

Evaluación de Algoritmos Cross-Layer para la Optimización de Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas en modo Ad Hoc

J. Alonso-Zárate¹, I. Ramos^{1,2}, E. Kartsakli², C. Verikoukis¹ y L. Alonso²

¹Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)

²Escuela Politécnica Superior de Castelldefels (EPSC) - Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

^{1,2}Av. Canal Olímpic s/n Parc Mediterrani de la Tecnologia, Castelldefels (Barcelona)

¹tel. 93-6452900 fax. 93-6452901

{jesus.alonso, cveri}@cttc.es, isma.ramos@gmail.com, {ellik, luisg}@tsc.upc.edu

Resumen

En el presente trabajo se proponen siete diferentes técnicas cross-layer diseñadas para mejorar la eficiencia de redes inalámbricas ad hoc, operando con el protocolo de acceso al medio definido en el estándar 802.11. Las técnicas cross-layer propuestas modifican los valores de las ventanas de contención en los procesos de backoff para reducir las colisiones en el sistema y aumentar el throughput efectivo entre terminales. Mediante simulaciones realizadas por ordenador, se pone de manifiesto que las técnicas propuestas en este artículo mejoran el rendimiento de las actuales redes inalámbricas WLAN en modo distribuido o ad hoc.

1. Introducción

En los últimos años, la comunidad científica ha trabajado intensamente en el desarrollo de las llamadas técnicas cross-layer [1]. Estas técnicas pretenden romper la estricta estructura de capas OSI (*Open System Interconnect*) propuesta por la ISO (*International Standards Organization*), y permitir la comunicación entre capas para optimizar el rendimiento de las redes de comunicaciones.

Paralelamente a este desarrollo, las redes ad hoc han sido otro de los campos intensamente trabajados durante años [2]. Actualmente, la creciente demanda por parte de los usuarios para poder estar conectado y establecer comunicación con otros usuarios bajo el paradigma “dónde sea y cuándo sea”, hace que el interés por este tipo de tecnología vuelva a estar en auge. Las redes ad hoc están formadas por un conjunto de terminales capaces de autoconfigurarse y establecer una red de comunicaciones sin la presencia explícita de una infraestructura previamente desplegada y configurada a tal efecto. Sus potenciales aplicaciones abarcan un amplio rango de usuarios, justificando por tanto la inversión tanto económica como personal en el estudio de estas tecnologías.

Teniendo en cuenta este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño y análisis de siete técnicas cross-layer diseñadas para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas en modo ad-hoc basadas en el estándar IEEE 802.11 [3]. Todas las propuestas aquí presentadas pretenden aumentar la eficiencia global del sistema mediante la modificación del modelo de capa MAC, estableciendo comunicación con la capa física (PHY). En todas ellas se crea un modelo de ventanas de contención (procedimiento de *backoff*) que es capaz de adaptarse a las condiciones del canal en todo momento con el objetivo de reducir la probabilidad de colisión. En el estándar 802.11 todos los nodos emplean la misma ventana de

contención, sin tener en cuenta las características del canal ni la causa de la pérdida de los paquetes (colisión o *fading* del canal). Así, puede suceder que tras aplicar la ventana de contención la causa inicial de la pérdida del paquete no se solucione, y se incurra de nuevo en la pérdida de la transmisión.

El presente artículo está organizado como sigue. En la Sección 2 se presenta un resumen del protocolo de acceso empleado en el estándar 802.11. La Sección 3 está íntegramente dedicada a describir las técnicas de cross-layer propuestas. En la Sección 4 se describe el escenario de estudio y en la Sección 6 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas por ordenador. La Sección 7 concluye el trabajo.

2. Protocolo MAC IEEE 802.11

Una variación del protocolo MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) constituye el protocolo de acceso al medio (MAC) definido en el estándar para redes inalámbricas de área local (WLAN) IEEE 802.11 en modo distribuido DCF (*Distributed Coordination Function*).

Aunque no es la intención de este apartado describir formalmente su funcionamiento, se ha considerado interesante presentar un resumen del mismo a efectos de ayudar a la lectura y entendimiento del presente artículo. El lector interesado en los detalles del mismo puede encontrarlos en [3].

El funcionamiento del protocolo se basa en el mecanismo de acceso al medio conocido bajo el acrónimo CSMA/CA (*Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance*), aplicando el envío de tramas RTS/CTS (que posteriormente se describirán) para reducir el efecto del terminal oculto y expuesto existente en redes ad hoc. Se definen 4 tipos de tramas, RTS-CTS-DATOS-ACK, como se muestra en la Figura 1. De manera extendida se ha convenido llamar a estas tramas indistintamente tramas o paquetes, por lo que en el

presente artículo se utilizarán ambos tipos de nomenclatura.

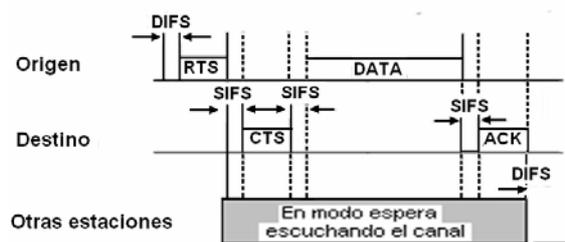


Figura 1 Protocolo MAC 802.11

Todos los terminales del sistema escuchan el canal radio (*channel sensing*) para conocer su estado (*libre u ocupado*). Si el canal está libre, es decir, no hay transmisiones en curso, y el terminal tiene paquetes de datos en cola para transmitir, se esperará un tiempo DIFS (*DCF Inter Frame Space*) antes de transmitir un paquete de petición de envío RTS (*Request to Send*). Mediante este paquete se indica (avisa) al terminal destino que el terminal que lo transmite tiene paquetes para transmitir.

Si el RTS se transmite correctamente y llega al nodo destino, este inicia la transmisión de un paquete CTS (*Clear to Send*) mediante el que confirma al terminal origen que está preparado para iniciar la comunicación. Si la trama CTS se recibe correctamente en el terminal origen, este interpreta que las condiciones del canal son las adecuadas para transmitir y que el nodo receptor está preparado para establecer la comunicación. Tras esperar un tiempo SIFS (*Short Inter Frame Space*), de menor duración que el DIFS, se iniciará la transmisión del mensaje de datos. Si el nodo destino recibe correctamente el mensaje de datos, tras esperar un nuevo tiempo SIFS, notificará al emisor la correcta recepción del mensaje mediante la transmisión de una trama de reconocimiento ACK (*Acknowledgement*).

En el caso de que el diálogo RTS/CTS no se ejecute correctamente porque alguna de las dos tramas contiene errores o ha colisionado con otra transmisión, el terminal origen intentará repetir el proceso de transmisión para intentar transmitir su paquete de datos. Antes de cada reintento, el terminal origen debe establecer una ventana de contención aleatoria (*Backoff*) definida aleatoriamente siguiendo una distribución uniforme en el intervalo $[0, CW-1]$. El valor de CW se inicia en CW_{min} y crece exponencialmente tras cada intento fallido hasta alcanzar el valor máximo de CW_{max} . Considerando una referencia temporal discreta con intervalos de tiempo definidos a nivel de capa física (PHY) y especificados en el estándar bajo el parámetro *SlotTime* indicados en unidades de tiempo, el valor del *backoff* escogido será el número de slots durante la cuál el canal radio debe permanecer libre antes de que el terminal inicie un nuevo diálogo RTS/CTS con algún terminal.

Mediante este procedimiento de *backoff* de duración aleatoria se logra reducir la probabilidad de colisión entre múltiples terminales intentado transmitir un paquete en el mismo instante de tiempo. Como se ha comentado anteriormente, el valor de CW crece exponencialmente a medida que aumenta el número de intentos fallidos de transmisión de un mensaje de datos (*Binary Exponential Backoff*). Una vez ha expirado este tiempo de *backoff*, tras un nuevo periodo de escucha de duración DIFS, el terminal iniciará el proceso de adquisición del canal para intentar realizar la retransmisión del paquete. Después de haber transmitido correctamente el mensaje y haber recibido el reconocimiento ACK por parte del terminal destino, el canal quedará libre y la ventana de *backoff* se restablecerá a los valores originales para la transmisión de los paquetes sucesivos. Los terminales que tengan paquetes en cola, tras esperar un DIFS y un tiempo de acceso al canal, intentarán iniciar la comunicación a través del envío del RTS, volviendo a iniciarse el ciclo de transmisión.

Es importante remarcar que los contadores de espera de *backoff* sólo son decrementados cuando el canal está libre. En caso de que canal esté ocupado el valor de tiempo de espera queda congelado (detenido) hasta que el canal esté libre, en cuyo caso se reanuda la cuenta atrás.

3. Técnicas Cross-layer

En esta sección se describen las diferentes técnicas cross-layer propuestas para mejorar el rendimiento del estándar en modo distribuido. El punto de partida común para todas las técnicas propuestas es que la asignación de los valores mínimos y máximos del intervalo de la CW del terminal origen se realiza en función del nivel de potencia recibida P_{rx} en el destino de la transmisión fallida. Cabe notar en este punto que en este trabajo se ha convenido asumir una notación diferente a la empleada en IEEE 802.11. Consideraremos que la CW se define mediante el par de valores enteros CW_{min} y CW_{max} que definen el intervalo dentro del cual se escogerá aleatoriamente (y uniformemente) la duración del periodo de *backoff*. Es decir, el valor del *backoff* se escogerá en el intervalo $[CW_{min}, CW_{max}]$, en lugar del intervalo $[0, CW-1]$ definido en el estándar.

Una transmisión fallida se puede producir:

- 1) Por colisión entre varios terminales transmitiendo simultáneamente, o
- 2) Porque el nivel de potencia recibida P_{rx} no supera el umbral de sensibilidad S del receptor de radiofrecuencia (RF). Esto a su vez puede deberse a la distancia entre el transmisor y el receptor o a las fluctuaciones del canal radio.

Teniendo esto en cuenta, la idea fundamental de las técnicas cross-layer propuestas es tener en cuenta las condiciones del canal radio antes de iniciar un proceso de retransmisión de una transmisión

previamente fallida. Para ello es necesario estimar el valor de la relación señal a ruido (SNR) de cada transmisión en el nodo destino, y hacerla llegar al terminal origen para que este pueda calcular la nueva CW. Queda fuera del alcance de este artículo el mecanismo mediante el cual el terminal origen recibe la información del estado del canal.

En cada una de las técnicas cross-layer propuestas se definen cinco posibles intervalos para la CW definidos mediante los valores CW_{min} y CW_{max} . El terminal origen (con datos que transmitir) escoge una de estas cinco ventanas en función del valor de P_{rx} estimada en el terminal destino de la última transmisión fallida.

Si consideramos un nivel de potencia de ruido constante, el valor de P_{rx} se puede utilizar directamente como estimación de la SNR presente en cada transmisión. Estos intervalos de potencia se muestran en la Tabla 1, donde P_{rx} corresponde al valor de potencia recibida y S es la sensibilidad del receptor, estando ambos expresados en decibelios (dBs). En esta tabla, además se muestra la elección de la CW en función del valor de P_{rx} .

A través de esta separación de niveles de potencia se puede diferenciar entre las tramas RTS que llegan por debajo del umbral (CW-1) y las que han colisionado o presentan algún error (CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5). La Figura 2 muestra el procedimiento que se debe realizar antes de seleccionar la CW de la que se fijará el tiempo de *backoff* en cada retransmisión.

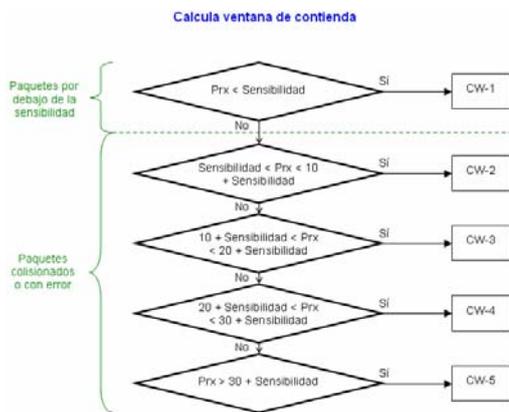


Figura 2 Diagrama de flujo de las técnicas cross-layer propuestas

Tabla 1 Selección de la CW en función de la potencia recibida

CW-x	Márgenes de potencia recibida
CW-1	$P_{rx} < S$
CW-2	$S < P_{rx} < S + 10$ dB
CW-3	$S + 10$ dB $< P_{rx} < S + 20$ dB
CW-4	$S + 20$ dB $< P_{rx} < S + 30$ dB
CW-5	$P_{rx} > S + 30$ dB

Las 7 técnicas cross-layer propuestas se clasifican en dos grupos:

Técnicas Cross-layer tipo A: Emplean diferentes intervalos de tiempo de espera en la ventana CW-1, es decir, cuando $P_{rx} < S$.

Técnicas Cross-layer tipo B: En el caso de que $P_{rx} < S$, se cambia el destino de los paquetes, con el objetivo de establecer comunicación con algún nodo con el cual el canal pueda ser más favorable. Es preciso anotar que este cambio de destino además debería estar relacionado con el protocolo de enrutamiento de capas superiores con objeto de evitar incoherencias entre capas. En este trabajo, no se ha considerado el diseño de dicho protocolo de enrutamiento.

En las subsiguientes secciones se describen las diferentes técnicas cross-layer propuestas.

3.1. Técnicas del tipo A

3.1.1. Técnica Cross-layer 1A

La finalidad de la técnica 1A es que las tramas RTS que han colisionado o han contenido errores pero que han llegado con un nivel de potencia superior a S esperen menos tiempo entre intentos de transmisión de un mismo RTS que el resto de transmisiones. Al esperar menos tiempo y tener un nivel de potencia de recepción suficiente, la probabilidad de llegar al destino y aumentar el *throughput* global del sistema es mayor. De esta manera, además, se reduce el retardo medio de transmisión.

La Tabla 2 muestra las CW empleadas en la técnica 1A, donde para CW-1 se emplean los mismos márgenes de tiempos de espera que en el estándar 802.11. El resto de ventanas reducen los intervalos de espera a medida que el nivel de P_{rx} es mayor, priorizando aquellas transmisiones que han llegado con una SNR mayor. Nótese que el valor de R en la primera columna, tanto para la Tabla 2 como para las tablas sucesivas con el mismo formato, indica el número de retransmisiones requeridas. Asimismo, todos los valores se expresan en unidades de tiempo, entendidas como el valor de *SlotTime* definido en el estándar 802.11 [3].

3.1.2. Técnica Cross-layer 2A

El objetivo de la técnica 2A es disminuir la probabilidad de colisión en el sistema y mejorar las condiciones del canal en transmisiones con un nivel de potencia en recepción inferior a la sensibilidad de los terminales receptores.

Para disminuir la probabilidad de que transmitan dos o más nodos simultáneamente y que sus transmisiones de RTS colisionen, las ventanas no presentan solapamiento entre los márgenes de tiempo de espera. Por otro lado, como se muestra en

la Tabla 3, los intervalos de la ventana CW-1 son siempre entre 1 y 255 unidades de tiempo (slots). De este modo si la causa de la transmisión fallida es la atenuación por distancia o *shadowing*, el nodo dispondrá de más tiempo para cambiar de posición o lograr que se venza el tiempo de coherencia del canal, siempre con el objetivo de mejorar las condiciones de transmisión.

3.1.3. Técnica *Cross-layer* 3A

La técnica 3A tiene como objetivo evitar que las transmisiones que cumpliendo que $P_{rx} > S$ (CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5) y que no se hayan podido realizar porque han colisionado o contienen errores, se puedan retransmitir de manera correcta sin estar afectadas por grandes atenuaciones de distancia debido a que los nodos se hayan alejado o hayan cambiado las condiciones del canal con respecto al primer intento de transmisión.

Por este motivo, como se observa en la Tabla 4 se da prioridad, con márgenes de tiempo de espera más pequeños, a las ventanas con un nivel de potencia más próxima a S . En esta técnica las ventanas también están solapadas y la CW-1 ($P_{rx} < S$) vuelve a tener valores entre 1 y 255 para reducir el número de colisiones y reducir la probabilidad de que la transmisión llegue por debajo del umbral de potencia necesario.

3.2. Técnicas de tipo B

3.2.1. Técnica *Cross-layer* 1B

La técnica 1B intenta que las tramas RTS que se reciben con un nivel inferior a la sensibilidad tengan una mayor probabilidad de que la retransmisión se realice correctamente. Para ello, se cambia el destino de los paquetes. Es importante remarcar que en este caso sería necesario establecer una comunicación directa con el protocolo de enrutamiento para evitar incoherencias en los procedimientos de enrutamiento.

Esta técnica se basa en el hecho de que las tramas RTS transmitidas usando CW-1 ($P_{rx} < S$) sólo llegarán correctamente si los nodos se aproximan o si las condiciones del canal varían. La probabilidad de que esto ocurra es muy baja si hay poca movilidad o si el tiempo de coherencia del canal es grande. Esta situación podría provocar que un alto porcentaje de retransmisiones se volvieran a perder hasta alcanzar el máximo de intentos, después de los cuales se descartaría el mensaje. Sin embargo, al cambiar de destino, teniendo en cuenta información de capas superiores, se aumenta la probabilidad de que las condiciones del canal sean mejores o que los nodos estén situados más próximos. En el caso de que las condiciones de transmisión no fueran adecuadas con el nuevo destino seleccionado, se repetiría el cambio de destino hasta 5 veces antes de descartar el mensaje.

En el resto de ventanas, se producen los mismos efectos que en la técnica 1A descrita anteriormente. Se priorizan las transmisiones que llegan al destino con mayor SNR, y los márgenes de tiempos de espera están solapados.

Los valores de las CW utilizados en esta técnica se expresan en la Tabla 5.

3.2.2. Técnica *Cross-layer* 2B

El propósito de la técnica 2B es obtener las mejoras introducidas por la técnica 2A, que pretende reducir las colisiones y aumentar el *throughput*, y además conseguir las ventajas de la técnica 1B en cuanto al retardo medio de transmisión, la ocupación en cola de los terminales y los paquetes recibidos con potencia inferior a S .

La Tabla 6 muestra las cinco ventanas de contienda de la técnica 2B, donde se puede observar que se da prioridad a los nodos con una potencia recibida mayor asignándole intervalos de tiempo de espera menores y no solapados para evitar colisiones. Por otro lado, se puede observar que se intenta mejorar las condiciones de retransmisión, cambiando el destino de aquellas transmisiones que llegan con un nivel de potencia inferior al umbral.

Tabla 2 CWs técnica 1A en unidades de *SlotTime*

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	1-7	1-5	1-4	1-3	1-2
2°	1-15	1-13	1-11	1-9	1-7
3°	1-31	1-27	1-23	1-19	1-15
4°	1-63	1-56	1-49	1-42	1-35
5°	1-127	1-117	1-107	1-97	1-87
6°	1-255	1-235	1-215	1-195	1-175

Tabla 3 CWs técnica 2A en unidades de *SlotTime*

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	1-255	16-35	8-15	3-7	1-2
2°	1-255	36-87	16-35	8-15	1-7
3°	1-255	88-175	36-87	16-35	1-15
4°	1-255	176-215	88-175	36-87	1-35
5°	1-255	216-255	176-215	88-175	1-87
6°	1-255	256-512	216-255	176-215	1-175

Tabla 4 CWs técnica 3A en unidades de *SlotTime*

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	1-255	1-2	3-7	8-15	16-35
2°	1-255	1-7	8-15	16-35	36-87
3°	1-255	1-15	16-35	36-87	88-175
4°	1-255	1-35	36-87	88-175	176-215
5°	1-255	1-87	88-175	176-215	216-255
6°	1-255	1-175	176-215	216-255	256-512

3.2.3. Técnica *Cross-layer* 3B

La técnica 3B prioriza las transmisiones cuya potencia recibida ha llegado por encima de la sensibilidad del nodo destino, pretende reducir las colisiones empleando CW's no solapadas y mejorar las condiciones de transmisión de los nodos con un nivel de potencia recibida por debajo de la sensibilidad.

La Tabla 7 muestra las ventanas de contención de la técnica 3B donde se puede observar que presenta ventanas similares a la técnica 3A cuando una transmisión colisiona o contiene error con la finalidad de dar prioridad a las transmisiones con menor nivel de potencia. Además la ventana CW-1 cambia de destino para intentar reducir el retardo medio, la ocupación de las colas y los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.

3.2.4. Técnica Cross-layer 4B

La técnica 4B se ha diseñado para sistemas de comunicaciones donde lo más importante es que el mensaje llegue a su destino aunque sea con un mayor retardo y así evitar eliminar los paquetes a causa de las retransmisiones. Este podría ser el caso de tráfico sin requisitos de calidad específicos y basado en un criterio de *best-effort*. Un ejemplo clásico de este tipo de servicio es el correo electrónico o cualquier aplicación de *background*, donde el retardo no es un factor crítico.

En esta última técnica las ventanas de contienda son las mismas que la técnica 2B, tal y como se muestra en la Tabla 8. Los márgenes de tiempos de espera no son solapados, y se priorizan los envíos que llegan al destino por encima de la sensibilidad con mayor SNR. Además este sistema permite realizar cambios de destino a los RTS que lleguen por debajo de la sensibilidad (CW-1), pero no limita el número de cambios de destino como en los casos anteriores.

Tabla 5 CWs técnica 1B en unidades de SlotTime

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	Cambia destino	1-5	1-4	1-3	1-2
2°		1-13	1-11	1-9	1-7
3°		1-27	1-23	1-19	1-15
4°		1-56	1-49	1-42	1-35
5°		1-117	1-107	1-97	1-87
6°		1-235	1-215	1-195	1-175

Tabla 6 CWs técnica 2B en unidades de SlotTime

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	Cambia destino	16-35	8-15	3-7	1-2
2°		36-87	16-35	8-15	1-7
3°		88-175	36-87	16-35	1-15
4°		176-215	88-175	36-87	1-35
5°		216-255	176-215	88-175	1-87
6°		256-512	216-255	176-215	1-175

Tabla 7 CWs técnica 3B en unidades de SlotTime

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	Cambia destino	1-2	3-7	8-15	16-35
2°		1-7	8-15	16-35	36-87
3°		1-15	16-35	36-87	88-175
4°		1-35	36-87	88-175	176-215
5°		1-87	88-175	176-215	216-255
6°		1-175	176-215	216-255	256-512

Tabla 8 CWs técnica 4B en unidades de SlotTime

R	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1°	Cambia destino	16-35	8-15	3-7	1-2
2°		36-87	16-35	8-15	1-7
3°		88-75	36-87	16-35	1-15

4°		176-215	88-175	36-87	1-35
5°		216-255	176-215	88-175	1-87
6°		256-512	216-255	176-215	1-175

La principal aportación de esta técnica es que permite realizar retransmisiones a todos los nodos del sistema sin que haya un máximo de nodos. Únicamente se marcará un máximo de retransmisiones cuando el destino haya recibido un mensaje de manera correcta. De modo que si un RTS llega con una potencia demasiado baja porque ese nodo está alejado de la mayoría, podrá probar con todos los nodos del sistema hasta encontrar uno válido. Cada nodo deberá haber almacenado el número de retransmisiones que ha realizado al mismo nodo destino debido a que una vez encontrado un nodo válido podrá realizar hasta un número de 6 intentos con ese nodo, antes de perder el mensaje. Nótese que el valor máximo de intentos se ha fijado en 6 para este estudio, aunque podría utilizarse cualquier otro valor entero.

Por otro lado, si el motivo del RTS fallido es que contiene errores o colisiona con otra transmisión (casos CW-2, CW-3, CW-4 ó CW-5), sólo podrá realizar hasta 6 reintentos sin cambiar de nodo y esperando el tiempo asignado en función de su ventana de contención.

De este modo en sistemas con más de 6 posibles destinos, por ejemplo 15 nodos, se tendrá la opción de probar la comunicación con todos los nodos del escenario, cosa que no es posible con las anteriores técnicas donde se limitaba a 6, pudiendo tener mejores condiciones de canal con los otros 9 restantes.

4. Escenario de Trabajo

4.1. Área de simulación

El escenario de trabajo está formado por un escenario cuadrado de estudio en dos dimensiones sobre el cual se distribuyen de manera aleatoria y homogénea los nodos de comunicaciones. Las simulaciones se han realizado en dos escenarios de distintas dimensiones. Concretamente en un escenario de 100x100 metros y en otro de 400x400 metros. Inicialmente a cada terminal o nodo del sistema se le asigna una posición aleatoria sobre el escenario de estudio.

4.2. Modelo de movilidad

Se ha implementado un modelo de movilidad aleatorio en el que los nodos varían su velocidad entre 0km/h. y 1.5km/h. Estas velocidades podrían corresponderse con las velocidades habituales para modelar a una persona caminando en un entorno interior. Para cada uno de los terminales se calcula una velocidad diferente e independiente de las demás, de modo aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo [0,1.5] Km./h.

El movimiento de cada nodo puede darse en cualquier dirección, tanto para el valor absoluto de la velocidad como para su sentido o dirección. Esto permite que el nodo pueda moverse libremente por el escenario hasta que llega a una frontera o límite del área de simulación. En este caso, el nodo cambiará la componente de sentido y dará la vuelta, pero manteniendo el mismo módulo de velocidad.

4.3. Sistema de colas

Cada uno de los nodos dispone de una cola de datos de tamaño fijo donde se almacenan los paquetes antes de ser transmitidos. El tamaño de la cola se ha fijado en una capacidad para almacenar 500 paquetes que, considerando paquetes de longitud fija de 500bytes, equivale a una capacidad máxima de almacenamiento de 250Kbytes, y considerando paquetes de 2312bytes, equivale a una capacidad de almacenamiento de 1156Kbytes. En el caso de que la cola llegue al máximo de su capacidad y se intenten almacenar más paquetes en ella, la cola se desbordará, perdiendo los paquetes que no han podido ser almacenados.

4.4. Modelo de tráfico

El sistema propuesto es capaz de trabajar con dos modelos de tráfico diferentes según el tamaño de los paquetes, tal y como se describen a continuación:

Paquetes de tamaño constante: Todos los paquetes generados por los nodos tendrán la misma longitud en bytes, siendo o bien de 500bytes o bien de 2312bytes. Estos son los tamaños definidos en el estándar 802.11 como valores mínimos y máximos para el tamaño de las tramas de datos.

Paquetes de tamaño variable: El tamaño de los paquetes de datos del sistema estará comprendido entre 500 y 2312 bytes. Los paquetes serán generados a partir de una función aleatoria y *Gaussiana* con una media centrada en 1400 bytes, que se corresponde con la longitud de los paquetes *Ethernet* usados en las redes LAN de área local.

En ambos modelos se han considerado llegadas de *Poisson* de mensajes de longitud 1 paquete. Para todos los nodos del sistema se han empleado diferentes valores de probabilidad de generación y tiempo entre llegadas que corresponden a cargar el sistema con un tráfico total agregado (suma de la carga ofrecida por todos los terminales) que va desde los 0 a los 6.5 Mbps.

4.5. Modelo de propagación

En el modelo de canal se han considerando tanto las pérdidas de propagación del canal como las atenuaciones debidas a posibles obstáculos en el escenario de simulación (*shadowing*). No se han considerado desvanecimientos rápidos (*fading*).

4.5.1. Pérdidas de propagación

Este tipo de atenuación está caracterizada principalmente por el medio de transmisión, el aire en nuestro caso, y la distancia entre el nodo emisor y el receptor. La expresión (1.1) describe el modelo de propagación a partir del cual se calcula la atenuación para una transmisión entre dos terminales separados por un distancia d .

$$L = \begin{cases} 40 + 20 \cdot \log[d(\text{metros})] & (\text{dB}) \text{ si } d \leq 5 \text{ metros} \\ 40 + 14 + 10 \cdot \gamma \cdot \log\left[\frac{d(\text{metros})}{5}\right] & (\text{dB}) \text{ si } d > 5 \text{ metros} \end{cases} \quad (1.1)$$

En esta ecuación, γ es un parámetro dependiente de las condiciones específicas del entorno de comunicaciones. Un valor típico, y que corresponde con el empleado en nuestro sistema es $\gamma = 3.5$.

4.5.2. Shadowing

Se ha considerado en el presente trabajo un canal del tipo NLOS (*Non-Line of Sight*) *Rayleigh*, es decir, sin visibilidad directa entre terminales y siguiendo una distribución *lognormal*. A esta atenuación, generalmente producida por los obstáculos que debe atravesar la señal, se le denomina *shadowing*.

La estadística *lognormal* citada anteriormente, en unidades logarítmicas tiene el comportamiento de una variable aleatoria *gaussiana*. Se ha modelado un canal con una desviación típica de 15dB y media nula, tal como se muestra en la Figura 3.

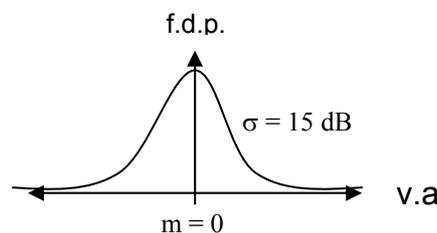


Figura 3 Variable Aleatoria Gaussiana

4.6. Modelo de canal

Las condiciones del canal no son siempre constantes, debido al movimiento de los nodos y de los obstáculos que lo rodean. Por eso la atenuación por *shadowing* no es siempre la misma sino que depende de que las condiciones del canal se mantengan constantes. El tiempo en el que un canal permanece bajo las mismas condiciones se denomina tiempo de coherencia (T_c), y para el caso particular de un canal *Rayleigh* se calcula mediante la expresión (1.2) [4],

$$T_c = \frac{1}{4,13 \cdot f_d} \quad (1.2)$$

donde f_d es la frecuencia *Doppler* máxima generada por el movimiento de los nodos.

La frecuencia *Doppler* es la dispersión en la frecuencia portadora causada por el movimiento de los nodos, que produce que la frecuencia del emisor esté desplazada de la del receptor. La ecuación (1.3) muestra el cálculo de la frecuencia máxima *Doppler*.

$$f_d = \frac{v}{\lambda} = f \times \frac{v}{c} \quad (1.3)$$

donde c es la velocidad de la luz, f es la frecuencia portadora del sistema y v es la velocidad relativa entre el nodo transmisor y el nodo receptor.

$$T_c = \frac{1}{4,13 \cdot 3.33Hz} = 72ms \quad (1.4)$$

En el presente trabajo se ha considerado una tiempo de coherencia de 72ms. y una desviación de frecuencia *Doppler* de 3.33Hzs., acorde con los valores de velocidad indicados anteriormente.

5. Resultados

Para analizar el rendimiento de las técnicas cross-layer propuestas, se ha implementado un simulador software orientado a objetos basado en la plataforma Visual C++. En él se ha implementado el protocolo de acceso al medio definido en el estándar 802.11, así como las diferentes técnicas cross-layer descritas en el presente trabajo.

El rendimiento del protocolo con y sin las diferentes técnicas de cross-layer propuestas se ha medido en base a dos parámetros: el *throughput* o rendimiento del sistema, y el retardo medio de transmisión de los paquetes de datos.

- El *throughput* representa la cantidad media de paquetes de datos que el sistema transmite correctamente por tiempo de simulación, y se expresa en bits por segundo. Es decir, la cantidad de carga que el sistema absorbe o envía correctamente. Se mide en Mega bits por segundo (Mbps.).
- El *retardo* es el periodo de tiempo desde que el mensaje o paquete es generado en un terminal dado, hasta que recibido de manera correcta por el nodo destino. Se mide en milisegundos (10^{-3} segundos, ms.)

Es importante decir en este punto que en esta sección se comparan todos los resultados con aquellos obtenidos cuando se usa el protocolo en el estándar 802.11 sin aplicar técnicas cross-layer, al cuál se ha convenido llamar sistema de referencia o rendimiento de referencia.

En primer lugar se ha analizado la carga de tráfico que se puede cursar en el sistema. Las figuras 4 y 5 muestran como al aplicar las técnicas cross-layer de tipo A la tendencia del *throughput* es muy similar a la obtenida cuando se emplea el sistema de referencia.

Cabe notar en cualquier caso que en escenarios de dimensiones reducidas se aprecia una mejora en el punto de saturación en las técnicas 2A y 3A absorbiendo un 5% ó 0.2Mbps. más de carga que el sistema de referencia. Este incremento se produce con cargas superiores a 4Mbps.

Por otro lado, en escenarios de grandes dimensiones sólo la técnica 3A aporta una mejora significativa al incrementar un 9% ó 0.12Mbps. la carga cursada en el sistema.

Este incremento del rendimiento en zonas próximas al punto de saturación se debe a que las técnicas 2A y 3A emplean CW con márgenes de tiempo no solapados, reduciendo la probabilidad de colisión y aumentando el *throughput* del sistema.

Los resultados representados en las figuras 6 y 7 muestran que en escenarios de 100x100 metros las técnicas 1A y 3A introducen un mayor retardo en el sistema no mejorando el rendimiento del sistema de referencia. Cuando ambas técnicas presentan un retardo de 1 segundo, sirven hasta una carga de 4.88Mbps. e introducen 100ms. más que el sistema de referencia.

El resto de técnicas logran reducir el retardo medio de transmisión. Concretamente, la técnica 2A es la que mejor se comporta reduciendo el retardo en 200ms. e incrementando el intervalo de trabajo en 0.05Mbps.

En escenarios de 400x400 metros las técnicas 2A y 3A son las que introducen un menor retardo, reduciendo en 200ms. el retardo del sistema de referencia y aumentando el intervalo de trabajo en 0.2Mbps.

Los resultados de la técnica 3A se deben a que en el escenario de 100x100 metros la probabilidad de colisión es más elevada que en el de 400x400 metros, porque en escenarios reducidos la probabilidad de solapar áreas de cobertura es mayor.

La técnica 3A mejora el *throughput* del sistema reduciendo el número de colisiones. A cambio, el canal se ocupa durante más tiempo al realizar un mayor número de transmisiones correctas, y por tanto, causa que los mensajes tengan que esperar más tiempo hasta que se libere el canal.

Por otro lado la técnica 2A es la que presenta un menor retardo al emplear ventanas solapadas (reduciendo las colisiones) y tener una eficiencia peor que 3A, dejando más tiempo libre el canal y que los nodos con paquetes en cola esperen un menor tiempo para intentar acceder al él.

La primera observación al aplicar las técnicas del tipo B es el aumento de la capacidad de absorción de carga por parte del sistema. En escenarios de 100x100 metros todas las técnicas tipo B aumentan el punto de saturación hasta cargas de 4.9Mbps.

Para cargas inferiores a 4Mbps. sirven el 99.9%, con un comportamiento prácticamente lineal (Figuras 10 y 11).

Las técnicas B aportan una mejora de 0.3Mbps. en la carga absorbida y de un 8% en la tasa de paquetes de datos servidos, en prácticamente todo el intervalo de trabajo.

A partir de los 4Mbps. el rendimiento baja pero sigue estando por encima en un 4% respecto al de referencia. En escenarios de 400x400 metros el rendimiento del sistema también aumenta, en este caso, en un 45 %, siendo capaz de servir entre el 98-95 % de la carga, en el intervalo de trabajo, e incrementando el caudal hasta 0.65Mbps.

El motivo de este cambio de comportamiento tan favorable respecto a las técnicas tipo A es que las tipo B realizan un cambio de destino con el que se pretende tener mejores condiciones de canal (menor *shadowing* y atenuación por distancia respecto al receptor). De esta manera se reducen las pérdidas producidas por niveles de potencia recibida insuficientes ($P_{rx} < S$) y aumenta el número de transmisiones correctas. Como muestran figuras 8 y 9 esta mejora es más notable en escenarios de grandes dimensiones ya que el motivo principal de pérdidas de RTS son las atenuaciones por distancia.

Las técnicas tipo B se comportan de manera similar en ambos escenarios presentando eficiencias totalmente diferentes. En escenarios de 100x100 metros las técnicas tipo B se diseñaron con la intención de reducir la pérdida de tramas RTS por falta de potencia en recepción incrementando así el *throughput* del sistema (figura 8). De modo que al servirse más tráfico el tiempo de espera en cola de cada paquete debería ser menor y se reduciría el retardo. Nuevamente se confirma que la teoría se corresponde con la práctica pues todas las técnicas B introducen un menor retardo respecto al de referencia y aumentan el intervalo de trabajo en escenarios de 100x100 metros, como se puede ver en las figuras 12 y 13. La técnica 2B es la que introduce un menor retardo reduciéndolo en 600ms. y aumentando en 0.06Mbps. el intervalo de trabajo.

En cambio, en escenarios de 400x400 metros, las técnicas B sólo reducen el retardo, en 120ms., con cargas inferiores a 1.4Mbps. y a partir de este punto se comportan peor que el sistema de referencia llegando con cargas inferiores al límite de 1 segundo. Esto es debido a que el sistema ha aumentado tanto su nivel de *throughput* que el canal está prácticamente siempre ocupado y los nodos deben esperar un tiempo elevado para intentar acceder.

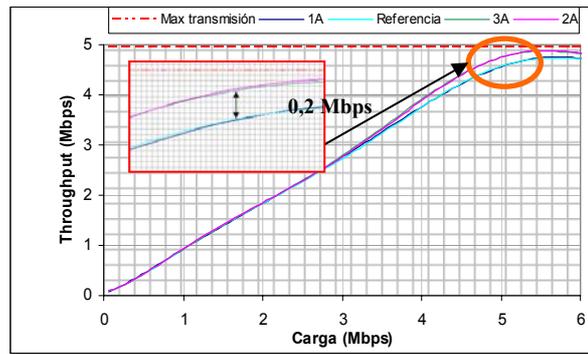


Figura 4 Throughput para las técnicas tipo A en un escenario de 100x100 metros

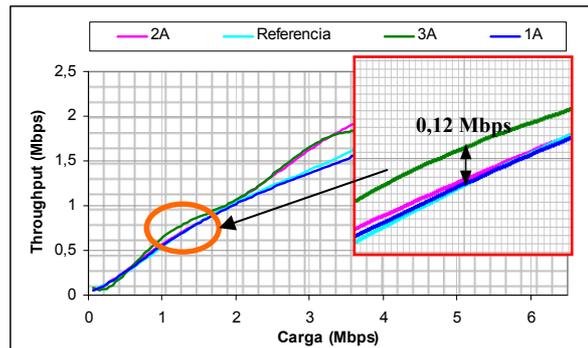


Figura 5 Throughput para las técnicas tipo A en un escenario de 400x400 metros

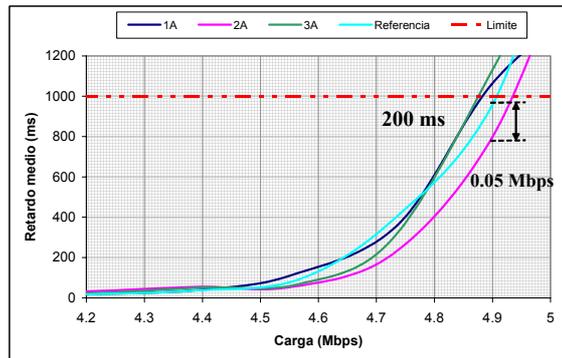


Figura 6 Retardo medio para técnicas tipo A en un escenario de 100x100 metros

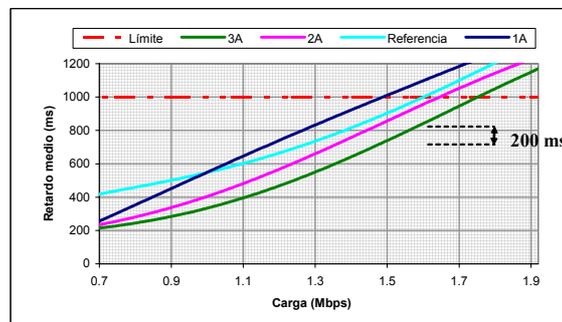


Figura 7 Retardo medio para técnicas del tipo A en un escenario de 400x400 metros

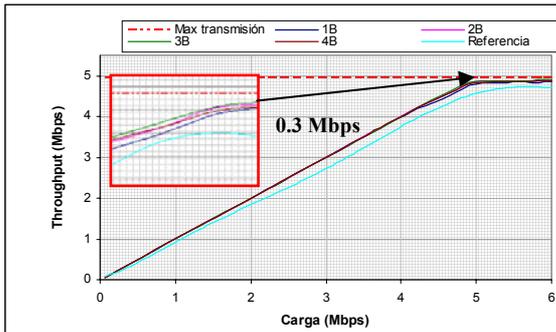


Figura 8 Throughput técnicas tipo B en un escenario de 100x100 metros

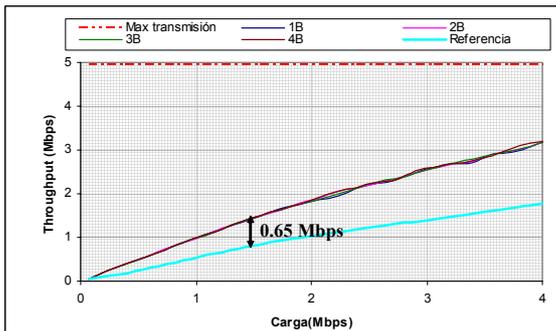


Figura 9 Throughput técnicas tipo B en un escenario de 400x400 metros

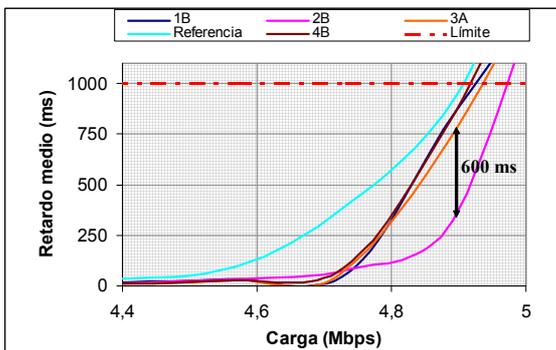


Figura 10 Retardo medio para técnicas tipo B en un escenario de 100x100 metros

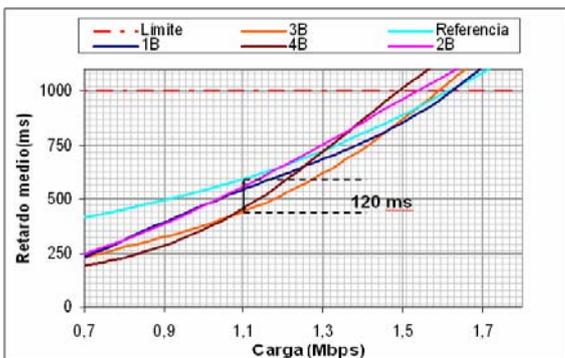


Figura 11 Retardo medio para técnicas tipo B en un escenario de 400x400 metros

6. Conclusiones

La conclusión final del presente trabajo es que en un amplio abanico de escenarios las siete técnicas cross-layer propuestas mejoran el rendimiento del protocolo de acceso definido en el estándar 802.11 tanto en términos de *throughput* como de retardo medio de transmisión de paquetes.

A continuación se presentan las conclusiones extraídas de cada grupo de técnicas propuestas separadas en técnicas de tipo A y técnicas de tipo B.

6.1. Técnicas tipo A

Tras realizar un análisis de las técnicas cross-layer 1A, 2A y 3A frente al sistema de referencia se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La técnica 1A presenta un rendimiento similar al sistema de referencia. Estos resultados demuestran que solapar los intervalos de tiempo de las ventanas de contienda y dar prioridad a las transmisiones con mejores condiciones de canal no aportan mejoras sustanciales al sistema.
- Las técnicas 2A y 3A aumentan el rendimiento del sistema tanto en escenarios de 100x100 metros como en escenarios de 400x400 metros. La mejora es mayor en escenarios pequeños ya que se disminuye en mayor grado el número de colisiones del sistema, aumentando por tanto su rendimiento. Los principales aspectos que mejoran estas técnicas en este tipo de escenarios son:

1) Se aumenta el *throughput* en 0.2Mbps. y el porcentaje de paquetes transmitidos correctamente en un 5%.

2) Se reduce el número de intentos medios necesarios para que una transmisión sea correcta, disminuyendo el consumo de energía.

3) Se mejora el retardo en 200ms.

4) Se disminuye la pérdida de paquetes RTS por colisión en un 18%, reduciendo la cantidad de paquetes de datos perdidos por 6 intentos.

6.2. Técnicas tipo B

En escenarios de dimensiones reducidas la técnica que aumenta el rendimiento en mayor grado es la 3B introduciendo las siguientes mejoras:

- Mejora el rendimiento del sistema sirviendo prácticamente el 100% de la carga hasta 4Mbps. y un 97% para cargas superiores, dentro del intervalo de trabajo. De este modo se logra un mayor rendimiento que las técnicas tipo A que sirven el 93% de la carga, en todo el intervalo de trabajo.

- Reduce en un 35% el número medio de intentos de RTS, mostrando una mayor eficiencia que las técnicas tipo A que reducen en un 25% la cantidad de intentos medios.
- Se reduce el retardo en 600ms.
- Disminuye la cantidad de paquetes perdidos de datos.
- Aumenta la cantidad de transmisiones de RTS debido al descenso de colisiones y de paquetes perdidos por potencia insuficiente en recepción.

En escenarios de grandes dimensiones, la técnica que presenta una mayor eficiencia es la 4B:

- Mejora el rendimiento sirviendo prácticamente el 96% de la carga hasta 1.5Mbps. de carga, logrando un mayor rendimiento que las técnicas A que sólo sirven hasta el 60% de la carga.
- Minimiza el número de intentos medios en un 65%, frente al 15% logrado por las técnicas cross-layer tipo A.
- Aumenta la cantidad de transmisiones de RTS en un 45% al disminuir las pérdidas por falta de potencia en recepción ($P_{rx} > S$) en un 40%.
- Se aumenta la cantidad de tráfico de datos servido en un 30%, consiguiendo un sistema de comunicaciones que garantiza unos requisitos de calidad de servicio con cargas de tráfico bajas.

Agradecimientos

Este artículo ha sido subvencionado por la Comisión Europea mediante ERACLIN (Marie Curie ToK, UE): MTKI-CT-2004-517218, y por el Gobierno Español a través de los siguientes proyectos: PlaNetS (FIT 330220-2005-111), ETECLAS (TEC2005-07326-C02-01/TCM) y PERSEO (TEC2006-10459/TCM).

Referencias

- [1] L. Alonso and R. Agustí, "Optimization of Wireless Communication Systems Using Cross-Layer Information", ACM Signal Processing, vol.86, issue 8, pp. 1755-1772, August 2006.
- [2] Mohammad Ilyas, "The handbook of Ad Hoc Wireless Networks, CRC Press, 2003.
- [3] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Standard IEEE, 1997.
- [4] J. M. Hernando, "Transmisión por Radio", Editorial Universitaria Ramón Areces, 2006.