

**Toward All-IP Networks**  
IP and Wireless Networks Convergence

*Hacia Redes All-IP*  
*Convergencia de Redes IP e Inalámbricas*

**- Resumen -**

**Autor**

Xavier Pérez Costa

**Director de Tesis Doctoral**

Sebastià Sallent Ribes

**Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)**  
Departamento de Ingeniería Telemática  
Barcelona, España

y

**NEC Network Laboratories**  
Third Generation Technologies Group  
Heidelberg, Alemania

**Fecha de lectura**

9 de Mayo del 2005

**Calificación**

Matrícula de Honor por unanimidad del tribunal  
Mención de Doctor Europeo

# Resumen de la Tesis Doctoral

## Hacia Redes All-IP: Convergencia de Redes IP e Inalámbricas

### 1. Introducción: Motivación y Objetivos

Durante las últimas décadas ha habido dos impulsores principales de la evolución de los sistemas de comunicaciones. Por un lado, la gran popularidad de Internet motivó la continua mejora de los diferentes soportes físicos y de su pila de protocolos para mejorar la rapidez y fiabilidad de la transmisión de datos. El desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios haciendo uso de estos avances incrementó todavía más la popularidad de Internet hasta transformarse en el estándar de facto para la transferencia de información. Por otro lado, el despliegue global de los sistemas celulares de segunda generación, por ejemplo el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), permitió por primera vez a un usuario comunicarse y estar localizable casi en todo el mundo gracias a los acuerdos de roaming entre operadores de redes. Este hecho resultó en un crecimiento extraordinario en el número de usuarios debido a la adopción de esta tecnología por los clientes de la telefonía fija tradicional.

El hecho de que los usuarios de las redes de comunicaciones se hayan acostumbrado a su uso para comunicarse desde cualquier lugar y acceder a todo tipo de información esta impulsando una tendencia a la convergencia de las redes IP e inalámbricas que debería concluir en lo que se denomina comúnmente como redes All-IP. El objetivo de este futuro tipo de redes es permitir a sus usuarios mantener ininterrumpidamente el uso de sus servicios incluso en el caso de estar en movimiento atravesando diferentes redes de acceso y al mismo tiempo garantizar una calidad de servicio adecuada.

La primera parte del trabajo realizado en esta tesis doctoral consistió en revisar el estado del arte de las redes IP y de las dos redes de acceso inalámbrico que se espera serán las predominantes en el futuro, UMTS y Wireless LANs. Los resultados de esta revisión se utilizaron para identificar tres áreas clave en la evolución de las redes actuales hacia redes All-IP que fueron las principales áreas de investigación en que se centró la tesis doctoral.

1. Administración de movilidad basada en IP : Las futuras redes All-IP deberán permitir a usuarios moverse a través de diferentes redes de acceso sin que ello suponga una disminución perceptible en la calidad de servicio durante el proceso de handoff. Por esta razón se requiere de un protocolo de movilidad independiente de las diferentes redes de acceso que sea capaz de proporcionar handoffs imperceptibles para los usuarios en redes heterogéneas.
2. Redes de acceso radio para UMTS basadas en IP : Las primeras redes UMTS desplegadas comercialmente, basadas en Release'99, usan ATM como protocolo de transporte en la Red de Acceso (UTRAN). Las especificaciones para futuros Releases incluyen el soporte de transporte IP en UTRAN pero diversas problemáticas son introducidas que requieren de soluciones para garantizar que la inclusión de las redes celulares de tercera generación (3G) en las redes All-IP se pueda realizar de forma eficiente.
3. Calidad de servicio para Wireless LANs : Las redes Wireless LAN son una de las redes de acceso más populares actualmente ya que permiten un acceso a Internet económico y de alta velocidad. Dado que las redes All-IP deberán proporcionar una calidad de servicio similar en las diferentes redes de acceso es necesario extender el estándar IEEE 802.11 de manera que se pueda dar una calidad de servicio similar a la de las redes fijas.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Administración de movilidad basada en IP

El grupo de trabajo del IETF en Mobile IP definió Mobile IPv6 (MIPv6) como el protocolo principal para dar soporte a la movilidad de usuarios en redes IPv6. Sin embargo, dado que se preveía que en ciertas circunstancias su rendimiento no sería el deseado, se propusieron diversas mejoras de las cuales Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) y Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6) fueron las que obtuvieron mayor aceptación. HMIPv6 es una extensión de MIPv6 cuyo objetivo es la reducción de la señalización introducida por MIPv6 fuera de su dominio local en el caso de que los nodos móviles cambien frecuentemente su punto de acceso dentro de una misma región. El objetivo de FMIPv6 es en cambio disminuir el tiempo requerido por MIPv6 para completar un handoff dado que en caso contrario las garantías de calidad de servicio de ciertas aplicaciones no se podrían satisfacer.

Durante el proceso de diseño de una red en la que la administración de movilidad estará basada en el protocolo Mobile IPv6 la cuestión de si es necesario utilizar alguna de sus posibles extensiones debería ser analizada. La contribución del trabajo de la tesis doctoral en esta área ha sido primero el estudio analítico y vía simulación de las mejoras de rendimiento obtenidas con cada una de las dos extensiones consideradas (HMIPv6 y FMIPv6) y sus costes asociados. Segundo, la propuesta de una integración de HMIPv6 y FMIPv6 (H+F MIPv6) cuyo objetivo es mejorar el rendimiento de ambas extensiones por separado mediante la suma de las ventajas de cada una de ellas. El estudio vía simulación requirió implementar Neighbor Discovery, HMIPv6, FMIPv6 y nuestra propuesta integración de HMIPv6 y FMIPv6 en el simulador ns-2.

El trabajo realizado en esta tesis ha analizado como el retardo en completar un handoff, la tasa de pérdida de paquetes, el ancho de banda obtenido y la probabilidad de completar un handoff con éxito son afectadas por el número de nodos móviles en la red o por interacciones con otros protocolos como por ejemplo Neighbor Discovery. El comportamiento de los diferentes protocolos de movilidad considerando un caso general con movimiento aleatorio de los nodos y fuentes de tráfico realistas como VoIP, video y TCP también ha sido estudiado. Finalmente, los costes de carga de señalización asociados con las diferentes propuestas han sido analizados y comparados con las mejoras de rendimiento obtenidas considerando un amplio margen de tasas de handoff y de número de correspondent nodes. Estos diferentes factores han mostrado tener una influencia relevante en las mejoras de rendimiento obtenidas con los protocolos y se han identificado los diferentes aspectos a tener en cuenta en una implementación real.

### 2.2 Influencia de los modelos de movilidad sobre estudios de rendimiento

Durante la evaluación de los protocolos de administración de movilidad basados en IP, la influencia de los modelos de movilidad sobre los resultados de rendimiento obtenidos resultó en una línea de investigación adicional donde las principales características del modelo de movilidad Random Waypoint (RWP) fueron analizadas.

El modelo RWP es un modelo de movilidad utilizado frecuentemente para simular redes de comunicaciones inalámbricas. La contribución de esta tesis en esta área ha sido la descripción formal de este modelo en términos de un proceso estocástico discreto en tiempo. Se obtuvieron las expresiones de (a) longitud y duración de un movimiento entre dos puntos, (b) la distribución espacial de nodos resultante y su dependencia con el tiempo de pausa, (c) el ángulo de dirección escogido al principio de cada transición, y (d) el número de cambios de celdas en una red celular. Estos resultados proporcionan un conocimiento profundo del comportamiento de este modelo en análisis basados en simulaciones de redes inalámbricas. Este conocimiento es necesario para evitar equivocaciones en la interpretación de los resultados de las simulaciones. La duración del movimiento y la tasa de cambios de celda permiten cuantificar el nivel de movilidad

de un escenario de simulación en concreto. El conocimiento de la distribución espacial de los nodos es esencial para toda investigación en que la posición relativa de los nodos es importante. Por último, la distribución de las direcciones escogidas por los nodos explica de manera analítica el efecto de que los nodos tienden a volver al centro del área del sistema. Este tipo de parámetros de movilidad son necesarios si se desea comparar resultados de simulación obtenidos con RWP con otros modelos y para identificar la influencia de la movilidad en los resultados de simulación. El conocimiento de la distribución espacial de los nodos es esencial para investigaciones de interferencias entre nodos, control de acceso al medio y conectividad por citar algunos ejemplos. Los métodos aplicados en nuestro trabajo pueden ser también aplicados a otros modelos de movilidad para obtener medidas de la movilidad creada de manera precisa y significativa.

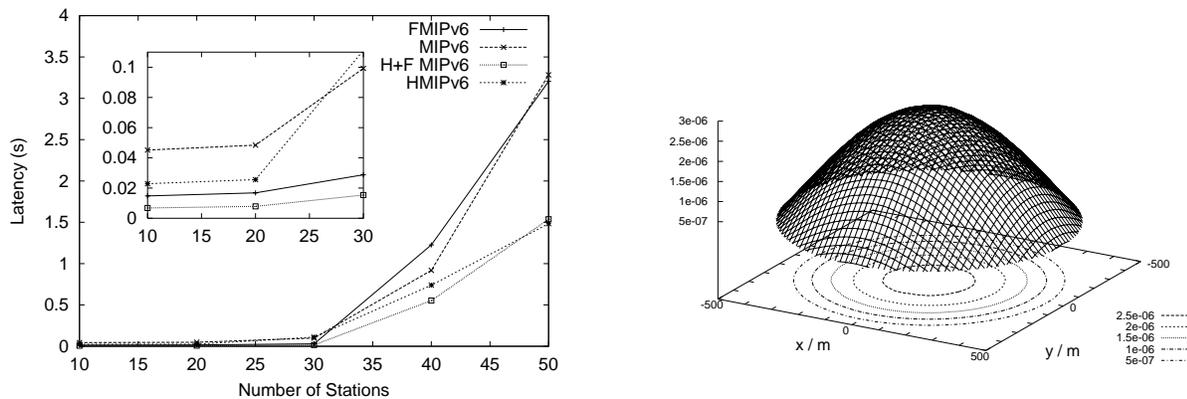


Figure 1: Ejemplo de resultados obtenidos en el área de administración de movilidad basada en IP, efecto del número de estaciones sobre el retardo de handoff, y en el área de la influencia de los modelos de movilidad sobre estudios de rendimiento, distribución espacial de los nodos móviles en un área circular.

### 2.3 Redes de acceso radio para UMTS basadas en IP

La sustitución del transporte ATM por IP en la red de acceso radio de UMTS (UTRAN) genera diversas problemáticas que tienen que ser solucionadas para garantizar la viabilidad de incluir las redes UMTS en las futuras redes All-IP. El importante incremento en el tamaño de las cabeceras para el transporte de paquetes requiere de la utilización de métodos de compresión y de multiplexado para conseguir una eficiencia del uso de los recursos de la UTRAN próxima al de ATM. Adicionalmente, los específicos requerimientos de UTRAN hacen necesario adaptar los mecanismos estándar de QoS packet scheduling con el fin de hacer un uso eficiente de los recursos de la red y al mismo tiempo proporcionar las garantías de calidad de servicio necesarias.

Los resultados obtenidos en esta área mediante simulación (OPNET) muestran que, utilizando métodos de compresión de cabeceras y diseñando Radio Access Bearers (RAB) adaptados a estos métodos, los recursos necesarios para transmitir paquetes IP en el interfaz de radio pueden ser reducidos significativamente. Específicamente, se diseñó un RAB para VoIP cuando Robust Header Compression (RoHC) es usado que reduce en aproximadamente un 50% los recursos necesarios en el interfaz de radio comparado con el RAB de referencia para VoIP definido por 3GPP.

En cuanto a la mejora de la eficiencia en el transporte de paquetes IP en la UTRAN, se identificó un mecanismo de multiplexado basado en soluciones estándares y se estudió su rendimiento en tres escenarios donde el número de usuarios generando tráfico diferente de VoIP se incrementa gradualmente (corto término  $\rightarrow$  medio término  $\rightarrow$  largo término). En los escenarios considerados el uso combinado de RoHC y multiplexado incrementó la eficiencia del uso de los recursos de UTRAN entre un 100% y un 260%.

Finalmente, para satisfacer los requerimientos específicos de UTRAN y al mismo tiempo proporcionar la calidad de servicio requerida por las aplicaciones, se propuso el uso de un mecanismo de QoS scheduling basado en Earliest-Deadline-First (EDF). El método propuesto, cuya mayor innovación es hacer el scheduling en el RNC en vez de en los routers intermedios (RNC → Node-Bs), permite la diferenciación del tráfico sin interferir con los requerimientos de transporte de UTRAN. Los resultados muestran que aplicando esta propuesta se consigue una mejora muy significativa con respecto al retardo y la tasa de pérdida de paquetes en la UTRAN.

## 2.4 Calidad de servicio para Wireless LANs

El estándar IEEE 802.11 presenta deficiencias relevantes para poder dar soporte a aplicaciones con requerimientos de calidad de servicio. La integración de este tipo de red de acceso a las futuras redes All-IP depende en gran medida del éxito del estándar 802.11e en extender la capa MAC de 802.11 para proporcionar garantías de calidad de servicio. El trabajo de investigación realizado en esta área contribuyó al esfuerzo de estandarización de 802.11e mediante el diseño y evaluación de tres extensiones de la capa MAC de 802.11 para proporcionar garantías de retardo (DIME-EF) y de ancho de banda, absolutas (ARME) o relativas (DWFQ).

DIME (DiffServ MAC Extension) es una extensión del protocolo MAC de 802.11 para dar soporte a Differentiated Services. Consiste en dos módulos independientes: Expedited Forwarding (EF) y Assured Forwarding (AF). La extensión EF se basa en reutilizar el Interframe Space de PCF de manera distribuida mientras que la extensión AF (ARME) utiliza DCF con un algoritmo modificado que calcula la Contention Window de manera dinámica. La compatibilidad de las extensiones propuestas con los usuarios utilizando la capa MAC original de 802.11 se consigue mediante el trato de estos usuarios como Best Effort. Los resultados obtenidos mediante simulación (ns-2) muestran que DIME-EF satisface los requerimientos de los servicios real-time si se realiza control de admisión y que ARME proporciona garantías de ancho de banda a los servicios AF mientras que el ancho de banda sobrante se reparte equitativamente entre los servicios Best Effort y AF. DWFQ (Distributed Weighted Fair Queuing) es una extensión de la capa MAC de 802.11 para emular Weighted Fair Queuing. El mecanismo utilizado es similar al de ARME, se ha diseñado un algoritmo que cambia el tamaño de las Contention Windows dinámicamente para conseguir la distribución de anchos de banda deseada. Las simulaciones realizadas (ns-2) muestran que DWFQ consigue proporcionar la distribución de anchos de banda requerida en una gran variedad de escenarios y que protege la utilización del canal en caso de sobrecarga.

Además del diseño de extensiones de la capa MAC de 802.11 para proporcionar garantías de calidad de servicio, en esta tesis se han analizado también mediante simulación (OPNET) las implicaciones de utilizar de manera simultánea los mecanismos de calidad de servicio de 802.11e y de ahorro de energía de 802.11. En dispositivos móviles como teléfonos celulares que incluyan Wireless LAN el uso de ambos mecanismos a la vez es necesario para garantizar una duración de la batería razonable y al mismo tiempo una calidad de VoIP aceptable. Las principales conclusiones que se han derivado del estudio son que la diferenciación obtenida con 802.11e se ve influenciada por el mecanismo de ahorro de energía de 802.11 pero sigue siendo altamente efectivo y que, en dispositivos en los que el ahorro de energía es un asunto de especial importancia, el significativo incremento en la duración de la batería justifica la pérdida de diferenciación y el aumento de señalización. Finalmente, dado el significativo impacto observado del mecanismo de ahorro de energía sobre los mecanismos de calidad de servicio de 802.11e, se diseñó y evaluó una solución para limitar el retardo de las tramas de bajada (AP → STAs) basada en la estimación de cada estación del tiempo entre llegadas de tramas de bajada para ella al AP. Los resultados del algoritmo propuesto, Adaptive Power Save Mode (APSM), muestran que se cumple el objetivo de limitar el retardo de bajada de las tramas y que el ahorro de energía es superior al del mecanismo de 802.11.

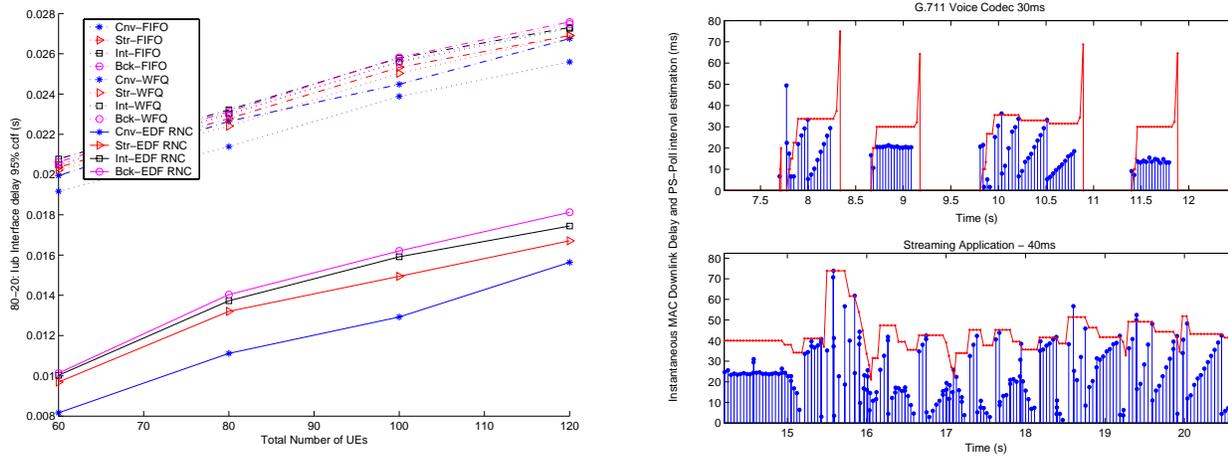


Figure 2: Ejemplo de resultados obtenidos en el área de redes de acceso radio para UMTS basadas en IP, efecto del número de estaciones sobre el retardo en el interfaz Iub para cada uno de los mecanismos de scheduling considerados, y en el área de calidad de servicio para Wireless LANs, muestra de la adaptación dinámica del algoritmo diseñado (APSM) para limitar el retardo de las tramas de bajada considerando aplicaciones realistas

### 3. Resumen y Conclusiones

Las futuras redes All-IP deberán permitir a sus usuarios utilizar sus servicios de manera continuada mientras se mueven libremente a través de distintas redes de acceso. Para que esto sea posible, la convergencia de las redes IP e inalámbricas es necesaria de tal manera que se puedan realizar handoffs entre diferentes redes de acceso de manera imperceptible para el usuario y al mismo tiempo garantizar una calidad de servicio similar en todas ellas. En esta tesis doctoral se ha contribuido al diseño de mejoras en tres áreas fundamentales para lograr esta convergencia.

En el área de administración de movilidad basada en IP se han evaluado las propuestas con mayor aceptación en el IETF, Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6) y Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6), y se ha diseñado una integración de ambas que mejora las ventajas que se obtendrían con su simple superposición. En el estudio, se han cuantificado las mejoras obtenidas con las diferentes propuestas y sus costes asociados para valorar el compromiso entre sus ventajas e inconvenientes en el caso de tener que decidir si es necesario utilizar alguna de las extensiones para una red en concreto. De los resultados de nuestra evaluación se puede concluir que las extensiones de Mobile IPv6 propuestas por el IETF podrían ser utilizadas para responder a necesidades concretas de futuras redes All-IP en cuanto a mejora de la experiencia de handoff (FMIPv6) o control de carga de señalización (HMIPv6) y que en el caso de necesitar satisfacer estos dos requerimientos al mismo tiempo lo más adecuado sería utilizar una integración de ambas como la propuesta en la tesis. Las conclusiones derivadas de este estudio han sido utilizadas para el diseño e implementación de la red All-IP desarrollada en el proyecto europeo Moby Dick. Los resultados han sido publicados en diversas revistas [2,4,6]<sup>1</sup> y congresos internacionales [8,10,11,14,15].

Durante la evaluación de los protocolos de administración de movilidad basados en IP, la influencia de los modelos de movilidad sobre los resultados de rendimiento obtenidos resultó en una línea de investigación adicional donde las principales características del modelo de movilidad Random Waypoint (RWP) fueron analizadas. El modelo RWP es un modelo de movilidad utilizado frecuentemente para simular redes de comunicaciones inalámbricas. La contribución de esta tesis en esta área ha sido la descripción formal de

<sup>1</sup>El listado de publicaciones y patentes puede consultarse en el anexo

este modelo en términos de un proceso estocástico discreto en tiempo. La duración del movimiento y la tasa de cambios de celda permiten cuantificar el nivel de movilidad de un escenario de simulación en concreto. El conocimiento de la distribución espacial de los nodos es esencial para toda investigación en que la posición relativa de los nodos es importante. Por último, la distribución de las direcciones escogidas por los nodos explica de manera analítica el efecto de que los nodos tienden a volver al centro del área del sistema. Los resultados de este trabajo tienen una gran importancia en la práctica para evitar errores a la hora de interpretar los resultados de las simulaciones y para poder comparar resultados con simulaciones obtenidas con otros modelos de movilidad. Este trabajo ha dado lugar a diversas publicaciones en revistas [3,5] y congresos internacionales [6,9,13].

En el área de redes de acceso radio para UMTS basadas en IP (UTRAN) las problemáticas originadas por la sustitución del transporte ATM por IP han sido analizadas y se han diseñado soluciones para mejorar la eficiencia en el uso de sus recursos. La potencial mejora de eficiencia en el uso del interfaz de radio ha sido evaluada mediante el diseño de un Radio Access Bearer (RAB) para voz sobre IP cuando se utiliza el mecanismo de compresión de cabeceras RoHC. Para incrementar la eficiencia del transporte de paquetes IP en la parte fija de la UTRAN se ha identificado y analizado un mecanismo de multiplexado de paquetes IP basado en soluciones estándares. Por último, para proporcionar garantías de calidad de servicio (QoS) y al mismo tiempo satisfacer los específicos requerimientos de retardo para la transmisión de paquetes en la UTRAN (interfaz Iub), se ha diseñado un mecanismo de QoS scheduling basado en Earliest-Deadline-First (EDF). Basándonos en nuestros resultados podemos concluir que, mediante la utilización de mecanismos estándares adaptados a las particularidades de las redes UTRAN basadas en IP, es posible mejorar significativamente la eficiencia del uso de sus recursos para obtener resultados similares a los del transporte ATM. Esta mejora sin embargo conlleva un incremento de la complejidad de la red no negligible. La investigación realizada en esta área ha sido utilizada en el desarrollo de productos NEC<sup>2</sup> para redes 3G basados en IP y ha dado lugar a una patente [6]. Parte de los resultados han sido publicados en congresos internacionales [3,7].

Finalmente, en el área de calidad de servicio para Wireless LAN, se ha contribuido al esfuerzo de estandarización de IEEE 802.11e mediante el diseño de extensiones de la capa MAC de IEEE 802.11 para proporcionar servicios de QoS similares a los definidos por Differentiated Services. Para proporcionar garantías de retardo y de ancho de banda absolutas dos extensiones, DIME-EF y ARME, fueron diseñadas y evaluadas. Dado que en algunos casos es preferible proporcionar garantías de ancho de banda relativo al disponible en el canal en vez de absolutas, se propuso y analizó también una extensión basada en weighted fair queuing, DWFQ. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de extender la capa MAC de 802.11 de forma sencilla para proporcionar garantías de QoS. Además del estudio de mecanismos para proporcionar garantías de QoS en la capa MAC de 802.11, en esta tesis se han analizado también las implicaciones de combinar los mecanismos de QoS de 802.11e con los de ahorro de energía de 802.11 en dispositivos con limitaciones de batería como por ejemplo teléfonos móviles duales (3G/WLAN). Basándonos en el importante efecto observado en nuestros estudios, se diseñó una solución adaptativa para limitar el retardo de las tramas transmitidas en la dirección de bajada (AP → STA) y al mismo tiempo minimizar el consumo de energía. El trabajo de la tesis realizado en esta área ha sido utilizado para el diseño y configuración del teléfono móvil NEC 3G/WLAN N900iL disponible en el mercado japonés. Los resultados de investigación han dado lugar a diversas patentes [1,2,3,4,5] y se han publicado en diversas revistas [1] y congresos internacionales [1,2,4,5,12,16,17,18,19,20]. Adicionalmente, la contribución del trabajo en esta área ha sido reconocida mediante la mención del autor de la tesis como uno de los principales contribuidores al estándar IEEE 802.11e y el premio de investigación y desarrollo de NEC en el 2005 (NEC R&D Award).

---

<sup>2</sup>La tesis doctoral fue realizada por el autor en paralelo con el desempeño de su actividad como investigador en los laboratorios de investigación de redes de NEC en Alemania.

## Originalidad

En este apartado se describen las contribuciones originales realizadas en las diferentes áreas que se han investigado en el contexto del tema de la tesis: Hacia redes All-IP, Convergencia de redes IP e Inalámbricas.

### Administración de movilidad basada en IP

En el área de administración de movilidad basada en IP se habían propuesto extensiones de Mobile IPv6 que solucionaban un problema específico. Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6) mejoraba el retardo y la pérdida de paquetes de Mobile IPv6 para realizar un handoff mientras que Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) disminuía la señalización introducida en la red en el caso de handoffs frecuentes en un mismo dominio local.

En esta tesis se contribuyó de manera original a esta área mediante la propuesta de una integración concreta de FMIPv6 y HMIPv6 que auna las ventajas de ambas y supera claramente el rendimiento de la superposición descoordinada de cada una de ellas. Adicionalmente, los estudios de simulación realizados para evaluar el rendimiento de las diferentes propuestas se diferencian significativamente de los realizados previamente por otros investigadores en el aumento de la complejidad de los escenarios considerados para emular redes realistas y la evaluación no solo de las mejoras obtenidas en cuanto a retardo de handoff sino de un amplio conjunto de medidas de rendimiento así como del efecto de diversos factores sobre los resultados obtenidos de estas medidas. Concretamente, en estudios previos de FMIPv6 y HMIPv6, el escenario de simulación consideraba una sola estación en toda la red realizando movimientos de forma determinista para forzar un cierto número de handoffs. En nuestro caso, se realizó un estudio de los protocolos en condiciones de estrés analizando como el retardo de handoff, la tasa de pérdida de paquetes, ancho de banda obtenido y probabilidad de éxito del proceso de handoff eran afectados por el número de nodos móviles (5 - 50), competencia para acceder al medio, o por interacciones con otros protocolos como por ejemplo Neighbor Discovery o TCP. Nuestro estudio también incluyó el estudio del comportamiento de los protocolos en escenarios realistas considerando movimientos aleatorios de los nodos y fuentes de tráfico como VoIP, video y FTP. Finalmente, los costes de señalización asociados a las diferentes propuestas comparado con las mejoras de rendimiento obtenidas también fueron analizadas considerando diferentes tasas de handoff y de número de correspondent nodes. Todos estos factores demostraron tener una influencia significativa sobre las medidas de rendimiento y se indicaron los puntos a tener en cuenta en una implementación real.

### Influencia de los modelos de movilidad sobre estudios de rendimiento

El estudio mediante simulación del rendimiento de protocolos de administración de movilidad basados en IP requiere del uso de modelos que generen el movimiento de los nodos de acuerdo a un cierto patrón predefinido.

En esta tesis se hicieron dos contribuciones originales a esta área. Por una parte, se demostró que el uso de modelos de movilidad desconociendo las características de la movilidad generada puede resultar en errores de interpretación de los resultados de simulación. Por ejemplo, se demostró que el modelo de movilidad más utilizado actualmente, Random Waypoint Model, genera una distribución de los nodos móviles no uniforme y por lo tanto los resultados de ciertos estudios utilizando este modelo podrían llegar a conclusiones erróneas debido este efecto. Por otra parte, se realizó un estudio analítico del Random Waypoint Model que permite determinar las características de la movilidad generada con este modelo así como poder encontrar los parámetros de configuración que se han de utilizar para generar la movilidad deseada. Específicamente, se obtuvieron las expresiones de (a) longitud y duración de un movimiento entre dos puntos, (b) la distribución espacial de nodos resultante y su dependencia con el tiempo de pausa, (c) el ángulo de dirección escogido al principio de cada transición, y (d) el número de cambios de celdas en una

red celular. Por último, la metodología utilizada en nuestro estudio del modelo Random Waypoint puede ser aplicada a otros modelos de movilidad para obtener expresiones analíticas de sus características y se puedan configurar para genera la movilidad deseada sin tener que recurrir a métodos empíricos.

## **Redes de acceso radio para UMTS basadas en IP**

La sustitución del transporte ATM por IP en la red de acceso radio de UMTS (UTRAN) genera diversas problemáticas que tienen que ser solucionadas para garantizar la viabilidad de incluir las redes UMTS en las futuras redes All-IP.

Las contribuciones originales del trabajo realizado en esta tesis doctoral en esta área han consistido en la búsqueda de soluciones para reducir el incremento de tamaño de cabeceras requerido por IP comparado con ATM y el estudio de cómo proporcionar calidad de servicio teniendo en cuenta los requerimientos del transporte en UTRAN.

A priori, para proporcionar calidad de servicio en UTRAN, se podría suponer que la aplicación de los mecanismos de QoS scheduling que han sido diseñados para las redes IP de Internet deberían ser adecuados también para UTRAN. Sin embargo, en esta tesis se identificaron unos requerimientos específicos del interfaz Iub (RNC ↔ Node-B) que provocan que una vez los paquetes son transmitidos por el RNC hacia los Node-Bs todos tengan que ser recibidos antes de un tiempo límite (igual para todas las clases) que es muy inferior al retardo mínimo requerido por cualquiera de las aplicaciones. Por esta razón, el uso de los mecanismos de QoS scheduling en los routers intermedios no es eficiente. Nuestra propuesta para satisfacer los requerimientos específicos de UTRAN y al mismo tiempo proporcionar la calidad de servicio requerida por las aplicaciones es la utilización del mecanismo Earliest Deadline First (EDF) en el RNC. De esta manera se permite la diferenciación del tráfico de acuerdo con su prioridad pero sin interferir con los requerimientos de transporte de UTRAN. Los resultados muestran que aplicando esta propuesta se consigue una mejora muy significativa con respecto al retardo y la tasa de pérdida de paquetes en la UTRAN.

Para reducir los recursos necesarios en el interfaz de radio para transmitir paquetes IP se evaluó el Radio Access Bearer (RAB) de referencia para VoIP definido por 3GPP cuando el mecanismo de compresión de cabeceras Robust Header Compression (RoHC) es usado. Dado que el rendimiento de este RAB no era óptimo, se diseñó uno que reduce en aproximadamente un 50% los recursos necesarios en el interfaz de radio comparado con el de referencia. Respecto a la mejora de la eficiencia en el transporte de paquetes IP en la UTRAN, se identificó un mecanismo de multiplexado basado en soluciones estándares que combinado con RoHC incrementa la eficiencia del uso de los recursos de UTRAN entre un 100% y un 260%.

## **Calidad de servicio para Wireless LANs**

Debido a las importantes deficiencias que el estándar IEEE 802.11 presenta para proporcionar calidad de servicio IEEE decidió crear el grupo de trabajo E para proponer una extensión de la capa MAC de 802.11, IEEE 802.11e, que proporcionase este tipo de garantías. La integración de las redes de acceso wireless LAN a las futuras redes All-IP depende en gran medida del éxito del estándar 802.11e en extender la capa MAC de 802.11 para proporcionar garantías de calidad de servicio de manera adecuada. Además, debido a la gran popularidad que los dispositivos móviles como ordenadores portátiles o teléfonos móviles han adquirido y teniendo en cuenta que cada vez es más corriente que estos dispositivos incluyan la posibilidad de comunicarse a través de wireless LAN, la utilización de mecanismos de ahorro de energía se ha convertido en una necesidad para garantizar una duración razonable de la batería de este tipo de dispositivos.

En esta tesis se contribuyó al esfuerzo de estandarización de 802.11e mediante propuestas originales para proporcionar diferentes tipos de calidad de servicio. Concretamente, se diseñaron y evaluaron tres extensiones de la capa MAC de 802.11 para proporcionar garantías de calidad de servicio similares a las definidas por Differentiated Services utilizando mecanismos distribuidos en vez de centralizados. DIME

(DiffServ MAC Extension) es una extensión del protocolo MAC de 802.11 para dar soporte a Differentiated Services que consiste en dos módulos independientes: DIME Expedited Forwarding (DIME-EF) y Assured Forwarding MAC Extension (ARME). La extensión DIME-EF se basa en reutilizar el Interframe Space de PCF de manera distribuida mientras que la extensión ARME utiliza DCF con un algoritmo modificado que calcula la Contention Window de manera dinámica. La compatibilidad de las extensiones propuestas con los usuarios utilizando la capa MAC original de 802.11 se consigue mediante el trato de estos usuarios como Best Effort. Los resultados obtenidos mediante simulación (ns-2) muestran que DIME-EF satisface los requerimientos de los servicios real-time si se realiza control de admisión y que ARME proporciona garantías de ancho de banda a los servicios AF mientras que el ancho de banda sobrante se reparte equitativamente entre los servicios Best Effort y AF. DWFQ (Distributed Weighted Fair Queuing) es una extensión de la capa MAC de 802.11 para emular Weighted Fair Queuing. El mecanismo utilizado es similar al de ARME, se ha diseñado un algoritmo que cambia el tamaño de las Contention Windows dinámicamente para conseguir la distribución de anchos de banda deseada. Las simulaciones realizadas (ns-2) muestran que DWFQ consigue proporcionar la distribución de anchos de banda requerida en una gran variedad de escenarios y que protege la utilización del canal en caso de sobrecarga.

Debido a la necesidad de utilizar el mecanismo de ahorro de energía de 802.11 en dispositivos móviles incluyendo la tecnología wireless LAN y su impacto potencial sobre los mecanismos de diferenciación definidos por 802.11e, en esta tesis se analizó mediante simulación (OPNET) las implicaciones de utilizar de manera simultánea estos mecanismos. Esta era una línea de investigación original ya que hasta el momento estos dos mecanismos siempre habían sido evaluados por separado. Las principales conclusiones que se han derivado del estudio son que la diferenciación obtenida con 802.11e se ve influenciada por el mecanismo de ahorro de energía de 802.11 pero sigue siendo altamente efectivo y que, en dispositivos en los que el ahorro de energía es un asunto de especial importancia, el significativo incremento en la duración de la batería justifica la pérdida de diferenciación y el aumento de señalización.

Por último, dado el significativo impacto observado del mecanismo de ahorro de energía sobre los mecanismos de calidad de servicio de 802.11e, se diseñó y evaluó una solución para limitar el retardo de las tramas de bajada (AP → STAs) basada en la estimación de cada estación del tiempo entre llegadas de tramas de bajada para ella al AP. Los resultados del algoritmo propuesto, Adaptive Power Save Mode (APSM), muestran que se cumple el objetivo de limitar el retardo de bajada de las tramas y que el ahorro de energía es superior al del mecanismo de 802.11.

## Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos en las diferentes áreas que se han investigado en el contexto del tema de la tesis: Hacia redes All-IP, convergencia de redes IP e inalámbricas

### Administración de movilidad basada en IP

- Propuesta detallada de una integración de las propuestas con mas aceptación del IETF, Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6) y Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) que aúna las ventajas de ambas y cuyo rendimiento es muy superior a su simple superposición: H + F MIPv6
- Estudio analítico del retardo de handoff de cada una de las propuestas: FMIPv6, HMIPv6 y H + F MIPv6
- Extensión de las librerías de la herramienta de simulación ns-2 para incluir neighbor discovery, FMIPv6, HMIPv6 y H + F MIPv6. Estas librerías han sido utilizadas por otros miembros del proyecto europeo Moby Dick (Mobility and Differentiated Services in a Future IP Network) como base para validar otras extensiones de protocolos estándar necesarias para conseguir el objetivo del proyecto que era el diseño de una red All-IP completa y su evaluación y demostración pública mediante un testbed
- Estudio exhaustivo mediante simulación de FMIPv6, HMIPv6 y de nuestra propuesta integración de ambas, H + F MIPv6. Los resultados del estudio fueron utilizados para valorar en el proyecto europeo Moby Dick el compromiso entre la mejora de rendimiento y los costes en cuanto a señalización y complejidad para decidir que protocolo de administración de movilidad basado en IP debía ser utilizado
- Los resultados de estos estudios han sido publicados en 3 revistas internacionales [2,4,6<sup>3</sup>] y 5 congresos internacionales [8,10,11,14,15]

### Influencia de los modelos de movilidad sobre estudios de rendimiento

- Estudio analítico del modelo de movilidad Random Waypoint utilizado comúnmente en estudios de simulación de redes inalámbricas. Se obtuvieron expresiones para:
  - Longitud y duración de un movimiento entre dos puntos
  - Distribución espacial de nodos resultante y su dependencia con el tiempo de pausa
  - Ángulo de dirección escogido al principio de cada transición
  - Número de cambios de celdas en una red celular
- Desarrollo de una metodología para la caracterización del modelo de movilidad Random Waypoint que puede ser utilizada para el estudio de otros modelos
- Demostración de que el desconocimiento de las características de la movilidad generada por el modelo de movilidad utilizado puede resultar en errores de interpretación de los resultados
- Los resultados de estos estudios han sido publicados en 2 revistas internacionales [3,5] y 3 congresos internacionales [6,9,13]

---

<sup>3</sup>El listado de publicaciones y patentes puede ser consultado en el anexo

## Redes de acceso radio para UMTS basadas en IP

- Identificación de los problemas básicos que amenazan la viabilidad del uso del transporte IP en redes de acceso radio para UMTS (UTRAN) y por lo tanto su posible integración en las futuras redes All-IP debido a la ineficiencia en el uso de los recursos de la UTRAN

- Problema 1: Eficiencia del interfaz de radio

Desarrollo de un simulador para evaluar el rendimiento del Radio Access Bearer (RAB) para VoIP de referencia propuesto por 3GPP en el caso de utilizar el mecanismo de compresión de cabeceras Robust Header Compression (RoHC)

Diseño de un RAB adaptado para VoIP con RoHC que reduce en aproximadamente un 50% los recursos necesarios en el interfaz de radio comparado con el RAB de referencia para VoIP definido por 3GPP

- Problema 2: Eficiencia del transporte de paquetes IP en el interfaz Iub

Identificación de un sistema de multiplexado de paquetes IP basado en soluciones estándares

Extensión de las librerías UMTS de la herramienta OPNET para simular el método de multiplexado en combinación con RoHC

Evaluación de la mejora obtenida utilizando el mecanismo de multiplexado y RoHC en tres escenarios donde el número de usuarios generando tráfico diferente de VoIP es incrementado gradualmente (corto término → medio término → largo término). En los escenarios considerados el uso combinado de RoHC y multiplexado incrementó la eficiencia del uso de los recursos de UTRAN entre un 100% y un 260%

- Problema 3: Eficiencia de los mecanismos de QoS scheduling en el interfaz Iub

Diseño de un mecanismo de QoS scheduling que permite satisfacer los requerimientos específicos de la UTRAN y al mismo tiempo proporcionar las garantías de calidad de servicio necesarias. El método propuesto consiste en realizar el QoS scheduling en el RNC en vez de en los routers intermedios en el interfaz Iub utilizando Earliest-Deadline-First (EDF)

Extensión de las librerías UMTS de la herramienta de simulación OPNET para incluir el método propuesto de QoS scheduling en el RNC (EDF)

Evaluación de la mejora obtenida con el método de QoS scheduling propuesto en los tres escenarios descritos previamente. Los resultados muestran que aplicando esta propuesta se consigue una mejora muy significativa con respecto al retardo y la tasa de pérdida de paquetes en la UTRAN. Este trabajo ha sido utilizado para el estudio de la evolución de los productos NEC de 3G

- Los resultados de estos estudios han sido publicados en 2 congresos internacionales [3,7]
- El mecanismo de QoS scheduling propuesto ha dado lugar a una patente [6]

## Calidad de servicio para Wireless LANs

- Contribución al diseño de las extensiones de capa MAC de IEEE 802.11 para proporcionar calidad de servicio, IEEE 802.11e, mediante la propuesta de tres mecanismos distribuidos que permiten dar garantías de retardo y de ancho de banda absolutas y relativas de manera similar a los Differentiated Services de Internet:

DIME-EF: DiffServ MAC Extension para proporcionar servicios Expedited Forwarding

ARME: Assured Rate MAC Extension para proporcionar servicios Assured Forwarding

DWFQ: Distributed Weighted Fair Queuing para proporcionar garantías relativas

- Extensión de las librerías de 802.11 de la herramienta de simulación ns-2 para incluir las tres propuestas diseñadas. Estas librerías fueron proporcionadas a los investigadores que las pidieron para su estudio y comparación con otras propuestas
- Evaluación analítica y mediante simulación del rendimiento obtenido con las tres propuestas diseñadas. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de extender la capa MAC de 802.11 de forma sencilla para proporcionar garantías de calidad de servicio
- Evaluación del impacto del modo de ahorro de energía de 802.11 sobre la diferenciación obtenida con 802.11e. Las principales conclusiones que se han derivado del estudio son que la diferenciación obtenida con 802.11e se ve influenciada por el mecanismo de ahorro de energía de 802.11 pero sigue siendo altamente efectivo y que, en dispositivos en los que el ahorro de energía es un asunto de especial importancia, el significativo incremento en la duración de la batería justifica la pérdida de diferenciación y el aumento de señalización.
- Diseño y evaluación de una mejora del modo de ahorro de energía para reducir el retardo en la transmisión de las tramas en la dirección de bajada (AP→ estación). Los resultados del algoritmo propuesto, Adaptive Power Save Mode (APSM), muestran que se cumple el objetivo de limitar el retardo de bajada de las tramas y que el ahorro de energía es superior al del mecanismo de 802.11
- Extensión de las librerías de 802.11 de la herramienta de simulación OPNET para incluir los mecanismos de calidad de servicio de 802.11e y los de ahorro de energía de 802.11 así como nuestra propuesta mejora del modo de ahorro de energía de 802.11 (APSM)
- Los resultados de estos estudios han sido publicados en 1 revista internacional [1] y 10 congresos internacionales [1,2,4,5,12,16,17,18,19,20]
- Los resultados de investigación han dado lugar a 5 patentes [1,2,3,4,5]
- Autor de un Tutorial para el congreso internacional IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications (PIMRC) en el 2005, *Integrating Wireless LAN Technology in Mobile Devices*
- El trabajo de la tesis realizado en esta área ha sido utilizado para el diseño y configuración del teléfono móvil 3G/WLAN desarrollado por NEC, N900iL. La configuración propuesta es la utilizada en los teléfonos móviles N900iL comercializados actualmente en Japón
- Premio de investigación y desarrollo de NEC en el 2005 (NEC R&D Award) por la contribución al desarrollo del teléfono móvil dual N900iL
- Mención del autor de la tesis como uno de los principales contribuidores al estándar IEEE 802.11e

El trabajo realizado por el autor en esta tesis doctoral ha sido reconocido por la comunidad investigadora con peticiones para revisar artículos e invitaciones para estar en comités técnicos científicos (TPCs). Específicamente, el autor es un revisor habitual de IEEE Transactions on Networking (TON), IEEE Journal on Selected areas of Communications (JSAC), ACM Kluwer Wireless Networks (WINET), ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R) y ACM Mobile Networking (MONET) entre otros, y ha sido miembro del comité técnico científico de los siguientes congresos: IEEE 3rd International Workshop on QoS in Multiservice IP Networks (QoS-IP'05), IASTED International Conference on Communication Systems and Networks (CSN'05), IEEE International Symposium on Personal Indoor Mobile Radio Communications (PIMRC'05) y IEEE International Conference on Communications (ICC'06).

## Aplicabilidad

Las contribuciones realizadas en esta tesis doctoral en el área de la convergencia de las redes IP e inalámbricas hacia redes All-IP tienen un gran interés práctico ya que pueden ser aplicadas para dar solución a diversas problemáticas actuales en la evolución de este tipo de redes. A continuación se detallan las diferentes contribuciones realizadas, la aplicación que ya se ha hecho de ellas y las potenciales áreas de aplicabilidad.

### Administración de movilidad basada en IP

El estudio de las mejoras y costes en cuanto a señalización y complejidad de las extensiones de Mobile IPv6 con más aceptación en el IETF, Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6) y Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6), más nuestra propuesta integración de HMIPv6 y FMIPv6 fue utilizado para determinar el protocolo de administración de movilidad basado en IP más adecuado para el proyecto europeo Moby Dick (Mobility and Differentiated Services in a Future IP Network).

La contribución realizada en esta área puede ser aplicada para:

- Estimar las mejoras de rendimiento que previsiblemente se obtendrán en una red en concreto y sus costes de señalización
- Determinar el protocolo de movilidad basado en IP más adecuado para satisfacer los requerimientos de una red en concreto
- Implementar la integración de HMIPv6 y FMIPv6 propuesta en vez de su simple superposición en el caso de desear obtener los beneficios de ambas con el máximo rendimiento

### Influencia de los modelos de movilidad sobre estudios de rendimiento

La obtención de las características del movimiento generado por el modelo de movilidad comúnmente utilizado en la simulación de redes inalámbricas, Random Waypoint (RWP), fue utilizado en el estudio del protocolo de administración de movilidad más adecuado para el proyecto europeo Moby Dick para determinar la configuración a utilizar de los parámetros de este modelo en los estudios de simulación y para evitar la interpretación incorrecta de los resultados obtenidos.

La contribución realizada en esta área puede ser aplicada para:

- Configurar el modelo RWP para generar la movilidad deseada en cualquier estudio de simulación utilizando este modelo
- Comprobar que determinados resultados de simulación se deben a la funcionalidad estudiada y no a las propiedades de la movilidad generada por el modelo RWP
- Obtener las características del movimiento generado por otros modelos de movilidad utilizando la metodología desarrollada en nuestro estudio
- Comparar resultados obtenidos con diferentes modelos de movilidad pero que generen un movimiento de los nodos móviles de similares características

## Redes de acceso radio para UMTS basadas en IP

El análisis de las diversas problemáticas originadas por la sustitución del transporte ATM por IP en la red de acceso de UMTS (UTRAN) y el diseño de nuestras propuestas soluciones fue utilizado para evaluar la viabilidad de esta posible evolución de las redes UMTS hacia la redes All-IP. NEC creó un testbed para evaluar esta tecnología utilizando partes de este estudio.

La contribución realizada en esta área puede ser aplicada para:

- Reducir los recursos necesarios para transmitir VoIP en el interfaz radio de UMTS mediante el uso del Radio Access Bearer (RAB) diseñado especialmente para la transmisión de VoIP cuando se utiliza el mecanismo de compresión de cabeceras Robust Header Compression (RoHC)
- Reducir los recursos necesarios para transmitir paquetes IP en el interfaz Iub (RNC ↔ Node-B) mediante el uso del mecanismo de multiplexado propuesto
- Maximizar la eficiencia del uso de los recursos de la UTRAN mediante la implementación del QoS scheduling en el RNC basado en Earliest Deadline First (EDF) de acuerdo con la propuesta de esta tesis en vez de en los routers intermedios en el interfaz Iub.
- Valorar el compromiso entre las mejoras obtenidas con las diferentes propuestas y su complejidad

## Calidad de servicio para Wireless LANs

Los diferentes mecanismos propuestos en esta tesis para proporcionar garantías de calidad de servicio en redes 802.11 de manera similar a Differentiated Services en Internet fueron utilizadas en las discusiones en el Task Group E de 802.11 y contribuyeron a la decisión final de los mecanismos y parámetros a configurar definidos en el estándar IEEE 802.11e. El estudio del efecto del modo de ahorro de energía de 802.11 sobre la diferenciación obtenida con 802.11e y la propuesta de una solución para limitar el retardo en la transmisión de las tramas en la dirección de bajada (AP→ estación) ha sido utilizado en el diseño y configuración del teléfono móvil dual 3G/WLAN desarrollado por NEC, N900iL.

La contribución realizada en esta área puede ser aplicada a:

- Utilizar en APs los mecanismos y algoritmos diseñados en esta tesis para proporcionar diversos tipos de calidad de servicio a los usuarios de manera dinámica configurando los parámetros de 802.11e de acuerdo a nuestras propuestas
- Utilizar en dispositivos móviles el algoritmo diseñado para poder utilizar continuamente el modo de ahorro de energía de 802.11 pero al mismo tiempo conseguir la calidad de servicio requerida por las aplicaciones como VoIP



Figure 3: N900iL: Teléfono móvil 3G/WLAN desarrollado por NEC utilizando parte de los resultados obtenidos en esta tesis doctoral.

**Toward All-IP Networks**  
IP and Wireless Networks Convergence

*Hacia Redes All-IP*  
*Convergencia de Redes IP e Inalámbricas*

**- Anexo -**

**Autor**

Xavier Pérez Costa

**Director de Tesis Doctoral**

Sebastià Sallent Ribes

**Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)**  
Departamento de Ingeniería Telemática  
Barcelona, España

y

**NEC Network Laboratories**  
Third Generation Technologies Group  
Heidelberg, Alemania

**Fecha de lectura**

9 de Mayo del 2005

**Calificación**

Matrícula de Honor por unanimidad del tribunal  
Mención de Doctor Europeo

# Índice

<b>1. Listado de Publicaciones</b>	Páginas 2-4
<b>2. Listado de Patentes</b>	Página 5
<b>3. Listado de Citaciones</b>	Páginas 6-7
<b>4. Mención en el estándar IEEE 802.11e</b>	Página 8
<b>5. Premio de Investigación y Desarrollo de NEC</b>	Página 9
<b>6. Muestra de artículos publicados en las diferentes áreas de investigación</b>	
6.1 A Performance Comparison of Mobile IPv6, Hierarchical Mobile IPv6, Fast Handovers for Mobile IPv6 and their Combination	Páginas 10-17
6.2 Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model	Páginas 18-36
6.3 Analysis of Performance Issues in an IP-based UMTS Radio Access Network	Páginas 37-42
6.4 Analysis of the Integration of IEEE 802.11e Capabilities in Battery Limited Mobile Devices	Páginas 43-48

## Listado de Publicaciones

### Revistas Internacionales

1. X.Pérez-Costa, D.Camps-Mur and T.Sashihara, *Analysis of the Integration of IEEE 802.11e Capabilities in Battery Limited Mobile Devices*, IEEE Wireless Communications Magazine (WirComMag), special issue on Internetworking Wireless LAN and Cellular Networks, Volume 12, Issue 6, December 2005.
2. V.Marques, X.Pérez-Costa, R.L.Aguiar, M.Liebsch and A. M. O. Duarte, *Evaluation of a Mobile IPv6-based Architecture supporting User Mobility QoS and AAAC in Heterogeneous Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), special issue on Wireless Overlay Networks Based on Mobile IPv6, Volume 23, No. 11, November 2005.
3. C.Bettstetter, H.Hartenstein, and X.Pérez-Costa, *Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model*, ACM/Kluwer Wireless Networks, special issue on Modeling and Analysis of Mobile Networks (WINET), vol. 10, no. 5, September 2004.
4. X.Pérez-Costa, M.Torrent-Moreno and H.Hartenstein, *A Performance Comparison of Mobile IPv6, Hierarchical Mobile IPv6, Fast Handovers for Mobile IPv6 and their Combination*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Volume 7, Issue 4, October, 2003.
5. X.Pérez-Costa, H.Hartenstein, and C.Bettstetter, *Towards a Mobility Metric for Reproducible and Comparable Results in Ad Hoc Networks Research*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Volume 7, Issue 4, October 2003.
6. X.Pérez-Costa and H.Hartenstein, *A Simulation Study on the Performance of Mobile IPv6 in a WLAN-Based Cellular Network*, Elsevier Computer Networks Journal (CN), special issue on The New Internet Architecture, 2002.

## Congresos Internacionales

1. X.Pérez-Costa and D.Camps-Mur, *AU-APSD: Adaptive IEEE 802.11e Unscheduled Automatic Power Save Delivery*, in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Istanbul, Turkey, June 2006.
2. X.Pérez-Costa, A.Vidal and D.Camps-Mur, *On the Integration of IEEE 802.11e QoS and Power Saving Mechanisms in Battery-limited Mobile Devices*, in Proceedings of European Wireless Conference (EW), Athens, Greece, April 2006.
3. X.Pérez-Costa, K.Heinze, A.Banchs and S.Sallent-Ribes, *Analysis of Performance Issues in an IP-based UMTS Radio Access Network* in Proceedings of ACM Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Montreal, Canada, October 2005.
4. X.Pérez-Costa and D.Camps-Mur, *APSM: Bounding the Downlink Delay for 802.11 Power Save Mode*, in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Seoul, Korea, May 2005.
5. M.Liebsch, X.Pérez-Costa, *Utilization of the IEEE802.11 Power Save Mode with IP Paging*, in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Seoul, Korea, May 2005.
6. R.Schmitz, H.Hartenstein, T.Melia, X. Pérez-Costa and W.Effelsberg, *The Impact of Wireless Radio Fluctuations on Ad Hoc Network Performance*, in Proceedings of 18 DFN Workshop on Communication Networks. Published in Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Dusseldorf, Germany, June 2004.
7. X.Pérez-Costa, A.Banchs, J.Noguera and S.Sallent-Ribes, *Optimal Radio Access Bearer Configuration for Voice over IP in 3G UMTS networks*, in Proceedings of the 5th European Wireless (EW), Barcelona, Spain, February 2004.
8. M.Torrent-Moreno, X.Pérez Costa and S.Sallent-Ribes, *A Performance Study of Fast Handovers for Mobile IPv6*, in Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Bonn, Germany, October 2003.
9. X.Pérez-Costa, H.Hartenstein, and C.Bettstetter, *Towards a Mobility Metric for Reproducible and Comparable Results in Ad Hoc Networks Research*, in Proceedings of ACM annual international conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), poster session, San Diego, USA, September 2003.
10. X.Pérez-Costa and M.Torrent-Moreno, *A Performance Study of Hierarchical Mobile IPv6 from a System Perspective*, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Anchorage, Alaska, May 2003.
11. X.Pérez-Costa, M.Torrent-Moreno and H.Hartenstein, *A Simulation Study on the Performance of Hierarchical Mobile IPv6*, in Proceedings of the International Teletraffic Congress (ITC), Berlin, Germany, August 2003.
12. A.Banchs, X.Pérez-Costa and D.Qiao, *Providing Throughput Guarantees in IEEE 802.11e Wireless LANs*, in Proceedings of the International Teletraffic Congress (ITC), Berlin, Germany, August 2003.

13. C.Bettstetter, H.Hartenstein, and X.Pérez-Costa, *Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model: Epoch Length, Direction Distribution, and Cell Change Rate*, in Proceedings of ACM MobiCOM Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Atlanta, USA, September 2002.
14. M.Liebsch, X.Pérez, R.Schmitz, A.Sarma, J.Jhnert, S.Tessier, M.Wetterwald and I.Soto, *Solutions for IPv6-based Mobility in the EU Project Moby Dick*, in Proceedings of the World Telecommunications Congress (WTC), Paris, France, September 2002.
15. X.Pérez-Costa, R.Schmitz, H.Hartenstein and M.Liebsch, *A MIPv6, FMIPv6 and HMIPv6 Handover Latency Study: Analytical Approach*, in Proceedings of the IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit (IST Summit), Thessaloniki, Greece, June 2002.
16. A.Banchs, M.Radimirsch, and Xavier Pérez, *Assured and Expedited Forwarding Extensions for IEEE 802.11 Wireless LAN*, in Proceedings of the tenth IEEE/IFIP International Workshop on Quality of Service (IWQoS), Miami, USA, May 2002.
17. A. Banchs and X. Pérez, *Distributed Weighted Fair Queuing in 802.11 Wireless LAN*, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), New York, USA, April 2002.
18. A.Banchs and X. Pérez, *An Assured Rate Service Extension for 802.11 Wireless LAN*, in Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, USA, March 2002.
19. A. Banchs, X. Pérez, M. Radimirsch and H. Stuetgen, *Service Differentiation Extensions for Elastic and Real-Time Traffic in 802.11 Wireless LAN*, in Proceedings of the IEEE Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), Dallas, USA, May 2001.
20. A.Banchs, X.Pérez, M.Radimirsch, and S.Sallent, *Service Differentiation Extensions for IEEE 802.11*, in 11th Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), Boulder, USA, March 2001.

## Listado de Patentes

1. X.Pérez-Costa, J.Palau and D.Camps-Mur, *Scheduled Automatic Power Save Delivery Algorithm*, NEC-E Invention Disclosure Nr.NLE-47-05, August 2005.
2. X.Pérez-Costa and M.Liebsch, *Extension of 802.11 Power Save Mode to Support IP Paging*, NEC-E Invention Disclosure Nr.NLE-42-05, August 2005.
3. X.Pérez-Costa and D.Camps-Mur, *Access Category Extension of the Access Point Power Save Mode Queue*, NEC-E Invention Disclosure Nr.NLE-29-04, August 2004.
4. X.Pérez-Costa, *No Data Acknowledgment (NDACK)*, NEC-E Invention Disclosure Nr.NLE-27-04, August 2004.
5. X.Pérez-Costa, *Adaptive Power Save Mode: Extension of IEEE 802.11 Power Save Mode*, NEC-E Invention Disclosure Nr.NLE-25-04, July 2004.
6. X.Pérez-Costa and A.Banchs, *Differentiated Downlink Packet Scheduling for an IP-based UTRAN*, NEC-E Invention Disclosure Nr. NLE-13-03, September 2003.

## Listado de Citaciones

A continuación se detallan algunas de las citaciones a artículos realizados en esta tesis doctoral en las diferentes áreas de estudio. La lista no pretende ser exhaustiva sino representativa de los diferentes tipos de citaciones que se han hecho a los artículos que han resultado del trabajo de la tesis doctoral.

### Libros y Revistas Internacionales

1. H.Zhu, M.Li, I.Chlamtac and B.Prabhakaran, *A survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks*, IEEE Wireless Communications Magazine (WirComMag), August 2004
2. A.Gurtov and J.Korhonen, *Effect of vertical handovers on performance of TCP-friendly rate control*, ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Volume 8, Issue 3, July 2004
3. F.Bai and A.Helmy, *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, Book, Kluwer Academic Publishers, June 2004.
4. W.Navidi and T.Camp, *Stationary distributions for the random waypoint mobility model*, IEEE Transactions on Mobile Computing (TON), Jan - Feb. 2004
5. C. Bettstetter, G. Resta and P. Santi, *The Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model for Wireless Ad Hoc Networks*, IEEE Transactions on Mobile Computing (TON), Vol. 2, n.3, July - Sept. 2003
6. S-C. Lo, G. Lee, and W-T. Chen, *An Efficient Multipolling Mechanism for IEEE 802.11 Wireless LANs*, IEEE Transactions on Computers (TOC), Special Issue on Wireless Internet, Vol. 52, No. 6, June 2003
7. W.Pattara-atikom et al., *Distributed Mechanisms for Quality of Service in Wireless LANs*, IEEE Wireless Communications Magazine (WirComMag), vol 10, No 3, June 2003
8. W.Pattara-Atikom, Sujata Banerjee and Prashant Krishnamurthy, *On distributed, adaptive, and fair QoS enabling mechanism in wireless LANs*, ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Volume 7, Issue 1, January 2003

### Congresos Internacionales

1. J.Kong, D.Wu, X.Hong and M.Gerla, *Mobile traffic sensor network versus motion-MIX: tracing and protecting mobile wireless nodes*, in Proceedings of the 3rd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks (SASN), November 2005
2. J.W. Mickens and B.D. Noble, *Security analysis: Modeling epidemic spreading in mobile environments*, in Proceedings of the 4th ACM workshop on Wireless security (WiSe), September 2005
3. C.Maih:ofer, T.Leinmuller, E.Schoch, *Abiding geocast: time-stable geocast for ad hoc networks*, in Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET), September 2005
4. J.Kong, X.Hong, Y.Yi, J-S.Park, J.Liu and Mario Gerla, *A secure ad-hoc routing approach using localized self-healing communities*, in Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc), May 2005

5. J. Puttonen, A.Viinikainen, M.Sulander and T.Hamalainen, *Performance Evaluation of the Flow-based Fast Handover Method for Mobile IPv6 Network*, of the 60th Semiannual IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), September 2004
6. Q. Zheng, X. Hong and S. Ray, *Recent advances in mobility modeling for mobile ad hoc network research*, in Proceedings of the 42nd annual Southeast regional conference (ACMSE), April 2004
7. G.Lin, G. Noubir and R.Rajaraman, *Mobility Models for Ad hoc Network Simulation*, in Proceedings of the 23rd Conference of the IEEE Communications Society (INFOCOM), March 2004
8. P.Samar, S.B. Wicker, *Network communication capacity and behaviors: On the behavior of communication links of a node in a multi-hop mobile environment*, in Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc), May 2004
9. A.Jardosh, E.M. Belding-Royer, K.C. Almeroth and S.Suri, *Simulation and implementation issues: Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks*, in Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), September 2003
10. N.Sadagopan, F.Bai, B.Krishnamachari and A.Helmy, *Mobility: PATHS: analysis of PATH duration statistics and their impact on reactive MANET routing protocols*, in Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc), June 2003
11. Y.Kwon, Y.Fang and H.Latchman, *Improving transport layer performance by using a novel medium access control protocol with fast collision resolution in wireless LANs*, in Proceedings of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWIM), September 2002

## Otro tipo de citaciones

Recomendación de leer algunos de nuestros artículos en asignaturas universitarias:

1. Asignatura *Mobile Computing and Wireless Networking course*, School of Engineering and Applied Science of the George Washington University, USA
2. Asignatura *Course on Networking Technology:IPv6, Mobility and Alternatives*, Helsinki University of Technology, Finlandia
3. Asignatura *Advanced Topics in Mobile Communications*, Universidad de Gottingen, Alemania
4. Asignatura *UNSA: DEA Réseaux et Systèmes Distribués*, Universidad de Ingeniería EURECOM, Sophia Antipolis, Francia