

Ramón Agüero Calvo

Nací en Santander, el 14 de octubre de 1977. En 1995 comienzo, en la ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, de la Universidad de Cantabria, los estudios de Ingeniería de Telecomunicación. En el año 2000 el Ministerio de Educación y Ciencia me concede una beca de colaboración, y me incorporo al Grupo de Ingeniería Telemática (dentro del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la citada escuela) para participar en el proyecto de investigación europeo WINE, marco en el cual desarrollé mi Proyecto Fin de Carrera, Implementación de un Protocol Booster para la Mejora de la Pila de Protocolos TCP/IP sobre WLAN, que presenté el día 10 de abril de 2001, obteniendo la calificación de Matrícula de Honor. Desde julio de 2000 hasta septiembre de 2001 colaboré como investigador en el Grupo de Ingeniería Telemática, primero como becario y, tras la lectura del proyecto, como investigador contratado.

En octubre de 2001, me incorporo a la compañía PWC Consulting, en la cual, y hasta la fecha, he estado involucrado en la realización de un análisis acerca del estado de la Sociedad de Información y las perspectivas futuras de la misma, obteniendo los datos pertinentes para la publicación, por parte de Telefónica I+D, de un informe al respecto, tal y como viene haciendo en los últimos años.

Además, durante el verano de 1999 disfruté de una beca de dos meses, dentro del Departamento de Desarrollo de Negocio de Terra, involucrándome en varios de las actividades que surgieron en relación a la salida a bolsa de la compañía.

La realización del proyecto fin de carrera me ha permitido realizar varias publicaciones en congresos nacionales (JITEL 2001) e internacionales (WPMC y PIMRC 2001) e, incluso, en la prestigiosa revista IEEE Communications Magazine. Por otro lado he obtenido el premio extraordinario fin de carrera en la Universidad de Cantabria, como mejor expediente en los estudios de Ingeniería de Telecomunicación en el curso 2000-2001.

Título: Implementación de un Protocol Booster para la Mejora de la Pila de Protocolos TCP / IP sobre WLAN

Tutor: Luis Muñoz Gutiérrez

Realizado en colaboración con el Grupo de Ingeniería Telemática del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria

Leído el 10 de abril de 2001, obteniendo la calificación de 10, Matrícula de Honor

Nota del autor

El tratar de resumir el trabajo de más de año y medio en 15 páginas es una labor complicada, y siempre hay muchos aspectos importantes que se quedan en el tintero. He tratado de plasmar los puntos que considero como más relevantes, aunque animo a los interesados en el tema que amplíen la lectura con la memoria del proyecto, mucho más completa.

Creo que los resultados, originalidad y alcance de este trabajo son importantes, como lo demuestra el hecho de que el proyecto europeo de investigación en el que se enmarca haya cosechado numerosos parabienes. Queda asimismo de manifiesto por las numerosas publicaciones, en congresos de ámbito nacional e internacional, y en revistas con tanta relevancia como el IEEE Communications Magazine, que ha suscitado, con mi participación directa en cinco de las mismas. La relación detallada de todas ellas se puede ver al final del presente documento, y en el CD se encuentran las versiones electrónicas de las cinco publicaciones en las que tuve participación activa.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los albores del siglo XXI, el auge que están experimentando las tecnologías de la información, está superando cualquier expectativa. Destaca, sobre manera, el crecimiento espectacular de las redes móviles o inalámbricas, como se pone de manifiesto con el despliegue de la telefonía móvil de segunda generación (GSM, Global System for Mobile communications) o las cantidades ingentes de dinero que se están invirtiendo en el desarrollo de la tercera (UMTS, Universal Mobile Telecommunications System). También en el mercado de las redes de área local, la tecnología inalámbrica está aumentando su presencia. Por otro lado, y en el tramo de acceso al usuario final, si hay una tecnología predominante hoy en día se trata, sin ninguna duda, de IP, favorecida por el aumento espectacular que el uso de la Internet ha experimentado desde mediados de la década de los 90, y que ha ganado la partida al resto de alternativas existentes en la actualidad.

En el marco que se ha bosquejado, surge el proyecto WINE (Wireless Internet NETworks), que pertenece al programa “Information Society Technologies” (IST), financiado con fondos de la Comisión Europea, y que toma como elemento central de desarrollo la sinergia entre el mundo de las redes de área local inalámbricas y la tecnología IP, y que marca el entorno en el cual se desarrolla el presente proyecto fin de carrera, dada la activa participación del autor del mismo en dicho trabajo de investigación.

Introducción al Proyecto WINE

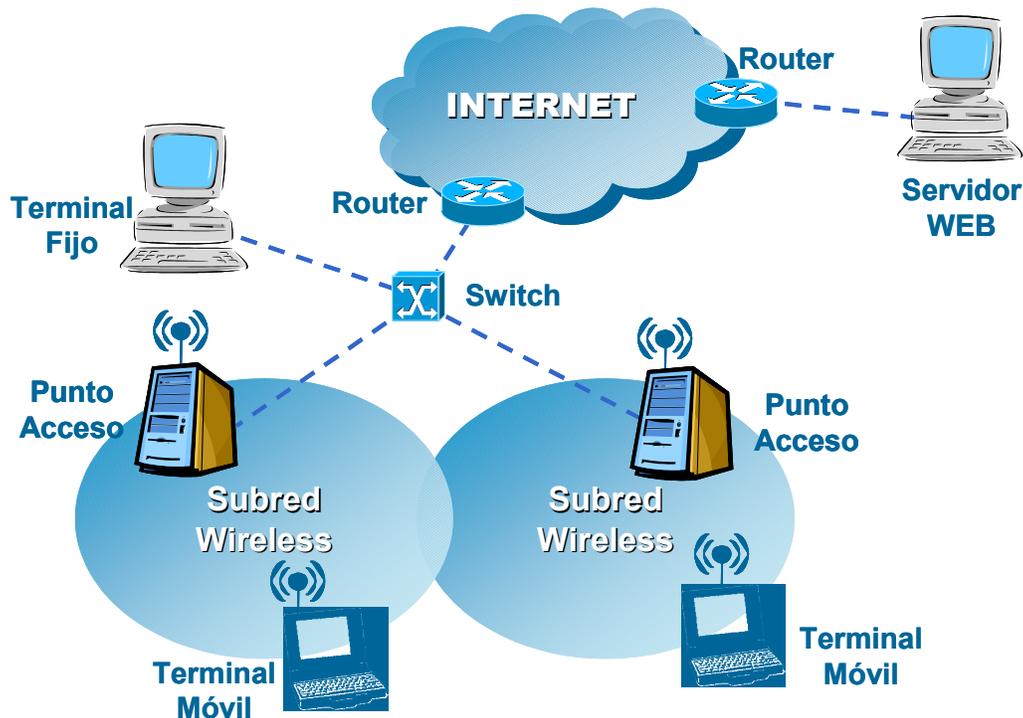
El objetivo final del proyecto WINE es la especificación, el diseño y la implementación de un sistema para el soporte de comunicaciones IP sobre enlaces inalámbricos, en arquitecturas Wireless LAN (WLAN). La sinergia entre el mundo Internet y las comunicaciones móviles es un aspecto que, hoy en día, presenta un gran atractivo, y que es objeto de investigación por parte de varios grupos. El proyecto se centra en la provisión de tecnología innovativa para soportar los requerimientos del usuario final en varios entornos, sin necesidad de tener que emplear las tradicionales alternativas basadas en soluciones con cable.

Una de las desventajas que presenta la utilización de redes de área local inalámbricas para comunicaciones basadas en tecnología IP es que los protocolos de transporte que se emplean en estas arquitecturas no fueron inicialmente diseñados para este tipo de tecnología, y su rendimiento sobre las mismas no es el más adecuado. Este inconveniente ha suscitado diversas investigaciones y estudios, con el objetivo final de mejorar el comportamiento de los protocolos más empleados en la actualidad sobre plataformas inalámbricas. El proyecto WINE se engloba en este área de investigación, aunque va un paso más adelante, ya que dentro de sus objetivos principales destaca la capacidad que se pretende añadir para adaptarse a las condiciones de canal, en función de las características del tráfico particular en cada momento.

Se adopta un enfoque basado en una solución en el nivel de enlace, para la mejora del rendimiento de los protocolos de nivel superior, de modo que se pueda realizar de manera local, sin tener que modificar la implementación de la pila de protocolos de la mayoría de servidores y máquinas que se emplean en la actualidad.

Topología de referencia en WINE

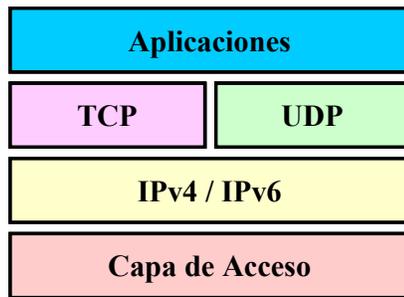
La figura muestra la topología básica del proyecto WINE, en la que un conjunto de terminales móviles acceden a los recursos de una red cableada y de la Internet a través de puntos de acceso. El desarrollo que se contempla en el proyecto se centra en la modificación de la pila de protocolos en los terminales móviles y en el punto de acceso, asegurando una solución basada en un enfoque local.



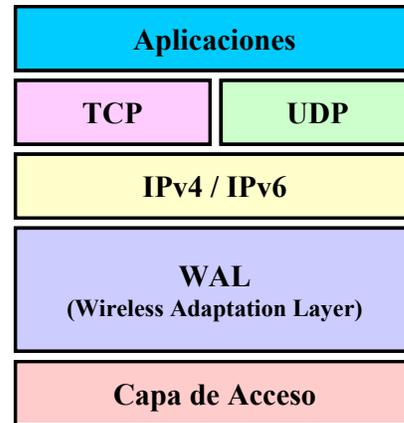
Dentro de las posibles alternativas que hoy en día existen como infraestructura a emplear en el acceso inalámbrico, son tres las que se deciden emplear en el marco del proyecto WINE: Bluetooth, Hiperlan 2 e IEEE 802.11. La última de las alternativas anteriores es en la que se empleará en el desarrollo del presente trabajo fin de carrera.

Arquitectura de protocolos en WINE

La manera en la que se pretende afrontar todos los requerimientos que se han mencionado para el proyecto WINE es mediante el diseño e implementación de una capa, que se situará entre el nivel MAC e IP, tal y como se observa en la figura. El nombre que se le da a la misma, teniendo en cuenta que se pretende adaptar el medio inalámbrico, ocultando sus deficiencias, para que se pueda emplear con aplicaciones basadas en la tecnología IP, es el de WAL (Wireless Adaptation Layer). Se compondrá de una serie de módulos independientes, cada uno de los cuales desarrollado con el fin de mejorar alguno de los tráficos que se cursen y que serán activados en función de las propiedades del mismo y dinámicamente, teniendo en cuenta las condiciones del canal inalámbrico en cada momento.



Pila de protocolos TCP/IP



Pila de protocolos TCP/IP de WINE

Se ha incluido un mecanismo de señalización completo fuera de banda, que permite la comunicación entre dos terminales que tengan capacidad para ello, y una serie de interfaces que favorecen la inserción de módulos de manera simple y flexible.

Objetivos del Presente Trabajo Fin de Carrera

Como se puede comprobar, el escenario en el que se engloba el trabajo fin de carrera es muy ambicioso. Durante el proceso de desarrollo invertido en el mismo, muchos son los temas y aspectos en los que se han trabajado, escogiendo para su memoria aquellos que se pueden considerar como más relevantes.

Ya se ha mencionado que el proyecto WINE nace con el objetivo principal de proporcionar comunicaciones con unas mínimas garantías de calidad cuando se empleen aplicaciones soportadas por la pila TCP/IP sobre redes inalámbricas. Para poder cuantificar los beneficios obtenidos al incluir la WAL es necesario tener caracterizado en detalle cuál es el comportamiento nativo de dichos protocolos sobre redes de área local inalámbricas. En ese sentido surge el primer objetivo del presente trabajo: la caracterización de los protocolos TCP y UDP cuando se emplean sobre la arquitectura IEEE 802.11, que es la tecnología sobre la que se sustenta el desarrollo realizado. A partir de este estudio se extraerán conclusiones que pudieran ser interesantes para el diseño a realizar en WINE.

Para que el desarrollo central de la capa WAL pueda ser independiente de la tecnología subyacente, es necesario la creación de una entidad que permita la interacción entre la capa MAC y la WAL mediante el uso de unos interfaces específicos y que provea de un conjunto necesario de funcionalidades. En el marco del presente trabajo, se ha implementado esta entidad, permitiendo la integración de la misma en la capa WAL.

Por último, también ha sido objeto del presente trabajo la implementación del agente SNOOP, un método clásico que permite la mejora de aplicaciones basadas en TCP sobre redes inalámbricas, y su posterior integración en el esquema general de la WAL.

ASPECTOS TEÓRICOS

En este Capítulo del proyecto se recogen, de manera resumida, todos aquellos conceptos teóricos que, de alguna manera, afectan al desarrollo y, por tanto, a la comprensión del presente trabajo fin de carrera.

Previamente a la descripción técnica de la pila de protocolos empleada en el transcurso de este proyecto, se da una introducción a la tecnología de las redes de área local inalámbricas, justificando su auge y el esfuerzo que se dedica a la investigación y desarrollo sobre este tipo de plataformas, contexto en el que se engloba el proyecto WINE y el presente trabajo fin de carrera.

ASPECTOS PRÁCTICOS

Debido al marco en que está situado este trabajo, existen determinadas restricciones a la hora de elegir los elementos utilizados para su desarrollo. Así, por ejemplo, como decisión de todo el consorcio que participa en el proyecto WINE, se especifica la utilización de la versión del kernel 2.2.14 de Linux como sistema operativo de los componentes de todo el sistema. Además, dentro de todas las posibilidades que se abren en lo referente a la plataforma inalámbrica, la Universidad de Cantabria, particularmente el Grupo de Ingeniería Telemática, acuerda utilizar la plataforma IEEE 802.11b, con el producto comercial de Lucent, Wavelan.

Hay que decir, por otra parte, que son dos elecciones muy apropiadas. La utilización de un sistema operativo como Linux facilita en un alto grado el desarrollo, ya que se trata de un sistema totalmente abierto, con la posibilidad de examinar libremente todo su código, desarrollado en C. Quizás no goce de la expansión y amigabilidad de otros productos más comerciales, pero es la opción idónea para un proyecto de las características de WINE. En lo referente a la elección del producto de Lucent, se puede mencionar que, a pesar de las lógicas dificultades que aparecieron por tratar de emplear un producto comercial para actividades para las que no estaba inicialmente diseñado, el hecho de emplear una tecnología robusta y con un funcionamiento contrastado daba un grado de confianza en el proceso de desarrollo.

CARACTERIZACIÓN DE LOS PROTOCOLOS TCP Y UDP SOBRE LA PLATAFORMA INALÁMBRICA IEEE 802.11

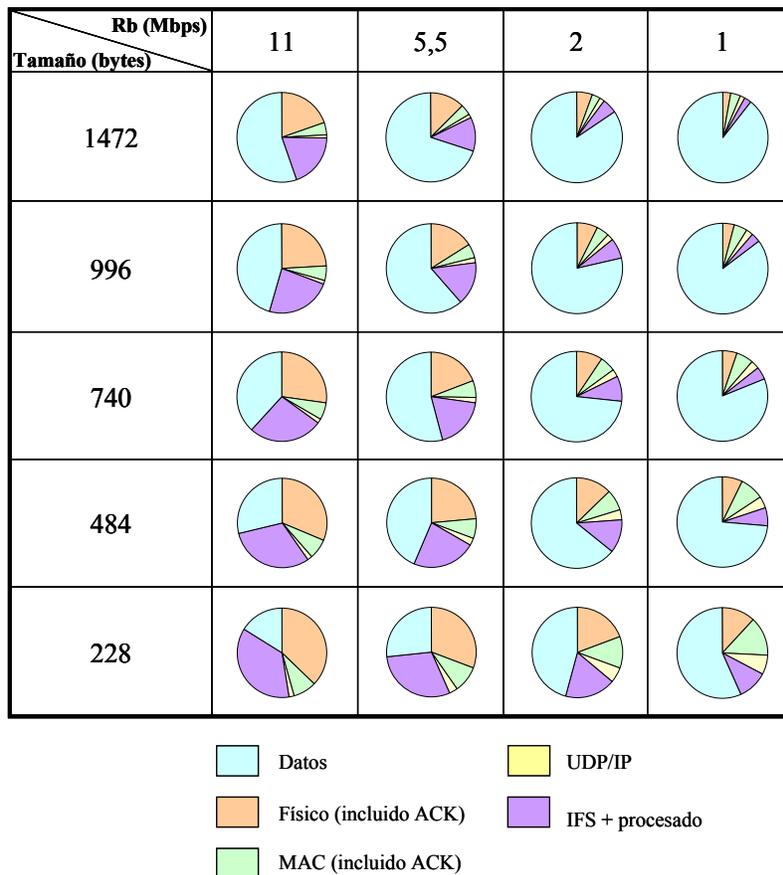
A pesar de que las redes de área local inalámbricas constituyen una alternativa (o complemento) tecnológica muy interesante a sus predecesoras cableadas, el comportamiento de las aplicaciones más habituales sobre este tipo de infraestructuras no siempre es adecuado. El hecho de que los protocolos de transporte en los que se basan dichas aplicaciones (TCP y UDP) fueran diseñados para redes cableadas, es la causa principal de este defectuoso comportamiento. Dado que se trata de un tema muy en boga hoy en día, existen numerosos estudios que analizan este aspecto, aunque la mayoría carecen de un enfoque muy detallado y exponen resultados basados en complejos cálculos analíticos y simulaciones, las cuales básicamente se centran en la influencia del número de terminales que acceden al medio y en cómo afecta su presencia al rendimiento del sistema. En este capítulo del proyecto se da una descripción exhaustiva del comportamiento de UDP y TCP sobre la plataforma 802.11b, cuantificando el rendimiento que se pierde debido a cada uno de los mecanismos empleados en el esquema DCF (método básico que marca el acceso al medio) del estándar, para

posteriormente evaluar la influencia de un canal con presencia de errores en el rendimiento global, enriqueciendo el estudio con un análisis del código que Linux utiliza para la implementación de TCP.

Protocolo UDP

En primer lugar se estudió el comportamiento del protocolo de transporte UDP sobre la WLAN, tanto sobre un canal ideal (con presencia de errores nula) como con una situación en la que la presencia de errores en el canal radio estuviera asegurada, con el fin de comprobar su influencia. Cabe decir que las aplicaciones que, en mayor medida, harán uso del protocolo de transporte UDP son las que tienen requerimientos de tiempo real, por lo que, además de tomar medidas del throughput, se caracterizará el comportamiento temporal de los datagramas UDP, con medidas del retardo medio entre datagramas consecutivos y de la varianza de dicho retardo.

En el canal ideal se evaluó la contribución de cada uno de los procedimientos que conforman el método de acceso del estándar IEEE 802.11 en el rendimiento global, validando las medidas realizadas con un análisis matemático. En la figura siguiente se puede observar la contribución individual de todos los procedimientos.

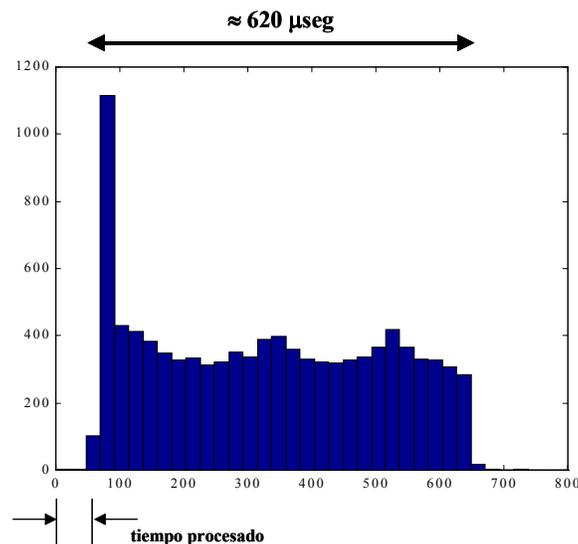


Se puede observar que la mayor parte de la tasa binaria bruta se emplea en la transmisión de la sobrecarga de nivel físico. Dicho análisis se realizó asimismo para el caso en que se emplee el método de acceso basado en el intercambio de dos paquetes

cortos (RTS/CTS), que se define como opcional en el estándar, en el que el efecto de la sobrecarga de nivel físico se mostró más acuciante.

Al caracterizar el comportamiento temporal de los datagramas sobre el canal libre de errores se obtuvo un resultado que cabía esperar, si se tiene en cuenta las características del método de acceso estudiado. En el mismo, la única contribución aleatoria es la del procedimiento de backoff que se emplea en el estándar; entre la transmisión de dos tramas consecutivas se deja un período de tiempo que viene dado por un número determinado de ranuras temporales, siguiendo una distribución aleatoria entre 0 y 31, y con una longitud de 20 microsegundos cada una de ellas. Pues bien, el valor medio y la varianza del tiempo entre datagramas se corresponde, con un elevado grado de exactitud, con el de la variable aleatoria descrita anteriormente.

Como aspecto adicional se pasó a caracterizar, con mayor detalle, ese período entre tramas consecutivas, pues, a pesar de la gran correspondencia entre los valores medidos y esperados, se podían apreciar ciertas discrepancias. Éstas se pueden justificar si se observa la distribución exacta (medida) de dicho tiempo, que se aprecia en la figura. Como se ve, su forma sí que recuerda a una distribución aleatoria uniforme, aunque con dos pequeñas discrepancias: se observa un pequeño desfase, que se debe al procesado que sufren los paquetes; por otra parte, también se ve que hay un número mayor de tramas que no sufren ninguna espera, como se desprende del hecho de que la primera barra del histograma sea mayor que las demás.



Una vez estudiado el comportamiento del protocolo UDP sobre la plataforma inalámbrica 802.11 sobre un canal ideal, lo que permitió tener un conocimiento claro de la misma, se pasó a evaluar la influencia que los errores que aparecen en el entorno radio tienen sobre dicho comportamiento. Para ello se situó el terminal móvil en un lugar en el que la relación señal a ruido fuera lo suficientemente pequeña para asegurar la presencia de errores. En esta situación se midió el tiempo entre datagramas consecutivos, el retardo medio y la varianza de dicho retardo. Los valores obtenidos, cuando la relación señal a ruido se situaba por debajo de 10 dB desaconsejan el uso de este tipo de infraestructuras para servicios de tiempo real. Un resultado no menos importante que se derivó del

análisis realizado fue que el tiempo medio entre datagramas, que se midió con un programa en C diseñado para tal fin se podía obtener a partir del throughput que proporcionaba la herramienta de medida, según la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo medio entre paquetes IP} = 8 \frac{\text{Longitud}_{\text{datos}}}{T_{\text{put}}}$$

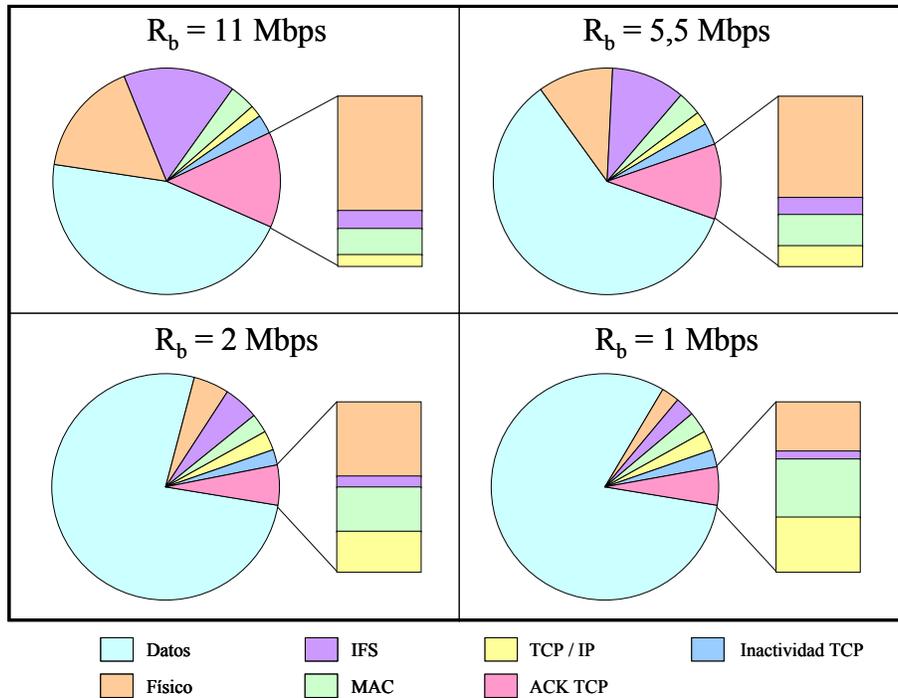
En este caso, un análisis teórico del throughput no resultaba factible, así que para corroborar los resultados que proporcionaba la herramienta de medida, se simuló el comportamiento del estándar 802.11 con el programa matemático Matlab, a partir de trazas en las que se recogía la llegada de paquetes al interfaz de red del computador, tanto si llegaban con error o sin él. Los resultados que se desprendieron de las simulaciones se correspondían en un alto grado con los de la herramienta de medida, validando el método seguido en el estudio.

Protocolo TCP

Una vez finalizada la caracterización del protocolo IEEE 802.11b, empleando tráfico UDP, se puede pasar a estudiar el comportamiento de aplicaciones basadas en TCP sobre la misma plataforma. El protocolo de transporte TCP implementa mecanismos para el control de flujo y de errores, por lo que no es tan apropiado para realizar la caracterización de la capa MAC. Sin embargo, hoy en día hay una multitud de aplicaciones cuyo funcionamiento se basa en TCP, por lo que conviene analizar el rendimiento que se puede alcanzar con este protocolo de transporte cuando se trabaja sobre 802.11b.

Se seguirá el mismo proceso que en el caso de UDP, es decir, primero se analizará el caso en el que el canal puede considerarse como ideal (sin presencia de errores), para más adelante estudiar la influencia que los errores tienen sobre el comportamiento de TCP. Sin embargo hay un aspecto que se modifica respecto al análisis realizado previamente. En esta ocasión, más que analizar los diferentes procedimientos que implementa el protocolo de acceso de IEEE 802.11b, se hará especial hincapié en el efecto de los errores en los mecanismos implementados por TCP. Se tratará, pues, de un análisis más a nivel de capa de transporte que de enlace, a diferencia del estudio basado en UDP, en el que la caracterización del protocolo MAC de 802.11b es el aspecto más importante.

En la figura se muestra la contribución individual de todos los aspectos que intervienen en la comunicación en el rendimiento global para las cuatro velocidades binarias de trabajo. Vuelve a verse que la sobrecarga física vuelve a ser el aspecto en el que se derrocha la mayor parte de la eficiencia, sobre todo cuando se trabaja a regímenes binarios elevados.



En el caso de aplicaciones basadas en TCP, la influencia de los errores del canal inalámbrico degradará su comportamiento de una manera radicalmente diferente al caso de UDP. En primer lugar, dado que este protocolo de transporte implementa un mecanismo de control de errores, la pérdida IP es cero en todos los casos, ya que aunque falle la transmisión de un segmento, es decir, se produzcan cuatro tramas MAC consecutivas con error en la transmisión, éste se retransmitirá posteriormente.

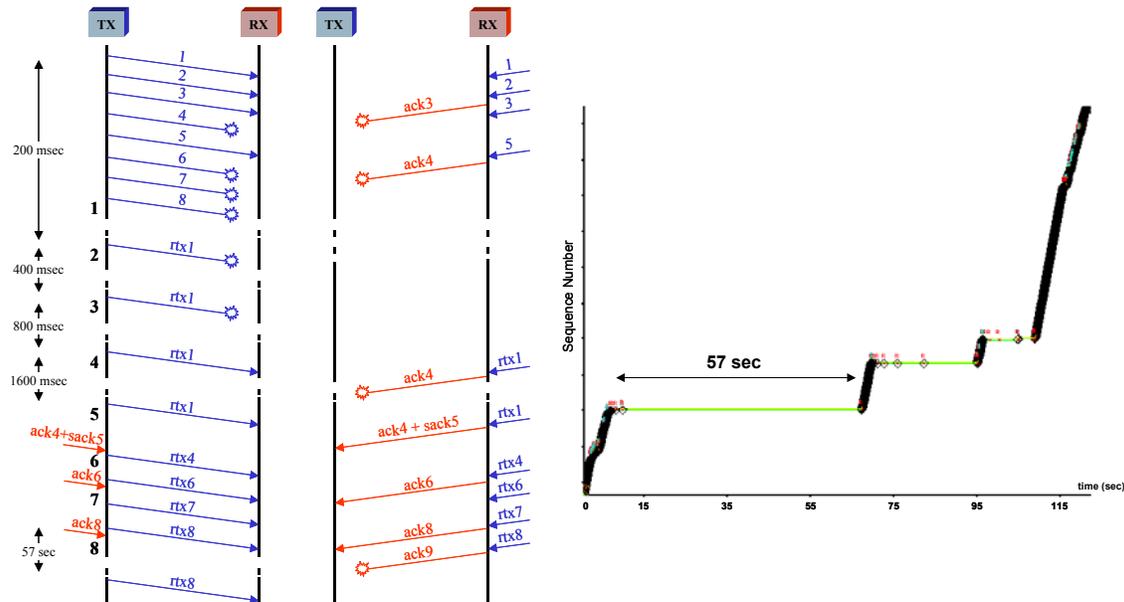
En el caso de aplicaciones cuyo funcionamiento se base en TCP, el factor que más se penaliza debido a la mala condición del canal inalámbrico es el throughput; debido, precisamente, a los mecanismos de retransmisión que TCP utiliza.

Principalmente, se pueden citar tres aspectos puntuales que degradan el rendimiento de TCP cuando hay errores en el canal.

- Las retransmisiones que se generan para recuperar los segmentos perdidos.
- En este caso, al producirse errores (PER distinta de cero), el número de tramas MAC transmitidas será mayor que el número de segmentos.
- El tiempo de inactividad global de la entidad TCP transmisora es mucho mayor que en el caso del canal ideal, por lo que su influencia en la pérdida de rendimiento será predominante; en algunos casos, que serán analizados con mayor detalle, la eficiencia desechada por la presencia de inactividades alcanza unas proporciones exageradas (en torno al 90 % de la tasa global).

Como el tercer de los aspectos mencionados con anterioridad era, con mucho, el más relevante, se pasó a analizar con detenimiento. Para ello se eligieron situaciones en las que fuera destacable, como la que aparece en la figura y, a partir de las capturas que se disponían y de un análisis del código fuente que implementaba el protocolo TCP en el núcleo del sistema operativo, se elaboraron sendos programas en C para emular el comportamiento de dicho protocolo en lo referente a las retransmisiones, comprobando

que todas las situaciones que se detectaron se correspondían con la implementación que se estaba usando de TCP.



WIRELESS ADAPTATION LAYER (WAL)

Dentro de la arquitectura del proyecto WINE, el aspecto más importante es la capa de adaptación inalámbrica (Wireless Adaptation Layer o WAL), cuyo objetivo principal es mejorar el rendimiento del tráfico IP en situaciones donde el acceso a Internet sea a través de un enlace inalámbrico, pues el comportamiento de los protocolos TCP y UDP en redes que empleen esta tecnología es bastante precario.

Básicamente, la WAL se puede ver como una batería de módulos, cada uno de los cuales realiza ciertas funcionalidades, que permiten mejorar el comportamiento de TCP y UDP sobre redes inalámbricas. Su activación será dinámica, en función de los requerimientos del tráfico y de las condiciones particulares del canal radio.

La WAL, dentro del proyecto WINE, se puede definir como un PEP (Performance Enhancing Proxy), diseñado para los protocolos de la arquitectura TCP/IP cuando se emplean sobre redes de área local inalámbricas. El comportamiento de estos protocolos (TCP y UDP) sobre tecnología inalámbrica se degrada en un alto grado; la WAL compensa las deficiencias anteriores, “ocultando” las particularidades del canal inalámbrico a los protocolos de transporte. En lugar de modificar los protocolos existentes, que gozan de una penetración muy elevada, la adaptación a realizar por la WAL se sitúa entre la capa IP y la infraestructura inalámbrica subyacente. De esta manera, y como su propio nombre indica, la WAL se adapta a las condiciones puntuales del canal, permitiendo a los protocolos de transporte operar en el modo de funcionamiento habitual.

La WAL es consciente de la Calidad de Servicio (QoS, Quality Of Service) que requiere IP (por el campo correspondiente en su cabecera), y adapta su funcionamiento para ser capaz de proporcionar el servicio apropiado para satisfacerla. En el caso de que la capa IP no implementara ningún mecanismo de calidad de servicio, la capa WAL utilizaría el tipo de tráfico (protocolo) para diferenciar las diferentes aplicaciones. De esta

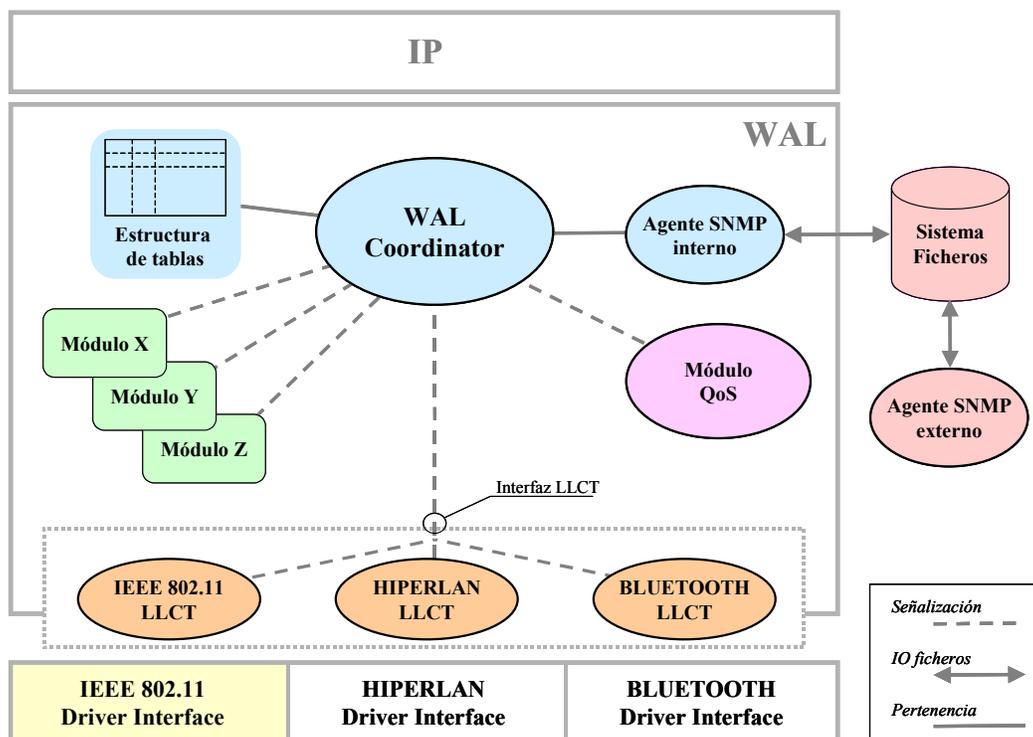
manera, la WAL complementa la política actual de QoS en redes IP, IntServ y DiffServ, pues no duplica sus funcionalidades, sino que es consciente de las mismas.

El diseño de la WAL tiene que considerar, principalmente, dos aspectos:

- Adaptación a las condiciones del canal observadas. Las condiciones del canal inalámbrico varían en el tiempo, por lo que la WAL aplica un esquema de adaptación que invoca los módulos apropiados para cada tipo de servicio y modifica sus parámetros de funcionamiento (por ejemplo, la capacidad correctora en el módulo FEC). Para ello, se emplea la información que la propia WAL obtiene acerca del canal (SNR, BER, throughput,...), y que se intercambiará entre las entidades que la conforman.
- Provisión de la QoS solicitada por IP. Los esquemas de calidad de servicio extremo a extremo utilizados por IP (IntServ y DiffServ) se aplican tanto en routers como en computadores (las últimas versiones del kernel de Linux incorporan una opción de control de tráfico). La WAL los complementa bajo un enfoque local, mapeando los requerimientos del tráfico cursado, para ofrecerle el servicio apropiado.

Arquitectura de la WAL

La figura muestra la arquitectura interna de la WAL.



Como se puede ver, la WAL se compone de diferentes entidades funcionales, entre las que destaca la del Coordinador WAL, que, como indica su nombre, se trata del elemento central de toda la arquitectura. Se encarga de gestionar el funcionamiento del resto de módulos, permitiéndoles acceder a la estructura de tablas. Además, se

comunicará con el Coordinador de otra entidad WAL remota, con el fin de sincronizar la comunicación entre ambas.

Otro módulo de vital importancia dentro de la WAL es el QoS, que clasifica los paquetes que le llegan (es el último módulo invocado) y se los pasa a las capas inferiores en función de sus requerimientos.

Con el fin de independizar el funcionamiento de la WAL de la infraestructura inalámbrica que se emplee, es necesario utilizar un elemento intermedio, el LLCT (Logical Link Control Translator), el cual debe realizar todas aquellas funciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema y que, de algún modo, dependan de la arquitectura que se emplee en las capas inferiores.

También se utiliza una batería de módulos, cada ellos de diferentes características y apropiados para tipos de tráfico variados. El Coordinador WAL, teniendo en cuenta los requerimientos de cada paquete que gestione, activará las entidades correspondientes que, además, adaptarán sus parámetros de funcionamiento en función de las condiciones del canal en cada momento.

El resto de entidades que aparecen reflejadas en la figura se emplean para favorecer la implementación o para dotar de funcionalidades adicionales a la WAL, y no son fundamentales para comprender su funcionamiento básico.

Todo el funcionamiento del protocolo se basa en dos conceptos, la clase y la asociación, que se describirán a continuación.

- *Clase.* Una clase consiste en la concatenación concreta de un conjunto de módulos WAL con objeto de proporcionar un servicio a las capas superiores, y se determina a partir del campo ToS de la cabecera IP y/o el tipo de protocolo (TCP o UDP). Es un concepto general dentro de la WAL, independiente de la condición del canal inalámbrico. Se definirán una serie de clases generales, de modo que todas las entidades WAL apliquen los módulos correspondientes a los paquetes que pertenezcan a las mismas.
- *Asociación.* Ya se ha adelantado que cada módulo adaptará su funcionamiento (modificando sus parámetros) en función de las condiciones del canal en cada momento, para lo que es necesario introducir el concepto de asociación, que se define como la combinación de la dirección IP de un terminal móvil (que determina la condición del canal) y una clase.

LOGICAL LINK CONTROL TRANSLATOR (LLCT)

El diseño de la WAL es genérico, en principio sin tener en cuenta la plataforma inalámbrica que se utilice por debajo. El proyecto WINE surge inicialmente con la idea de emplear tres de las tecnologías más importantes de la actualidad (Bluetooth, Hiperlan 2 e IEEE 802.11b), aunque no se descarta la posibilidad de incorporar nuevas arquitecturas posteriormente. El diseño, por tanto, de una entidad que se encargue de actuar de interfaz entre la WAL y el driver de red correspondiente es una tarea indispensable dentro del proyecto WINE.

Esta es precisamente la labor principal del módulo denominado Logical Link Control Translator (LLCT). El módulo para la plataforma IEEE 802.11 fue desarrollado completamente en el marco de este proyecto fin de carrera.

Papel del LLCT en la Arquitectura WINE

El LLCT provee a la WAL de la capacidad de comunicarse con la capa física, y debe encargarse de todas aquellas funciones que de algún modo dependan de la misma. Ya que cada una de las arquitecturas inalámbricas sobre las que se empleará, tienen características diferentes, el diseño del módulo presentará aspectos claramente diferenciados en función de la arquitectura para la que se diseñe. En principio, se pueden destacar tres funciones principales de esta entidad.

- Gestionar la conexión con el interfaz de red, pasándole las tramas que tiene que transmitir y recibiendo las que le llegan a través del enlace radio.
- Realizar las medidas que permitan a la WAL conocer la condición del canal en cada instante.
- Controlar el registro de los terminales a nivel MAC.

A continuación se describirán con mayor detalle las funciones anteriormente mencionadas.

Transmisión y recepción de paquetes

Para no obligar al WAL coordinator a conocer la manera de comunicarse con el driver de red de todas las arquitecturas empleadas dentro del proyecto, se utiliza el LLCT. Una vez que un datagrama IP haya sido procesado por todos los módulos pertenecientes a la cadena de una determinada clase, el WAL coordinator pasa el paquete al LLCT, mediante una llamada genérica, para que sea este último quien finalice con la transmisión del paquete, generando la llamada al driver correspondiente.

Por otra parte, cuando un paquete llega al interfaz de red a través del canal radio, es el LLCT quien lo recoge, para pasárselo posteriormente al WAL coordinator.

Proceso de registro MAC

Se tiene la necesidad de que alguna entidad esté comprobando la presencia de nuevos terminales móviles en el rango de cobertura de un AP, avisando al WAL coordinator cuando se detecta actividad por parte de un MT, para que dispare el proceso de registro a nivel WAL. Evidentemente, este procedimiento depende fuertemente de la arquitectura que se esté utilizando, por lo que es necesario que sea el LLCT quien lo lleve a cabo. En ese sentido, las características de las tres plataformas en las que se implementará la capa WAL (Bluetooth, IEEE 802.11 e Hiperlan2) son muy dispares.

Por otra parte, también es necesario realizar el proceso inverso, y avisar al WAL coordinator de que un MT previamente registrado ha abandonado el área de cobertura de un determinado AP. Así, por ejemplo, si un MT se apaga, o dobla una esquina y pierde contacto con el AP, es necesario que el WAL coordinator sea consciente de esta nueva situación, para que no persista en mandar tráfico dirigido a ese terminal, lo que supondría un gasto de ancho de banda innecesario.

Recogida de estadísticas del canal radio

Para que el comportamiento de la capa WAL se pueda adaptar a las condiciones del canal radio (que son variantes en el tiempo) es necesario obtener ciertas estadísticas que permitan conocer su estado. Evidentemente, este es un procedimiento que depende de la arquitectura subyacente, y de cómo el driver de los dispositivos empleados obtiene estas estadísticas.

Varios son los parámetros que podrían emplearse para caracterizar el estado del canal, como la BER, la tasa de error de paquete, la relación señal a ruido,... La principal restricción a la hora de decantarse por alguno es la capacidad que tienen los dispositivos empleados. Una elección que, a primera vista, parece apropiada, es emplear la SNR; en primer lugar es una información que las tarjetas de red empleadas en el marco del proyecto facilitan y, además, caracteriza de manera sencilla y eficiente el canal. En ese sentido, se ha de recordar que se ha realizado una extensa caracterización del comportamiento de TCP y UDP sobre una plataforma inalámbrica particular, para diferentes posiciones, cada una caracterizada por una relación señal a ruido, por lo que es posible, a partir de un valor de SNR, extrapolar el comportamiento del canal, permitiendo establecer diferentes regiones de funcionamiento.

La funcionalidad del LLCT, en este sentido, es clara. Por una parte debe tomar medidas periódicas de la relación señal a ruido de los canales radio con cada uno de los móviles que estén registrados. Debe ser capaz de proporcionar dicha información al WAL coordinator, que le interrogará mediante la utilización de ciertas funciones predefinidas. Por otro lado, si durante la toma de medidas de un canal determinado, el LLCT detecta que se ha cruzado algún umbral de las zonas de funcionamiento debería avisar al WAL coordinator, a través de un evento, con el fin de que pudiera establecer el correspondiente mecanismo de reasociación. Para evitar la generación de múltiples eventos cuando se esté trabajando en el entorno de alguno de los umbrales, se podría utilizar algún mecanismo de histéresis.

AGENTE SNOOP COMO EJEMPLO DE MODULO EN LA WAL

El protocolo de transporte TCP ha sido diseñado y optimizado para su uso en redes cableadas, con terminales fijos. Su comportamiento en ese tipo de topología es apropiado, ya que es capaz de adaptarse a los retardos que se producen extremo a extremo, y de reaccionar de manera adecuada a la presencia de congestión en la red. Una de las claves de su correcto funcionamiento es la suposición de que las pérdidas de paquetes se corresponden, mayoritariamente, con situaciones de congestión en la red, en las que los enrutadores, al recibir más paquetes de los que pueden manejar, comienzan a desecharlos.

Sin embargo, la presencia de errores en el nivel físico, como ocurre en entornos inalámbricos, degrada en un elevado grado el rendimiento de TCP. TCP reacciona ante las pérdidas de segmentos debidas a las malas condiciones del canal radio de la misma manera que hace cuando son consecuencia de la congestión de elementos intermedios de la red, causando una degradación elevada del rendimiento, ya que se produce un desperdicio de recursos muy elevado.

El agente SNOOP, desarrollado por la Universidad de Berkeley, trata de solventar estas deficiencias, añadiendo una entidad que se ejecuta en el AP, sin tener que modificar las implementaciones de la pila de protocolos que se utilicen en el resto de entidades que participen en la comunicación.

Funcionamiento del Agente SNOOP

En la implementación original del agente SNOOP se contempla únicamente la “modificación” de la pila de protocolos en el AP y en el MT, sin la necesidad de realizar cambios en los terminales fijos, normalmente servidores que se conectan en la red. Sin

embargo, en un primer enfoque, y dentro del proyecto WINE, el agente SNOOP se implementará en el punto de acceso, operando así como módulo asimétrico. Básicamente se encarga de la “detección” de errores en el enlace radio y de la recuperación de los mismos mediante retransmisiones.

Solamente se gestionarán aquellas conexiones que supongan la transmisión de datos del terminal fijo al móvil, ya que la pérdida de segmentos en conexiones donde el flujo de datos va del MT al AP no presenta la misma trascendencia. En ese sentido se tendrán que gestionar dos posibles casos: la recepción de un segmento de datos de la parte alámbrica, y la gestión de los reconocimientos que reciba del terminal móvil.

De manera general, el agente SNOOP guarda los segmentos TCP con datos que vayan del servidor fijo al móvil, y los libera cuando recibe los correspondientes reconocimientos de éste. Para evitar que el transmisor reaccione ante las pérdidas debidas a las malas condiciones del canal radio como reaccionaría ante una congestión, el agente SNOOP realiza retransmisiones locales, que son disparadas, en principio, por dos eventos diferentes: la recepción de un ACK duplicado y la expiración de un temporizador local. Una entidad TCP, por el procedimiento fast retransmit reacciona con la retransmisión de un segmento cuando se reciben tres ACK duplicados; como SNOOP realizará la retransmisión con anterioridad, eliminará los segmentos de reconocimiento que vayan de la parte móvil a la fija y que sean duplicados, para evitar que el transmisor reenvíe de nuevo el segmento perdido.

De lo previamente comentado se desprende que el agente SNOOP realiza una doble labor de procesado de los datos. Por una parte, procesa los segmentos de datos que van del terminal fijo al móvil (procesado de datos) y, por otra, los reconocimientos que este genera (procesado de ACK). Asimismo, gestiona un temporizador por cada una de las conexiones TCP que mantiene, para realizar la retransmisión de segmentos tras su expiración.

CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar, este trabajo fin de carrera se ha sustentado en numerosos aspectos. Es por ello que la dificultad de extraer conclusiones del mismo es elevada. A continuación se resumen aquellos aspectos más relevantes.

- En primer lugar, y teniendo en cuenta el trabajo de investigación que se llevó a cabo para realizar la caracterización del comportamiento de los protocolos UDP y TCP sobre la plataforma inalámbrica IEEE 802.11b, habría que resaltar las siguientes conclusiones.
 - Se ha llevado a cabo una completa caracterización del protocolo IEEE 802.11b, utilizando tráfico UDP.
 - En el caso del canal ideal, los cálculos teóricos resultaron idénticos a los valores medidos.
 - Cuando la presencia de errores en el canal era apreciable, las simulaciones que se llevaron a cabo proporcionaron unos rendimientos muy similares a los obtenidos durante la campaña de medidas.
 - El estudio llevado a cabo constituye un análisis preliminar del comportamiento que aplicaciones con requerimientos de tiempo real pueden tener, en términos de retardo y pérdida, cuando se empleen sobre IEEE 802.11b.

- Asimismo se ha dado un primer paso en un estudio detallado sobre el esquema ARQ implementado por la capa MAC de la infraestructura utilizada.
- En cuanto al comportamiento de TCP hay que destacar el amplio estudio que se llevó a cabo sobre la implementación que este protocolo tiene en el kernel de Linux, para justificar la presencia de periodos de inactividad elevados en las medidas realizadas con un canal defectuoso.
- De toda la labor llevada a cabo en este proceso se puede destacar su naturaleza eminentemente ingenieril, ya que se ha sido capaz de, empleando diversas herramientas y desarrollos propios, llevar a cabo las acciones adecuadas para resolver las dudas que se iban planteando a medida que la profundidad del análisis era mayor.
- No hay que perder de vista que este es un trabajo que surge en el escenario del proyecto WINE, por lo que no está de más que se resalten los aspectos más importantes del mismo, haciendo hincapié en los puntos relacionados, de algún modo, con el contenido de la memoria.
 - El proyecto WINE goza de un prestigio relativamente elevado en un ámbito europeo, como se desprende de los resultados que se obtuvieron en la primera auditoría técnica, realizada a finales de octubre de 2000; en la segunda, realizada en Santander en abril de 2001, en el que se realizó una demostración del módulo LLCT, desarrollado en el marco del presente trabajo; por último, la revisión final, llevada a cabo en diciembre de 2001, concluyó con la felicitación de los representantes de la comisión a todo el consorcio en general y a la Universidad de Cantabria (equipo en el que el autor del presente proyecto tuvo participación activa) en particular.
 - Se ha dado una breve descripción de la funcionalidad de la WAL. En el momento de escribir estas líneas el funcionamiento de la WAL es muy estable y la semilla de su diseño, concretado en la reunión que el Consorcio WINE tuvo en Santander en septiembre de 2000, es una propuesta del equipo en el que colaboraba el autor del presente trabajo.
 - A partir del desarrollo, realizado en el contexto de este trabajo fin de carrera, del LLCT, se ha asegurado el uso de la WAL sobre la plataforma inalámbrica IEEE 802.11. El funcionamiento del citado módulo es un aspecto totalmente corroborado, así como su integración con el resto de la capa WAL.
 - El funcionamiento del módulo SNOOP es un aspecto que también se ha contemplado en el presente trabajo fin de carrera, además de su integración en la WAL, destacando ciertas modificaciones que fueron necesarias en la implementación del WAL Coordinator y que se propusieron a partir de la labor realizada en el proyecto.
- En definitiva, los objetivos iniciales que se plantearon al comienzo del proyecto se han cumplido con creces. Se ha demostrado, por otra parte, una capacidad adecuada para adaptarse a las características de trabajo necesarias en un proyecto de la naturaleza de WINE, en el que intervienen varias entidades, tanto del ámbito empresarial como universitario.

Listado de publicaciones del autor relacionadas con el Proyecto Fin de Carrera

- L. Muñoz, **R. Agüero**, M. García, J. Choque, P. Mähönen, “*Enhancing UDP Performance over the IEEE 802.11b Wireless LAN*”, Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2001, Aalborg (Dinamarca), Septiembre 2001. pp 519-524.
- **R. Agüero**, M. García, L. Muñoz, J. Choque, “*Caracterización del Protocolo UDP sobre Redes de Area Local Inalámbricas IEEE 802.11b*”, III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL 2001, Barcelona, Septiembre 2001. pp 235-241.
- J. Choque, L. Muñoz, M. García, **R. Agüero**, “*Provisión de Servicios IP sobre Infraestructuras Inalámbricas Heterogéneas*”, III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL 2001, Barcelona, Septiembre 2001. pp 301-305.
- M. García, **R. Agüero**, L. Muñoz, P. Mähönen, “*Behavior of UDP-Based Applications over IEEE 802.11 Wireless Networks*”, 12th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication, PIMRC 2001, San Diego (EE UU), Octubre 2001. Vol II, pp 72-77.
- L. Muñoz, M. García, J. Choque, **R. Agüero**, P. Mähönen, “*Optimizing Internet Flows over IEEE 802.11b Wireless Local Area Networks: A Performance Enhancing Proxy Based on Forward Error Correction*”, IEEE Communications Magazine, Vol 39, N° 12, Diciembre 2001. pp 60-67.

Listado de publicaciones de otros autores relacionadas con el Proyecto Fin de Carrera

- P. Mähönen, N. Passas, G. Orphanos, L. Muñoz, A. Marshall, D. Melpignano, T. Inzerilli, F. Lucas, M. Vitiello, M. García, “*Platform-Independent IP Transmission over Wireless Networks: The WINE Approach*”, IEEE Personal Communications Magazine, Vol 8, N° 6, Diciembre 2001. pp 32-40.
- Z. Shelby, T. Saarinen, P. Mähönen, D. Melpignano, A. Marshall, L. Muñoz, “*Wireless IPv6 Networking: WINE*”, IST (Information Society Technologies) Mobile Summit 2000, Galway (Irlanda), Octubre 2000, pp 575-580.
- L. Becchetti, F. Delli Priscoli, T. Inzerilli, P. Mähönen, L. Muñoz, “*Enhancing IP Service Provision over Heterogeneous Wireless Networks: A Path Towards 4G*”, IEEE Communications Magazine, August 2001, Vol. 39, No. 8, pp. 74–81.

Otros méritos asociados al Proyecto Fin de Carrera

Mi participación en el proyecto de investigación WINE, en el que se enmarca este trabajo, ha sido subvencionada: desde octubre de 1999 hasta junio de 2000 gracias a la beca-colaboración concedida por el Ministerio de Educación y Cultura (BOE 077-2000); desde julio de 2000 hasta abril de 2001 con becas concedidas por el departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria, con fondos europeos (proyecto IST 1999-10028 WINE).

Los resultados de WINE (concluido en diciembre de 2001) han sido totalmente satisfactorios, recogiendo las felicitaciones de los auditores encargados de su evaluación, que hicieron especial hincapié en el papel desempeñado por el grupo en el cual participó el autor de este proyecto fin de carrera.

Si el lector desea una mayor información acerca del proyecto WINE, puede visitar su página web: <http://www.vtt.fi/ele/projects/wine/>