

Diferenciación de servicios y mejora de la supervivencia en redes ad hoc conectadas a redes fijas

Introducción

El trepidante mundo de las telecomunicaciones se ha visto vigorosamente revolucionado con el desarrollo e investigación de nuevas aplicaciones y sistemas inalámbricos cuya finalidad es permitir la comunicación en cualquier momento y lugar. A medida que las redes inalámbricas vayan evolucionando, los clientes solicitarán aplicaciones de red incluso en casos donde no exista una infraestructura de red propia. Los usuarios de terminales móviles con dispositivos inalámbricos compatibles entre sí deberán ser capaces de establecer una red de corta duración que les permita satisfacer sus necesidades de comunicación en un momento determinado, es decir, deberán poder implementar una red ad hoc.

Dada la enorme importancia que pueden llegar a tener las comunicaciones inalámbricas y en especial las redes ad hoc, éstas deben estar preparadas para ofrecer una cierta calidad de servicio, QoS (Quality of Service) a aplicaciones tales como las multimedia. Resulta muy complicado establecer calidad de servicio en una red ad hoc debido a sus particularidades; por este motivo, la provisión de calidad de servicio entre redes ad hoc y redes IP fijas se ha convertido en un desafío tan difícil como atrayente.

En esta tesis doctoral se han centrado todos los esfuerzos en establecer una comunicación en las mejores condiciones posibles entre una red ad hoc y una red IP fija, pero para lograr alcanzar el objetivo propuesto ha sido preciso comenzar estudiando qué es una red ad hoc.

Fundamentos: las redes ad hoc

Las redes ad hoc están formadas por dos o más dispositivos que son capaces de comunicarse entre sí sin la necesidad de recurrir a una infraestructura de red preexistente, con lo cual no son requeridas estaciones base ni cables ni routers fijos. Dichas redes pueden estar constituidas por grupos de terminales móviles independientes y basados en radio enlaces, aunque también cabría la posibilidad de

que alguno de estos dispositivos estuviera conectado a un sistema celular o a una red fija.

Las redes ad hoc son adaptativas y están habilitadas para configurarse a sí mismas, prescindiéndose de la intervención de un administrador del sistema.

En las redes ad hoc es posible que dos nodos inalámbricos se puedan comunicar entre sí, incluso cuando se hallan fuera de su alcance radio, gracias a la presencia de nodos intermedios que actuarán como routers y reenviarán los paquetes de datos de la fuente al destino.

Motivación

Las motivaciones por las cuales se ha desarrollado particularmente esta tesis doctoral son las siguientes:

- ❖ *Proporcionar calidad de servicio entre una red ad hoc y una red IP fija.*
- ❖ *Mejorar la supervivencia de una red ad hoc conectada a una red IP fija.*

A continuación se describen con mayor profundidad ambas motivaciones.

Motivación 1: Proporcionar calidad de servicio entre una red ad hoc y una red IP fija

Si proporcionar calidad de servicio en una red IP fija tiene sus complicaciones, conseguir ofrecer calidad de servicio en una red ad hoc se convierte en un reto tan extremadamente difícil como atrayente.

En una red ad hoc resulta particularmente complicado proporcionar una cierta calidad de servicio porque tanto la topología como capacidad de los enlaces varían dinámicamente. Además, en los entornos inalámbricos la existencia de fading provoca que las tasas de pérdidas de paquetes y las variaciones de retardo sean mucho mayores y variables en comparación con las redes fijas.

En un principio, la investigación en el campo de las redes ad hoc se centró fundamentalmente en desarrollar redes aisladas e independientes, que pudieran desempeñar su labor en determinados escenarios destacados: Redes en catástrofes naturales, en operaciones militares, en áreas muy escasamente pobladas, etc.

Sin embargo, este tipo de redes se halla sujeto a entornos muy restringidos. Además, el tráfico no local de las redes ad hoc viajará muy probablemente a través de redes basadas en infraestructura y la manera de que las redes ad hoc puedan acceder a Internet será también a través de redes con infraestructura.

Por todas estas razones, la investigación actual se ha centrado muy recientemente en cómo conseguir la convivencia e interacción para facilitar la integración entre redes ad hoc y redes IP fijas. Si la red ad hoc está conectada a una red IP fija, que le proporciona acceso a Internet, será crucial y esencial el desarrollo de un modelo de calidad de servicio que facilite la interacción entre ambas redes para poder transportar el tráfico de tiempo real.

Motivación 2: Mejorar la supervivencia de una red ad hoc conectada a una red IP fija

Se está llevando a cabo una importante investigación con el fin de desarrollar nuevos protocolos (tanto de encaminamiento como a nivel de la capa de red o de acceso al medio) que sean capaces de alargar el tiempo de vida de las baterías de una red ad hoc con el fin de mejorar su supervivencia.

Si tenemos en cuenta que las redes ad hoc no solamente existirán en entornos aislados, sino que también se integrarán, coexistiendo con otras redes, debe fomentarse el uso de técnicas que permitan alargar lo máximo posible el tiempo de vida de los nodos de una red ad hoc, porque de esta forma se está fomentando la comunicación entre las redes ad hoc y otras redes, como las redes IP fijas. Favorecer esta comunicación significa invertir esfuerzos en que sea lo más fiable y duradera posible.

Objetivos

El objetivo vital de esta tesis doctoral es el de hacer factible una comunicación en las mejores condiciones posibles entre una red ad hoc y una red IP fija.

Se han realizado numerosos estudios de investigación en torno a redes ad hoc aisladas y también en torno a redes IP fijas, pero la literatura existente es escasísima cuando de lo que se trata es de estudiar y analizar la interconexión y comunicación entre redes ad hoc y redes IP fijas.

Conseguir que las redes ad hoc puedan comunicarse en las mejores condiciones posibles con las redes basadas en infraestructura, significa lograr alcanzar los dos objetivos siguientes:

- ❖ *Intentar proporcionar calidad de servicio extremo a extremo en la comunicación entre una red ad hoc y una red fija*
- ❖ *Alargar la supervivencia de la red ad hoc para que la comunicación sea lo más estable y duradera posible*

Desarrollo y conclusiones

Para poder alcanzar los objetivos que se han propuesto en esta tesis se ha realizado un estudio exhaustivo tanto de los modelos de calidad de servicio como de los protocolos de encaminamiento existentes en redes ad hoc aisladas. Fruto de dicho estudio ha surgido una primera contribución consistente en el diseño e implementación del protocolo de encaminamiento SEADSR para la mejora de la supervivencia en redes ad hoc aisladas. Se ha conseguido demostrar mediante simulaciones que SEADSR supera al estándar DSR en relación a la supervivencia de red sin que se vea reducida la capacidad del sistema.

A partir de esta base se ha podido analizar la diferenciación de servicios en redes ad hoc conectadas a redes fijas; como consecuencia de esta investigación ha sido posible desarrollar el modelo de calidad de servicio DS-SWAN para la provisión de calidad de servicio entre redes ad hoc y redes IP fijas. Se ha demostrado que con DS-SWAN es posible mantener la diferenciación de servicios entre una red IP que use la arquitectura DiffServ y una red ad hoc, algo que no sucede cuando se usa el anteriormente propuesto modelo SWAN para la red ad hoc. Las simulaciones realizadas han demostrado la eficiencia y rendimiento del protocolo DS-SWAN bajo una variedad representativa de cargas de tráfico best-effort y usando diferentes modelos de tráfico best-effort (TCP o bien CBR). Se ha probado su escalabilidad para redes ad hoc de distinto tamaño con respecto al número de fuentes de VoIP y la movilidad. El estudio de tráfico en sentido inverso (hacia la red ad hoc) ha resultado ser muy interesante porque el protocolo CSMA/CA debe garantizar un acceso sin prioridades al medio inalámbrico y este funcionamiento parecía que podía causar problemas a la hora de aplicar nuestro modelo para la diferenciación de servicios; las simulaciones realizadas han demostrado el buen funcionamiento de DS-SWAN incluso en los casos más problemáticos.

Por último, se ha logrado mejorar la supervivencia de una red ad hoc conectada a una red basada en infraestructura mediante el diseño e implementación del protocolo de encaminamiento SD-AODV. SD-AODV colabora conjuntamente con el modelo DS-SWAN para mitigar las condiciones de congestión y reducir los problemas relacionados con la congestión, beneficiándose con ello las aplicaciones de tiempo real, que son capaces de mantener sus requisitos de calidad de servicio. La combinación de ambos protocolos reduce no solamente los retardos extremo a extremo de los flujos de VoIP sino también el jitter y las pérdidas de paquetes para el tráfico de VoIP y mantiene el throughput del tráfico best-effort sin que sufra inanición.

Se ha demostrado que con este protocolo de encaminamiento es posible no sólo alargar la supervivencia de la red ad hoc, sino también disminuir la congestión y mejorar la diferenciación de servicios entre ambas redes. Las simulaciones realizadas han demostrado la efectividad de dicho protocolo cuando el tráfico fluía desde la red ad hoc hacia la red basada en infraestructura y también en sentido inverso.

Las contribuciones presentadas en esta tesis doctoral tienen una singular importancia, pues hasta la fecha no se ha desarrollado ningún modelo de calidad de servicio que permita la interacción y favorezca la cooperación entre una red ad hoc y una red IP fija con el fin de proporcionar calidad de servicio extremo a extremo.

A partir del trabajo de investigación realizado, se deducen las siguientes conclusiones específicas:

- ❖ Los modelos de calidad de servicio desarrollados para redes ad hoc aisladas no sirven para proporcionar calidad de servicio entre una red ad hoc y una red IP fija, porque tratan de diferenciar servicios para el tráfico dentro de cada uno de sus dominios, pero no van más allá. En esta tesis doctoral se ha conseguido demostrar mediante la utilización de simulaciones que si existe un modelo de calidad de servicio en la red ad hoc (SWAN) y otro modelo de calidad de servicio en la red IP fija (DiffServ) y estos modelos no colaboran entre sí, no será posible el mantenimiento de los parámetros de calidad de servicio que una aplicación de tiempo real requiera.
- ❖ Para poder diferenciar servicios entre una red ad hoc y una red IP fija resulta indispensable contar con un modelo de calidad de servicio que permita la cooperación entre ambas redes. En esta tesis doctoral se ha diseñado y evaluado un modelo de calidad de servicio (DS-SWAN) que sí que funciona correctamente porque se basa en la cooperación para el mantenimiento de la calidad de servicio entre las redes ad hoc y las redes IP fijas.
- ❖ Para poder diferenciar servicios entre una red ad hoc y una red IP fija resulta imprescindible mapear las clases de servicio del modelo de calidad de servicio incluido en la red ad hoc a las clases de servicio del modelo de calidad de servicio incluido en la red IP fija. En esta tesis doctoral ha quedado justificada la necesidad de que las clases de servicio del modelo SWAN (VoIP y best-effort CBR) sean mapeadas a las clases de servicio del modelo DiffServ (PHB EF y best-effort).
- ❖ Debe establecerse una negociación de los parámetros de calidad de servicio para que después dichos parámetros puedan ser garantizados y pueda ofrecerse calidad de servicio entre la red ad hoc y la red basada en infraestructura. En las simulaciones realizadas, el modelo SWAN comprueba mediante el control de

admisión si tiene recursos de ancho de banda suficientes para poder establecer una sesión de tiempo real y también si estos recursos se mantienen mientras dura la sesión de tiempo real. En DiffServ también se comprueba si los flujos de paquetes pertenecientes a las distintas clases cumplen o no con el perfil acordado para que puedan contar con aquellos recursos que han demandado. También el protocolo DS-SWAN realiza una negociación de los parámetros de calidad de servicio comprobando la tasa de pérdidas de paquetes de tiempo real y el retardo de dichos paquetes durante toda la simulación y mantiene en todo momento unos valores adecuados para estos parámetros de calidad de servicio de manera adaptativa.

- ❖ Para poder diferenciar servicios en una red ad hoc aislada o bien entre una red ad hoc y una red IP fija resulta indispensable contar con un modelo de calidad de servicio que esté basado en un diseño cross layer. El diseño cross layer promueve la interacción entre capas; se trata de que el mayor número de capas posible unan sus esfuerzos con un objetivo común: La diferenciación de servicios. En esta tesis doctoral ha quedado demostrado que resulta absolutamente necesario apoyarse en este planteamiento para lograr el objetivo expuesto.
- ❖ Los protocolos de encaminamiento guardan una estrecha relación con la provisión de calidad de servicio. El rendimiento de la red depende estrechamente de la velocidad a la cual los protocolos de encaminamiento pueden recalcular nuevas rutas entre pares fuente-destino después de haberse producido cambios en la topología de red (si no existe ninguna ruta alternativa almacenada en la caché del nodo fuente). El retardo en el cálculo de nuevas rutas tendrá un cierto impacto en la calidad de servicio ofrecida a las sesiones de tiempo real establecidas. En esta tesis doctoral ha quedado demostrado que cuando el protocolo de encaminamiento de la red ad hoc (SD-AODV) conectada a la red IP fija basa su funcionamiento en criterios relacionados con la provisión de calidad de servicio, mejora la diferenciación de servicios entre ambas redes.
- ❖ Los protocolos de encaminamiento guardan una estrecha relación con el tiempo de vida de las baterías. En esta tesis doctoral se ha puesto de manifiesto que se puede alargar la supervivencia de la red ad hoc si se emplea en una red ad hoc aislada un protocolo de encaminamiento (SEADSR) que tenga en cuenta a la hora de seleccionar sus rutas la capacidad de las baterías de los nodos móviles. También se ha comprobado lo mismo usando en una red ad hoc conectada a una red IP fija un protocolo de encaminamiento (SD-AODV) que tenga en cuenta a la hora de seleccionar sus rutas la congestión existente.

Aportaciones originales de la tesis doctoral

En esta tesis doctoral se presentan una serie de aportaciones originales:

- ❖ *Diseño e implementación del protocolo de encaminamiento SEADSR para la mejora de la supervivencia en redes ad hoc aisladas.*

Se ha desarrollado un protocolo de encaminamiento que es una mejora del protocolo de encaminamiento DSR y que a la hora de tomar decisiones de encaminamiento tiene en cuenta la capacidad sobrante de las baterías de los terminales en una red ad hoc aislada con el objetivo de alargar la supervivencia de la red en cuestión.

- ❖ *Desarrollo y evaluación de un modelo de calidad de servicio para redes ad hoc conectadas a redes IP fijas.*

Numerosos estudios tratan el problema de cómo intentar proporcionar calidad de servicio en redes ad hoc aisladas. Sin embargo, este tipo de modelos desarrollados resultan insuficientes cuando se trata de proporcionar calidad de servicio entre una red ad hoc y una red basada en infraestructura. De acuerdo con nuestros conocimientos, no se ha desarrollado hasta la fecha ningún modelo de calidad de servicio que permita la interacción y favorezca la cooperación entre una red ad hoc y una red IP fija con el fin de proporcionar calidad de servicio extremo a extremo. En este sentido el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral resulta fundamental, pues en él se propone dejar de considerar la calidad de servicio en una red ad hoc y la calidad de servicio en una red IP fija como dos problemáticas independientes. La provisión de calidad de servicio extremo a extremo entre ambas redes debe contemplarse como un objetivo global y no basta con desarrollar modelos de calidad de servicio que traten de diferenciar servicios independientemente en cada una de las redes de forma separada: Con la ayuda del modelo de QoS creado en esta tesis doctoral se demuestra que resulta imprescindible la cooperación e interacción entre los modelos de calidad de servicio de ambas redes para lograrlo. Este trabajo resulta por tanto pionero en estos aspectos y sirve para abrir una nueva línea de investigación con el fin de promover la comunicación entre redes ad hoc y redes fijas.

❖ *Diseño e implementación de un protocolo de encaminamiento para la mejora de la supervivencia y la cooperación en el mantenimiento de la calidad de servicio en redes ad hoc conectadas a redes fijas*

Numerosos estudios tratan el problema de cómo mejorar la supervivencia en redes ad hoc aisladas. Sin embargo, de acuerdo con nuestros conocimientos no se ha desarrollado hasta la fecha ningún protocolo de encaminamiento que trate de mejorar la supervivencia en una red ad hoc interconectada con una red IP fija.

Numerosos estudios hablan de maximizar el tiempo de vida de una red ad hoc. Sin embargo, según nuestros conocimientos no se ha desarrollado hasta la fecha ningún protocolo de encaminamiento que utilice como retroalimentación para su correcto funcionamiento información relacionada con el mantenimiento de los parámetros de calidad de servicio que le proporciona la red ad hoc. El protocolo de encaminamiento desarrollado no sólo basa su funcionamiento en la utilización de dicha información sino que además la usa no sólo con el objetivo de promover una disminución del consumo de energía de los nodos de la red ad hoc, sino también con la intención de mantener la calidad de servicio entre la red ad hoc y la red IP fija.

Resultados obtenidos

En el capítulo 3 de esta tesis doctoral se ha pasado a explicar con detenimiento la primera contribución, “Desarrollo del protocolo de encaminamiento SEADSR para la mejora de la supervivencia en redes ad hoc aisladas”, procediéndose a realizar una explicación teórica y a presentar simulaciones detalladas de la misma. Se ha conseguido demostrar mediante simulaciones que SEADSR mejora la supervivencia de la red ad hoc en comparación con el protocolo de encaminamiento DSR, lo cual repercute en un aumento del throughput, en el caso de que los recursos energéticos sean escasos. También se ha podido comprobar que en sistemas con poblaciones de nodos estables (ningún nodo muere debido al agotamiento de sus reservas de energía), los resultados indican que a pesar del retardo y señalización adicional introducidas por el protocolo SEADSR, los paquetes consiguen llegar puntualmente a sus destinos.

En el capítulo 4 de esta tesis doctoral se ha analizado la necesidad de la existencia de modelos de calidad de servicio en redes ad hoc interconectadas con redes fijas. La literatura existente acerca de la provisión de calidad de servicio entre redes ad hoc y redes fijas es escasísima. Aunque una publicación precursora subraya la necesidad de desarrollar modelos de este tipo, hasta la fecha no ha aparecido ninguno.

Para cubrir este déficit se ha presentado el primer modelo de calidad de servicio de la investigación actual para la comunicación entre una red ad hoc y una red IP fija. Esta nueva contribución de esta tesis doctoral se denomina “Desarrollo del modelo de calidad de servicio DS-SWAN para redes ad hoc conectadas a redes fijas” y se ha procedido a realizar una explicación teórica y a presentar los resultados detalladamente mediante simulaciones de la misma.

Con el fin de estudiar el protocolo DS-SWAN y conseguir cada vez mayores mejoras, se han introducido modificaciones en su funcionamiento, analizándose los resultados obtenidos en busca siempre de aquella solución que proporcione mejor diferenciación de servicios y un mayor aprovechamiento de los recursos de red.

Se han presentado los resultados obtenidos a la hora de simular las versiones más destacadas del protocolo DS-SWAN y compararlas con el modelo de calidad de servicio SWAN. En las simulaciones realizadas, se ha considerado un escenario en el cual una red ad hoc estaba conectada a una red IP fija y se han establecido una serie de conexiones de tráfico best-effort CBR y de tráfico de tiempo real VBR (VoIP) para comunicar los nodos móviles de la red ad hoc con alguno de los hosts localizados en la red fija. Como modelo de calidad de servicio en la red fija se ha usado la

arquitectura DiffServ. Si se usa el protocolo SWAN como modelo de calidad de servicio en la red ad hoc, el retardo medio extremo a extremo de los flujos de VoIP (tráfico de tiempo real) es mayor de 150 ms; por lo tanto, estos flujos se ven degradados y queda demostrado que si se aplica separadamente un modelo de calidad de servicio en la red ad hoc y otro en la red IP fija, pero estos dos modelos no interaccionan entre sí para mantener la calidad de servicio extremo a extremo, las aplicaciones de tiempo real funcionarían incorrectamente.

En cambio, todas las versiones del modelo de calidad de servicio DS-SWAN presentadas cooperan con la arquitectura de Servicios Diferenciados en la red fija y sí que son capaces de mantener la calidad de servicio de las aplicaciones de tiempo real, sin que se produzca inanición del tráfico best-effort.

De entre todas las versiones presentadas del modelo de calidad de servicio desarrollado en esta tesis doctoral, la versión “DS-SWAN – fuentes de VoIP + vecinos” es la que supera en rendimiento al resto, mejorando los parámetros de calidad de servicio para los flujos de tiempo real en cuanto a retardo extremo a extremo, jitter y tasa de pérdida de paquetes, sin que se produzca inanición del tráfico best-effort. Por este motivo, debe seleccionarse esta versión del modelo como la más adecuada para su implementación en una red ad hoc.

Se ha estudiado la escalabilidad de esta versión de DS-SWAN para redes ad hoc de distinto tamaño con respecto al número de fuentes de VoIP. También se ha estudiado la escalabilidad del protocolo con respecto a la movilidad, realizándose simulaciones para redes ad hoc de distinto tamaño. Además, se ha analizado el impacto del volumen de tráfico best-effort en las conexiones de VoIP para una red que utilice este modelo de calidad de servicio.

Asimismo, se ha analizado la influencia del tráfico best-effort sobre los flujos de tiempo real, introduciendo como tráfico best-effort fuentes CBR en el primer caso o bien fuentes TCP en el segundo. En todas las simulaciones realizadas los resultados obtenidos han sido siempre muy positivos y con la ayuda de DS-SWAN ha sido siempre posible transmitir los flujos de tiempo real correctamente.

En dichas simulaciones se ha analizado la transmisión de tráfico best-effort y de tiempo real desde la red ad hoc hacia la red fija. Posteriormente, se ha invertido el sentido del tráfico (desde la red fija hacia la red ad hoc) con el fin de comprobar si en este caso más problemático, donde el gateway corría el riesgo de convertirse en un nodo permanentemente congestionado, podía garantizarse el buen funcionamiento del modelo desarrollado. Los resultados han demostrado que aunque ha sido necesario introducir ciertas modificaciones en el sistema para favorecer la transmisión del tráfico de VoIP, esta transmisión continúa siendo realmente exitosa, sin que haya llegado a

producirse en ningún momento inanición del tráfico best-effort. La escalabilidad del protocolo con respecto a un número creciente de fuentes de VoIP ha vuelto a ser corroborada de nuevo mediante simulaciones.

En el capítulo 5 se ha presentado una nueva contribución de esta tesis doctoral, “Desarrollo del protocolo de encaminamiento SD-AODV para la mejora de la supervivencia y la cooperación en el mantenimiento de la calidad de servicio en redes ad hoc conectadas a redes fijas”, procediéndose a realizar una explicación teórica y a presentar los resultados detalladamente mediante simulaciones de la misma.

Se han presentado los resultados obtenidos a la hora de simular el protocolo de encaminamiento SD-AODV y compararlo con el protocolo AODV. En las simulaciones realizadas, se ha considerado un escenario en el cual una red ad hoc está conectada a una red IP fija y se han establecido una serie de conexiones de tráfico best-effort CBR y de tráfico de tiempo real VoIP (VBR) entre alguno de los nodos móviles de la red ad hoc y alguno de los hosts localizados en la red fija. Como modelo de calidad de servicio en la red fija se ha usado la arquitectura DiffServ. Como modelo de calidad de servicio en la red ad hoc se ha usado el modelo de calidad de servicio DS-SWAN.

En las simulaciones realizadas, se ha analizado la transmisión de tráfico best-effort y de tiempo real desde la red ad hoc hacia la red fija, y, posteriormente, se ha invertido el sentido del tráfico (desde la red fija hacia la red ad hoc) con el fin de comprobar si, en este caso más problemático, donde el gateway corría el riesgo de convertirse en un nodo permanentemente congestionado, podía garantizarse el buen funcionamiento del protocolo de encaminamiento desarrollado. Los resultados para tráfico enviado en cualquiera de los dos sentidos han demostrado que la transmisión del tráfico de VoIP es realmente exitosa.

SD-AODV colabora conjuntamente con el modelo DS-SWAN para mitigar las condiciones de congestión y reducir los problemas relacionados con la congestión, beneficiándose con ello las aplicaciones de tiempo real, que son capaces de mantener sus requisitos de calidad de servicio. La combinación de ambos protocolos reduce no solamente los retardos extremo a extremo de los flujos de VoIP sino también el jitter y las pérdidas de paquetes para el tráfico de VoIP y mantiene el throughput del tráfico best-effort sin que sufra inanición. Por tanto, SD-AODV ha demostrado ser el protocolo de encaminamiento más adecuado para ser combinado con el modelo DS-SWAN en el mantenimiento de los parámetros de calidad de servicio para los flujos de tiempo real entre una red ad hoc y una red IP fija. Asimismo, ha quedado demostrado que con SD-AODV se reduce el consumo de energía de los nodos congestionados; así estos nodos no extinguirán sus recursos de energía antes de tiempo y el problema de que la red sufra una partición se verá reducido.

Aplicabilidad práctica en el área específica

Las contribuciones que se aportan en esta tesis doctoral demuestran que sí que es posible la diferenciación de servicios entre una red ad hoc y una red IP fija; además, prueban que resulta imprescindible la cooperación e integración de los modelos de calidad de servicio de ambas redes para lograrlo. Asimismo, debe tratarse de alargar lo máximo posible el tiempo de vida de los nodos de la red ad hoc, porque de esta forma perdura durante más tiempo la comunicación entre esta red y otras redes, como las redes IP fijas. Este trabajo resulta pionero en estos aspectos y sirve para abrir una nueva línea de investigación con el fin de promover la comunicación entre redes ad hoc y redes fijas. Las aplicaciones comerciales que pueden surgir como consecuencia de poder aplicar calidad de servicio en una red ad hoc conectada a una red fija son innumerables; quisiéramos destacar a modo de ejemplo algunas de ellas:

❖ *Redes ad hoc empleadas en los hotspots.*

Las redes ad hoc no solamente tendrán utilidad como redes aisladas e independientes. Su papel será primordial al ser empleadas en los 'hotspots' o lugares de interés (hoteles, aeropuertos, centros comerciales, etc.) donde existe una alta concentración de personas con necesidad de establecer al mismo tiempo comunicaciones de voz y/o datos. Para poder cubrir las necesidades de dichos usuarios se suele usar el estándar de tecnología WLAN (Wireless Local Area Networks) denominado IEEE 802.11.

Cuando las WLAN con IEEE 802.11 operan en el modo basado en infraestructura, la red está constituida por al menos un punto de acceso conectado a la infraestructura de la red cableada y a un conjunto de estaciones inalámbricas.

En cambio, cuando las WLAN con IEEE 802.11 operan en el modo ad hoc, lo que tenemos es un conjunto de estaciones inalámbricas que se comunican directamente entre sí, sin la presencia de puntos de acceso, evitándose de esta forma su colapso a la hora de atender a un número tan elevado de usuarios (no todo el tráfico debe de estar dirigido al punto de acceso, tal y como sucede con las WLAN operando en el modo basado en infraestructura). Además, los usuarios que lo deseen, tendrán acceso a Internet. Resulta fundamental poder ofrecer a estos usuarios aplicaciones con la calidad de servicio requerida incluso en situaciones de congestión y alargar el tiempo de vida de los nodos de la red ad hoc; las contribuciones de esta tesis demuestran que sí que es posible lograrlo.

❖ *Redes ad hoc como una extensión de Internet.*

Las redes ad hoc son redes altamente flexibles y rápidas de desarrollar, pues no necesitan para su funcionamiento una infraestructura propia. Por este motivo, se han convertido en la manera más natural de extender Internet más allá de su alcance tradicional, a aquellas áreas hasta ahora inaccesibles, permitiendo la utilización de servicios Web en todo momento y lugar. Gracias a la coexistencia y cooperación entre las redes ad hoc y las redes IP fijas, que nos permitirán acceder a Internet, será posible desarrollar nuevas e innovadoras aplicaciones de calidad, aprovechando también las ya existentes. Las contribuciones de esta tesis refuerzan esta posibilidad.

❖ *Redes ad hoc entre vehículos.*

Un ejemplo futurista serán aquellas redes ad hoc que se establecerán espontáneamente entre vehículos en una carretera para poder intercambiar información, localizarse e influenciarse mutuamente. Estas redes serán muy útiles en caso de accidentes, donde se podría enviar un mensaje de alerta desde un coche al resto de vehículos para que escogiera una ruta alternativa a la del accidente y de este modo pudiera prevenirse la congestión. Internet también podría prestar conjuntamente sus servicios a los usuarios de estas redes ad hoc 'improvisadas' mediante informaciones actualizadas del estado de las carreteras.

Los fabricantes de coches ya están explorando actualmente la utilidad de las redes ad hoc para ayudar a las agencias de transporte a recolectar, en tiempo real, información fiable acerca del tráfico de una autopista. Las contribuciones de esta tesis sirven para colaborar en la creación y mejora de este tipo de redes.

❖ *Un sistema de información basado en redes ad hoc para taxis.*

En vez utilizar otros sistemas más caros, complejos y poco eficientes podría utilizarse una red ad hoc como sistema básico de información para taxis. Cada taxi tendría incorporado un dispositivo ad hoc y existiría además un servidor ad hoc central localizado en una oficina. Este servidor central podría tener acceso a Internet y transferir al resto de nodos (taxis) de la red ad hoc información referente al tráfico, el tiempo, etc. Nos encontraríamos pues con un escenario híbrido donde si bien la red ad hoc (con excepción del nodo en la oficina central) es totalmente móvil, también hay un cierto grado de centralización a la hora de obtener un cierto tipo de información y hay conectividad con una red fija. En un escenario de este tipo se requerirá que de algún modo los taxis estén conectados con la central, que es quién transferirá ciertas órdenes, pero esta conectividad no tiene porque ser directa sino indirecta (a través de otros taxis) y cualquier miembro de la red ad hoc puede en un momento determinado estar en disposición de enviar algún tipo de comunicación al resto. Nosotros sostenemos

que incluso en una ciudad grande con una elevada concentración de taxis y utilizando el modelo de calidad de servicio desarrollado en esta tesis (DS-SWAN combinado con SD-AODV) la comunicación no presentará ningún problema y será posible ofrecer a los pasajeros usuarios aplicaciones de Internet y servicios multimedia con una calidad más que aceptable, alargándose el tiempo de vida de la red ad hoc.

❖ *Aplicaciones multimedia en redes ad hoc.*

Los dispositivos de telecomunicaciones móviles han evolucionado hasta límites insospechados, convirtiéndose en auténticos prodigios de la tecnología. Actualmente casi cualquier teléfono móvil ya incorpora una cámara integrada, un micrófono, un reproductor MP3, etc. Está previsto que otras aplicaciones multimedia se incorporen también en un futuro muy próximo. Los vídeos, fotos, etc. captados con las cámaras de los teléfonos móviles podrán ser transmitidos a otros dispositivos (por ejemplo a ordenadores) o bien se podrá descargar música desde los ordenadores a los teléfonos móviles. Para lograrlo basta con comunicar redes ad hoc con Internet (en la actualidad ya se está haciendo parcialmente). Para conseguir poner en marcha aplicaciones tan innovadoras resulta indispensable que las redes ad hoc estén preparadas para ofrecer una cierta calidad de servicio; esta propiedad resulta absolutamente esencial en aplicaciones tales como las multimedia. Resulta muy complicado establecer calidad de servicio en una red ad hoc debido a sus particularidades; por este motivo, la provisión de calidad de servicio entre redes ad hoc y redes IP fijas se ha convertido en un desafío tan difícil como atrayente y en esta tesis se ha demostrado cuáles son las pautas a seguir y los protocolos a utilizar para alcanzar este propósito. Algunas compañías ya ofrecen dispositivos de comunicación ad hoc y están utilizando esta tecnología de red para la comunicación entre dispositivos móviles con fines comerciales relacionados con la distribución de contenidos.

A través de las aplicaciones presentadas para redes ad hoc conectadas a redes fijas se ha demostrado que sí que es viable su comercialización en la actualidad y que nuestras contribuciones sirven para mejorar la supervivencia de la red ad hoc y la calidad de servicio ofrecida. Y todo es posible gracias a la utilización de la tecnología ya existente; tan sólo hace falta una alta densidad de dispositivos inalámbricos configurados para soportar protocolos ad hoc como los descritos en esta tesis. Como consecuencia, aquellas compañías con mayor perspectiva de futuro muestran mucho interés por las grandes expectativas que originan las redes ad hoc interconectadas a redes IP fijas y están estudiando las posibilidades que tienen de introducirse en este novedoso y prometedor mercado.

Anexos

Esta tesis doctoral ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España gracias al proyecto de investigación “Gestión por políticas en redes ad hoc corporativas”, con referencia TIC2003-08129-C02, que está parcialmente subvencionado por FEDER y en el que participo como profesora universitaria del departamento de Ingeniería Telemática.

Publicaciones relacionadas con la tesis doctoral

A continuación se describen aquellas publicaciones que ha generado esta tesis doctoral:

Congresos nacionales

- [P1] M. C. Domingo, D. Remondo y O. León, “Nuevo protocolo de encaminamiento para la mejora de la supervivencia en redes ad hoc”, Jitel 2003, IV Jornadas de Ingeniería Telemática, Las Palmas de Gran Canaria, Sept. 2003, pp. 361-367, ISBN: 84-96131-38-6.
- [P2] M. C. Domingo y D. Remondo, “Diferenciación de servicios por clase en redes inalámbricas”, URSI 2003, XVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Coruña, Sept. 2003, ISBN 84-9749-081-9.

Congresos internacionales

- [P3] M. C. Domingo, O. León and D. Remondo, “On the Extension of Battery Life with Dynamic Source Routing”, Proceedings of IFIP WG6.7 Workshop and EUNICE Summer School on Adaptable Networks and Teleservices, Eunice'2002, Trondheim, Norway, Sept. 2002, pp. 15-19, ISBN 82-993980-5-3.
- [P4] M. C. Domingo and D. Remondo, “Per-Flow Service Differentiation via Virtual MAC”, Proceedings of WiOpt'03: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, INRIA Sophia-Antipolis, France, March 2003, pp.319-320, ISBN 2-7261-1238-2.

- [P5] M. C. Domingo and D. Remondo, "A New Energy-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", Proceedings of Med-Hoc-Net 2003, Mahdia, Tunisia, June 2003.
- [P6] M. C. Domingo, D. Remondo and O. León, "A Simple Routing Scheme for Improving Ad Hoc Network Survivability", Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM 2003), San Francisco, USA, Dec. 2003, ISBN 0-7803-7975-6.
- [P7] M. C. Domingo and D. Remondo, "State of Art in Multi-Hop Ad Hoc Networks", EUNICE Summer School on Next Generation Networks, Proceedings of Eunice'2003, Budapest, Hungary, Sept. 2003, pp.219-225, ISBN 963-421-576-9.
- [P8] M. C. Domingo and D. Remondo, "An Interaction Model between Ad-hoc Networks and Fixed IP Networks for QoS Support", Proceedings of the Seventh ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWIM 2004), Venice, Italy, Oct. 2004, pp. 188-194, ISBN 1-58113-953-5.
- [P9] M. C. Domingo and D. Remondo, "Analysis of VBR VoIP Traffic for Ad Hoc Connectivity with a Fixed IP Network", Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2004-Fall), Los Angeles, USA, Sept. 2004, ISBN 0-7803-8522-5.
- [P10] M. C. Domingo and D. Remondo, "A Cooperation Model between Ad Hoc Networks and Fixed Networks for Service Differentiation", Proceedings of IEEE Wireless Local Networks (IEEE WLN 2004), held in conjunction with LCN, Tampa, Florida, USA, Nov. 2004, pp. 692-693, ISBN 0-7695-2260-2.
- [P11] M. C. Domingo and D. Remondo, "A Cooperation Model and Routing Protocol for QoS Support in Ad Hoc Networks Connected to Fixed IP Networks", Accepted for publication in Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR 2005), Lisbon, Portugal, 2005, IEEE Computer Society.

Revistas internacionales

- [P12] M. C. Domingo and D. Remondo, "An Improved Service Differentiation Scheme for VBR VoIP in Ad-Hoc Networks Connected to Wired Networks", Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR 2004), Fortaleza, Brazil, vol. 3126 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, 2004, Springer Verlag, pp. 301-310, ISBN 3-540-22567-6.
- [P13] M.C. Domingo and D. Remondo, "Quality of Service Support in Wireless Ad Hoc Networks Connected to Fixed DiffServ Domains", IFIP TC6 9th International Conference, Personal Wireless Communications (PWC 2004), Delft, The Netherlands, vol. 3260 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, 2004, Springer Verlag, pp.262-271, ISBN 3-540-23162-5.
- [P14] M C. Domingo and D. Remondo, "An Interaction Model and Routing Scheme for QoS Support in Ad Hoc Networks Connected to Fixed Networks", International Workshop on Quality of Future Internet Services (QofIS 2004), Barcelona, Spain, vol. 3266 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, 2004, Springer Verlag, pp. 74-83, ISBN 3-540-23238-9.
- [P15] M. C. Domingo and D. Remondo, "An Improved Resource Allocation Scheme for VBR VoIP Support in Ad Hoc Networks Connected to Fixed IP Networks", Special Issue on "Wireless Ad Hoc and Sensor Networks" of the Journal of Internet Technology (JIT), Vol. 6 (2005), No. 1, January 2005, pp. 93-100, ISSN 1607-9264.
- [P16] M. C. Domingo and D. Remondo, "An Interaction Model for QoS Support in Ad Hoc Networks Connected to Fixed IP Networks", Special Issue on "Mobile Systems, E-commerce and Agent Technology" of the International Journal of Wireless and Mobile Computing (IJWMC), Vol. 1, Issue 7 (2005).

Libros

- [P17] M. C. Domingo and D. Remondo, "Analyzing Voice Transmission between Ad Hoc Networks and fixed IP Networks providing end-to-end Quality of Service", "Wireless Networks and Mobile Computing" (edited by Ding-Zhu Du and

Guoliang Xue), in Book Series "Network Theory and Applications", Springer Verlag.