



Resumen de la Tesis Doctoral

***Provisión de Calidad de Servicio en Redes Móviles
Ad-Hoc Basada en el Diseño Cross-layer
de Algoritmos de Encaminamiento***

Realizada por: ***María Canales Compés***,
Profesora Colaboradora del área de Ingeniería Telemática del Departamento de Ingeniería
Electrónica y Comunicaciones (Universidad de Zaragoza)

Esta Tesis fue codirigida por: ***Dra. Ángela Hernández Solana***, Profesora Colaboradora
del área de Ingeniería Telemática y ***Dr. Antonio Valdovinos Bardají***, Catedrático del
área de Ingeniería Telemática en la Universidad de Zaragoza,

y leída el 09 de marzo de 2007, en el Departamento de Ingeniería Electrónica y
Comunicaciones de la Universidad de Zaragoza, obteniendo la calificación de *Sobresaliente
Cum Laude por Unanimidad*, con la mención de *Doctorado Europeo*.

Zaragoza, febrero 2008

Resumen del trabajo realizado

1. Motivación y objetivos de la Tesis

El enorme desarrollo que han experimentado en los últimos años las redes de comunicaciones móviles y la creciente demanda de nuevas aplicaciones más versátiles cuyos servicios han de ser igualmente proporcionados en dicho contexto ha dado lugar a un gran esfuerzo científico-técnico para determinar los mecanismos más adecuados para el cumplimiento de la calidad de servicio (QoS) requerida por dichas aplicaciones.

A diferencia de las clásicas redes celulares (UMTS, GPRS, GSM, etc.) y las redes inalámbricas de área local (IEEE 802.11 - modo BSS) donde una infraestructura fija soporta el control y la gestión de la red (estaciones base o puntos de acceso), una red ad hoc – *Mobile Ad hoc NETWORK* (MANET) – es una red auto-organizativa, distribuida y capaz de adaptarse a cambios en su topología (términos ingleses *self-creating*, *self-organizing*, *self-administering*).

La capacidad autosuficiente de las MANETs se consigue gracias a que la inteligencia de la red reside en los nodos o terminales y no está centralizada en un único elemento. Dadas su versatilidad, flexibilidad y facilidad de establecimiento, este tipo de redes representa por una parte una alternativa tecnológica atractiva para nuevos escenarios de aplicación, y por otra, resuelve el despliegue de redes allí donde la dificultad en el establecimiento de una infraestructura de red lo hacía inviable. Su importancia reside, por lo tanto, en su capacidad para proporcionar soporte a nuevos servicios en multitud de escenarios: provisión de servicios de banda ancha en entornos específicos (centros comerciales, aeropuertos); despliegue de redes en entornos de emergencias médicas; aplicación en entorno militar, como por ejemplo, redes desplegadas en un campo de batalla; redes de sensores inalámbricas (WSN); redes de área personal (PAN); acceso inalámbrico a redes de área extensa tanto fijas (RTC, ADSL, etc.) como móviles (TETRA, GPRS, UMTS); aumento de la cobertura y la capacidad de redes celulares UMTS; redes intervehiculares.

La falta de una infraestructura fija que soporte la gestión de la red exige la cooperación activa entre los diferentes nodos para lograr un funcionamiento distribuido. El alcance limitado de las transmisiones radio implica la necesidad de establecer rutas multisalto para conectar dos nodos cualesquiera de la red. Así pues, la funcionalidad de *host* de los terminales se complementa con la de *router*, retransmitiendo también el tráfico de comunicaciones ajenas, facilitando así un enrutamiento distribuido. De igual modo, el reparto de los recursos de la red entre las diversas comunicaciones no recae en un gestor específico, sino que debe realizarse mediante la colaboración de todos los terminales. La naturaleza compartida del medio de transmisión inalámbrico presenta una dificultad añadida. La eficiencia en su utilización depende en gran medida de la capacidad de los mecanismos de control de acceso al medio MAC para proporcionar un acceso distribuido al sistema garantizando un elevado reuso de los recursos. Además, la provisión de QoS requiere una asignación diferenciada de los recursos entre las diversas aplicaciones de acuerdo a sus demandas. La solución al compromiso entre eficiencia y provisión de QoS debe basarse en mecanismos de admisión (CAC) capaces de adecuarse a la naturaleza distribuida de las redes ad hoc.

Por otra parte, las MANETs se caracterizan por su dinamismo, ya que los terminales pueden moverse libremente dentro de la red así como aparecer y desaparecer de la misma forma dinámica generando topologías muy variantes, lo que dificulta el establecimiento y mantenimiento de las rutas. Asimismo, garantizar las prestaciones de las comunicaciones activas en un escenario donde tanto la interferencia entre usuarios como la conectividad resultan tan variantes todavía complica más el proceso de admisión y la provisión de QoS.

El mecanismo de admisión debe valorar el impacto real de una nueva activación sobre la eficiencia de la red y las prestaciones de las conexiones activas. Además, debe evaluar la posibilidad real de mantener la conexión activa en su duración completa garantizando el cumplimiento de sus demandas. La admisión de una aplicación en un contexto ad hoc no sería posible sin la confirmación

previa de la existencia de un camino de conexión viable entre los dos extremos de la comunicación. Cobra así especial relevancia el problema del encaminamiento multisalto. Los protocolos de encaminamiento desarrollados en las redes fijas, donde los nodos permanecen estables, no son adecuados en redes ad hoc, por lo que han surgido multitud de propuestas para implementar algoritmos distribuidos capaces tanto de encontrar rutas como de reaccionar ante la variabilidad inherente a la red. La mayoría de estos algoritmos se han diseñado sin tener en cuenta explícitamente la calidad de servicio de las rutas encontradas. Sin embargo, la demanda real de las aplicaciones exige el cumplimiento de ciertas restricciones (ancho de banda, retardo mínimo o su variación – *jitter*) a lo largo de la ruta completa, extremo a extremo (E2E). Se demanda, por lo tanto, la inclusión de nuevas métricas de encaminamiento, más allá del número de saltos, capaces de identificar la calidad existente en cada camino facilitando así las decisiones adecuadas por parte de los algoritmos. Por otra parte, puesto que la provisión de la QoS depende fundamentalmente de la gestión de los recursos del sistema, una nueva definición de la métrica de encaminamiento debe facilitar un conocimiento lo más exacto posible de la disponibilidad y viabilidad de estos recursos. Una correcta estimación de estos parámetros depende directamente de la tecnología de nivel físico empleada y la capa MAC implementada, de manera que una operación conjunta (*cross-layer*) se presenta como una de las respuestas más prometedoras a la necesidad planteada.

En este contexto, el objetivo fundamental de esta tesis es el diseño y evaluación de una propuesta de encaminamiento con QoS basada en un diseño *cross-layer* apoyado en la cooperación con el nivel MAC. Se pretende así diseñar un mecanismo de control de admisión distribuido que garantice la provisión de QoS extremo a extremo y sea capaz de adaptarse al entorno variante característico de las MANETs. Los problemas concretos que se plantean en esta tesis son: la caracterización de las principales necesidades tanto a nivel de encaminamiento como a nivel MAC finalmente representadas en la selección específica de los algoritmos; la adecuada definición de las métricas de encaminamiento que permiten identificar correctamente la disponibilidad real de los recursos; el diseño de los mecanismos de cooperación necesarios y el desarrollo de técnicas de adaptación al entorno orientadas a la flexibilización de las estrategias propuestas.

Un objetivo adicional, pero no menos importante, es el desarrollo de una herramienta de simulación adecuada para la evaluación de las propuestas bajo condiciones realistas. Dicha herramienta pretende emular el comportamiento de los algoritmos involucrados y los diversos procedimientos desarrollados. Teniendo en cuenta la necesidad de realizar una adaptación consecuente con la naturaleza variante de las redes ad hoc se consideran aspectos como la interferencia entre usuarios, el modelo de propagación o la movilidad de los terminales. Dada la particularización de algoritmos realizada y el diseño de procedimientos específicos de cooperación entre los diversos módulos, se opta por una programación flexible y autónoma frente a los simuladores de red existentes. La herramienta, desarrollada en C++ e implementada como parte del trabajo realizado en la tesis, responde a un diseño modular ampliable gracias a la versatilidad a la hora de modificar elementos característicos como las fuentes de tráfico, modelos de propagación o patrones de movilidad.

2. Desarrollo

1.- Estudio, caracterización y selección de los algoritmos de encaminamiento y nivel MAC que constituyen una arquitectura de cooperación adecuada (trabajo reflejado en los capítulos 2 y 3 de la tesis y el anexo A).

El estudio realizado de los protocolos MAC desarrollados en el contexto ad hoc se ha centrado en las estrategias de acceso TDMA, ampliamente analizadas por diversos autores y consideradas especialmente atractivas gracias a la asignación dinámica y la reserva de recursos que proporcionan. Se ha tenido en cuenta como criterio diferenciador el soporte que la capa de acceso debe constituir para la arquitectura *cross-layer* y la necesaria capacidad para proporcionar QoS en el nivel de enlace. La selección realizada no pretende constituir un diseño óptimo en sí mismo sino una base adecuada

para la implementación de la arquitectura finalmente propuesta. Las características del protocolo ADHOC MAC en su versión modificada para proporcionar QoS, responden a estas pretensiones.

ADHOC MAC trabaja sobre una capa física síncrona ranurada e implementa un mecanismo de acceso distribuido capaz de establecer dinámicamente un canal *broadcast* fiable – *Basic broadcast CHannel* (BCH) – para cada terminal activo. Cada BCH transporta señalización, incluidas prioridades, que distribuye información de conectividad en el nivel dos, así como la ocupación percibida de los recursos, hacia todos los terminales. Esta funcionalidad resulta particularmente atractiva a la hora de proporcionar una estimación fiable de la disponibilidad de recursos al nivel superior. En respuesta a la QoS demandada por las diferentes aplicaciones, el nivel MAC asigna eficientemente recursos diferenciados explotando la señalización en banda proporcionada por el protocolo. La estrategia de reserva se basa en el uso de las capacidades del BCH para señalar la petición antes de realizar el acceso de manera que, gracias a la resolución distribuida de la competencia entre los diversos terminales, se garantiza una utilización de los recursos teóricamente libre de colisiones – *Book In Advance Scheme* (BIAS). Por otra parte, gracias al uso de las prioridades, los servicios más prioritarios pueden utilizar recursos previamente reservados para aplicaciones de menor prioridad.

Tras el análisis crítico de las múltiples alternativas de encaminamiento estudiadas, el algoritmo *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV) se ha considerado un punto de partida apropiado para desarrollar un mecanismo distribuido de control de admisión. Su naturaleza bajo demanda, de activación inmediata ante el establecimiento de una nueva conexión, y la consecuente difusión de información de encaminamiento a lo largo de la red, se han estimado adecuadas para determinar tanto la disponibilidad de recursos como el impacto sobre las conexiones admitidas, reduciendo el *overhead* asociado a un mantenimiento periódico de las rutas. Su estructura plana, sin jerarquización de las funcionalidades, puede facilitar la generalización del diseño, en la medida que particularizar en protocolos específicos lo hace posible, no asociándolo así a un contexto de aplicación determinado y proporcionando mayor flexibilidad al diseño. De manera adicional, se ha estudiado la versión multicamino correspondiente (AOMDV), con objeto de incorporar las facilidades asociadas a la búsqueda de diversas rutas de manera que la definición de una métrica de QoS permita realizar una mejor selección en función del criterio establecido.

2.- Definición de una métrica de encaminamiento (ancho de banda E2E). Propuesta y evaluación del procedimiento de admisión distribuido (capítulo 3, anexo B).

La asignación de recursos necesaria para satisfacer los requerimientos de las aplicaciones se ha concretado en la definición de una métrica de encaminamiento basada en la medida del ancho de banda extremo a extremo. La particularización de dicha medida en el acceso TDMA considerado se ha desarrollado mediante el diseño de un procedimiento de cálculo de los slots disponibles en cada uno de los enlaces a lo largo del camino buscado (algoritmo BWC-FA). La consecuente reserva de los recursos demandados durante la confirmación de la ruta seleccionada permite el establecimiento de circuitos virtuales garantizados, constituyendo el mecanismo de admisión distribuido.

Para garantizar las demandas de las aplicaciones, en términos de ancho de banda (R slots), es necesario realizar una búsqueda selectiva de ruta que determine, conjuntamente con el procedimiento de encaminamiento, la disponibilidad de recursos en el camino, es decir: los slots TDMA en cada enlace que garantizan, en caso de utilizarse, transmisiones libres de colisiones a lo largo del camino P encontrado, $P = \{n_m \rightarrow n_{m-1} \dots \rightarrow n_1 \rightarrow n_0\}$. El cálculo distribuido del ancho de banda, realizado durante el descubrimiento de ruta, se apoya en las medidas tomadas por el nivel MAC gracias al intercambio periódico de información de estado en el slot BCH. Gracias a esta información, cada nodo intermedio i define los conjuntos de slots disponibles para transmitir sin colisionar con ningún vecino (SRT_i), y los slots disponibles para recibir sin sufrir interferencias (SRR_i). Evitar el problema del terminal oculto, característico de las redes ad hoc, exige utilizar recursos no coincidentes en tres enlaces consecutivos. Esta inter-dependencia entre los diversos enlaces conduce al intercambio necesario de información, mediante los propios mensajes de encaminamiento, que permita la definición correcta de disponibilidad en el camino completo. El conjunto de slots dispo-

nibles PB_{k+1}^k , a calcular en el nodo k , identifica los slots libres de conflicto que permiten transmitir desde el nodo previo n_{k+1} hasta el nodo k . La incorporación de la información relativa a los enlaces previos en el mensaje *RREQ* recibido (tripleta $\langle PB_{k+3}^{k+1}, PB_{k+2}^{k+1}, SRT_{k+1} \rangle$), permite actualizar la disponibilidad real incorporando la restricción de *SRR* $_k$ del nodo k , calculando el PB_{k+1}^k efectivo (funciones mostradas en el anexo B de la memoria) y evaluar la satisfacción de demandas del usuario de acuerdo a la métrica de ancho de banda calculada hasta el momento: $BW(FP^k) = |PB_{k+1}^k|$ siendo $FP^k = \{n_m \rightarrow n_{m-1} \dots \rightarrow n_{k+1} \rightarrow n_k\}$ el camino parcial desde la fuente al nodo k . El valor finalmente calculado en el destino identifica el ancho de banda extremo a extremo disponible $BW(P) = BW(FP^0) = |PB_1^0|$. El destino conserva la información de las copias repetidas del mismo *RREQ*, provenientes de diferentes caminos, con objeto de seleccionar finalmente la mejor alternativa de acuerdo al valor de su métrica. La decisión final considera el camino con mínimo número de saltos que garantiza la máxima disponibilidad. Durante la confirmación de ruta, nuevamente se incorpora en el *RREP* la información de disponibilidad necesaria $\langle PB_{k+3}^k, PB_{k+2}^k, PB_{k+1}^k \rangle$, de acuerdo a los cálculos realizados durante la búsqueda (valor más actualizado de disponibilidad existente en nodos más cercanos al destino). Los transmisores de cada enlace identifican únicamente los recursos demandados (R), activando inmediatamente su reserva efectiva mediante el mecanismo BIAS del protocolo ADHOC MAC.

Finalmente, el funcionamiento conjunto del AODV/BWC-FA y el ADHOC MAC constituye un novedoso control de admisión distribuido capaz de garantizar la utilización eficiente de los recursos del sistema en función de las demandas específicas de QoS de las diversas aplicaciones. La gestión compartida de los recursos se materializa en la utilización conjunta de la tabla de encaminamiento, modificada incluyendo los slots especificados en el enlace hacia el siguiente salto. El establecimiento de flujos con demandas de QoS se traduce en la activación del procedimiento AODV/BW-FA resultando en la activación del circuito virtual correspondiente, identificado unívocamente en la tabla de encaminamiento. Por el contrario, todo el tráfico *best-effort*, hacia el mismo destino, comparte una entrada en la tabla no asociada con el nivel MAC. La asignación de recursos (*scheduling*) consiste en la reserva continua de los slots especificados en la tabla de encaminamiento y la posterior asignación secuencial, por orden de prioridad, de recursos adicionales para el tráfico no garantizado, de acuerdo a los paquetes en cola (incluyendo recursos prioritarios adicionales que permiten la transmisión eficiente de la información de control (encaminamiento) y la flexibilidad para absorber fluctuaciones de tasa sobre el ancho de banda medio garantizado). Por otra parte, la sincronización entre ambos niveles, encaminamiento y MAC, permite la reacción conjunta ante las posibles roturas de rutas (desconexiones de enlaces) y la actualización apropiada de las tablas compartidas.

Como se refleja en el capítulo 3 de la memoria, con objeto de evaluar la conveniencia de las soluciones adoptadas, se ha analizado la propuesta frente a diferentes condiciones de entorno, asumiendo un escenario simplificado (estático, *Protocol Model*), lo que ha permitido identificar los problemas derivados del carácter compartido del medio de transmisión y la naturaleza distribuida del procedimiento. El análisis realizado ha servido para verificar la corrección del mecanismo de admisión propuesto, en situaciones de diversa densidad de terminales, o carga en el sistema, así como en escenarios multiservicio, lo que se muestra en las conclusiones obtenidas en el apartado de resultados del presente resumen.

3.- Análisis del impacto de la variabilidad del entorno sobre el control de admisión. Propuesta y evaluación de un mecanismo de readmisión y estrategias de adaptación (capítulo 4).

El control de admisión propuesto inicialmente asume una estimación fiable del ancho de banda extremo a extremo (algoritmo BWC-FA) y la consiguiente selección y reserva permanente de recursos libres de colisiones (*conflict-free*). Dicha fiabilidad se apoya en la señalización proporcionada por el protocolo ADHOC MAC, capaz de eliminar el problema del terminal oculto y garantizar el reúso evitando terminales expuestos. El análisis del esquema mediante un modelo de interferencia simplificado (capítulo 3) demuestra la certeza de dicha afirmación. Sin embargo, el contexto de

aplicación real (redes inalámbricas, móviles y distribuidas) implica un escenario variante que requiere la adaptación de las soluciones inicialmente adoptadas.

El efecto de la interferencia real entre usuarios (SIR) tiene un impacto directo sobre la información de estado recibida (BCH) así como sobre el mantenimiento fiable de los recursos reservados. Las inestabilidades en el sistema a consecuencia de una información imprecisa en el nivel MAC han tenido que resolverse desde la perspectiva de dicho nivel, con objeto de seguir constituyendo un soporte fiable para la arquitectura propuesta. Los problemas observados gracias a la valoración de la arquitectura completa han focalizado los puntos débiles del protocolo ADHOC MAC. Las posibles soluciones, concretadas en la modificación adecuada de los procedimientos y la señalización involucrada, así como en la definición de un conjunto de parámetros configurables, se han evaluado desde un punto de vista global, analizando el impacto sobre las prestaciones obtenidas en términos de admisión y tráfico correctamente cursado. Los diversos escenarios de test, analizados en condiciones de interferencia variante (variabilidad en el tráfico) han permitido extraer la parametrización necesaria del protocolo MAC para garantizar la fiabilidad y estabilidad de la propuesta.

El efecto añadido de la movilidad de los terminales todavía supone una dificultad mayor para garantizar la QoS ante un escenario de conectividad e interferencia variantes. La modificación de las condiciones iniciales de admisión, resultado de la variabilidad observada, puede producir escenarios de tráfico admitido y utilización de recursos poco eficientes. La nueva topología puede implicar la desconexión y el redescubrimiento de rutas o el incremento de la interferencia en los circuitos virtuales ya establecidos de manera que no pueda mantenerse el ancho de banda garantizado. Las soluciones propuestas tratan de mejorar las prestaciones del sistema en este nuevo escenario, en términos de grado de servicio (GoS) y capacidad efectiva. De modo análogo a una red celular, una MANET se comporta como un sistema con capacidad de proporcionar QoS, medida mediante el GoS (típico: $GoS = (P_b + 10 \cdot P_d)/11$) en términos de probabilidad de bloqueo de conexiones P_b (durante la admisión inicial) o expulsión de aplicaciones en curso P_d (bloqueo durante *handover*). Sin embargo, en el contexto ad hoc, dada la naturaleza distribuida de los procedimientos de admisión y reasignación de recursos, algunas aplicaciones que no experimentan la QoS demandada pueden mantenerse en el sistema, a pesar de ser equivalentes, desde la perspectiva del usuario final, con una expulsión. Así pues, una evaluación más realista del grado de servicio incluye dichas aplicaciones en la métrica final (redefinición de P_d como P_f).

Con objeto de flexibilizar la utilización de los recursos se ha diseñado y evaluado un mecanismo de readmisión capaz de priorizar el mantenimiento de las comunicaciones activas mediante una adecuada redistribución de los recursos expulsando las aplicaciones que no puedan permanecer con la QoS demandada en el nuevo escenario de admisión. Los procedimientos existentes en el propio AODV para identificar roturas en las rutas se han complementado con un procedimiento de monitorización de la QoS basado en el mecanismo BWC-FA propuesto para la admisión inicial. La identificación del ancho de banda residual disponible permite realizar reasignaciones inmediatas sobre los caminos establecidos activando la readmisión únicamente en caso de estimar una QoS no recuperable. La configuración de ciertos parámetros específicos permite modular la operación del sistema con objeto de definir la correcta respuesta del mismo de acuerdo tanto a la prioridad del tráfico ofrecido, como a la naturaleza de la degradación en caso de realizarse una readmisión. Se consideran así tres escenarios de actuación: admisión inicial (I), readmisión tras una rotura (II) y readmisión tras la pérdida de la QoS (III). La priorización flexible realizada a nivel MAC tiene por objeto diferenciar las readmisiones asegurando una menor probabilidad de expulsión tratando de minimizar, a su vez, la pérdida de paquetes de los flujos prioritarios mientras la conectividad del camino pueda garantizarse. Por otra parte, para mejorar las prestaciones en términos de grado de servicio se ha diseñado una estrategia de sobredimensionado de las demandas iniciales (búsqueda de ancho de banda adicional ΔBW) que gracias al aumento en el bloqueo de nuevas admisiones aumenta la capacidad disponible en readmisión reduciendo la expulsión de conexiones activadas.

Una detallada evaluación de las estrategias propuestas, cuyos resultados se reflejan en el apartado correspondiente de este resumen, ha tratado de identificar la correcta configuración de parámetros

del mecanismo completo. Sin embargo, los resultados observados han constatado la clara dependencia de la respuesta del sistema con la naturaleza de las aplicaciones y el grado de movilidad. Si bien no resulta viable una optimización generalizable, han podido establecerse dos modos de operación básicos: **funcionamiento en entorno cuasi-estático** (movilidad reducida), que exige la configuración básica sin el *overhead* asociado a la flexibilización adicional y **funcionamiento en movilidad**, donde una admisión más limitada y una probabilidad de expulsión representativa de conexiones interferentes permite mejorar sensiblemente las prestaciones de las aplicaciones admitidas. Esta influencia determinante del grado de movilidad ha impulsado el diseño de un mecanismo eficiente de adaptación al entorno. Mediante un análisis del impacto de la movilidad sobre la conectividad de la red (duración de los enlaces, número de vecinos) se ha identificado una métrica representativa basada en la variación del número de vecinos: $var_{NB,i}^{filt}(t) = \alpha \cdot var_{NB,i}^{filt}(t - \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot var_{NB,i}(t)$, con $var_{NB,i}(t) = |[NB_i^{est}(t) - NB_i^{est}(t - \Delta t)]/\Delta t|$. La continua identificación del conjunto de vecinos estables, intrínseca al protocolo ADHOC MAC implementado, ha permitido el diseño de un método de seguimiento de la citada métrica, así como la posterior definición de los umbrales adecuados de disparo e histéresis, que permiten activar la reacción esperada del sistema, reconfigurando automáticamente los mecanismos de flexibilización propuestos garantizando la estabilidad del sistema.

3. Conclusiones

En esta tesis se ha propuesto y evaluado una arquitectura *cross-layer* basada en la cooperación entre el nivel de red (encaminamiento con QoS) y el nivel MAC que ha permitido diseñar un mecanismo de control de admisión distribuido capaz de proporcionar QoS extremo a extremo adaptándose al entorno variante característico de las MANETs. De acuerdo al propósito establecido se han estudiado los requisitos necesarios, en términos de encaminamiento y protocolo de acceso al medio, definiendo las estrategias de cooperación necesarias y proponiendo mecanismos de gestión distribuida de recursos y diferenciación de servicios.

El modelado de la arquitectura propuesta a través de un simulador, desarrollado en C++, sobre el que se han implementado y evaluado las diversas estrategias diseñadas a lo largo de la realización de la tesis, ha permitido identificar los problemas derivados tanto de la propia cooperación entre niveles, como de su aplicación en escenarios más realistas. La identificación mediante simulación de las necesidades concretas ha facilitado el planteamiento de las soluciones presentadas en este trabajo.

La evaluación de la propuesta en condiciones estáticas ha demostrado la capacidad del sistema de asegurar una asignación eficiente de los recursos de acuerdo a las demandas de las aplicaciones mediante el establecimiento de circuitos virtuales de ancho de banda garantizado. La selección específica de recursos libres de colisiones, enlace a enlace, supera la imprecisión de los mecanismos de admisión basados en la clásica medida del enlace de mínimo ancho de banda (“cuello de botella”). Sin embargo, la naturaleza interferente y dinámica de las MANETs conduce a cambios en la topología que modifican las condiciones de admisión y la fiabilidad de los recursos reservados, reduciendo la ganancia obtenida. Dichos efectos han motivado la propuesta de estrategias de protección frente a interferencias y un mecanismo de reasignación flexible y readmisión de conexiones. Los resultados han revelado las dificultades de configurar apropiadamente el mecanismo propuesto en diferentes condiciones de movilidad. Sin embargo, se han identificado dos modos de operación básicos: en escenarios cuasi-estáticos (baja movilidad) y de alta movilidad, a partir de los cuales se ha diseñado un método de configuración adaptativa basado en la estimación del grado de movilidad del entorno, la definición de los umbrales adecuados de disparo y un mecanismo de histéresis que garantiza la estabilidad del sistema. La evaluación del método planteado ha permitido validar la adecuación de la propuesta en escenarios de movilidad media variante, logrando una mejora significativa en términos globales de capacidad efectiva y grado de servicio y la simplificación de la parametrización del sistema consiguiendo hacer éste adaptable al entorno.

Originalidad

El emergente escenario de las redes móviles ad hoc, especialmente en el intervalo temporal en el que la tesis fue realizada, motivó la creciente investigación en dicho contexto, en múltiples áreas de trabajo. En este sentido, especialmente considerando la creciente utilización de aplicaciones con grandes demandas de recursos y restricciones asociadas, cobraba especial relevancia la capacidad de proporcionar QoS en este nuevo entorno. Si bien en redes fijas se han desarrollado muchos trabajos al respecto, éstos no son directamente aplicables en el entorno de las redes móviles ad hoc, especialmente limitado por un lado, por el propio medio de transmisión inalámbrico, y por otro, por el carácter móvil de los terminales. Así pues, proporcionar un servicio satisfactorio a la demanda actual de aplicaciones con requerimientos cada vez más restrictivos y su implantación en el contexto de las MANETs, planteaba la necesidad de desarrollar propuestas específicas adaptadas a la problemática presentada en este nuevo escenario (limitaciones energéticas, variabilidad del canal radio, limitaciones de cobertura, requerimientos de encaminamiento multisalto, gestión distribuida...)

Proporcionar QoS en este nuevo contexto abarca un campo de aplicación muy amplio, desde la perspectiva de todos y cada uno de los niveles de la arquitectura de la red. Considerando las implicaciones que tiene desarrollar un sistema completo capaz de garantizar la provisión de servicios para cada uno de los usuarios o aplicaciones (*QoS Framework*) el problema puede generalizarse desde la perspectiva de cuatro conceptos clave: Los modelos QoS, la señalización y reserva de recursos, el encaminamiento con QoS y la QoS en el nivel de enlace (protocolos MAC). Dicho de otra forma, se puede hablar de QoS si la red es capaz de garantizar una comunicación fiable extremo a extremo entre cualquier par de nodos de la red mediante una gestión eficiente de los recursos que permita una adecuada diferenciación de servicios de acuerdo a las características y demandas propias de cada aplicación.

Bajo la perspectiva de dicha compleja definición de provisión de QoS, el trabajo de esta tesis ha tratado de dar respuesta al problema conjunto, gracias a una metodología de diseño *cross-layer*, basada en la cooperación entre niveles, centrándose en las necesidades específicas de encaminamiento y nivel MAC. La estrecha relación entre la provisión de QoS y la gestión de los recursos del sistema, y la necesidad de aportar soluciones eficientes al tiempo que adaptables al dinamismo propio de las redes ad hoc evidencian la especial adecuación de una solución *cross-layer*, como ha demostrado el amplio análisis crítico realizado en el estudio bibliográfico reflejado en el capítulo 2 de la tesis. Dicho análisis constató que desarrollar mecanismos distribuidos de control de admisión se presentaba como uno de los principales retos a resolver. Para ello, el primer paso necesario para garantizar un servicio satisfactorio en el entorno ad hoc era, naturalmente, el establecimiento de la ruta apropiada entre los dos extremos de la comunicación. La definición de la idoneidad de dicho camino para garantizar las prestaciones demandadas no es más que la representación cuantificable, a través de determinada métrica de encaminamiento, de la capacidad del sistema para proporcionar los recursos necesarios (ancho de banda principalmente). El diseño conjunto del protocolo de encaminamiento y la capa MAC se postulaba como una potente herramienta para determinar la métrica adecuada así como para gestionar de una manera distribuida los recursos del sistema realizando una admisión eficiente de los servicios de acuerdo a sus demandas.

Si bien, en el momento de plantear los objetivos clave del trabajo presentado, existían en la literatura diversas propuestas de encaminamiento con QoS en el entorno de las redes móviles ad hoc, incluyendo alternativas de cooperación entre niveles, el estudio desarrollado en esta tesis ha pretendido identificar de una manera mucho más detallada la problemática asociada a la implementación real de un diseño *cross-layer* específico con objeto de analizar la viabilidad de este tipo de soluciones. El desarrollo de un simulador propio, integrador de los protocolos seleccionados, alternativas propuestas y modelos específicos de tráfico, propagación y movilidad ha sido uno de los factores clave a la hora de llevar a cabo las tareas establecidas y el cumplimiento de los objetivos planteados. De hecho, dicha implementación, más allá de constituir una simple herramienta de evaluación de prestaciones ha permitido identificar los problemas reales que es necesario abordar a la hora de

desarrollar soluciones de cooperación como la propuesta en esta tesis. Las simulaciones llevadas a cabo, incluyendo las depuraciones necesarias de todo proceso de programación, han clarificado la interdependencia entre los elementos involucrados, no sólo dentro del propio terminal, sino considerando el escenario distribuido propio de una red ad hoc, lo cual ha facilitado el diseño coherente de soluciones específicas para dicho entorno.

La primera contribución de la tesis, desarrollada inicialmente como resultado del análisis exhaustivo del estado del arte en el contexto en el que se ha centrado el trabajo, ha sido la selección específica de protocolos (AODV y ADHOC MAC), sin ánimo de identificar los mismos como la solución óptima sino particularizando los requisitos que se han identificado como claves para el desarrollo de una solución *cross-layer* adecuada al entorno de las MANETs. Precisamente la selección de dichos requisitos en uno de los factores identificativos de la originalidad del trabajo, permitiendo el posterior desarrollo y evaluación de la propuesta realizada.

El problema de la gestión distribuida de los recursos se ha abordado contemplando por una parte los requerimientos de los nodos individualmente (priorización de servicios, *scheduling*, compartición de memorias entre el encaminamiento y el nivel MAC) y por otra, la red en su conjunto, gracias a la inclusión del mecanismo de estimación de la disponibilidad de recursos (ancho de banda extremo a extremo) implementada mediante el algoritmo BWC-FA incluido en el protocolo AODV. En este sentido, se ha identificado la información que es necesario extraer del nivel MAC, lo que ha conducido al refinamiento de los mecanismos desarrollados en este nivel para garantizar una estimación realista del ancho de banda así como una cooperación productiva con el protocolo de encaminamiento. El algoritmo de cálculo de ancho de banda tomado como base para el desarrollo de la propuesta final, ha sido mejorado gracias a la flexibilización de los procedimientos permitiendo un incremento de las prestaciones (en términos de reducción de la probabilidad de bloqueo) ante situaciones conflictivas, como las consecuentes del solapamiento de búsquedas en la red ante la activación simultánea de conexiones. La definición de la métrica de ancho de banda como el máximo disponible en el menor número de saltos posible y la posterior reserva de recursos ajustada a las demandas durante la fase final del establecimiento de la ruta (*backward reservation*) constituyen la clave de un procedimiento flexible capaz de identificar con mayor exactitud el impacto de admitir una nueva conexión al sistema. La propuesta supera, de este modo, la rigidez derivada de una búsqueda acotada a las prestaciones demandadas y una reserva anticipada (*forward*). Como resultado, el trabajo desarrollado constituye un novedoso mecanismo de control de admisión distribuido, adaptado al entorno ad hoc, que sin la necesidad de gestores centralizados permite una asignación flexible, eficiente y diferenciada de los recursos ante las demandas de las aplicaciones.

Una vez estudiados los problemas asociados a la implementación específica de una propuesta de encaminamiento con QoS *cross-layer*, permitiendo la definición de los parámetros adecuados para garantizar la eficiencia del mecanismo de control de admisión desarrollado, la inclusión de modelos más realistas de interferencia y movilidad ha permitido diferenciar los problemas inherentes a la naturaleza variante del escenario (degradación de prestaciones en recursos reservados, inexactitud en la señalización de control recibida y rotura de enlaces establecidos), lo cual constituye una de las principales contribuciones de esta tesis. Gracias a dicha diferenciación, se han desarrollado mecanismos de flexibilización que, no tratando de constituir soluciones teóricas generalizables, han demostrado sin embargo, que los problemas existentes son abordables desde la perspectiva tomada de cooperación entre niveles y fácilmente adaptables al carácter distribuido del diseño desarrollado. Las principales contribuciones en este sentido son:

- Protección frente a interferencias en el nivel MAC: configuración de parámetros de estabilidad para garantizar el soporte fiable para la arquitectura.
- Aprovechamiento del mecanismo de admisión originariamente diseñado como procedimiento adicional de monitorización de la QoS y posible reasignación de recursos. Se consigue así el mantenimiento de las prestaciones ante cambios en las condiciones iniciales de admisión.

- Identificación de las dificultades a la hora de asegurar las prestaciones a todas las conexiones admitidas. Se plantea, como solución, una redistribución más eficiente de los recursos mediante la expulsión selectiva de conexiones, con objetivo de reducir la probabilidad de fallo (insatisfacción de la QoS demandada) incrementando en consecuencia el grado de servicio obtenido.
- Introducción de estrategias preventivas basadas en el uso de un ancho de banda residual (valor estimativo no centralizado a partir de la activación individual de conexiones) para atender la posible redistribución de conexiones en readmisión.

Una de las conclusiones relevantes del estudio realizado ha sido la identificación de la complejidad de configuración asociada al sistema en un escenario de grado de movilidad variable. Si bien ha podido establecerse una parametrización acotada, la evaluación detallada de la propuesta en múltiples escenarios ha demostrado la elevada dependencia de un correcto punto de operación del sistema con la movilidad del entorno, no siendo posible determinar una configuración óptima. Precisamente dicho resultado es una de las valoraciones novedosas a la hora de validar un diseño *cross-layer*: la implementación realista del sistema ha permitido constatar la inexistencia de valores óptimos generalizables sugiriendo la necesidad de estudiar el escenario de aplicación y, por tanto, desarrollar soluciones adaptativas al entorno. La propia cooperación entre niveles supone por otra parte la mejor herramienta posible para implementar dicha adaptación gracias a la interrelación entre los diversos elementos del sistema. En este sentido, se ha planteado una propuesta de diseño adaptativo que aprovecha la funcionalidad del nivel MAC (mantenimiento de la conectividad) y la interfaz implementada con el nivel superior. El procedimiento desarrollado introduce una nueva métrica en el sistema, el grado de movilidad medio del entorno, estimado a partir de la variabilidad de número de vecinos estables, que permite determinar el punto de operación adecuado, los niveles de disparo, la consecuente autoconfiguración de parámetros y la garantía de estabilidad del sistema mediante un mecanismo adicional de histéresis.

Resultados

La figura 1 muestra el esquema completo de la arquitectura *cross-layer* propuesta donde se observa la funcionalidad específica del AODV, que garantiza el establecimiento y mantenimiento de la tabla de rutas, y del protocolo ADHOC MAC, responsable de los procedimientos de *scheduling*, mantenimiento de conectividad y reserva de recursos (BIAS). A pesar de la independencia en dichas funciones, propias de los algoritmos mencionados, destaca la interacción entre ambos niveles gracias a la compartición de información (tabla de encaminamiento asociada a la base de datos que identifica los flujos de datos con QoS) y la señalización entre capas realizada por las principales funciones de gestión (búsqueda y reparación de rutas, gestión de recursos y conectividad local).

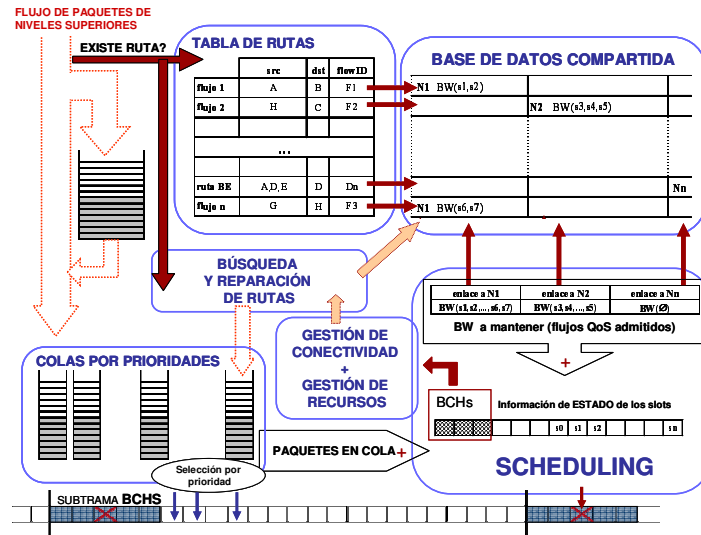


Figura 1: Arquitectura *cross-layer* propuesta.

Con el propósito de evaluar el funcionamiento de la arquitectura completa, con especial énfasis en las interacciones entre módulos, se ha desarrollado un simulador por eventos en C++ que implementa todas las funcionalidades necesarias: los protocolos AODV y ADHOC MAC, las interfaces específicas y los algoritmos implementados (BWC-FA, gestión de recursos). Igualmente, se han considerado todos aquellos modelos requeridos para emular un comportamiento realista de la red ad hoc (interferencia entre usuarios, modelo de propagación) así como la inclusión de un patrón de movilidad basado en el clásico RWP, modificado con el propósito de modelar una trayectoria más próxima al movimiento natural de los usuarios (reflejado en el anexo C de la memoria).

La evaluación de la propuesta en un escenario simplificado, donde la conectividad se basa en distancias Euclídeas, desestimando la interferencia de usuarios más allá del rango de cobertura (*Protocol Model*), ha permitido identificar los problemas derivados del carácter compartido del medio de transmisión y la naturaleza distribuida del procedimiento. A pesar de la capacidad del protocolo ADHOC MAC de establecer con exactitud la disponibilidad de los recursos, resolviendo los problemas del terminal oculto y el terminal expuesto, la búsqueda del máximo ancho de banda se complica en un escenario de búsquedas de ruta paralelas. En este sentido, se han planteado estrategias aproximadas como solución a la problemática, flexibilizando la posterior reserva de los recursos y garantizando una mayor admisión, especialmente en situaciones de baja carga en el sistema, como ha evidenciado el análisis comparativo realizado al respecto (capítulo 3). Como muestra la figura 2, la identificación específica de los recursos utilizables en cada enlace posibilita una estimación del ancho de banda E2E, mucho más próxima a la realidad que la clásica medida local del enlace “cuello de botella”. La consecuente decisión de admisión, así como la reserva real de los recursos especificados, aumentan la probabilidad de admitir las conexiones con garantías de satisfacción en la QoS demandada, como han constatado los resultados obtenidos en condiciones estáticas, donde se ha observado la ganancia obtenida, en términos de capacidad efectiva (tráfico correctamente cursado), gracias al establecimiento de circuitos virtuales garantizados. La ampliación de las condiciones de estudio a un escenario multiservicio ha mostrado la capacidad de diferenciación de la propuesta

gracias a la priorización de los circuitos virtuales sobre el tráfico *best-effort*, a pesar de la ligera degradación experimentada como consecuencia de la naturaleza distribuida del procedimiento y los problemas inherentes al medido compartido.

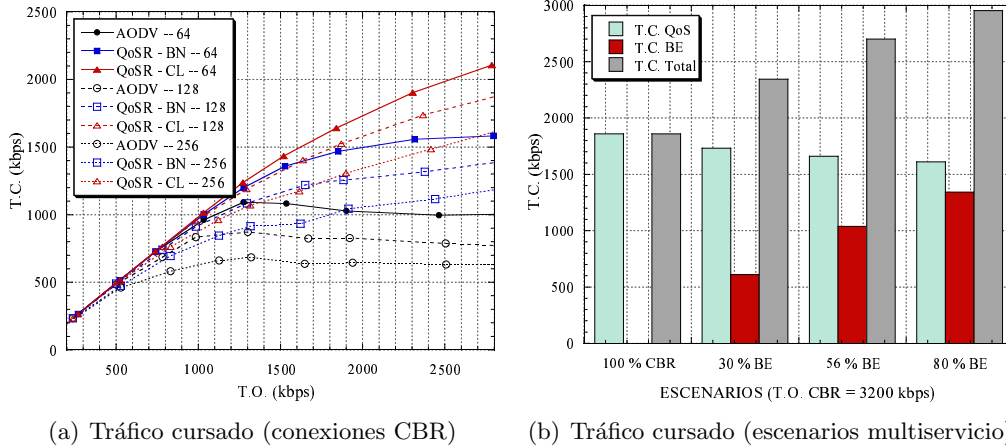


Figura 2: *Cross-layer* (QoS-CL) vs. “bottle-neck” (QoS-BN) y ADOV básico. 50 nodos.

La inclusión de un modelo de conectividad más realista basado en la interferencia real entre usuarios (*Physical Model*) ha permitido evaluar el efecto real de la SIR en recepción sobre la fiabilidad de las comunicaciones establecidas así como sobre la propia medida de la disponibilidad. Los diversos escenarios de test, analizados en condiciones de interferencia variante (variabilidad en el tráfico) han permitido extraer la parametrización necesaria del protocolo MAC para garantizar la fiabilidad y estabilidad de la propuesta. La evaluación de la propuesta en condiciones de movilidad ha mostrado las dificultades para garantizar la QoS en este escenario dinámico. Conforme aumenta la velocidad media de los nodos, el número de conexiones correctamente cursadas se reduce debido a la creciente pérdida de paquetes, dadas las frecuentes roturas de rutas o interferencia emergente que interrumpe los circuitos virtuales inicialmente establecidos. De este modo, el procedimiento de admisión diseñado se comporta como una simple limitación de conexiones activas en el sistema, sin una asociación específica de camino establecido (dadas las múltiples recolocaciones en la red) cuya provisión final de QoS depende de la capacidad del nivel MAC de realizar una adecuada diferenciación de servicios. No obstante, con objeto de mantener la garantía de ancho de banda, se han diseñado unos mecanismos de flexibilización que se materializan en un procedimiento continuo de readmisión de conexiones en el sistema capaz de garantizar, en cada evento de admisión, los recursos demandados, consiguiendo así cierto nivel de *soft-QoS* satisfactorio.

El análisis realizado, como se refleja en el capítulo 4, si bien ha constatado la gran dependencia de las aplicaciones y el grado de movilidad a la hora de optimizar la respuesta del sistema, ha permitido establecer los condicionantes más significativos que se traducen en la definición específica de parámetros de configuración: habilitación o no de los mecanismos de monitorización, sobredimensionado y expulsión (activación conjunta de los procedimientos); monitorización de la QoS (periodicidad y sensibilidad); definición de umbral temporal máximo de insatisfacción de QoS; rango viable de sobredimensionado (ΔBW) en la admisión inicial. Una selección de compromiso de los valores adecuados a los escenarios de test se ha tomado como referencia en la definición de los dos modos de funcionamiento básicos (cuasi-estático, QSOP, y en movilidad, MOP) sin pretender seleccionar dichos valores como la configuración genérica óptima. Su definición, sin embargo, ejemplifica las dificultades de configuración y las consideraciones a tener en cuenta para dar una solución aproximada, dando así respuesta a uno de los objetivos principales de la tesis, como es la identificación de los problemas derivados de la implementación específica de una solución *cross-layer*. La configuración del mecanismo completo de readmisión únicamente permite mejorar las prestaciones globales en términos de grado de servicio en escenarios de elevada movilidad (20 km/h) debido a que el *overhead* de control introducido (monitorización, readmisión) puede compensarse con un incremento observable de la capacidad efectiva, gracias a la reducción de la probabilidad de fallo (P_f). Con velocidades menores, P_f no es lo suficientemente significativa y no puede ser reducida en gran

medida. Además, se incrementa la probabilidad de bloqueo debido al *overhead* y la infrautilización de recursos (ΔBW), lo que tiene un apreciable efecto negativo sobre la capacidad efectiva.

Para garantizar un funcionamiento correcto en cualquier escenario, configurando adaptativamente el modo de operación, se define la métrica de movilidad $var_{NB,i}^{filt}$, resultado del filtrado de la variación temporal del número medio de vecinos estables (periodicidad de la medida $\Delta t = 1$ s.). La memoria del filtro (α) debe resolver el compromiso entre una estimación precisa del valor medio de $var_{NB,i}$ y una pronta reacción a las variaciones rápidas del mismo. Los resultados obtenidos en los escenarios de simulación analizados sugieren la utilización de un valor α de compromiso (0,99 en los escenarios propuestos) que permite una clara diferenciación entre escenarios. Menores valores generan una métrica demasiado fluctuante que dificulta la deseada diferenciación, mientras que una memoria excesiva, a pesar de estimar mejor el valor medio, implica una convergencia excesivamente lenta para adaptar la respuesta del sistema a potenciales cambios en la movilidad del entorno. Por otra parte, debido a las oscilaciones en la medida, para garantizar una configuración estable del sistema se propone un método de histéresis basado en dos umbrales: th_1 , para activar la configuración MOP y th_2 , para recuperar la configuración QSOP. El valor th_1 debe ser suficientemente elevado para evitar el mecanismo completo de readmisión en escenarios cuasi-estáticos, y se relaciona con el valor medio esperado de $var_{NB,i}$ para el grado de movilidad mínimo que exige una configuración MOP. El valor th_2 mantiene una configuración estable del sistema absorbiendo las variaciones en la métrica ($th_1 - th_2$). Los resultados observados en 9 Km/h permiten identificar dicho grado de movilidad como un punto de inflexión entre los dos modos de operación (QSOP, MOP). A menor velocidad, el *overhead* introducido por la configuración MOP no puede ser asumido mientras, a mayores velocidades, las prestaciones globales mejoran gracias a la gestión flexible de los recursos. Así pues, la media y la desviación estándar de $var_{NB,i}$ en dicho escenario se han considerado una referencia. Finalmente, la evaluación de diversas configuraciones ha permitido un ajuste experimental de los umbrales. Dicha configuración permite una adaptación del sistema capaz de proporcionar unas prestaciones (GoS y capacidad efectiva) cercanas a las mejores obtenidas mediante la configuración explícita (QSOP o MOP) en cualquier escenario de movilidad.

Una configuración adaptada al grado de movilidad específico proporciona una definición más ajustada de los parámetros de readmisión. Sin embargo, una solución adaptativa permite la autoconfiguración del sistema sin el conocimiento previo del escenario. Por otra parte, condiciones variables de movilidad pueden dificultar la selección del modo de operación más apropiado. Con objeto de evaluar la solución propuesta en un escenario de movilidad variante, se ha analizado un escenario más dinámico modelado mediante la utilización de diversos patrones de movilidad (velocidad media variable en el tiempo). La figura 3 muestra cómo, en un escenario representado por una velocidad media creciente (2, 9 y 20 Km/h), el procedimiento de readmisión adaptativo permite obtener un grado de servicio próximo al proporcionado mediante la configuración MOP gracias a la flexibilidad en la gestión de recursos (figura 3(a)) manteniendo la capacidad efectiva, evaluada de acuerdo al tráfico correctamente cursado, como muestra la figura 3(b).

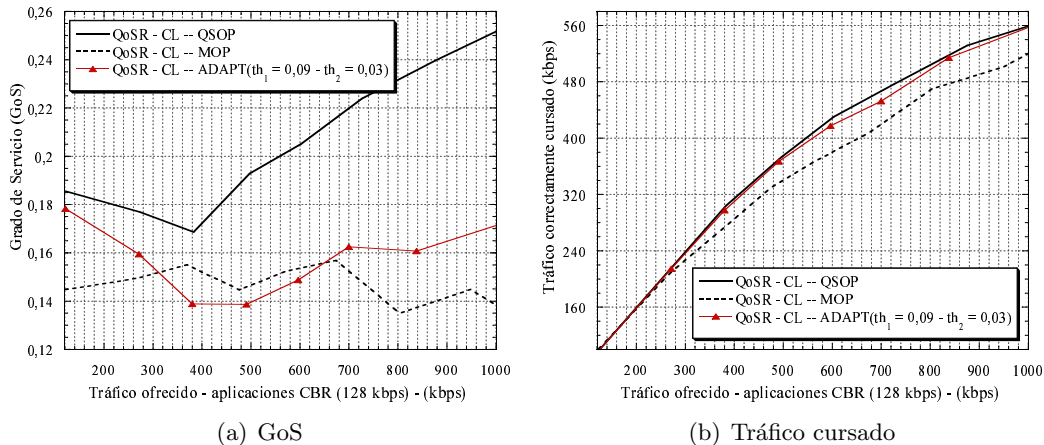


Figura 3: Prestaciones en un escenario con grado de movilidad variable.

Aplicabilidad

El trabajo desarrollado en la tesis se enmarca plenamente en el contexto de la propuesta de soluciones para la adaptación de los esquemas habituales de provisión de QoS al nuevo escenario de las redes móviles ad hoc. El diseño de mecanismos de gestión de recursos para garantizar la calidad de servicio se complica aún más cuando las funcionalidades necesarias han de distribuirse cooperativamente entre todos los elementos de la red. Dicha cooperación, además, debe garantizar la conectividad extremo a extremo sin el soporte de una infraestructura fija de red capaz de encaminar correctamente los flujos de datos. La complejidad de afrontar la problemática del medio de transmisión inalámbrico y la variabilidad de la topología de red, resultante de la movilidad de los terminales, todavía acrecienta más las dificultades.

A pesar de que la propuesta de diseño realizada pueda no ser directamente generalizable a cualquier escenario, la particularización de las soluciones en la cooperación explícita entre los protocolos seleccionados (AODV y ADHOC MAC) ha permitido realizar un estudio eminentemente práctico, desde la perspectiva de simulación, constituyendo un estudio de viabilidad, claro punto de partida para la aplicabilidad de los planteamientos desarrollados. Así pues, las contribuciones aportadas por esta tesis demuestran la viabilidad del diseño *cross-layer* para desarrollar soluciones avanzadas de encaminamiento con QoS capaces de proporcionar mecanismos de control de admisión distribuidos adaptables al entorno dinámico de las redes móviles ad hoc.

Por otra parte, el análisis de los diversos problemas a los que hacer frente y las estrategias planteadas para la superación de las dificultades inherentes a la variabilidad del entorno permiten identificar los pasos adecuados de diseño que deberían seguirse para implementar una arquitectura capaz de proveer de QoS a las actuales aplicaciones.

Teniendo en cuenta el desarrollo actual de aplicaciones en entornos ad hoc (*hot spots*, extensión del acceso a Internet desde WLAN, etc.) la inmediata aplicación comercial de las propuestas desarrolladas en estos escenarios dista todavía de ser una realidad considerando el asentamiento de la tecnología basada en el estándar IEEE 802.11, a pesar de las limitaciones del mismo para proporcionar una QoS garantizada. Sin embargo, la aplicabilidad en contextos más particulares: redes profesionales con demandas exigentes de QoS (aplicaciones multimedia en tiempo real), redes intervehiculares, sistemas de emergencias o incluso contextos militares, tiene una potencialidad mucho mayor. Dadas las múltiples líneas de investigación todavía existentes en este sentido, las conclusiones de la tesis pueden servir como una arquitectura base para el desarrollo de soluciones completas (*QoS framework*) en estos escenarios.

Buena muestra del interés científico en este sentido es el grado de difusión del trabajo realizado, medido en términos de producción científica (publicaciones en revistas internacionales y congresos tanto nacionales como internacionales) tal y como se refleja en el anexo correspondiente.

Anexos

1. Participación en Proyectos de I+D relacionados con el trabajo de la tesis

Convocatoria pública:

- “Evaluación de Nuevas Tecnologías de Banda Ancha y Desarrollo de Técnicas para la Provisión de Calidad de Servicio en Redes Móviles Ad-Hoc”, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) ref. n^o TEC2004-04529/TCM, 2005-2007 (Universidad de Zaragoza).
- “PULSERS PHASE-2 (Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio Systems PHASE 2)”, Unión Europea. Integrated Project del VI Programa Marco, 2006-2008 (Subproyecto de la Universidad de Zaragoza).
- “Desarrollo de una Plataforma de Simulación Integrada UMTS: Aplicación a Sistemas Móviles de Emergencias Médicas”, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) ref. n^o TIC2001-2481, 2002-2004 (Universidad de Zaragoza).

Financiación privada:

- “Plan de promoción tecnológica de UMTS, implementación y evaluación de un sistema de telemonitorización de ambulancias sobre una red UMTS”, Telefónica Móviles de España, 2003-2005 (Universidad de Zaragoza)

2. Publicaciones relacionadas con el trabajo de la tesis

Revistas internacionales:

- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “QoS Provision in Mobile Ad Hoc Networks with an Adaptive Cross-layer Architecture”, *Springer Wireless Networks* Aceptado, pendiente de publicación, 2008. DOI: 10.1007/s11276-008-0109-2.(IF2006: 0.812)
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Control de Admisión Distribuido para Redes Móviles Ad-Hoc basado en un Diseño Cross-layer”, *IEEE América Latina*, vol. 5, no. 6, pp. 425-432, Octubre 2007.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “Analysis and Modelling of Broadcast Services for TDMA Wireless Ad Hoc Networks”, *IEE Electronics Letters*, vol. 43, no.6, pp. 350-352, Marzo 2007. (IF2006: 1.063)
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Performance Evaluation of Cross-Layer Routing for QoS Support in Mobile Ad Hoc Networks”, *Springer Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4217, pp. 322-333, 2006. (IF2005: 0.402)
- M. Canales, A. Hernández, J.R. Gállego, A. Valdovinos, “Adaptive Resource Sharing Strategies for UMTS Multiservice Mobiles”, *Springer Telecommunication Systems*, vol. 28, no.2, pp. 151-167, Febrero 2005. (IF2006: 0.330)
- J.R. Gállego, A. Hernández, M. Canales, J. Lafuente, A. Valdovinos, J. Fernández, “Performance Analysis of Multiplexed Medical Data Transmission for Mobile Emergency Care over the UMTS Channel”, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 1, pp. 13-22, Marzo 2005. (IF2006: 1.542)

Congresos internacionales:

- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Adaptive Admission Control for Mobile Ad Hoc Networks based on a Cross-layer Design”, 12th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC 2007). Publicado en Springer IFIP Series, vol. 245, pp. 1-12, Praga (República Checa), Septiembre 2007.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “Analysis of a TDMA MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks under Multipath Fading Channels”, 12th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC 2007). Publicado en Springer IFIP Series, vol. 245, pp. 13-24, Praga (República Checa), Septiembre 2007.
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Performance Analysis of Cross-layer QoS Routing for Mobile Ad Hoc Networks”, 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’06), pp 946-950 (ISSN 1347-6890), San Diego (EE.UU.), Septiembre 2006.
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Cross-layer routing for QoS provision in multiservice mobile ad hoc networks”, 17th Annual IEEE International Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2006 (PIMRC’06), ISBN 1-4244-0330-8, Helsinki (Finlandia), Septiembre 2006.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “Modeling of Broadcast Capacity for TDMA Wireless Ad Hoc Networks”, 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’06), pp 869-873 (ISSN 1347-6890), San Diego (EE.UU.), Septiembre 2006.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “Performance Analysis of an Interference Aware MAC Protocol with Power Control for Wireless Ad Hoc Networks”, 17th Annual IEEE International Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2006 (PIMRC’06), ISBN 1-4244-0330-8, Helsinki (Finlandia), Septiembre 2006.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “A TDMA Power Controlled MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks”, 3rd IEEE International Symposium on Wireless Communications Systems 2006 (ISWCS’06), pp 248-252, ISBN: 1-4244-0398-7, Valencia, Septiembre 2006.
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Cross-Layer proposal for QoS Routing in Mobile Ad-Hoc Networks”, 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’05), pp 1325-1329, ISSN: 0908-1224, Aalborg (Dinamarca), Septiembre 2005.
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Interference-aware Routing with Bandwidth Requirements in Mobile Ad Hoc Networks”, IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC2005-fall), pp. 2556-2560, ISBN: 0-7803-9153-5, Dallas (EE.UU.), Septiembre 2005.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, L. Campelli, M. Cesana, A. Valdovinos, “Performance Evaluation of an Interference-Aware Access Scheme for Point-to-Point Services in the ADHOC MAC Protocol”, 7th IFIP/IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 2005), ISBN: 0-955-1814-0-2, Marrakech (Marruecos), Septiembre 2005.
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, L. Campelli, M. Cesana, A. Valdovinos, “Performance Evaluation of Point-to-Point Scheduling Strategies for the ADHOC MAC Protocol”, 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’05), pp 1380-1384, ISSN: 0908-1224, Aalborg (Dinamarca), Septiembre 2005.

- J.R. Gállego, L. Campelli, M. Cesana, A. Capone, F. Borgonovo, A. Hernández, M. Canales, A. Valdovinos, “Efficient Bandwidth Allocation for Basic Broadcast and Point-to-Point Services in the AD-HOC MAC Protocol”, 10th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC 2005), pp 87-98. ISBN 1-86094-582-1. Imperial College Press, Colmar (Francia), Agosto 2005.
- M. Canales, A. Hernández, J.R. Gállego, A. Valdovinos, “Performance evaluation of adaptive resource sharing strategies for UMTS multiservice mobiles”, IEEE 59th Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004 Spring), pp. 1579-1583, ISBN: 0-7803-8256-0, Milán (Italia), Mayo 2004.
- J.R. Gállego, A. Hernández, M. Canales, A. Valdovinos, “Adaptive Multimedia Traffic Multiplexing for Dedicated Channels in the UMTS system”, 9th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2004), pp 448-453, ISBN: 0-7803-8623-X, Alejandría (Egipto), Junio 2004.

Congresos nacionales:

- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Control de Admisión Distribuido para Redes Móviles Ad-Hoc basado en un Diseño Cross-layer”, VI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2007), pp 9-16. ISBN: 978-84-690-6670-6, Málaga, Septiembre 2007. (**Premio Fundación Vodafone España en JITEL 2007**).
- J.R. Gállego, M. Canales, A. Hernández, A. Valdovinos, “Análisis de un Protocolo MAC TDMA para Redes Inalámbricas Ad Hoc en Presencia de Desvanecimientos”, VI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2007), pp 321-328 ISBN: 978-84-690-6670-6, Málaga, Septiembre 2007.
- M. Canales, J.R. Gállego, A. Hernández, A. Valdovinos, “Encaminamiento con Calidad de Servicio para Redes Móviles Ad-Hoc”, XX Simposio Nacional de la URSI 2005, ISBN: 84-9705-859-3, Gandía, Septiembre 2005.
- J.R. Gállego, A. Hernández, M. Canales, A. Valdovinos, L. Campelli, M. Cesana, A. Capone, F. Borgonovo, “Asignación Eficiente de Recursos para los Servicios de Broadcast y Punto a Punto en el Protocolo ADHOC MAC”, V Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2005), Libro de Actas JITEL 2005. pp 9-15. ISBN: 84-8408-346-2, Vigo, Septiembre 2005.

3. Referencias de otros autores a los artículos publicados

J.R. Gállego, A. Hernández, M. Canales, J. Lafuente, A. Valdovinos, J. Fernández, “Performance Analysis of Multiplexed Medical Data Transmission for Mobile Emergency Care over the UMTS Channel”, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 1, pp. 13-22, Marzo 2005.

2 referencias:

- S. Chatziperis, P. Koutsakis, M. Paterakis, “A new call admission control mechanism for multimedia traffic over next-generation wireless cellular networks” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 95-112, 2008. (IF2006: 2.550)
- D. Niyato, E. Hossain, J. Diamond, “IEEE 802.16/WiMax-based broadband wireless access and its application for telemedicine/E-health services” *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, no. 1, pp. 72-83, 2007. (IF2006: 2.577)

4. Estancias en centros de investigación relacionadas con la tesis

- “Encaminamiento con calidad de servicio (QoS Routing) en el contexto de redes inalámbricas ad-hoc. Diseño *cross-layer*”. ANTLab (*Advanced Networks Technologies Laboratory*), Dipartimento di Elettronica e Informazione. Politecnico di Milano, (Milán, Italia), Mayo-Junio 2005 (8 semanas). Financiada por una beca del Programa Europeo de Estancias de Investigación CAI-CONSI+D 2005.
- “Gestión de recursos radio y provisión de calidad de servicio en el contexto de redes inalámbricas ad-hoc”. Wireless@KTH, Royal Institute of Technology (KTH) (Estocolmo, Suecia), Abril-Mayo 2004 (9 semanas). Financiada por una beca del Programa Europeo de Estancias de Investigación CAI-CONSI+D 2004.