

Sobre la justicia en las redes IEEE 802.11e: Desincronización de su mecanismo de acceso al medio

E. Lopez-Aguilera, J. Casademont, y J. Cotrina

Resumen—Se han propuesto diferentes mecanismos para proporcionar calidad de servicio a las redes IEEE 802.11 desde la publicación de su primer estándar. Sin embargo, los estudios basados en la asignación de los tiempos de acceso AIFS según IEEE 802.11e revelan que los diferentes niveles de prioridad trabajan de forma sincronizada.

Los estudios muestran que EDCA estrangula el tráfico de baja prioridad cuando la carga ofrecida al sistema es elevada. Esta situación no es deseable. Los autores de este artículo defienden que el tráfico con requerimientos de QoS tiene que ser priorizado, pero los usuarios que envían tráfico best-effort deben obtener también el servicio esperado. Por otro lado, el tráfico de alta prioridad puede también degradarse a causa de la elevada presencia de tramas de baja prioridad.

Se propone un mecanismo basado en la desincronización de IEEE 802.11e. Éste evita que las estaciones con diferente prioridad puedan transmitir de forma simultánea. De esta manera, el mecanismo establece una prioridad en grupos de colisión independientes y consigue mejor justicia a corto y largo plazo. La propuesta ha sido evaluada mediante resultados analíticos y obtenidos por simulación. Así, el mecanismo previene la estrangulación del tráfico de baja prioridad y reduce la degradación del de alta prioridad cuando la carga en el sistema es elevada.

Palabras clave— Protocolos de acceso, Redes de área local inalámbricas.

I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad, las redes de área local inalámbricas (WLAN) se están desarrollando de forma extensiva en diferentes áreas con el objetivo de proporcionar a los usuarios acceso inalámbrico a Internet. De esta manera, esta tecnología ha experimentado en los últimos años un aumento significativo en el número de usuarios. Cada vez son más los que emplean dispositivos móviles de pequeño tamaño (teléfonos, PDAs, tablet PC, agendas electrónicas, notebooks,...) para realizar transferencias de datos, establecer comunicaciones de voz, consultar páginas web y acceder a diversos servicios de red.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del gobierno español a través del proyecto CICYT TEC2006-04504.

E. Lopez-Aguilera, J. Casademont y J. Cotrina pertenecen al Grupo de Redes Inalámbricas del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 08034 Barcelona, España,

IEEE 802.11, el estándar del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para WLAN, puede considerarse una versión inalámbrica de la Ethernet, y una de sus características es que proporciona un servicio *best-effort* sin ningún tipo de garantías para usuarios y aplicaciones. Por este motivo, cada vez más, las demandas de los usuarios se centran en que este tipo de redes ofrezca también garantías de *calidad de servicio* (QoS).

Hasta el momento, se han propuesto diferentes mecanismos para proporcionar QoS a las WLAN: mecanismos de *diferenciación de servicios*, de *control de admisión* y de *reserva de ancho de banda*.

La diferenciación de servicios es capaz de proporcionar QoS en condiciones de carga de tráfico media. Pero cuando la carga en el sistema aumenta, estos mecanismos ya no funcionan como debieran y se hace necesaria la utilización de métodos de control de admisión y de reserva de ancho de banda. Sin embargo, por otro lado, la aplicación de estos últimos no es tarea sencilla; una estación en la red no es capaz de controlar exactamente lo que pasa en el medio inalámbrico y por lo tanto se hace difícil tanto la realización de una decisión de admisión precisa como la reserva de ancho de banda por parte de las estaciones.

La diferenciación de servicios, el control de admisión y la reserva de ancho de banda son mecanismos concebidos originalmente con el objetivo de proteger el tráfico con importantes requerimientos de QoS de los flujos de baja prioridad (e.g. *best-effort*). Sin embargo, estudios recientes han puesto de manifiesto la estrangulación del tráfico de baja prioridad cuando se utilizan los mecanismos de priorización de IEEE 802.11e y la carga de alta prioridad aumenta en el sistema [1]. A criterio de los autores, este hecho supone un resultado no deseable que debería evitarse. El tráfico con estrictos requerimientos de QoS debe tener prioridad máxima, pero los datos *best-effort* también necesitan obtener alguna porción del ancho de banda disponible, y así los usuarios que lo deseen podrán también disfrutar del servicio solicitado.

El objetivo en este trabajo consiste en presentar un mecanismo capaz de diferenciar tráfico y también de respetar la transmisión de las tramas de baja prioridad. Además, la propuesta intenta resolver otro problema encontrado en IEEE 802.11e: la degradación del tráfico de alta prioridad que

aparece cuando el número de tramas de baja prioridad aumenta.

La propuesta se basa en un aspecto concreto de la especificación IEEE 802.11e: asignar diferentes tiempos de acceso de espacio entre tramas *Inter-frame Space* (IFS) a los diferentes niveles de prioridad. IEEE 802.11e utiliza intervalos *IFS* separados entre sí por múltiplos del tiempo de una ranura (*slot*) vacía. Escogemos tiempos de acceso que no cumplen esta propiedad, y de esta manera se desincroniza el mecanismo de acceso al medio propuesto por IEEE 802.11e. Las tramas de diferente prioridad no colisionan entre ellas, y se obtiene un esquema para establecer prioridades del tráfico por *grupos de colisión* independientes. Como consecuencias del empleo de este mecanismo se obtiene la reducción en la probabilidad de colisión de las tramas y el aumento de la justicia en el acceso al medio, tanto a corto como a largo término. Con el método propuesto, se resuelve el problema de la estrangulación, se disminuye el tiempo malgastado debido a la resolución de colisiones entre tramas y en consecuencia se aumenta la transferencia efectiva (*throughput*) global del sistema.

El artículo se distribuye de la forma siguiente. La Sección 2 presenta el problema de la estrangulación en el acceso al medio de IEEE 802.11e y revisa los trabajos relacionados. La Sección 3 proporciona una breve descripción del mecanismo de acceso distribuido IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (DCF). La Sección 4 presenta los aspectos relacionados con la especificación IEEE 802.11e. La propuesta de diferenciación y su análisis matemático se presentan en la Sección 5. La Sección 6 describe el entorno de simulación. La Sección 7 presenta los resultados obtenidos a través del modelo matemático y de la simulación. Finalmente, el artículo concluye con la Sección 8, donde se expone un resumen de los puntos más destacados del trabajo.

II. EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA Y TRABAJOS RELACIONADOS

Han sido muchos los trabajos de investigación publicados con respecto a la *diferenciación de servicios* en redes IEEE 802.11. A continuación se presentan varios de los mecanismos encontrados en la literatura.

I. Aad *et al.* en [2] presentan un mecanismo basado en la asignación de varios intervalos *IFS* para los diferentes niveles de prioridad. Esta misma referencia [2], M. Barry *et al.* en [3] y A. Banchs *et al.* en [4] exponen métodos basados en la modificación de la función de backoff. D.-J. Deng *et al.* en [5] proponen un mecanismo que combina la asignación de intervalos *IFS* y la modificación de la función de backoff. A. Banchs *et al.* en [6] aplican un algoritmo *Distributed Weighted Fair Queuing* (DWFQ) para ajustar los valores de la ventana de backoff. N.H. Vaidya *et al.* en [7] proponen un mecanismo *Distributed Fair Scheduling* (DFS) para seleccionar el intervalo de backoff.

La diferenciación de servicios propuesta en las anteriores referencias consigue establecer prioridad del tráfico con requerimientos de *QoS* en condiciones de carga de tráfico media. Sin embargo, las garantías de *QoS* no se pueden

mantener cuando el tráfico en la red aumenta [1]. Por este motivo se hacen necesarios mecanismos de control de admisión y de reserva de ancho de banda.

Respecto a los mecanismos de *control de admisión*, éstos pueden clasificarse de dos maneras: *basados en medidas* y *basados en cálculos*. Los primeros toman decisiones basados en medidas obtenidas mediante la observación del estado de la red (e.g. el *throughput* y el retardo) [3], [8]-[12]. Los últimos, sin embargo, crean ciertas métricas para evaluar el estado de la red [13], [14].

En lo referente a los métodos de *reserva de ancho de banda*, en la literatura se registran varias propuestas [4], [15], [16].

Por otro lado, la especificación IEEE 802.11e define mecanismos para establecer prioridad de tráfico mediante su clasificación en clases de servicio. El MAC (*Medium Access Control*) de IEEE 802.11e recibe el nombre de *Hybrid Coordination Function* (HCF). Éste combina un método distribuido de contienda, *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA), con un mecanismo coordinado, *HCF Controlled Channel Access* (HCCA). IEEE 802.11e EDCA maneja varios niveles de prioridad, y cada uno de ellos utiliza diferentes intervalos *IFS* (*Arbitration Inter-frame Space* o *AIFS*) y valores mínimos y máximos de la ventana de backoff. La especificación también incluye un mecanismo de control de admisión y de planificación (*scheduling*).

Sin embargo, esta especificación presenta también algunos inconvenientes. EDCA proporciona una prioridad estadística y no determinista, y por consiguiente las garantías para el tráfico de alta prioridad sólo se mantendrán a largo plazo y no en cada transmisión. Una consecuencia directa de este comportamiento es que los requerimientos de retardo difícilmente se podrán satisfacer, ya que su variación (*jitter*) será elevada.

Por otro lado, el tráfico de alta prioridad puede degradarse por diversos motivos: en primer lugar, a causa de la presencia de elevadas cantidades de tramas menos prioritarias [17], y, en segundo lugar, también debido al aumento de otras tramas de alta prioridad¹ [18].

Además, trabajando con IEEE 802.11e EDCA y cuando las condiciones de carga de alta prioridad son elevadas en el sistema, el tráfico de baja prioridad puede verse estrangulado fácilmente. Cada nivel de prioridad utiliza un *AIFS* y valores mínimos y máximos de la ventana de contención diferentes. Los intervalos *AIFS* se encuentran separados entre sí por valores que son múltiplos del tiempo de una ranura (*slot*) vacía. Por otro lado, el temporizador de backoff también está ranurado – éste se escoge como un número entero de ranuras vacías. De esta manera, cuando el tráfico ofrecido a la red es elevado, los diferentes niveles de prioridad trabajan de forma *sincronizada*, i.e. pueden intentar transmitir tramas de forma simultánea. La sincronización es la causa de las colisiones

¹ Los valores de la ventana de contención para prioridades altas son pequeños, por este motivo si el número de usuarios que pertenecen a este nivel de prioridad aumenta, las colisiones también crecen y el *throughput* disminuye.

entre tramas que pertenecen a diferentes niveles de prioridad. Bajo estas condiciones, se puede dar el siguiente caso: la transmisión de una trama de alta prioridad que ha estado esperando un tiempo backoff para poder transmitirse colisiona con una trama de baja prioridad que ha sido enviada directamente después de esperar el *AIFS* correspondiente. Tras la colisión, las tramas volverán a iniciar el proceso de contienda, y cabe la posibilidad de que la trama más prioritaria gane el medio respecto a la de prioridad menor. De esta manera, si el número de tramas de alta prioridad aumenta y el de baja prioridad se mantiene, el funcionamiento de IEEE 802.11e EDCA puede conducir a la estrangulación de las tramas de baja prioridad.

En este artículo se presenta una propuesta de diferenciación que consiste en la *desincronización* del mecanismo de acceso de IEEE 802.11e EDCA. Se trata de evitar que tramas de diferente prioridad puedan acceder al medio de forma simultánea y, por lo tanto, colisionar entre ellas. De esta manera se consigue aumentar la justicia en el acceso al medio, se soluciona el problema de la estrangulación del tráfico de baja prioridad y la degradación de la transmisión de las tramas más prioritarias cuando la carga en el sistema es elevada. La propuesta de los autores de este artículo consigue cumplir estos objetivos manteniendo un mecanismo de acceso al medio por contienda, sin necesidad de realizar un control de admisión o reserva de ancho de banda.

III. PROTOCOLO DE ACCESO AL MEDIO DE IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 presenta dos modos de operación: *Distributed Coordination Function* (DCF) y *Point Coordination Function* (PCF).

El modo más común es DCF, cuyo esquema de funcionamiento está basado en el protocolo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). En este caso, cuando una estación tiene una trama lista para ser enviada, únicamente puede transmitir si el canal se encuentra libre durante un periodo de tiempo llamado *Distributed Inter-frame Space* (DIFS). En caso contrario, la estación continúa escuchando el canal hasta que lo encuentre libre durante *DIFS*, y a continuación se espera un intervalo aleatorio de backoff antes de iniciar la transmisión. La inclusión de dicho tiempo de backoff es un mecanismo muy útil para minimizar la probabilidad de colisión entre transmisiones procedentes de diferentes estaciones. También es importante destacar, que este tiempo de backoff además se utiliza para evitar que una única estación acapare el medio, perjudicando a las demás. De esta manera una estación deberá esperar un intervalo aleatorio de backoff, además de un *DIFS*, entre dos transmisiones de tramas consecutivas.

El tiempo de backoff responde a un comportamiento exponencial. Su valor se escoge de forma aleatoria como un número entero de ranuras vacías en el intervalo $[0, CW-1]$. CW recibe el nombre de ventana de contención y su valor depende del número de intentos de transmisión fallidos. De esta manera, la primera vez que falla la transmisión de una trama, la ventana de contención toma su valor mínimo CW_{min} ,

y por cada nueva transmisión fallida CW dobla su valor anterior, hasta llegar a un límite predeterminado $CW_{max}=2^m CW_{min}$. Los valores CW_{min} y CW_{max} están estandarizados y su valor depende de la capa física utilizada.

El tiempo de backoff se decreta mientras el medio se encuentra libre. En el momento en que el canal pasa de nuevo a estar ocupado por la transmisión de una trama procedente de otra estación, dicho decremento se paraliza, reanudándose de nuevo cuando el medio vuelve a estar libre.

IV. MECANISMO DE ACCESO IEEE 802.11E EDCA

IEEE 802.11 EDCA modifica el mecanismo DCF utilizado en IEEE 802.11 con la intención de proporcionar garantías de *QoS* en las transmisiones de tramas. EDCA permite manejar 8 prioridades de tráfico diferentes (definidas en capas superiores), que se relacionan con 4 categorías de acceso (ACs), donde cada una de ellas representa un nivel de prioridad diferente. Cada AC accede al medio siguiendo las reglas establecidas por DCF y utiliza $AIFS[AC]$, $CW_{min}[AC]$ y $CW_{max}[AC]$ en lugar de *DIFS*, CW_{min} y CW_{max} . $AIFS[AC]$ se asigna siguiendo la siguiente expresión:

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \cdot \sigma, \quad (1)$$

donde σ corresponde al valor del tiempo de ranura vacía y $AIFSN[AC]$ es un número entero mayor que cero.

Fig. 1 presenta el MAC de IEEE 802.11e EDCA. Cada AC pertenece a una cola independiente en la capa MAC y se comporta como una entidad independiente de contienda. Cuando dos o más AC en la misma estación expiran su contador de backoff de forma simultánea, ocurre una colisión virtual. Entonces, la trama más prioritaria es la que se transmite. Además, el ganador de la contienda puede transmitir tramas durante un periodo de tiempo determinado, conocido como *oportunidad de transmisión* (TXOP).

V. PROPUESTA DE DESINCRONIZACIÓN Y ANÁLISIS MATEMÁTICO

Uno de los mecanismos para diferenciar tráfico consiste en asignar *AIFS* a los diferentes niveles de prioridad. Pero estos intervalos *AIFS* se encuentran separados entre sí mediante valores que son múltiplos del tiempo de ranura vacía (cf. Eq. (1)). El contador de backoff está ranurado, así que el MAC de IEEE 802.11e EDCA actúa de forma *sincronizada* cuando la carga en el sistema es elevada, provocando colisiones entre tramas que pertenecen a diferentes niveles de prioridad. Los autores proponen un método para *desincronizar* el MAC de IEEE 802.11e, y de esta manera evitar las colisiones entre tramas de diferente prioridad; se establece una prioridad de *grupos de colisión* independientes, y de esta manera se aumenta la justicia en el acceso al medio y se resuelve el problema de la estrangulación de tráfico.

En primer lugar proporcionamos una evaluación analítica de la propuesta considerando condiciones de tráfico de saturación. El throughput de saturación consiste en un parámetro fundamental que se define como el límite alcanzado por el throughput del sistema cuando la carga ofrecida

aumenta. Así, este parámetro representa la máxima capacidad que puede soportar el sistema en condiciones estables. El problema de la estrangulación aparece para una carga de tráfico elevada, así que resulta razonable realizar nuestro análisis en condiciones de saturación.

Se parte del modelo publicado por G. Bianchi en [19], que presenta una evaluación precisa sobre el throughput de saturación en redes IEEE 802.11 DCF. G. Bianchi concluye con la siguiente expresión para el throughput de saturación normalizado S :

$$S = \frac{P_{tr} P_s E_p}{r E_s}, \quad (2)$$

donde E_s es la duración media de una ranura, r es la tasa de transmisión de datos, E_p es la longitud de datos de la trama, P_{tr} representa la probabilidad de que al menos una estación transmita y P_s es la probabilidad de que una transmisión concluya con éxito.

Para realizar nuestro análisis, se consideran n estaciones² y se distribuyen en g grupos; cada uno de ellos corresponde a un nivel de prioridad diferente.

Cada grupo de prioridad *grupo* i está formado por n_i estaciones y utiliza un tiempo de acceso $AIFS_i$. Consideramos que todos los grupos de prioridad utilizan los mismos valores para la ventana de contención³.

Los nuevos tiempos de acceso $AIFS_i$ responden a la siguiente expresión, donde σ representa la duración de un tiempo de ranura vacía:

$$AIFS_i = AIFS_{inicial} + i \frac{\sigma}{g}, \quad i \in (0, g-1) \quad (3)$$

$AIFS_{inicial}$ toma el menor valor de $AIFS$ disponible en la especificación de IEEE 802.11e, i.e. $SIFS + \sigma$.

De esta manera, se crean g grupos de colisión independientes, que intentarán transmitir en instantes de tiempo separados por σ/g . Así, la desincronización será efectiva siempre que el retardo de propagación entre estaciones sea inferior a σ/g . Se puede observar que esta condición se cumple en los escenarios de WLAN más comunes, e.g. utilizando cuatro grupos de prioridad diferentes, $g=4$, y PHY IEEE 802.11g con la ranura corta ($\sigma=9 \mu s$), se obtiene un retardo de propagación máximo σ/g correspondiente a 0,675 km de cobertura⁴, valor que se encuentra por encima de los radios de cobertura utilizados en las configuraciones de WLAN habituales.

La propuesta de desincronización consigue crear grupos de prioridad que no colisionan entre ellos, por lo tanto, se puede modelar el comportamiento de cada uno de ellos de forma

² Dentro de estas n estaciones se puede incluir tanto el punto de acceso (AP), en el caso de trabajar con una red con infraestructura, como las estaciones de usuario.

³ Se pretende evaluar la propuesta de desincronización manteniendo al margen la influencia de otros factores de prioridad, como son la asignación de diferentes valores para la ventana de contención.

⁴ Se considera un número máximo de niveles de prioridad igual a 4 en concordancia que la especificación IEEE 802.11e, la cual presenta 4 categorías de acceso por defecto.

independiente utilizando el modelo de G. Bianchi [19]. Así, siguiendo esta referencia, se puede obtener los valores para τ_i y p_i : la probabilidad de que una estación que pertenece al *grupo* i transmita o colisione, respectivamente. La relación entre τ_i y p_i es la siguiente [19]:

$$p_i = 1 - (1 - \tau_i)^{n_i - 1}. \quad (4)$$

El modelo de G. Bianchi considera las diferentes situaciones que se pueden encontrar en una ranura E_s . Distinguimos $2g+1$ tipos diferentes: la transmisión con éxito o con colisión para cada grupo de prioridad (un total de $2g$ tipos), y que el medio se encuentre desocupado y por lo tanto transcurra una ranura vacía. Las estaciones que pertenecen al *grupo* 0 son las que disfrutan de la prioridad más elevada, mientras que las estaciones del *grupo* $g-1$ son las de más baja prioridad. Si analizamos el mecanismo de diferenciación, una estación del *grupo* i transmitirá (después de esperar las ranuras de backoff correspondientes) siempre que ninguna estación de los grupos más prioritarios (*grupo* 0 hasta *grupo* $i-1$) esté intentando transmitir; así, las estaciones del *grupo* i sólo podrán transmitir cuando las de los *grupos* 0 hasta $i-1$ se encuentren en estado de backoff. A continuación se analizan las diferentes situaciones que se pueden dar en una ranura genérica E_s .

Si la transmisión de una estación del *grupo* 0 concluye con éxito, ésta tiene una duración $T_{s0}=T_s$, donde T_s corresponde al tiempo durante el que el canal se encuentra ocupado por una transmisión exitosa presentado por G. Bianchi [19]. Esta situación ocurre con probabilidad P_{s0} :

$$P_{s0} = n_0 \tau_0 (1 - \tau_0)^{n_0 - 1}. \quad (5)$$

La transmisión con éxito de una estación del *grupo* i , $i \in (1, g-1)$, tiene una duración $T_{si}=T_s+i\sigma/g$ y ocurre con probabilidad P_{si} :

$$P_{si} = n_i \tau_i (1 - \tau_i)^{n_i - 1} \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \tau_j)^{n_j}. \quad (6)$$

Si la transmisión de una estación del *grupo* 0 colisiona, ésta tiene una duración $T_{c0}=T_c$, donde T_c corresponde al tiempo durante el cual el canal se encuentra ocupado debido a una colisión presentado por G. Bianchi [19]. Dicha colisión ocurre con probabilidad P_{c0} :

$$P_{c0} = \left(1 - (1 - \tau_0)^{n_0} - n_0 \tau_0 (1 - \tau_0)^{n_0 - 1} \right) \quad (7)$$

La colisión en la transmisión de una estación que pertenece al *grupo* i , $i \in (1, g-1)$, tiene una duración $T_{ci}=T_c+i\sigma/g$, y ocurre con probabilidad P_{ci} :

$$P_{ci} = \left(1 - (1 - \tau_i)^{n_i} - n_i \tau_i (1 - \tau_i)^{n_i - 1} \right) \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \tau_j)^{n_j}. \quad (8)$$

Por otro lado, si el medio se encuentra desocupado, transcurre un tiempo de ranura vacía de duración σ con probabilidad P_σ :

$$P_\sigma = \prod_{i=0}^{g-1} (1 - \tau_i)^{n_i}. \quad (9)$$

Así, la duración media de un tiempo de ranura genérica cumple la siguiente relación:

$$E_s = P_\sigma \sigma + \sum_{i=0}^{g-1} (P_{si} T_{si} + P_{ci} T_{ci}). \quad (10)$$

El throughput normalizado del sistema S es:

$$S = \frac{E_p \sum_{i=0}^{g-1} P_{si}}{rE_s} \quad (11)$$

y el correspondiente a cada *grupo* i por separado S_i :

$$S_i = \frac{E_p P_{si}}{rE_s}. \quad (12)$$

Finalmente también presentamos una expresión para el retardo de transmisión, que se define como el intervalo de tiempo entre dos transmisiones consecutivas con éxito (incluyendo el tiempo invertido en la resolución de colisiones) llevadas a cabo por una estación en concreto, dentro de un sistema con n nodos activos. La expresión correspondiente al retardo de transmisión para cada *grupo* i es T_{ii} :

$$T_{ii} = n_i \frac{E_s}{P_{si}}. \quad (13)$$

VI. ENTORNO DE SIMULACIÓN

Con el fin de validar el análisis matemático expuesto en la sección anterior, se utiliza un software de simulación implementado en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). El programa de simulación está escrito en lenguaje C++ y sigue los detalles especificados en el estándar IEEE 802.11, emulando de la forma más exacta posible el funcionamiento real de todas las estaciones. La herramienta permite la evaluación de diversos parámetros, como son el throughput, el retardo de transmisión y la probabilidad de colisión entre estaciones. Además, el correcto funcionamiento de la herramienta de simulación utilizada ha sido verificado comparando los resultados obtenidos con la información publicada en [19], bajo idénticas condiciones de simulación. Finalmente, el simulador ha sido ya utilizado en otros trabajos publicados en la literatura [20].

Se ha estudiado el comportamiento de un sistema compuesto por n estaciones distribuidas en g grupos de prioridad. Cada uno ellos utiliza un tiempo de acceso *AIFS*, diferente según Eq. (3). Para obtener los resultados numéricos hemos considerado las capas PHY y MAC de IEEE 802.11g, que las estaciones transmiten tramas de datos de tamaño constante y que el tiempo entre llegadas consecutivas sigue una distribución exponencial. Todas las estaciones trabajan en condiciones de saturación, se encuentran dentro del área de cobertura, y no experimentan errores de transmisión ni situaciones de terminal oculto.

VII. EVALUACIÓN

En esta sección se presenta la evaluación de la propuesta de desincronización en un escenario compuesto por 12 estaciones, que han sido distribuidas de forma equitativa entre 2 niveles de prioridad, i.e. cada grupo de prioridad consta de 6 estaciones. Además, comparamos su comportamiento con el obtenido cuando no se utiliza prioridad alguna (IEEE 802.11 DCF), y con los resultados obtenidos aplicando el criterio de prioridad mediante *AIFS* de IEEE 802.11e.

Fig. 2-4 presentan el throughput por estación del grupo más prioritario (*grupo 0*), del menos prioritario (*grupo 1*), y el throughput total, respectivamente. Se utilizan tasas de transmisión de datos de 6 y 54 Mbps. Todas las figuras presentan resultados analíticos (líneas) y de simulación (símbolos) para nuestra propuesta. En el caso del IEEE 802.11 DCF original y del IEEE 802.11e las figuras sólo incluyen resultados de simulación.

En Fig. 2 se muestra que la propuesta de desincronización consigue aumentar el throughput de las estaciones más prioritarias en comparación con el caso sin prioridad de forma considerable. Sin embargo, el throughput obtenido es inferior al que se consigue empleando los *AIFS* de IEEE 802.11e. Así, se puede observar una disminución del 13,15% para una tasa de transmisión de 6 Mbps y del 11,27% para 54 Mbps.

Fig. 3 confirma que las estaciones menos prioritarias obtienen mejores resultados si se utiliza la propuesta de desincronización: las estaciones sufren únicamente un ligero decremento de throughput respecto al IEEE 802.11 DCF original. Este decremento es de 11,61% para una tasa de transmisión de 6 Mbps y de 7,80% para 54 Mbps. Sin embargo, empleando IEEE 802.11e esta diferencia es de 44,60% para 6 Mbps y de 43,28% para 54 Mbps. Con la desincronización del MAC se logra disminuir el problema de la estrangulación del tráfico de baja prioridad que aparece en IEEE 802.11e, a cambio de reducir el nivel de diferenciación de las estaciones del *grupo 0* (cf. Fig. 2), aunque éste sigue siendo igualmente elevado.

Fig. 4 presenta el throughput total del sistema. Gracias a la desincronización del MAC, las transmisiones de estaciones que pertenecen a diferentes grupos de prioridad no colisionan, y, por lo tanto, la probabilidad de colisión de las transmisiones disminuye considerablemente (cf. Eq. (4) y Fig. 5 y 6). Así, el tiempo invertido en resolver colisiones disminuye y, en consecuencia, se incrementa el throughput global.

A continuación evaluamos la justicia en el acceso al canal mediante el Jain Fairness Index [21]. En Fig. 7 se muestra que nuestra propuesta consigue mejor justicia (a corto y a largo término) que la obtenida con IEEE 802.11e e incluso con IEEE 802.11 DCF. Esto supone una propiedad muy deseable para un mecanismo de acceso. Concretamente, si la justicia a corto plazo aumenta, la variación del retardo disminuirá, y dicha variación consiste en un parámetro importante para proporcionar garantías de QoS .

Fig. 8 presenta el throughput agregado por grupo de prioridad en un nuevo escenario: se aumenta el número de estaciones del grupo menos prioritario (*grupo 1*) y se

conservan 6 estaciones en el grupo 0. Considerando este nuevo escenario, la propuesta consigue diferenciar el throughput entre grupos, aunque el nivel de diferenciación es más pequeño que el obtenido por IEEE 802.11e. Por otro lado, si nos fijamos en el throughput individual por estación (cf. Tabla I), observamos que el empleo de AIFS de IEEE 802.11e conduce a una mayor degradación en el throughput de las estaciones más prioritarias: éstas experimentan un decremento del 20,01% para 6 Mbps y de 18,18% para 54 Mbps cuando el número de estaciones de baja prioridad aumenta de 6 a 14. Sin embargo, nuestra propuesta obtiene una degradación de 13,44% para 6 Mbps y de 12,54% para 54 Mbps. Así, la desincronización también consigue reducir la estrangulación del tráfico de alta prioridad, situación que aparece cuando el número de tramas menos prioritarias aumenta.

La propuesta ha sido evaluada en gran cantidad de escenarios. Se ha variado el número de usuarios n y el número de grupos de prioridad g , obteniendo resultados análogos a los comentados en párrafos anteriores.

Para finalizar, únicamente comentar los problemas de implementación que puede presentar la propuesta. Ésta deberá contemplar las limitaciones causadas por el algoritmo *Clear Channel Assessment* (CCA). Éste es el encargado de determinar si el canal se encuentra libre u ocupado. Por este motivo, la diferencia entre tiempos AIFS, deberá ser al menos igual a un intervalo CCA. Si este requerimiento no se cumple, la probabilidad de colisión entre tramas, utilizando el hardware actual, se incrementará, y, por lo tanto, los resultados de la propuesta se verán limitados.

VIII. CONCLUSIONES

Según se ha expuesto en este trabajo, son muchas las propuestas publicadas en la literatura que persiguen proporcionar *QoS* a las WLAN. Uno de los mecanismos utilizados por la especificación IEEE 802.11e es la asignación de tiempos AIFS para la diferenciación entre niveles de prioridad. Sin embargo, se ha demostrado que dicha asignación conduce hacia un MAC que trabaja de forma sincronizada, provocando así la estrangulación del tráfico de baja prioridad. Los autores defienden que el tráfico con requerimientos de *QoS* debe priorizarse, pero sin llegar a una situación de estrangulación del de más baja prioridad. Así, los usuarios con tráfico sin *QoS* también podrán disfrutar de una cierta porción del ancho de banda disponible. Por otro lado, con EDCA el tráfico de alta prioridad también puede degradarse a causa del aumento en el número de tramas de baja prioridad.

En este artículo se ha presentado un método basado en la desincronización del MAC de IEEE 802.11e, y se ha evaluado a través de resultados analíticos y de simulación. Nuestro mecanismo consigue mitigar los problemas anteriores, manteniendo un mecanismo de acceso al medio distribuido, y sin necesidad de realizar un control de admisión o reserva de ancho de banda.

IX. REFERENCIAS

- [1] A. Lindgren, A. Almquist, O. Schelen, "Evaluation of quality of service schemes for IEEE 802.11 wireless LANs," in *Proc. IEEE LCN 2001*, pp 348-351, November 2001.
- [2] I. Aad and C. Castelluccia, "Differentiation mechanisms for IEEE 802.11," in *Proc. IEEE INFOCOM 2001*, vol. 1, pp. 209-218, April 2001.
- [3] M. Barry, A.T. Campbell, A. Veres, "Distributed control algorithms for service differentiation in wireless packet networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2001*, vol. 1, pp. 582-590, April 2001.
- [4] A. Banchs, X. Perez, "Providing throughput guarantees in IEEE 802.11 wireless LAN," in *Proc. IEEE WCNC 2002*, vol. 1, pp. 130-138, March 2002.
- [5] D.-J. Deng, R.-S. Chang, "A priority scheme for IEEE 802.11 DCF access method," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E82-B, no. 1, pp. 96-102, January 1999.
- [6] A. Banchs, X. Perez, "Distributed weighted fair queuing in 802.11 wireless LAN," in *Proc. IEEE ICC 2002*, vol.5, pp. 3121-3127, April-May 2002.
- [7] N.H. Vaidya, P. Bahl, S. Gupta, "Distributed fair scheduling in a wireless LAN," in *Proc. ACM MOBICOM 2000*, pp. 167-178, August 2000.
- [8] A. Veres, A.T. Campbell, M. Barry, L.-H. Sun, "Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 10, pp. 2081-2093, October 2001.
- [9] S. Valaee, B. Li, "Distributed call admission control for ad hoc networks," in *Proc. IEEE VTC-Fall 2002*, vol. 2, pp. 1244-1248, September 2002.
- [10] S.H. Shah, K. Chen, K. Nahrstedt, "Dynamic bandwidth management for single-hop ad hoc wireless networks," in *Proc. IEEE PerCom 2003*, pp. 195-203, March 2003.
- [11] Y. Xiao, H. Li, "Evaluation of distributed admission control for the IEEE 802.11e EDCA," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. S20-S24, September 2004.
- [12] L. Zhang, S. Zeadally, "HARMONICA: Enhanced QoS Support with Admission Control for IEEE 802.11 Contention-based Access," in *Proc. IEEE RTAS 2004*, pp. 64-71, May 2004.
- [13] M. Kazantzidis, M. Gerla, S.-J. Lee, "Permissible Throughput Network Feedback for Adaptive Multimedia in AODV MANETs," in *Proc. IEEE ICC 2001*, vol. 5, pp. 1352-1356, June 2001.
- [14] D. Pong, T. Moors, "Call admission control for IEEE 802.11 contention access mechanism," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2003*, vol. 1, pp. 174-178, December 2003.
- [15] M. Li, B. Prabhakaran, S. Sathyamurthy, "On flow reservation and admission control for distributed scheduling strategies in IEEE 802.11 wireless LAN," in *Proc. ACM MSWiM 2003*, pp. 108-115, September 2003.
- [16] K. Liu, T. Wong, J. Li, L. Bu, J. Han, "A reservation-based multiple access protocol with collision avoidance for wireless multihop ad hoc networks," in *Proc. IEEE ICC 2003*, vol. 2, pp. 1119-1123, May 2003.
- [17] J.W. Robinson, T.S. Randhawa, "Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 917-928, June 2004.
- [18] G. Bianchi, I. Tinnirello, L. Scalia, "Understanding 802.11e contention-based prioritization mechanisms and their coexistence with legacy 802.11 stations," *IEEE Network*, vol. 19, no. 4, pp. 28-34, July/August 2005.
- [19] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000.
- [20] E. Lopez-Aguilera, M. Heusse, F. Rousseau, A. Duda, J. Casademont, "Performance of wireless LAN access methods in multicell environments," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2006*, November-December 2006.
- [21] R. Jain, D. Chiu, W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," *DEC Research Report TR-301*, September 1984.

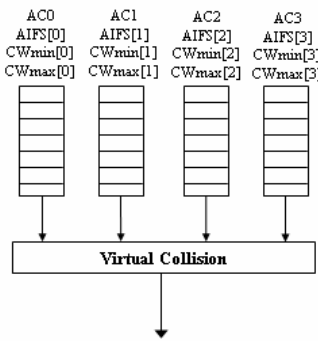


Fig. 1. IEEE 802.11e EDCA MAC

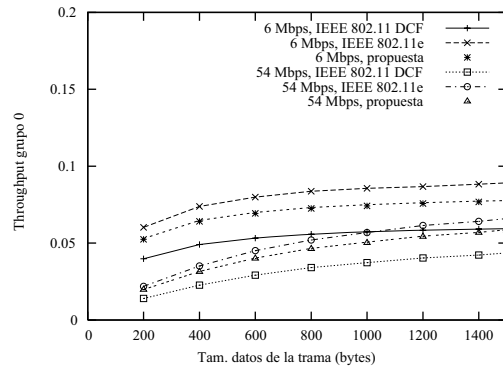


Fig. 2. Throughput por estación (*grupo 0*) vs. tamaño de datos de la trama

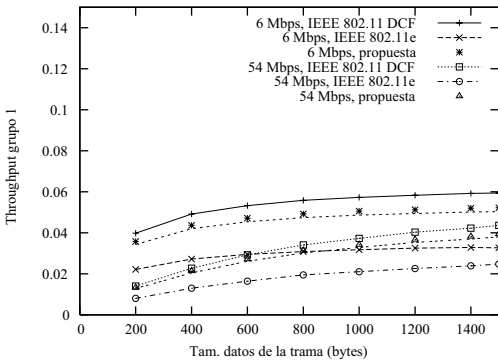


Fig. 3. Throughput por estación (*grupo 1*) vs. tamaño de datos de la trama

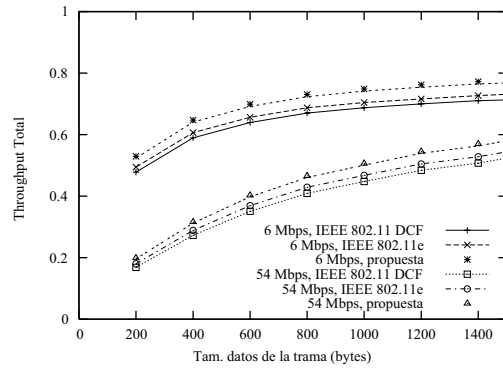


Fig. 4. Throughput total vs. tamaño de datos de la trama

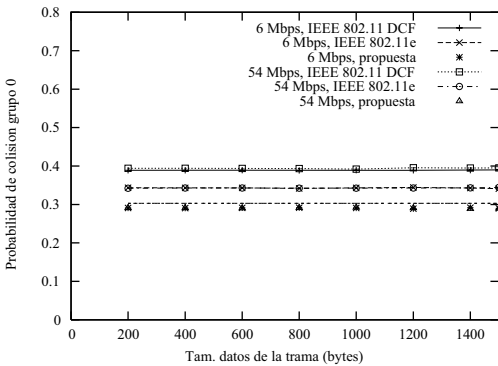


Fig. 5. Probabilidad de colisión por estación (*grupo 0*) vs. tamaño de datos de la trama

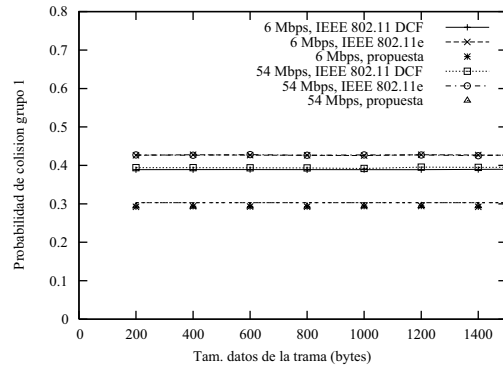


Fig. 6. Probabilidad de colisión por estación (*grupo 1*) vs. tamaño de datos de la trama

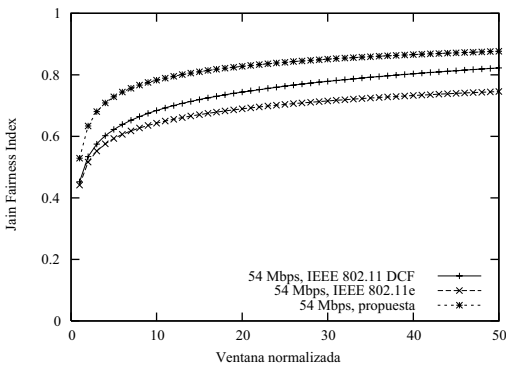


Fig. 7. Justicia en el acceso al canal

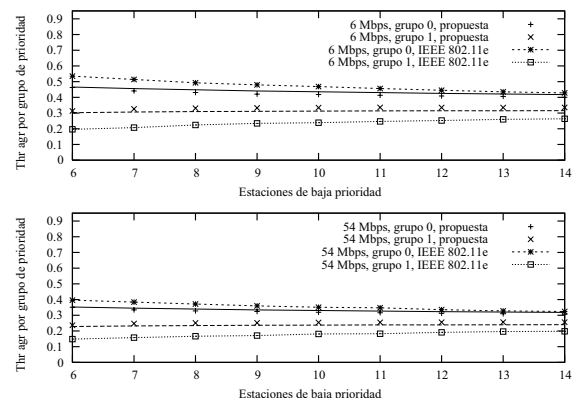


Fig. 8. Throughput agregado por grupo vs. número de estaciones menos prioritarias (*grupo 1*), tamaño de datos de la trama de 1500 bytes

TABLA I
THROUGHPUT POR ESTACIÓN VS. NÚMERO DE ESTACIONES MENOS
PRIORITARIAS (*GRUPO I*), TAMAÑO DE DATOS DE LA TRAMA 1500 BYTES

6 Mbps				
Estaciones <i>grupo I</i>	IEEE 802.11e		Propuesta	
	<i>grupo 0</i>	<i>grupo 1</i>	<i>grupo 0</i>	<i>grupo 1</i>
6	0,0892	0,0327	0,0776	0,0503
7	0,0856	0,0296	0,0759	0,0438
8	0,0820	0,0280	0,0746	0,0386
9	0,0799	0,0260	0,0734	0,0346
10	0,0781	0,0239	0,0724	0,0313
11	0,0760	0,0224	0,0716	0,0285
12	0,0742	0,0210	0,0708	0,0262
13	0,0724	0,0200	0,0702	0,0242
14	0,0713	0,0188	0,0696	0,0225
54 Mbps				
Estaciones <i>grupo I</i>	IEEE 802.11e		Propuesta	
	<i>grupo 0</i>	<i>grupo 1</i>	<i>grupo 0</i>	<i>grupo 1</i>
6	0,0660	0,0247	0,0587	0,0381
7	0,0639	0,0225	0,0575	0,0331
8	0,0619	0,0208	0,0565	0,0293
9	0,0600	0,0190	0,0557	0,0262
10	0,0586	0,0181	0,0550	0,0237
11	0,0579	0,0166	0,0544	0,0217
12	0,0559	0,0160	0,0539	0,0199
13	0,0546	0,0151	0,0534	0,0184
14	0,0540	0,0141	0,0530	0,0171

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del gobierno español a través del proyecto CICYT TEC2006-04504.

BIOGRAFÍAS



Elena López Aguilera recibió el título de Ingeniera de Telecomunicación en 2001 por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España.

En 2002 fue contratada como profesora a tiempo completo por el Departamento de Ingeniería Telemática de dicha universidad y desde 2005 trabaja como profesor colaborador. Actualmente forma parte del Grupo de Investigación de Redes Inalámbricas dentro del Departamento de Ingeniería Telemática. Su área de investigación se centra en los protocolos de acceso al medio de las redes de área local inalámbricas.



Jordi Casademont recibió el título de Ingeniero de Telecomunicación en 1992 y el de Doctor en Ingeniería de Telecomunicación en 1998, ambos por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España.

En 1993 fue contratado por el Departamento de Ingeniería Telemática de dicha universidad como profesor asociado y en 1998 obtuvo una plaza de profesor Titular de Universidad. Actualmente forma parte del Grupo de Investigación de Redes Inalámbricas enfocando su investigación hacia los protocolos de la capa de enlace de las redes de área local inalámbricas y la problemática de las redes malladas.

Desde el año 2003 hasta el 2006 ejerció el cargo de Director de Departamento y anteriormente, desde 2000 hasta 2003, el de Jefe de Estudios, ambos del Departamento de Ingeniería Telemática.



Josep Cotrina. Licenciado en Informática por la Universitat Autònoma de Barcelona, y Doctor en Software por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España.

Trabaja como profesor colaborador en el Departamento de Ingeniería Telemática de dicha universidad desde 2001. Actualmente forma parte del Grupo de Investigación de Redes Inalámbricas dentro del Departamento de Ingeniería Telemática. Sus principales intereses son las redes inalámbricas y la seguridad de contenidos digitales.