico sobre la red MPLS, se van a poder aplicar distintas restricciones durante el cálculo de las rutas totales o parciales.

Así, este planteamiento es el que se muestra en la Fig. 4. En esta imagen, el dominio MPLS está delimitado por el Agente Origen (HA) que hace de LER de entrada (*ingress LER*) y por los router de acceso que dan servicio a los nodos móviles y que actúan como LER de salida (*egress LER*).

El LSP establecido para la comunicación es el que aparece con la línea más gruesa. A medida que el nodo móvil se va moviendo (siguiendo el camino que indica la línea discontinua inferior), habrá un momento en el que el router de acceso cambia, siendo necesario un nuevo camino desde el agente origen hasta dicho router de acceso. Ese camino podrá tener una parte común al LSP anterior y una parte nueva. Dos posibles tramos nuevos son los que aparecen con las líneas discontinuas (etiquetadas en la figura como Alternativa 1 y Alternativa 2). En función de la situación de la red y de las restricciones planteadas para la ingeniería de tráfico, las posibles alternativas serán evaluadas y los mecanismos de decisión que deben ser diseñados seleccionarán una de las alternativas que será la que forme parte del camino "articulado".

La generación del camino completo, la deseñalización de una parte de él en un movimiento y la creación de una nueva parte, que es la que denominamos sección articulada, sigue una estructura con forma de árbol, en la que el LER de entrada sería el nodo raíz y cada uno de los LER de salida actuarían como nodos hoja. Existen gran cantidad de algoritmos que se basan en estructuras arbóreas para tomar decisiones de encaminamiento. En este caso, el mecanismo de *backtracking* puede resultar fundamental para identificar la sección articulada del camino tras un movimiento.

La estructura articulada propuesta en este apartado plantea muchas posibilidades para continuar con el trabajo de investigación. En la siguiente sección se identifica el trabajo futuro a realizar.

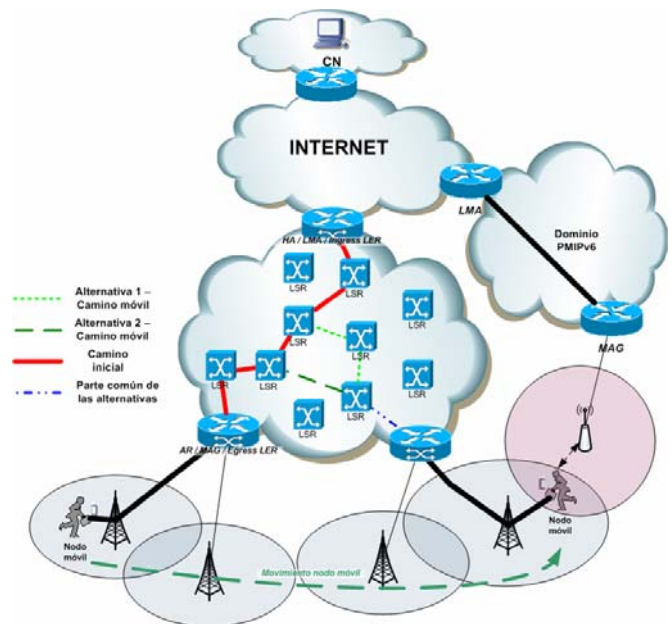


Figura 4 - Arquitectura MPLS - MIPv6 propuesta

V. TRABAJO FUTURO

Partiendo del estudio realizado acerca de la coexistencia de MPLS y Mobile IPv6, así como de la ingeniería de tráfico y las restricciones de QoS que puede imponer la movilidad en una arquitectura como la presentada en el apartado anterior, proponemos a continuación una serie de trabajos relacionados a realizar.

En primer lugar, el hecho de que sean los nodos de entrada MPLS los que se encarguen de computar las rutas, cada vez con más restricciones puede llegar a suponer una carga adicional de cómputo que afecta negativamente al proceso de *handover*. Desde hace varios años, el IETF está desarrollando una nueva técnica que libere del cómputo de LSPs a los nodos MPLS. La arquitectura PCE (*Path Computation Element*) [35] es el resultado de este trabajo.

La arquitectura PCE se adapta muy bien al diseño articulado, propuesto en el apartado anterior ya que uno de sus modos de funcionamiento es aquel en el que existe más de un elemento PCE en el dominio, pero cada uno de ellos encargado de calcular segmentos de ruta sobre un área concreta de la red (computación múltiple). En este caso, los PCE están obligados a colaborar entre sí para calcular los respectivos segmentos, ensamblarlos y devolver al nodo LER la ruta completa solicitada.

El diseño de la arquitectura articulada con la inclusión de PCE para el cálculo de las rutas con restricciones de ingeniería de tráfico se muestra en la Fig. 5. En esta imagen aparecen elementos propios de PCE que pueden encontrarse en [35]. Así, se podría liberar de trabajo a los nodos LER, y serían los propios agentes PCE los que se encargan de calcular los túneles LSP y los segmentos del camino cuando se produzca un movimiento.

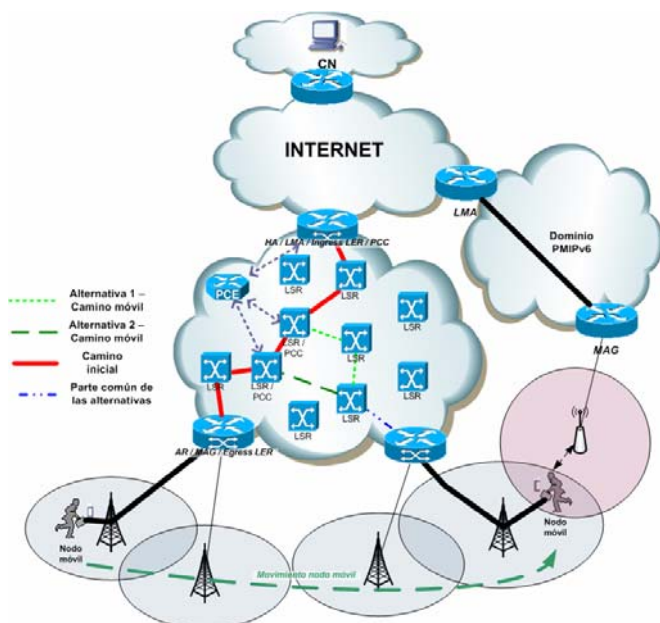


Figura 5 - Arquitectura propuesta con la inclusión de PCE

Aunque la inclusión de la arquitectura PCE es la principal propuesta de trabajo futuro, existen otros mecanismos que pueden mejorar el rendimiento de la arquitectura, como el *Cranback Signaling*, los mecanismos de restauración local de LSPs (*Local Path Restoration*) o las comunicaciones P2MP (Punto-MultiPunto). Otro mecanismo directamente relacionado con PCE es el de calcular caminos desde el destino al origen. El grupo de trabajo PCE del IETF ya está trabajando en un mecanismo llamado *Backward Recursive Path Computation*.

Dado que este trabajo aún está en curso, la inclusión de estos mecanismos puede ofrecer un resultado que permita optimizar el encaminamiento y la provisión de QoS en redes móviles gestionadas por Mobile IP sobre MPLS.

REFERENCIAS

- [1] Chiussi, F.M.; Khotimsky, D.A.; Krishnan, S., "Mobility management in third-generation all-IP networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.40, no.9, pp. 124-135, Sep 2002.
- [2] Akyildiz, I.; Altunbasak, Y.; Fekri, F.; Sivakumar, R., "AdaptNet: an adaptive protocol suite for the next-generation wireless Internet," *Communications Magazine, IEEE*, vol.42, no.3, pp. 128-136, Mar 2004.
- [3] Saha, D.; Mukherjee, A.; Misra, I.S.; Chakraborty, M.; Subhash, N., "Mobility support in IP: a survey of related protocols," *Network, IEEE*, vol.18, no.6, pp. 34-40, Nov.-Dec. 2004
- [4] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6". IETF RFC 3775. June 2004.
- [5] Jun Seob Lee; Seok Joo Koh; Sang Ha Kim, "Analysis of handoff delay for Mobile IPv6," *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, vol.4, no., pp. 2967-2969 Vol. 4, 26-29 Sept. 2004
- [6] Passas, N.; Salkintzis, A.K.; Wong, K.D.; Varma, V.K., "Architectures and protocols for mobility management in all-IP mobile networks [guest editorial]," *Wireless Communications, IEEE*, vol.15, no.2, pp.6-7, April 2008.
- [7] Langar, R., Bouabdallah, N., and Boutaba, R. 2008. "A comprehensive analysis of mobility management in MPLS-based wireless access networks". *IEEE/ACM Trans. Netw.* 16, 4 (Aug. 2008), 918-931
- [8] F. M. Abduljalil, S. K. Bodhe. "A survey of integrating IP mobility protocols and mobile ad hoc networks". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 9, no. 1. 1st Quarter 2007.
- [9] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon. "Multiprotocol Label Switching Architecture. IETF RFC 3031. January 2001.
- [10] D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, J. McManus. "Requirements for Traffic Engineering Over MPLS". IETF RFC 2702. September 2009.
- [11] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow. "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels". IETF RFC 3209. December 2001.
- [12] D. Katz, K. Kompella, D. Yeung. "Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF version 2". IETF RFC 3630. September 2003.
- [13] H. Smit, T. Li. "Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions for Traffic Engineering". IETF RFC 3784. June 2004.
- [14] Awduche, D.O.; Agu, E., "Mobile extensions to RSVP," *Computer Communications and Networks, 1997. Proceedings., Sixth International Conference on*, vol., no., pp.132-136, 22-25 Sep 1997
- [15] A. Kumar Talukdar, B.R. Badrinath, A. Acharya. "MRSVP: A Resource Reservation Protocol for an Integrated Services Network with Mobile Hosts" *Wireless Networks, Springer*, vol 7, no.1, pp. 5-19, January 2001.
- [16] Mahadevan, I.; Sivalingam, K.M., "An experimental architecture for providing QoS guarantees in mobile networks using RSVP," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998. The Ninth IEEE International Symposium on*, vol.1, no., pp.50-54 vol.1, 8-11 Sep 1998.

- [17] Chien-Chao Tseng; Gwo-Chuan Lee; Ren-Shiou Liu, "HMRSVP: a hierarchical mobile RSVP protocol," *Distributed Computing Systems Workshop, 2001 International Conference on*, vol., no., pp.467-472, Apr 2001.
- [18] Paskalis, S.; Kaloxylos, A.; Zervas, E.; Merakos, L., "Evaluating the RSVP mobility proxy concept," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*, vol.1, no., pp. 270-274 vol.1, 15-18 Sept. 2002.
- [19] Mahadevan, I.; Sivalingham, K.M., "Quality of service in wireless networks based on differentiated services architecture," *Computer Communications and Networks, 1999. Proceedings. Eight International Conference on*, vol., no., pp.548-553, 1999
- [20] G. Stattenberger, T.Braun. "QoS provisioning for Mobile IP users", *Conference on Applications and Services in Wireless Networks, ASW 2001*.
- [21] T. Braun, G. Stattenberger. "Providing Differentiated services to Mobile IP Users" *Proc. of the 26th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks*. 2001.
- [22] Taha, A.-E.M.; Hassanein, H.S.; Mouftah, H.T., "Extensions for Internet QoS paradigms to mobile IP: a survey," *Communications Magazine, IEEE*, vol.43, no.5, pp. 132-139, May 2005.
- [23] Sa-Ngiamsak, W.; Krachodnok, P.; Varakulsiripunth, R., "A Recovery Scheme for QoS Guaranteed Mobile IP Over MPLS Network," *Wireless Pervasive Computing, 2006 1st International Symposium on*, vol., no., pp. 1-5, 16-18 Jan. 2006.
- [24] ITU-T Recommendation. Y.1281, "Mobile IP Services over MPLS", September 2003.
- [25] IP/MPLS Forum. "Mobile backhaul Standard". October 2008.
- [26] J. Choi, M. Kim and Y. Lee, "Mobile IPv6 Support in MPLS Network," IETF Internet Draft, available at draft-choi-mobileip-ipv6-mpls-02.txt. December 2001.
- [27] J.K. Choi, Y.K. Lee, S.H. Yang, T.W. Um, and M.H. Kim, "Extensions of LDP for Mobile IP Service through the MPLS network," IETF Internet Draft, November 2001.
- [28] F. Xia, B. Sarikaya. "MPLS Tunnel Support for Proxy Mobile IPv6". IETF Internet Draft (work in progress), available at draft-xia-netlmm-mpls-tunnel-00.txt. October 2008.
- [29] O. Berzin, A. Malis, "Mobility Support Using MPLS and MP-. BGP Signaling", IETF Internet Draft, October 2007.
- [30] Anjali, T.; Scoglio, C., "Traffic routing in MPLS networks based on QoS estimation and forecast," *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE*, vol.2, no., pp. 1135-1139 Vol.2, 29 Nov.-3 Dec. 2004
- [31] M. L. Puterman, "Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming". Wiley, Ne Cork, 1997.
- [32] H Chaskar. "Requirements of a Quality of Service (QoS) Solution for Mobile IP". IETF RFC 3583. September 2003.
- [33] Moon, J.M.; Yun, M.Y.; Kim, Y.J.; Kim, S.H., "History-based adaptive QoS provisioning in mobile IP networks," *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, vol.6, no., pp. 3483-3487 vol.6, 1-5 Dec. 2003
- [34] Fei Yu; Wong, V.W.S.; Leung, V.C.M., "Efficient QoS provisioning for adaptive multimedia in mobile communication networks by reinforcement learning," *Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on*, vol., no., pp. 579-588, 25-29 Oct. 2004.
- [35] A. Farrel, J. P. Vasseur, J. Ash. "A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture". IETF RFC 4655. August 2006.