



Carlos J. Bernardos obtuvo el título de Ingeniero superior de Telecomunicación por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) en Marzo de 2003. Desde el año 2000, simultaneó sus estudios universitarios con la actividad de colaborador de investigación en el Departamento de Ingeniería Telemática de la UC3M, siendo beneficiario de una beca "Nortel Networks" y una beca de colaboración con departamento otorgada por el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. A partir del año 2003, trabaja como investigador y profesor ayudante en la UC3M, además de cursar estudios en el programa de doctorado de Tecnologías de las Comunicaciones de la UC3M.

Ha participado en varios proyectos de investigación internacionales, como el IST Moby Dick y actualmente en el Daidalos, trabajando en temas relacionados con redes de cuarta generación y protocolos de movilidad IP.

PFC “Estudio de soluciones de movilidad en redes de cuarta generación”

A. Datos del autor

Nombre y apellidos: Carlos Jesús Bernardos Cano

Nº asociado: 15.090

Nº colegiado: 12.403

C. Datos del tutor, departamento, fecha de lectura y calificación del PFC

Nombre y apellidos: Ignacio Soto Campos

Departamento: Departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Carlos de III de Madrid

Fecha de lectura: 17 de Marzo de 2003

Calificación: 10.0 (MATRÍCULA DE HONOR)

D. Relación cronológica de publicaciones relacionadas con el PFC

1. Pablo Serrano, Carlos J. Bernardos, Ignacio Soto y José I. Moreno, “*Medida y análisis del tráfico multimedia en redes móviles de cuarta generación*”. Telecom I+D 2003
2. Carlos J. Bernardos, Ignacio Soto, José I. Moreno, Telemaco Melia, Marco Liebsch and Ralf Schmitz, “*Experimental Evaluation of a Handover Optimization Solution for Multimedia Applications in a Mobile-IPv6 Network*”. Aceptada para su publicación en la revista ETT (European Transactions on Telecommunications”. Actualmente en proceso de revisión editorial.
3. Antonio Cuevas, Pablo Serrano, Carlos J. Bernardos, José I. Moreno, Jürgen Jähnert, Kim Hyong-Woo, Jie Zhou, Diogo Gomes y Pedro Gonçalves, “*Field Evaluation of a 4G True-IP network*”. Enviado para ser tenido en cuenta para su aceptación en el “IST-Mobile and Wireless Communications Summit”

E. Otra información de mérito

El presente proyecto fin de carrera se ha realizado dentro del marco de trabajo del proyecto europeo IST Moby Dick (<http://www.ist-mobydick.org>). Actualmente, parte del trabajo fruto de este proyecto fin de carrera se está utilizando en el proyecto europeo IST FP6 DAIDALOS (<http://www.ist-daidalos.org>)

Estudio de soluciones de movilidad en redes de cuarta generación

RESUMEN

Carlos Jesús Bernardos Cano
Tutor: Ignacio Soto Campos

29 de marzo de 2004

1 Introducción

Este documento resume el trabajo realizado, como proyecto fin de carrera, en el estudio y análisis de las soluciones de movilidad en redes IPv6. El marco dentro del cual se ha desarrollado el trabajo es el proyecto europeo MOBY DICK ([MOB]), el cual pretendía estudiar y desplegar una plataforma de comunicaciones móviles de cuarta generación, sobre una arquitectura completamente IPv6, con características de movilidad, calidad de servicio y AAA, con diferentes tecnologías de acceso (Ethernet, WLAN 802.11b y WCDMA).

El mundo de las comunicaciones avanza cada vez más a un entorno en el que los usuarios son móviles, y en muchos casos las redes de acceso son inalámbricas. El protocolo IP constituye los cimientos de la red de comunicaciones de datos más extendida actualmente: Internet. Este protocolo, es por tanto la base de toda red de comunicaciones actual y futura, pero sin embargo no fue concebido para terminales móviles, sino todo lo contrario, los terminales eran fijos y además había una estrecha relación entre las direcciones asignadas a los terminales y su localización física y topológica, configurándose estáticamente para la red en la que estaban conectados. En los últimos tiempos se han diseñado y desplegado soluciones que permiten la configuración dinámica de terminales (DHCP por ejemplo), con lo cual se consigue la *portabilidad* de terminales, pero en ningún caso la *movilidad* transparente.

Por todas las razones anteriores, han surgido propuestas de soluciones, concretándose en protocolos como IPv4 móvil ([EP02]) e IPv6 móvil ([BJEPA03]). Estos protocolos tienen como fin permitir de manera transparente a un terminal el cambio de subred IP, manteniendo la dirección IP a través de la cual siguen siendo globalmente alcanzables, así como las conexiones de niveles superiores que tuvieran activas antes del movimiento.

En la Internet actual, el protocolo IPv4 ha soportado el paso del tiempo y un crecimiento que ninguna previsión hubiera vaticinado en el momento de su diseño. Aún así, IPv4 tiene muchas debilidades - siendo la principal de ellas la escasez de direcciones - que hacen que sea necesaria la transición hacia un nuevo protocolo, que solucione los problemas más graves y además facilite el despliegue de mecanismos para afrontar los retos de las redes actuales. El protocolo IPv6 ([DH98]) surgió como una evolución de IPv4, diseñándose teniendo en cuenta toda la experiencia acumulada con este protocolo. IPv6 ha de ser la base de las redes de comunicaciones del futuro y por esta razón, el presente proyecto fin de carrera se centra en el análisis y desarrollo de soluciones de movilidad para redes IPv6, si bien se han estudiado también previamente la problemática y soluciones para redes IPv4, pues comparten características y presentan muchas similitudes.

La solución propuesta por el protocolo IPv6 móvil es adecuada para situaciones de *macro-movilidad* (un terminal es encendido en una subred que no es la correspondiente a su dirección IP, o tiene un movimiento a baja velocidad). Sin embargo actualmente se considera que no es suficientemente eficiente en situaciones de *micro-movilidad*, en las cuales el terminal se mueve entre diferentes subredes en un espacio reducido (por tanto a mayor velocidad) y en un dominio diferente del suyo. Cada movimiento requiere del intercambio de unos mensajes de señalización de cara a mantener la conectividad del terminal móvil. Dicha señalización conlleva una latencia asociada al movimiento (*traspaso*), que puede ser inadmisibles para aplicaciones interactivas con requisitos de tiempo real (como por ejemplo las comunicaciones de voz).

Para intentar solucionar estos problemas, han surgido una serie de propuestas, entre las cuales podemos destacar: *traspasos rápidos para IPv6 móvil* ([Koo02]) e *IPv6 móvil jerárquico* ([SCEMB02]), que intentan completar la funcionalidad de IPv6 móvil, con el objetivo de mejorar sus prestaciones en situaciones de micro-movilidad. Actualmente es un tema muy activo en el IETF, que está siendo objeto de múltiples estudios.

El proyecto fin de carrera, además de estudiar las especificaciones de los protocolos y extensiones

relacionadas con la movilidad en redes IPv6 móvil, ha tenido como uno de sus objetivos fundamentales la experimentación con implementaciones reales de estos protocolos, para estudiar su aplicación práctica, su eficiencia y posibles mejoras de funcionamiento.

2 Objetivos

Podemos resumir los objetivos principales del proyecto en los siguientes puntos:

- Estudio de la problemática de la movilidad en redes IP.
- Estudio del estado del arte actual en temas relacionados con la macro-movilidad en redes IPv6, prestando especial atención a las diferentes revisiones de la especificación del protocolo IPv6 móvil ([BJEPA03]).
- Estudio del estado del arte actual en temas relacionados con la micro-movilidad en redes IPv6, prestando especial atención a las soluciones propuestas más aceptadas en la actualidad: FMIPv6 ([Koo02]) y HMIPv6 ([SCEMB02]).
- Búsqueda y análisis de implementaciones del protocolo IPv6 móvil.
- Despliegue de una red real de pruebas IPv6, prestando especial atención en el diseño hardware y software de la misma, para permitir experimentos en situaciones de movilidad.
- Adquisición de conocimientos de instalación y configuración del soporte del protocolo IPv6 en los sistemas operativos más importantes (Linux, FreeBSD y MS Windows).
- Migración de aplicaciones a IPv6, en tanto fue necesario para tener una base adecuada de aplicaciones para las pruebas de movilidad.
- Instalación y prueba de implementaciones del protocolo IPv6 móvil.
- Instalación y prueba de una implementación de la extensión FMIPv6 al protocolo IPv6 móvil, así como contribución en el desarrollo de la misma.
- Análisis de prestaciones de los protocolos MIPv6 y FMIPv6 en entornos reales de aplicación, a partir de la realización de pruebas cuantitativas (medida y estimación de latencias de traspaso) y cualitativas (valoración subjetiva de la influencia de la movilidad en el comportamiento de aplicaciones) sobre implementaciones de dichos protocolos.
- Extracción de conclusiones sobre la problemática de la movilidad en redes IPv6, así como evaluación de la eficiencia de las soluciones propuestas en entornos reales.

3 Estado del arte

3.1 Introducción

En primer lugar, es importante distinguir entre *portabilidad* y *movilidad*. El primer término hace referencia a la capacidad de un terminal de operar conectado a diferentes redes de acceso, pero siendo necesario detener y reiniciar las conexiones de red activas en el nuevo punto de conexión a la red. Se trata por tanto, de una mera *configuración automática*, pero no de un soporte transparente de la movilidad del terminal.

Con *movilidad* hacemos referencia a la capacidad de un terminal de cambiar de punto de conexión a la red sin necesidad de reiniciar ningún tipo de conexión.

El concepto de *movilidad* es más complejo en su implementación que el de *portabilidad*. Existen hoy varias soluciones tecnológicas que proporcionan *portabilidad* a nivel IP, algunas de ellas estandarizadas y de amplia y probada utilización. Sin embargo, el problema de la *movilidad* está aún sin solucionar completamente.

Una pregunta que podemos hacernos es por qué se ha adoptado una solución de movilidad a nivel IP y no en otros niveles. Si bien existen soluciones de movilidad a otros niveles, la solución genérica más aceptada a día de hoy es la movilidad a nivel IP.

Pensar en movilidad a niveles inferiores supone restringir la movilidad dentro de redes de una misma tecnología de subred, además de necesitar de múltiples soluciones, aptas cada una de ellas para cada tipo de subred.

De la misma manera, pensar en movilidad a niveles superiores requiere desarrollar soluciones para cada protocolo de transporte, con los mismos problemas descritos anteriormente.

En el estado actual, en el que la tecnología IP es claramente dominante en el ámbito de las comunicaciones basadas en conmutación de paquetes, la movilidad IP es la opción más lógica. Adoptar IP como el nivel sobre el que implementar la movilidad también origina otro tipo de retos tecnológicos que propician la aparición de soluciones particulares que mejoran el rendimiento, dependiendo de la aplicación, capas inferiores y protocolos implicados.

3.2 El problema de la movilidad IP

En las redes IP existe una estrecha relación entre las direcciones IP y la localización física de los nodos (la dirección IP identifica al nodo y la dirección de transporte incluye la dirección IP). El prefijo de la dirección IP de un nodo identifica a la red a la que está conectada, utilizando todos los nodos de una red el mismo prefijo. De esta forma, si movemos un nodo de un lugar a otro (no perteneciente a la misma red IP), todos los paquetes enviados a la dirección IP del nodo se encaminan (siguiendo el encaminamiento IP) a la red a la que el nodo estaba conectado, no siendo por lo tanto entregados al mismo. Gráficamente la situación anterior se puede observar en la figura 1, en la que se representa cómo un paquete destinado a la dirección IP del nodo móvil no alcanza su destino al cambiar éste de subred.

Cuando el nodo *nodo_movil* cambia de punto de conexión a la red (se mueve de la red *redA* a la red *redB*), todos los paquetes destinados a la dirección IP de *nodo_movil* (dirección formada por el prefijo de red más el sufijo correspondiente a *nodo_movil*) se entregan en la red *redA*. *Nodo_movil* debe cambiar su dirección IP de forma que refleje la red a la que está conectado en la actualidad si quiere tener conectividad con otros nodos de la red. Con este cambio recuperaríamos la conectividad, pero no lograríamos *movilidad*, sino *portabilidad*. Como ya hemos reseñado, la *movilidad* implica que un nodo pueda cambiar de conexión a la red, sin perder la conectividad (salvo en un pequeño intervalo de tiempo) a través de su dirección IP original y sin que sea necesario interrumpir ninguna conexión de niveles superiores a IP (por ej. TCP).

3.3 IPv6 Móvil

El protocolo IPv6 proporciona mecanismos de autoconfiguración¹ que, de ser empleados, pueden proporcionar *portabilidad* a nivel IP, es decir, la capacidad de conectarnos a diferentes redes (de acceso) y tener

¹Nos referimos básicamente a la autoconfiguración sin estado (*stateless*) mediante la recepción de anuncios de rutas (*router advertisements*) o a la autoconfiguración con estado (*stateful*) mediante DHCPv6.

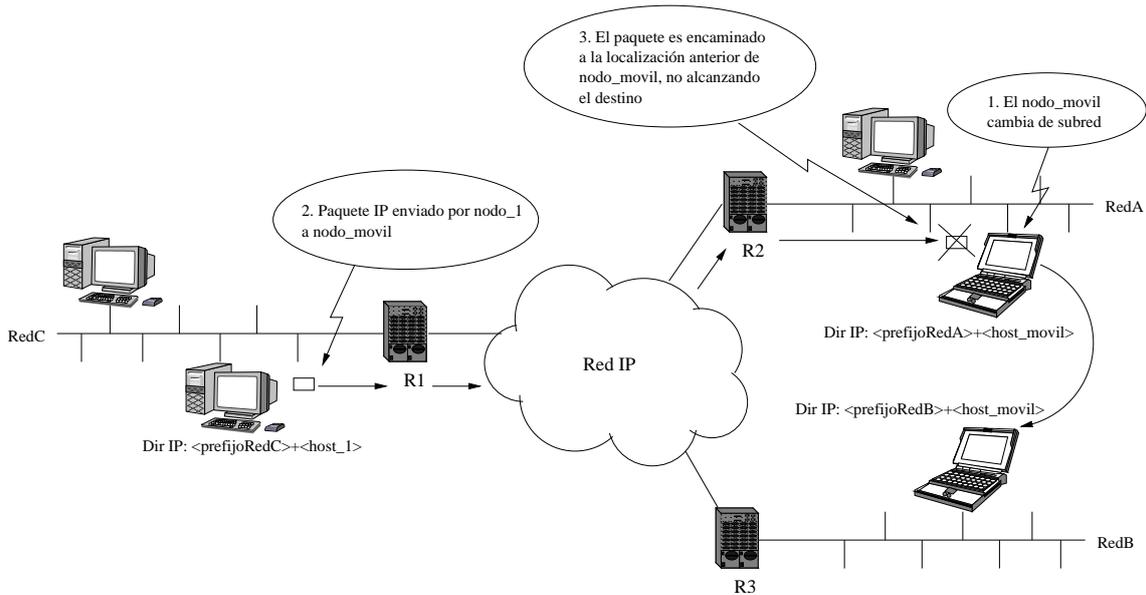


Figura 1: Problemática movilidad IP

conectividad IP. Sin embargo, esto requiere la interrupción de todas las conexiones de niveles superiores y su posterior reinicio, una vez conectados al nuevo punto de acceso. Además, el resto de nodos no disponen de ningún mecanismo transparente para comunicarse de nuevo con el nodo *móvil*, al ignorar la nueva localización del mismo.

3.3.1 Funcionamiento básico de IPv6 Móvil

IPv6 móvil proporciona a un nodo movilidad a nivel 3 de forma transparente para los niveles superiores (por ejemplo TCP), siendo siempre alcanzable a través de su dirección hogar, sin importar si se encuentra conectado a su red hogar o está visitando otras redes. La transición, traspaso o *handover* entre redes es transparente para los niveles superiores y la pérdida de conectividad que se produce durante el mismo es el correspondiente al intercambio de los mensajes de señalización correspondientes².

Mientras el nodo móvil se encuentra conectado a su red hogar (subred en la que se define el prefijo de su dirección hogar), no es necesaria ninguna operación especial. Los paquetes son enviados y recibidos por el nodo móvil de la misma forma que un nodo clásico (que podríamos denominar para simetrizar nodo *estático*). La dirección hogar (dirección IPv6 permanente a través de la cual es siempre accesible) del nodo móvil pertenece al espacio de direcciones delegado a la red a la que está conectado (el prefijo de la dirección hogar es igual a uno de los prefijos de la red a la que está conectado), por lo que los protocolos de encaminamiento IP normales entregan los paquetes enviados a la dirección hogar permanente del nodo móvil.

Cuando un nodo móvil está conectado a una red diferente de su red hogar (red foránea o visitada), el nodo es alcanzable a través de su(s) dirección(es) CoA (*Care-of-Address*, dirección temporal perteneciente al espacio de direcciones IPv6 de la red visitada - es decir, topológicamente correcta-), pero también a través de su dirección hogar permanente. Los paquetes enviados por cualquier nodo de la red (nodo correspondiente - *Correspondent Node*) con destino la dirección hogar del nodo móvil llegan a la red hogar del mismo, donde

²Hay muchos mecanismos propuestos para complementar a IPv6 móvil, reduciendo el tiempo de interrupción en la comunicación durante un traspaso. Algunas de estas propuestas serán introducidas y comentadas en otros capítulos del presente documento.

un nodo especial, denominado agente local (*Home Agent*) los intercepta y envía, mediante un túnel (figuras 2 y 3), a la CoA que previamente ha tenido que registrar el nodo móvil en el agente local. Esta correspondencia entre dirección hogar de un nodo móvil y su CoA actual recibe el nombre de asociación. Los paquetes llegan a la localización actual del nodo móvil, ya que su CoA pertenece al espacio de direcciones de la subred a la que está conectado, por lo que el encaminamiento IP entrega el paquete enviado por el agente local (que lleva encapsulado en su interior el paquete IP original) al nodo móvil.



Figura 2: Túnel IP-en-IP

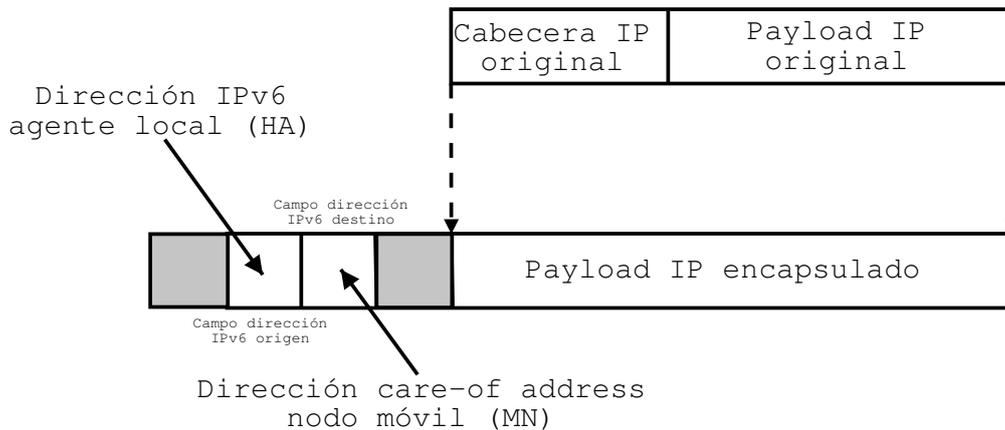


Figura 3: Encapsulación IP-en-IP (HA-MN)

Típicamente, un nodo móvil adquiere una dirección CoA por medio de autoconfiguración de direcciones sin estado (*stateless*), si bien también puede utilizar métodos con estado (*stateful*) (por ejemplo DHCPv6) o preasignaciones estáticas.

Un intercambio de paquetes típico entre un nodo móvil y un nodo corresponsal se muestra en la figura 4. En la figura se observa como un paquete enviado por un nodo corresponsal a un nodo móvil, cuando éste se encuentra *visitando* una red, llega a su red hogar, dónde el agente local intercepta el paquete y lo envía a su localización actual. En la figura se aprecia como los paquetes enviados por el nodo móvil son enviados directamente³. MIPv6 proporciona mecanismos además para que entre estos dos nodos se pueda redirigir la comunicación para que sea directa, sin que sea necesaria la intervención del agente local⁴, mediante el

³Esto cambia en las últimas versiones de la especificación de IPv6 móvil (debido a problemas de seguridad). En el caso más básico los paquetes enviados por el nodo móvil son enviados por un túnel inverso hacia el nodo corresponsal.

⁴A este fenómeno se le conoce con el nombre de *triangle routing* (encaminamiento en triángulo) y es subóptimo. Era característico

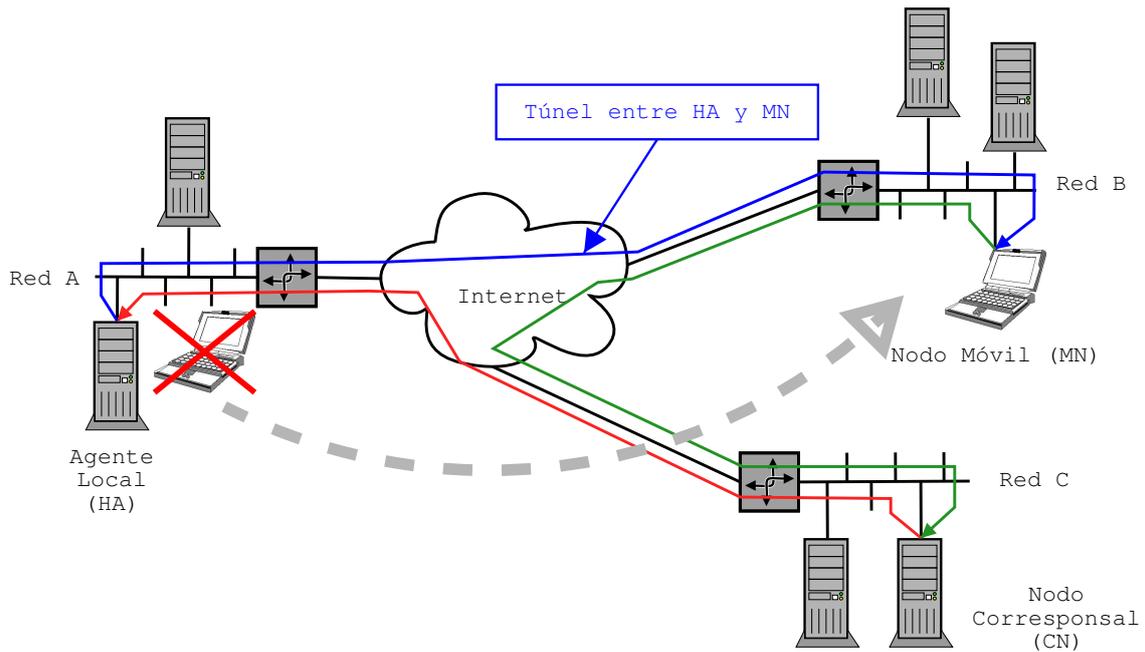


Figura 4: Encaminamiento básico IPv6 móvil. Establecimiento de túnel HA-MN

mecanismo de optimización de encaminamiento.

Básicamente, el procedimiento de optimización de encaminamiento permite al nodo móvil emplear su dirección CoA (dirección temporal perteneciente al espacio de direcciones de la red que visita) como dirección origen de los paquetes IPv6 que envía hacia nodos corresponsales. Para que los nodos corresponsales identifiquen estos paquetes como provenientes del nodo móvil, éste incluye una opción de destino IPv6, llamada *Home Address* (dirección hogar), que contiene su dirección hogar. A su vez, los paquetes destinados al nodo móvil, enviados por un nodo corresponsal, utilizan como dirección IPv6 destino la dirección CoA del nodo móvil. Nuevamente, para conseguir transparencia en la movilidad, estos paquetes incluyen una cabecera de encaminamiento IPv6 especial, conteniendo un único salto, igual a la dirección hogar del nodo móvil.

3.4 Extensiones a IPv6 móvil

Si bien el protocolo IPv6 móvil permite la movilidad transparente, no proporciona el rendimiento necesario en situaciones de micromovilidad y/o con aplicaciones con requisitos de tiempo real. Para este tipo de escenarios se han definido extensiones al protocolo básico IPv6 móvil. En el proyecto fin de carrera se han analizado dos: IPv6 móvil jerárquico (HMIPv6) y trasposos rápidos para IPv6 móvil (FMIPv6).

Básicamente, la extensión de IPv6 móvil jerárquico introduce la figura del MAP (*Mobile Anchor Point*), entidad que básicamente es un HA local que permite la estratificación en jerarquías del procesado asociado a la movilidad IP. Esto permite disminuir la señalización relativa a IPv6 móvil que se intercambia, al sólo ser necesaria la comunicación con el MAP (si el movimiento se realiza dentro del dominio del mismo MAP), además de mejorar el rendimiento global, al estar el MAP en general más “cerca” que el agente local y los nodos corresponsales y por lo tanto el proceso de actualización de asociaciones posterior a un movimiento se realiza en un intervalo de tiempo menor.

de IPv4 móvil e IPv6 proporciona mecanismos para solucionarlo.

El protocolo de trasposos rápidos para IPv6 móvil intenta minimizar la latencia asociada al nivel IP, intentando reducir el tiempo de traspaso y la pérdida de paquetes a prácticamente la debida al traspaso a nivel 2. Para ello sigue la filosofía de “prepararse antes de moverse”, dividiendo el proceso de traspaso en tres fases: inicio del handover - durante la cual se avisa al router de acceso al que se encuentra conectado el nodo móvil del router al que se quiere realizar un traspaso -, establecimiento de un túnel bidireccional - empleado por el router de acceso previo y el nuevo router de acceso para hacer que los paquetes enviados al nodo móvil le sean entregados en su nueva localización, nada más conectarse al nuevo router de acceso - y reencaminamiento de los paquetes - fase en la cual se encaminan los paquetes desde el router de acceso previo al nuevo router de acceso.

Ambas extensiones se describen y analizan en detalle en la versión completa del proyecto fin de carrera.

4 Descripción del trabajo realizado

4.1 Entorno de pruebas

Uno de los objetivos principales del proyecto fin de carrera fue la prueba experimental de diferentes soluciones de soporte de movilidad, básicamente la comparativa entre la solución básica del protocolo IPv6 móvil y la extensión de trasposos rápidos para IPv6 móvil (solución desplegada dentro del ámbito de trabajo del proyecto Moby Dick). De cara a dicha experimentación, un requisito básico es disponer de un escenario de pruebas sobre el que poder realizar diferentes tipos de pruebas. Uno de los trabajos realizados en el proyecto fin de carrera fue el diseño e implantación de un escenario de red apropiado, no sólo para la realización de pruebas de movilidad, sino también para ser compatible con pruebas de otros protocolos involucrados en el proyecto Moby Dick.

Previo al diseño de la arquitectura de red se analizaron las necesidades y especificaciones que debía cumplir dicha arquitectura. Básicamente, los principales requisitos son:

- Existencia de varias redes
- Convivencia de diferentes tecnologías de acceso
- Conectividad IPv6 global

Teniendo en cuenta dichos requisitos, el escenario desplegado en la Universidad Carlos III de Madrid, dentro del proyecto Moby Dick es el que aparece en la figura 5, en el que mostramos los detalles referentes a la movilidad (papeles que juega cada nodo, redes implicadas, etc)

Por otro lado, es también importante el aspecto software del escenario. A continuación enumeramos aquellos elementos software que consideramos necesarios e interesantes en toda plataforma de red que pretenda ser un reflejo aproximado (y simplificado) de una red móvil 4G real:

- **Herramientas de configuración**
- **Herramientas conectividad básica**
- **Servicios de red**
- **WWW**
- **Juegos**

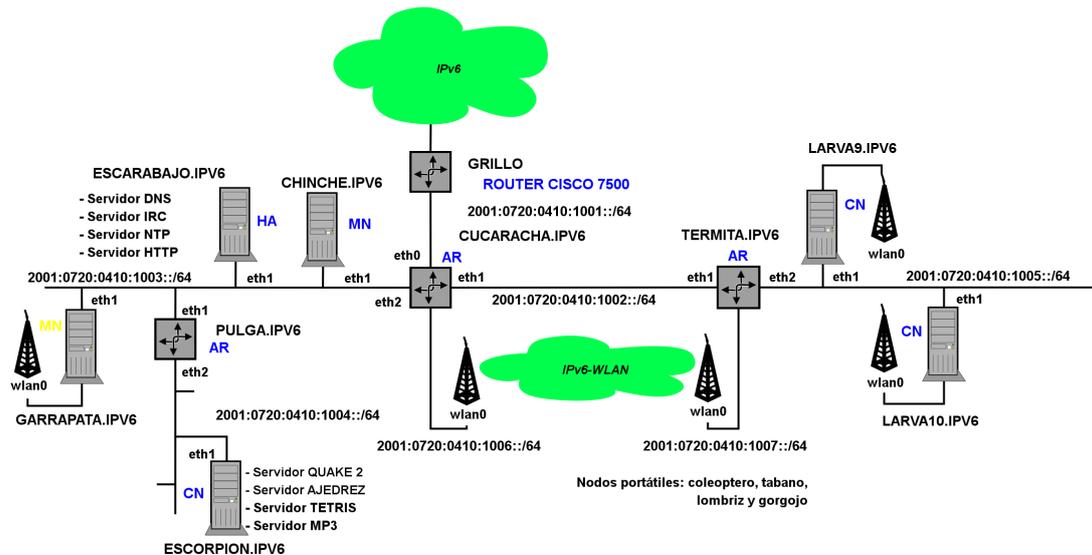


Figura 5: Escenario de pruebas de movilidad

- **Audio-vídeo conferencia**
- **Descarga bajo demanda (*streaming*) de audio y vídeo**
- **Otros**, como por ejemplo el IRC, SSH, telnet, etc.

En la memoria completa del proyecto fin de carrera se especifican los diferentes componentes software, disponibles bajo la modalidad de software libre, que cumplen con los requisitos anteriores. Es interesante señalar que, en el momento en que se desplegó el escenario, no había aplicaciones disponibles con soporte IPv6 que cumplieran todos los requisitos. Para dichos tipos de aplicaciones, optamos por desarrollar el soporte de IPv6 para aplicaciones existentes con soporte IPv4. Se portaron a IPv6 dos aplicaciones: un servidor de ajedrez (*chessd*) y un cliente de streaming MP3 (*mpg321*). El parche producido para esta última aplicación se remitió al desarrollador principal de la aplicación y fue aceptado para su inclusión en la siguiente versión oficial de la aplicación. En la memoria del proyecto fin de carrera se incluye un apéndice en el que se describen los pasos necesarios para migrar una aplicación a IPv6.

A continuación resumimos las aplicaciones desplegadas en la red de pruebas:

- **Herramientas de configuración**
- **Herramientas de conectividad básica:** *Ping6*, *traceroute6*
- **WWW:**
 - Servidor HTTP IPv6: *apache*
 - Clientes HTTP IPv6: *mozilla* y *w3m*
- **Juegos:**
 - *Quake 2* (cliente y servidor, UDP)
 - Ajedrez: (*chessd*) (servidor, TCP, parche IPv6 desarrollado por el autor del presente PFC), *xboard* (cliente, TCP)

- Tetris: *tetrinetx* (servidor, TCP), *gtetrinet* (cliente, TCP)
- **Audioconferencia:** RAT (UDP)
- **Vídeoconferencia:** VIC (UDP)
- **Audio bajo demanda (MP3):** *mpg123* y *mpg321* (parche IPv6 desarrollado por el autor del presente PFC)
- **Vídeo bajo demanda:** VideoLAN (cliente y servidor, UDP)
- **Servicios de red:**
 - Software de resolución de nombres: *bind9*
 - Software de encaminamiento dinámico RIPng: *zebra*
 - Sincronización relojes: *NTP* (servidor y clientes)
- **Otros:**
 - Software de login remoto: *SSH*
 - Software de coordinación, IRC: *xchat* (cliente, TCP), *ircd* (servidor, TCP) e *ircservices* (servicios añadidos)

El escenario desplegado, permitió la realización y publicación de un trabajo paralelo al proyecto fin de carrera, consistente en el estudio y caracterización del comportamiento del tráfico multimedia en redes 4G ([SBM03]). El objetivo de dicho trabajo fue proporcionar un análisis y caracterización de diversos tipos de tráfico multimedia en redes de cuarta generación, de cara a poder provisionar adecuadamente mecanismos de calidad de servicio (QoS) en este tipo de redes. La caracterización se realizó tanto de manera cuantitativa (variando parámetros como el ancho de banda, retardo, jitter, pérdidas, etc), como cualitativa, analizando la degradación percibida por los usuarios al variar dichos parámetros. Para poder modelar las diferentes características de la red se empleó el emulador NISTNET ([NIS]), que permitía, para flujos de tráfico IPv4, modelar, en base a diferentes parámetros, las características de la red. De cara a poder emplear dicho emulador en nuestro prototipo de red 4G, totalmente IPv6, fue necesario desplegar un túnel IPv6-en-IPv4. De entre los resultados obtenidos de este estudio, cabe resaltar algunos, como el hecho de que las redes 4G van a tener que tratar con flujos de muy diversa índole, tanto por la arquitectura que suponen (cliente-servidor, peer-to-peer), como por los requisitos de ancho de banda. Otra conclusión interesante es el hecho de que para determinados tipos de aplicaciones (como por ejemplo VoIP, Quake II, etc), el hecho de que el tráfico de dichas aplicaciones sea transportado sobre IPv6 supone una sobrecarga en el ancho de banda muy significativa, debido al considerable tamaño de la cabecera fija IPv6. Por otro lado, este problema se ve aún más agravado con el soporte de movilidad, que introduce más sobrecarga en forma de cabeceras de extensión.

Sobre la plataforma desplegada, junto con la otra sede de pruebas del proyecto Moby Dick, se desarrollaron también estudios de campo, de forma que se proporcionan resultados reales sobre un prototipo de red de cuarta generación, resultados muy útiles de cara al futuro despliegue de redes 4G. Fruto de dicho trabajo, se ha presentado un artículo [CSB⁺04], estando la decisión sobre su posible aceptación aún pendiente.

4.2 Implementaciones de IPv6 móvil: Análisis y pruebas

Otro de los trabajos realizados en el proyecto fin de carrera fue el análisis de las implementaciones libres del protocolo IPv6 móvil disponibles, de cara a la selección de una de ellas, en base a sus características y funcionalidades. Se identificaron las siguientes implementaciones:

- *Mobile IPv6 for Linux (MIPL) ([HUT])*. Se trata de una implementación libre de IPv6 móvil básico para el sistema operativo Linux realizada por el Departamento de Informática de la Universidad Tecnológica de Helsinki (HUT). Se actualiza constantemente para proporcionar el soporte descrito en las últimas revisiones del borrador de la especificación de IPv6 móvil.

Ésta es la implementación libre más completa existente en la actualidad y la utilizada en el presente proyecto. La versión empleada durante la fase final del proyecto proporciona la funcionalidad de la revisión 15 del borrador. Actualmente existe una versión que soporta la última revisión de la especificación de IPv6 móvil.

- *Microsoft Mobile IPv6 Implementation (MIPv6) ([dLM])*. Se trata de una implementación para sistemas operativos Microsoft Windows NT y 2000. Proporciona el soporte descrito en la revisión 13 del borrador de IPv6 móvil.

El soporte de IPv6 para Microsoft Windows NT y 2000 no viene incluido en dichos sistemas operativos de manera nativa. Es necesario instalarlo adicionalmente, siendo su rendimiento y prestaciones muy escasas.

- *KAME*. Soporte IPv6 móvil en FreeBSD KAME. El paquete de KAME ([KAM]) para FreeBSD añade soporte de IPv6 móvil.

En nuestras pruebas preliminares encontramos numerosos problemas (además de los derivados de la comprensión del proceso de instalación de FreeBSD, del paquete KAME y del uso y configuración de un sistema FreeBSD) debidos a la forma que presentaba nuestra arquitectura de pruebas preliminar (un CN, un MN y un router que interconectaba ambos, que además actuaba como HA), no soportada inicialmente por el código de KAME. Tras una intensa interacción con los desarrolladores de KAME conseguimos una versión del código que contemplaba, en teoría, nuestra arquitectura, pero para cuando aquella estuvo disponible, nosotros habíamos decidido optar por la implementación de MIPL, descartando seguir con las pruebas de la implementación de FreeBSD.

- *Linux USAGI*. El soporte del paquete USAGI ([USA]) está basado en el paquete MIPL.

Al estar basado nuestra plataforma en el soporte oficial de IPv6 del núcleo de Linux (no en el ofrecido por el paquete de USAGI) y además basarse el soporte de movilidad de USAGI en la implementación de MIPL, decidimos no probar esta implementación.

Una vez seleccionada una implementación (MIPL), se sometió a la misma a múltiples pruebas, analizando en profundidad el grado de cumplimiento de la especificación del protocolo. En la memoria del proyecto fin de carrera se incluye un apéndice de instalación y configuración de la implementación, así como una descripción de su funcionamiento en una batería de numerosas pruebas, incluyendo:

- Traspasos intratecnología
- Traspasos intertecnología
- Pruebas intersedes, involucrando, además de la sede de la Universidad Carlos III, la otra sede de pruebas del proyecto Moby Dick, situada en la Universidad de Stuttgart (Alemania)
- Pruebas de interoperabilidad de implementaciones

4.3 Análisis de una implementación de FMIPv6: FHO

Otro de los objetivos del proyecto, y quizás el que supone una mayor novedad y aporta unos resultados más interesantes, es el desarrollo, prueba y análisis de una implementación de FMIPv6. Dentro del proyecto Moby Dick se desarrolló una implementación de FMIPv6, denominada FHO. Dicha implementación fue desarrollada principalmente por los laboratorios NEC europeos, si bien también contribuimos con parte de trabajo, principalmente en su prueba y depuración, pero también en la detección y corrección de algunos errores.

4.4 Estudio experimental MIPv6 vs FMIPv6

En el momento de realización del proyecto fin de carrera, y todavía en estos momentos, existe una falta de resultados experimentales que comparen el rendimiento de diferentes soluciones de micromovilidad frente al del protocolo básico de IPv6 móvil. Existen algunos estudios teóricos que evalúan el rendimiento esperado de diversas soluciones de movilidad. Algunos de ellos ([PCSHL02],[PCH02]) se hicieron dentro del marco de trabajo del proyecto Moby Dick, y en base a sus resultados se decidió implementar el protocolo de Traspasos Rápidos para IPv6 Móvil (FMIPv6), pues esta solución era la que presentaba mejores resultados (de sólo implementar una de ellas de manera aislada, puesto que los mejores resultados esperables se obtendrían con una implementación conjunta de IPv6 Móvil jerárquico y Traspasos Rápidos para IPv6 Móvil).

En el proyecto se pretendía demostrar que los resultados obtenidos mediante el empleo de IPv6 móvil básico son diferentes a los obtenidos mediante el empleo de traspasos rápidos para IPv6 móvil, intentando evaluar además cuánto de mejores son los últimos respecto a los primeros.

Podemos resumir los objetivos que pretendíamos alcanzar en:

- Evaluar, en términos de pérdida de paquetes y latencia de traspaso, el rendimiento de la implementación de traspasos rápidos para IPv6 móvil FHO.
- Evaluar igualmente, el rendimiento de la implementación de IPv6 móvil básico MIPL.
- Realizar las pruebas bajo diferentes escenarios:
 - *Local*: Todos los nodos involucrados (HA, MN y CNs) pertenecen a una misma sede.
 - *Remoto*: Los CNs (y puede que el HA) están situados en una sede diferente al que está visitando el MN.
- Comparar los resultados obtenidos, para ver si existe una clara diferencia de prestaciones entre ambas opciones.

En la memoria del proyecto fin de carrera se describe en detalle el método empleado para medir las latencias de traspaso de las diferentes soluciones de movilidad, así como los escenarios bajo los que se probaron las implementaciones de dichas soluciones.

A continuación vamos a incluir un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Para cada caso, incluiremos las medias de tiempos de latencia de traspaso, tanto para el caso de soporte de IPv6 básico (implementación MIPL), como para el caso de soporte de traspasos rápidos para IPv6 móvil (implementación FHO). Se realizó un estudio estadístico, de cara a garantizar que el número de iteraciones (traspasos) era estadísticamente suficiente para demostrar que las muestras medidas representaban poblaciones distintas.

En la tabla 1 resumimos los resultados obtenidos en las pruebas realizadas⁵.

Entorno	Latencia MIPL	Latencia FHO	Valor p
Local (UC3M)	350–360 ms	0–10 ms	$1,83 \cdot 10^{-19}$
Remoto (UC3M - FREENET6)	800–900 ms	0–100 ms	$1,61 \cdot 10^{-22}$
Remoto (UC3M - U. Stuttgart)	1400–1500 ms	0–100 ms	$1,72 \cdot 10^{-17}$

Cuadro 1: Resumen resultados comparativa MIPL vs FHO

A la vista de los resultados, se puede observar como el empleo del soporte de trasposos rápidos para IPv6 móvil mejora claramente el rendimiento global. Debido al método de medida empleado, no podemos ofrecer resultados más precisos en entornos remotos. De todas formas, en una red en la que se pierden paquetes y el ancho de banda no está garantizado, las limitaciones en las comunicaciones interactivas no van a estar marcadas por la movilidad y las latencias de traspaso.

Los resultados obtenidos en un entorno local son extremadamente significativos. El tiempo de traspaso empleando FHO es menor a 10ms, lo cual es un valor realmente bajo y completamente válido para aplicaciones con requisitos de tiempo real, tal y como pueden ser las comunicaciones de voz.

Estudios teóricos, como [KT01], estiman en 100-150ms el retardo máximo admisible para comunicaciones de voz sobre Internet. Mediante la utilización del soporte de trasposos rápidos para IPv6 móvil obtenemos latencias de traspaso menores a ese umbral. Sin embargo, el soporte de IPv6 móvil básico no es capaz de proporcionar retardos admisibles, ni tan siquiera en entornos locales⁶. A la vista de estos resultados, la utilización del soporte de trasposos rápidos para IPv6 móvil es necesaria en caso de ofrecer comunicaciones de voz con movilidad de terminal, siendo claramente insuficiente el soporte de IPv6 móvil básico.

Se puede observar como el rendimiento empleando el soporte de IPv6 móvil básico está relacionado con las características del enlace entre el nodo móvil y el nodo corresponsal, ya que la latencia de traspaso viene determinada, entre otros factores, por el tiempo requerido por la señalización relativa al protocolo IPv6 móvil. El tiempo de *ping6* devuelto en el caso del entorno remoto 1 (UC3M - FREENET6) es menor que el del caso del entorno remoto 2 (UC3M - U. Stuttgart), y esto se traduce en que la señalización tarda más en completarse en este último caso, tal y como se refleja en los tiempos de latencia de trasposos obtenidos cuando empleamos MIPL.

Además de esta evaluación cuantitativa, se realizó también, como parte del proyecto fin de carrera, una primera evaluación cualitativa del rendimiento de las diferentes soluciones de movilidad, empleando para ello aplicaciones (especialmente aquellas con requisitos de tiempo real).

Este estudio de evaluación de prestaciones fue posteriormente ampliado en un artículo [BSM⁺04], aceptado para su publicación en la revista “European Transactions on Telecommunications”. En dicho trabajo se realizaron pruebas similares, pero introduciendo el emulador NISTNET, de cara a poder desarrollar un estudio más exhaustivo de latencias de traspaso, en función del retardo de comunicación entre el nodo móvil y el nodo corresponsal. De igual forma, se realizó un estudio de evaluación cualitativa del rendimiento de las diferentes soluciones de movilidad, empleando aplicaciones y usuarios reales.

⁵El valor p, también denominado nivel de significación experimental o descriptivo, es la probabilidad real de obtener un valor de la t de tabla igual o mayor que la t_c (estadístico de prueba). Es conocido también como nivel exacto de significancia o la probabilidad exacta de cometer un error de tipo I.

⁶Estos resultados son similares a los esperables en caso de utilizar una implementación de HMIPv6

5 Conclusiones

En este trabajo se han estudiado aspectos relacionados con la movilidad en redes IPv6, incluyendo aspectos generales de configuración y prueba en plataformas IPv6. Se ha trabajado enormemente en el despliegue de una plataforma de pruebas, que no fuera útil sólo desde el punto de vista del estudio de soluciones de movilidad, sino también que permitiera plasmar la filosofía de una posible futura red de comunicaciones de cuarta generación. Estas actividades han contribuido al buen progreso del proyecto Moby Dick ([MOB]).

En el presente proyecto fin de carrera se ha estudiado el comportamiento de FHO, una implementación de traspasos rápidos para IPv6 móvil, contribuyendo a la prueba, desarrollo y mejora de la misma. A su vez, se ha comparado el rendimiento de dicha implementación con los obtenidos con MIPL. Los resultados obtenidos han indicado que la utilización del soporte de traspasos rápidos para IPv6 móvil es necesaria si se quieren proporcionar comunicaciones en tiempo real sin sufrir degradación apreciable. Por ejemplo, para soportar comunicaciones de voz, los tiempos de latencia obtenidos con el soporte de IPv6 móvil básico son insuficientes para cumplir los requisitos que impone la transmisión de voz. Los resultados obtenidos con el soporte de traspasos rápidos para IPv6 móvil están muy por debajo de el umbral mínimo requerido, siendo posible por lo tanto el establecimiento de comunicaciones de voz de calidad mediante la utilización de dicho soporte.

Durante la actividad de estudio del estado del arte actual en materias de movilidad en redes IPv6, se adquirieron amplios conocimientos sobre la problemática que introduce la movilidad en redes IPv6, así como una visión global de las soluciones propuestas, y en particular un conocimiento amplio de aquellas más importantes ([BJEPA03], [SCEMB02] y [Koo02]).

Referencias

- [BJEPA03] B. Johnson, David, E. Perkins, Charles, y Arkko, Jari. *Mobility Support in IPv6*, Enero 2003. Draft-ietf-mobileip-ipv6-20.txt (work in progress).
- [BSM⁺04] Bernardos, Carlos J., Soto, Ignacio, Moreno, José I., Melia, Telemaco, Liebsch, Marco, y Schmitz, Ralf. *Experimental evaluation of a handover optimization solution for multimedia applications in a mobile-ipv6 network*. *European Transactions on Telecommunications*, 2004. Aceptado para su publicación, actualmente en proceso de revisión editorial.
- [CSB⁺04] Cuevas, Antonio, Serrano, Pablo, Bernardos, Carlos J., Moreno, José I., Jähnert, Jürgen, Hyong-Woo, Kim, Zhou, Jie, Gomes, Diogo, y Gonçalves, Pedro. *Field evaluation of a 4g true-ip network*, 2004. Enviado para su consideración de aceptación en IST Mobile and Wireless Communications Summit.
- [DH98] Deering, S. y Hinden, R. *RFC 2460: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, Diciembre 1998.
- [dLM] de Lancaster, Universidad y Microsoft. *Microsoft Mobile IPv6 Implementation (MIPv6)*. URL <http://www.landmarc.net/research/MIPv6-Home.htm>
- [EP02] E. Perkins, Charles. *RFC 3220: Mobility Support in IPv4*, Enero 2002.
- [HUT] HUT. *Mobile IPv6 for Linux*. URL <http://www.mipl.mediapoli.com/>

- [KAM] *The KAME Project.*
URL <http://www.kame.net>
- [Koo02] Koodli, Rajev. *Fast Handovers for Mobile IPv6*, Septiembre 2002. Draft-ietf-mobileip-fast-mipv6-05.txt (work in progress).
- [KT01] Karam, Mansour y Tobagi, Fouad. *Analysis of the delay and jitter of voice traffic over the internet.* En *IEEE Infocom 2001*. Abril 2001.
- [MOB] *Proyecto Moby Dick IST-2000-25394.*
URL <http://www.ist-mobydick.org>
- [NIS] *NIST net, network emulation package.*
URL URL: <http://snad.ncsl.nist.gov/itg/nistnet/>
- [PCH02] P. Costa, X. y Hartenstein, H. *A simulation study on the performance of mobile ipv6 in a wlan-based cellular network.* *Computer Networks Special Issue on The New Internet Architecture*, págs. 191–204, Agosto 2002.
- [PCSHL02] P. Costa, X., Schmitz, R., Hartenstein, H., y Liebsch, M. *A mipv6, dmipv6 and hmipv6 handover latency study: analytical approach.* En *IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit 2002*, págs. 100–105. Thessaloniki, Greece, 17-19 Junio 2002.
- [SBM03] Serrano, Pablo, Bernardos, Soto Ignacio, Carlos J., y Moreno, José I. *Medida y análisis del tráfico multimedia en redes móviles de cuarta generación.* En *Telecom I+D 2003*. 2003.
- [SCEMB02] Soliman, Hesham, Castellucia, Claude, El-Malki, Karim, y Bellier, Ludovic. *Hierarchical Mobile IPv6 mobility management (HMIPv6)*, Octubre 2002. Draft-ietf-mobileip-hmipv6-07.txt (work in progress).
- [USA] *USAGI Project - Linux IPv6 Development Project.*
URL <http://www.linux-ipv6.org/>