

Comunicaciones en Tiempo Real adecuando el Protocolo 802.11e (EDCA)

Omar Alimenti, Guillermo Friedrich, Guillermo Reggiani y Santiago Tonietti

Universidad Tecnológica Nacional - FRBB. 11 de Abril 461, Bahía Blanca, Argentina
{iealimen}@criba.edu.ar, {gfried, ghreggiani}@frbb.utn.edu.ar, {stonietti}@gmail.com

Resumen. Las tecnologías inalámbricas representan una alternativa deseable a ser utilizadas en ambientes industriales, para interconectar sistemas móviles o bien evitar el cableado de sensores y controladores en planta. Un sistema de control basado en red (NCS) requiere que el controlador interactúe en tiempo real con los sensores y actuadores por medio de una red de comunicaciones. Sin embargo, las redes inalámbricas presentan problemas de confiabilidad y temporizado inherentes a las características de los canales de radio, los mecanismos de control de acceso al medio (MAC), etc., que provocan latencias impredecibles y pérdida de paquetes. El mecanismo MAC de EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), definido en el estándar 802.11e, provee cuatro niveles de Calidad de Servicio (QoS) diferenciados, que no garantizan un retardo acotado para el envío de paquetes. Este trabajo propone un mecanismo de MAC inalámbrico apto para Tiempo Real, basado en controlar adecuadamente la Ventana de Contención (CW), el contador de retroceso (backoff) y los espacios entre tramas para el arbitraje (AIFS) del esquema EDCA, a fin de evitar la pérdida de paquetes y acotar la latencia de transmisión. Los resultados se compararon con los obtenidos utilizando los parámetros por defecto de EDCA, simulados ambos sobre ns-2.

Keywords: AIFS, inalámbrico, Prioridades, EDCA, Determinístico, ns-2, NCS, MAC, Tiempo Real.

1 Introducción

Las redes de tecnología inalámbrica (WLAN) presentan una alternativa a las redes de área local cableadas (LAN), ya que brindan numerosos beneficios sobre ambientes industriales. Cabe destacar la reducción de tiempo y costo de instalación, mantenimiento y modificación del cableado (evitando el impacto de ambientes agresivos sobre cables y conectores), así como la integración de sistemas móviles [1]. Sin embargo, la confiabilidad de estos sistemas suele verse afectada por factores como las interferencias en el canal de radio frecuencia (RF), la movilidad de algunas estaciones y la incertidumbre en el tiempo de acceso al medio de ciertos protocolos.

Si bien existen diversas opciones de conectividad inalámbrica, el interés del presente trabajo se centra en las redes WLANs basadas en IEEE 802.11.

El protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) es decisivo en el rendimiento de una red [2]. 802.11 propone dos mecanismos MAC: Función de Coordinación Puntual (PCF) y Función de Coordinación Distribuída (DCF). En el modo PCF (libre

de contención), el Punto de Acceso (Access Point: AP) coordina el acceso a la red. En DCF, las estaciones (STA) y eventualmente el AP compiten por el acceso al medio. A pesar de las diferencias, ambos modos emplean el mecanismo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision-Avoidance). El protocolo MAC 802.11 original no soporta QoS para diferenciar tipos de tráfico. El estándar 802.11e [3] propone dos mecanismos de QoS: Acceso al Canal en Forma Distribuida Mejorada (EDCA) y Acceso al Canal Controlado por Función de Coordinación Híbrida (HCCA). EDCA es una extensión de DCF [4], que diferencia cuatro Categorías de Acceso (AC) priorizadas [5]. EDCA mejora la tasa de transferencia y el tiempo de respuesta con respecto a DCF, aunque la reducida cantidad de AC (que limita la diferenciación de tráfico con restricciones temporales [6]) y los factores probabilísticos del mecanismo MAC de EDCA resultan desfavorables para aplicaciones de tiempo real (RT).

El presente trabajo, basado en EDCA, tiene el objetivo de lograr un retardo de acceso al medio predecible. Para ello se propone usar tantas AC como STAs y/o mensajes existan en la red [7] [8]. Los resultados teóricos fueron comprobados mediante simulaciones sobre ns-2 [9] y comparados con EDCA estándar.

El campo de aplicación que se tiene como objetivo para el presente trabajo es el de los Sistemas de Control sobre Redes (NCS: Networked Control Systems) [10] cuyas capacidades son la adquisición de información (de sensores/usuarios), el comando (controladores/usuarios), la comunicación, la red y el control (actuadores). A grandes rasgos, la investigación sobre NCS se divide en dos categorías [11]:

(a) Control de la red: estudio e investigación sobre comunicaciones y redes, a fin de hacerlas adecuadas para los requerimientos de tiempo real de los NCS. Por ejemplo: control del enrutamiento, reducción de la congestión, comunicación de datos eficiente, protocolos de red, etc.

(b) Control sobre la red: trata con el diseño de estrategias y sistemas de control, para minimizar los impactos desfavorables de determinados parámetros de la red –por ejemplo: retardos variables– sobre el desempeño del NCS.

El presente trabajo está orientado al “control de la red”, en la búsqueda de adecuar determinados parámetros de los tipos de redes considerados, a fin de poder utilizarlas como base para la implementación de sistemas de “control sobre la red”.

2 De DCF en 802.11 a EDCA en 802.11e

DCF es un mecanismo distribuido de MAC basado en CSMA/CA, que define el estándar IEEE 802.11 (Fig. 1). Una STA debe sensar el medio antes de transmitir. Si el medio permanece ocioso durante un cierto tiempo aleatorio, la STA puede iniciar la transmisión. En caso contrario, debe implementar un mecanismo de espera. DCF puede operar en dos modos: uno consiste en transmitir la trama de datos cuando se obtiene el acceso al medio; en el otro, previo al envío de datos se intercambian tramas RTS/CTS, a fin de evitar colisiones con nodos ocultos [12]. El presente trabajo está basado en el primero.

Como no es posible detectar colisiones ni interferencias en un medio inalámbrico, el acceso al canal se controla mediante Espacios de Tiempo entre Tramas (IFS). Cuando una STA tiene una trama para transmitir y detecta que el medio está libre,

debe esperar primero un tiempo denominado Espacio de Separación entre Tramas Distribuido (DIFS) y luego una espera aleatoria denominada Ventana de Retroceso (BW: Backoff Window). La Ventana de Contención CW determina el rango de variación del número aleatorio CW (0 a $CW-1$). BW es un contador de ranuras de tiempo ST (slot-time). Si el medio permanece ocioso durante toda la Ventana de Retroceso, inicia la transmisión. CW comienza con una duración mínima CW_{min} , y si BW llega a cero estando el medio ocupado, CW duplica su valor (hasta un máximo CW_{max}). Si el medio se ocupa antes que BW llegue a cero, se suspende la cuenta hasta que el medio vuelva a estar libre durante un tiempo DIFS. Si BW llega a cero en dos o más STAs al mismo tiempo, se producirá una colisión. Luego de un tiempo IFS Corto (SIFS) posterior a la correcta recepción de una trama, la STA receptora envía un reconocimiento (ACK) (Fig. 1). Si la STA transmisora no recibe el ACK, asume que pudo haber ocurrido una colisión o un ruido en el medio físico y es necesario retransmitir, causando indeterminación en el tiempo requerido para concretar una transmisión. El tiempo de latencia se define como el tiempo transcurrido desde el arribo de una solicitud hasta la llegada del ACK.

Debido a que todas las STAs que compiten por el acceso al medio utilizan los mismos valores de DIFS y CW, no es posible realizar ninguna diferenciación en cuanto a la prioridad de una transmisión sobre otra. Por otra parte, la ocurrencia de colisiones o ruidos imponen retardos variables, que impiden asegurar una latencia máxima a aquellas aplicaciones con requerimientos temporales estrictos.

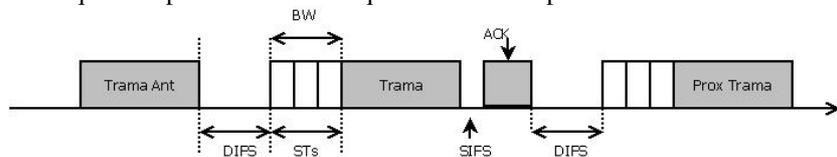


Fig. 1. Esquema básico DCF

EDCA (Fig. 2) propone un mecanismo diferenciado de QoS con cuatro AC: AC_BK (Background) para niveles de prioridad más bajos (1 y 2), AC_BE (Best Effort) para los siguientes (0 y 3), AC_VI (Video) para 4 y 5 y AC_VO (Voice) para las más altas (6 y 7). De acuerdo a su prioridad, una trama será ubicada en una de esas cuatro categorías. Para cada AC están definidos valores específicos de espacios de separación entre tramas de arbitraje (AIFS), CW_{min} y CW_{max} [3] [13].

En EDCA cada trama está parametrizada por su AC_i , y el contador BW se inicia después de sensar el medio libre durante un tiempo $AIFS_i$. A mayor prioridad, los valores de AIFS y CW son menores, aumentando la probabilidad de acceder al canal. Debido a que en una misma AC pueden coexistir tramas de distintas STAs, no se descarta la ocurrencia de colisiones, que se resuelven de una manera parecida a DCF.

En la Tabla 1 se indican, a modo de ejemplo, los valores por defecto correspondientes a la capa física de 802.11b.

La Fig. 3 muestra los intervalos de tiempo $AIFS_i$ y CW_{min} para las cuatro AC. Se observa que hay superposiciones parciales entre las CW de distintas clases, por lo que cabe la posibilidad de que una trama de menor prioridad sea transmitida antes que una de mayor prioridad o bien que colisionen tramas de distintas prioridades.

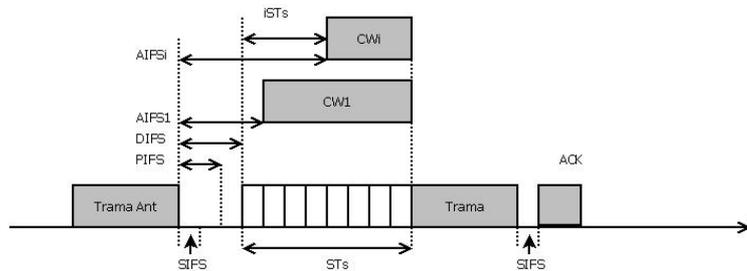


Fig. 2. Esquema básico EDCA

Este comportamiento probabilístico de EDCA lo hace poco apropiado para aplicaciones que requieran garantizar un cierto tiempo de latencia máximo. Sin embargo, resulta de interés que, mediante la selección de valores adecuados de $AIFS_i$, CW_{min} y CW_{max} , se pueda lograr un desempeño acorde a los requerimientos específicos de un determinado sistema [14][15][16][17].

Tabla 1. Parámetros por defecto de EDCA en 802.11b

Parámetros	aCWmin	aCWmax	AIFSN[AC]
AC_BK	31	1023	7
AC_BE	31	1023	3
AC_VI	15	31	2
AC_VO	7	15	2

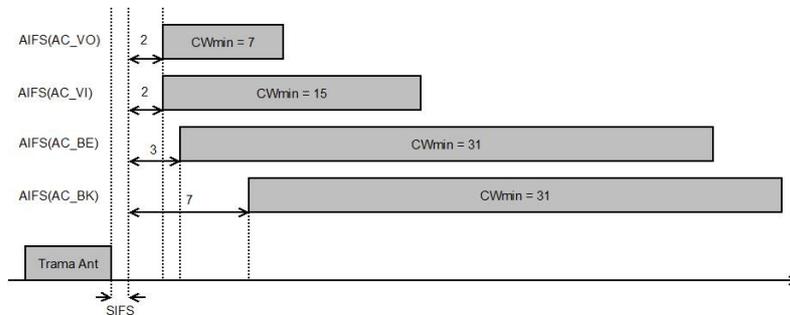


Fig. 3. Esquema básico EDCA

En el presente trabajo se propone un esquema de acceso al medio libre de colisiones, que garantice el tiempo de respuesta de las STAs y mantenga acotado el número de colisiones. Para ello se establecerán tantas AC como tipos de mensajes estén previstos en la red y se eliminará la ventana de contención.

3 EDCA en Tiempo Real: RT-EDCA

El objetivo básico propuesto es adecuar los parámetros de EDCA [18] para eliminar los factores probabilísticos y asegurar una latencia máxima de transmisión, a fin de

que sea apto para tráfico de tiempo real. El nuevo protocolo denominado RT-EDCA está basado en las siguientes pautas de funcionamiento:

- A cada tipo de trama le corresponde una determinada prioridad, conocida desde el instante inicial y distinta a cualquier otra (a la manera del bus CAN) [19].
- La prioridad se indica mediante un valor numérico comprendido entre cero para la máxima y un cierto número positivo N para la mínima (N depende del número de tipos de mensajes que se van a manejar en el contexto de la aplicación).
- En caso de requerimientos simultáneos, se debe transmitir el de mayor prioridad.
- Todas las STA son capaces de escucharse entre sí (no existen nodos ocultos).
- La lógica del mecanismo MAC debe evitar la ocurrencia de colisiones.
- Todo el tráfico es RT-EDCA (no se admite tráfico mixto con EDCA y/o DCF).
- La ausencia de ACK implica que se produjo una colisión o bien que la transmisión se alteró por ruido o interferencia electromagnética.

RT-EDCA introduce las siguientes variantes al protocolo EDCA:

- Se fija $CW_{min} = CW_{max} = 0$, por lo que $BW=0$.
- Se establece un tiempo de arbitraje $AIFS_i$ distinto para cada tipo de trama, tal que a menor $AIFS_i$ mayor prioridad.
- No puede haber dos nodos que transmitan tramas con el mismo $AIFS_i$.

La Fig. 4 presenta aspectos básicos de RT-EDCA. Una STA espera que el medio esté inactivo durante $AIFS_i$ para iniciar la transmisión. Si durante la espera el medio es ocupado, la misma se aborta para reiniciarse cuando el medio vuelva a estar ocioso.

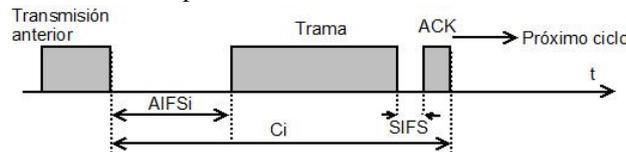


Fig. 4. RT-EDCA: Esquema básico

$AIFS_i$ es el tiempo de arbitraje correspondiente al mensaje de prioridad i . El uso de diferentes $AIFS_i$ evita las colisiones y brinda determinismo, al asegurar que en caso de competencia, el acceso al medio sea obtenido por el mensaje de mayor prioridad.

En la Fig. 5 se muestra el ordenamiento de tres tramas de prioridades 2, 3 y 4. Las tres STA intentan transmitir, pero como $AIFS_2$ es el menor se abortan los intentos de $Trama_3$ y $Trama_4$. Éstas se reinician luego de finalizado el ciclo de $Trama_2$.

La duración de $AIFS_i$ se calcula en función de los valores de $DIFS$ y ST fijados por la norma correspondiente a la capa física (PHY), según la siguiente fórmula:

$$AIFS_i = DIFS + i * ST \quad (1)$$

El tiempo C_i de una transmisión de prioridad i , compuesto por $AIFS_i$, $SIFS$ y los tiempos de transmisión de las tramas i (t_{TRAMA_i}) y ACK (t_{ACK}), será:

$$C_i = AIFS_i + t_{TRAMA_i} + SIFS + t_{ACK} \quad (2)$$

En la Tabla 2 se presentan los valores de $SIFS$, $DIFS$ y ST correspondientes a distintas variantes de capa física.

Tabla 2. Parámetros de 802.11 según la capa física

PHY	Frec.(GHz)	Tasa (Mbps)	SIFS (μs)	DIFS (μs)	Slot time (μs)
802.11b	2.4	11	10	50	20
802.11g	2.4	54	10	28	9
802.11a	5	54	9	16	34

En caso de no recibirse el ACK no se efectúa una retransmisión, sino que se notifica a las capas superiores que la transmisión ha fallado. Estas deben tomar la decisión con respecto a que acciones ejecutar, ya que conocen la lógica y las restricciones temporales de la aplicación. RT-EDCA sólo se encarga de brindar un servicio de comunicación determinístico en cuanto a la latencia máxima.

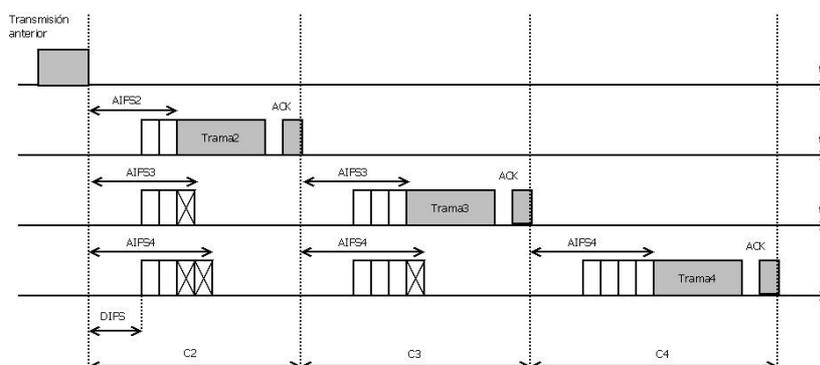


Fig. 5. Ordenamiento de transmisiones según la prioridad de los mensajes

RT-EDCA permite implementar un esquema de tiempo real del tipo Prioridades Monotónicas Crecientes (PMC) [20], asignando prioridades en orden inverso a los períodos. Conociendo t_{TRAMAi} para todos los mensajes, y asumiendo que son periódicos, se puede calcular el mínimo período posible (T_i) para un dado mensaje m_i , en función de todos los demás m_j de mayor prioridad que m_i (siendo $j < i$). Adaptando la clásica fórmula con la que se analiza la factibilidad de un conjunto de tareas periódicas de tiempo real sobre un procesador [21], el mínimo período [22] posible para un mensaje de prioridad i es:

$$T_i \geq \sum_{\forall j < i} \left\lceil \frac{T_i}{T_j} \right\rceil C_j + C_i \quad (3)$$

Donde: T_i, T_j : Período de mensajes de prioridad i y j .

C_i, C_j : Duración del ciclo de transmisión de mensajes de prioridad i y j .

El ejemplo de la Fig. 5 corresponde a mensajes con períodos $T_2 \leq T_3 \leq T_4$.

La fórmula (3) es válida cuando la red está al límite de la saturación de tráfico, es decir cuando siempre hay al menos un requerimiento de transmisión pendiente, a la espera de que finalice la transmisión actual. Sin embargo, en función de la cantidad de mensajes y sus períodos, puede haber intervalos prolongados de silencio. Éste es un

caso particular a analizar, dado que el fin de una transmisión es el evento que reinicia el temporizado en cada nodo y permite mantener el sincronismo.

Si se supera el AIFS más largo ($AIFS_N$) sin haberse efectuado ninguna transmisión, todas las STA deben reiniciar sus temporizadores. En la Fig. 6 se muestra la transmisión de una trama luego de un par de ciclos de inactividad. En la operación real podrían darse intervalos de silencio más largos, obligando a reiniciar los temporizadores luego de cada período $AIFS_N$ de inactividad.

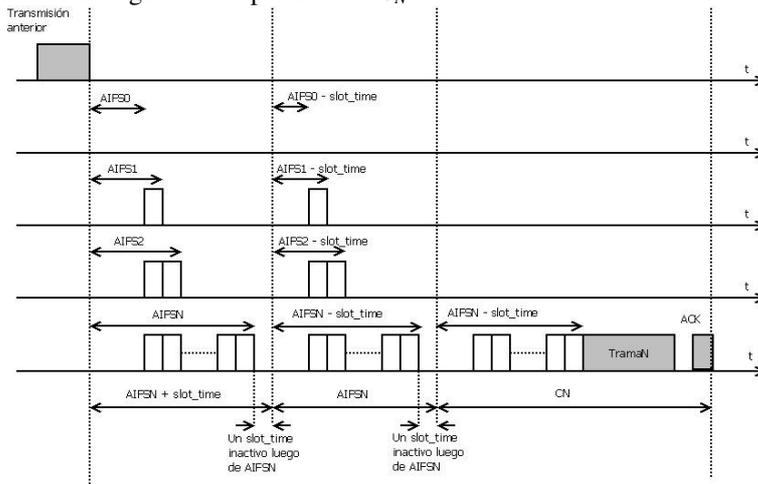


Fig. 6. Temporizados de RT-EDCA en condiciones de no saturación

Cuando se produzcan intervalos de silencio de duración mayor o igual que $AIFS_N$, todos los nodos deben reiniciar sus temporizadores $AIFS_i$, con una periodicidad $AIFS_N$. Sin embargo, el desfasaje entre los relojes locales de los distintos nodos puede conducir a la ocurrencia de una colisión.

En caso de requerimientos cuasi-simultáneos de prioridades consecutivas, debido a los corrimientos que puedan existir entre los relojes de distintos nodos, podría haberse anulado (o reducido casi totalmente) la diferencia de un ST entre ambos niveles de prioridad, dando lugar a una colisión (Fig. 7).

La manera en que cada STA detecta y resuelve una colisión depende del instante en que hayan finalizado las transmisiones. Una vez detectada la colisión y resincronizados los temporizadores $AIFS_i$, cada nodo participante en la colisión reinicia el proceso para intentar una nueva transmisión. Esta es la única situación para la que RT-EDCA tiene prevista una retransmisión, es decir luego de una colisión posterior a un silencio mayor que $AIFS_N$.

La ocurrencia de una colisión permite a todas las STAs resincronizar sus temporizadores $AIFS_i$ a partir de tal evento.

Dado que los intervalos ociosos de duración mayor que $AIFS_N$ pueden llevar a la ocurrencia de colisiones, una forma de prevenirlas es evitar silencios tan prolongados. Para ello, la STA con la menor prioridad ($AIFS_N$) siempre debe realizar una transmisión. Si al vencimiento de $AIFS_N$ no tiene una transmisión pendiente, deberá enviar una trama vacía (“dummy”), a fin de ocupar el medio y permitir que todas las STAs se sincronicen con el fin de la misma.

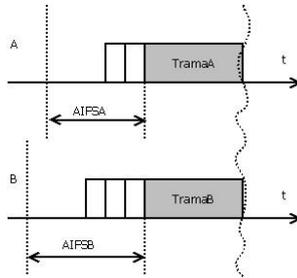


Fig. 7. Colisión por desincronización de los relojes locales

Otra situación a tener en cuenta es la inversión de prioridad que se produce cuando la transmisión de una trama es diferida hasta la finalización de otra de menor prioridad. La Fig. 8 muestra el requerimiento casi simultáneo de Trama₂ y Trama₃. Como el requerimiento de Trama₂ se produjo un instante después de vencido AIFS₂, su transmisión debe esperar al próximo ciclo.

Trama₂ permaneció bloqueada durante un tiempo $B_2 \leq C_3 - AIFS_2$. Considerando a todas las tramas de prioridad inferior a 2, el bloqueo máximo para Trama₂ será:

$$B_2 = \max(C_j) - AIFS_2 \quad \forall j > 2 \quad (4)$$

En general, para una trama de prioridad i , el bloqueo por inversión de prioridad es:

$$B_i = \max(C_j) - AIFS_i \quad \forall j > i \quad (5)$$

Otra situación de bloqueo se da cuando una trama debe esperar hasta el próximo ciclo para ser transmitida, debido a que su requerimiento llegó después de haber vencido su AIFS y no hay transmisiones de menor prioridad que ocasionen inversión de prioridad. El tiempo de bloqueo para este caso sería $B_2 = AIFS_N - AIFS_2$. Como es inferior al del bloqueo por inversión de prioridad, sigue siendo válida la fórmula (5).

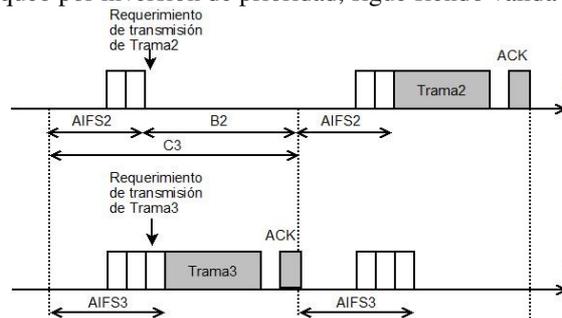


Fig. 8. Ejemplo de inversión de prioridad. Trama₃ es transmitida antes que Trama₂

En base a estas consideraciones, la fórmula (3) se extiende de la siguiente manera:

$$T_i \geq \sum_{\forall j < i} \left\lceil \frac{T_i}{T_j} \right\rceil C_j + C_i + B_i \quad (6)$$

El rendimiento de RT-EDCA se degrada a medida que aumenta el número de mensajes, porque cada mensaje adicionado incrementa en un ST el valor de $AIFS_N$.

Si bien el modelo propuesto se basa en arbitrar el acceso al medio mediante el uso de prioridades diferentes para cada tipo de mensaje, bajo ciertas condiciones puede ser factible utilizar una cantidad de prioridades inferior al número total de tipos de mensajes [23]. La idea sería que dos o más mensajes, generados en el mismo nodo, utilicen el mismo $AIFS_i$, siempre y cuando esto no provoque colisiones, siendo necesario un solo AIFS por nodo. Esto será tratado en futuros trabajos.

4. Evaluación del desempeño

El desempeño de los sistemas de comunicación industrial representa un tema crítico que es acentuado cuando se emplean redes inalámbricas. Estos sistemas por lo general utilizan mensajes periódicos de pequeño tamaño [24], lo que ha sido tenido en cuenta para la evaluación del desempeño de RT-EDCA.

A tal fin se han planteado distintos escenarios, consistentes en una cierta cantidad de mensajes (uno por STA) de igual tamaño (50 bytes de carga útil) y período, a fin de determinar el mínimo período de tiempo necesario para poder despachar tal conjunto de mensajes. Los valores obtenidos para RT-EDCA en base a (6) se compararon con valores obtenidos para RT-EDCA y EDCA estándar en base a simulaciones sobre ns-2 [9] y [25]. Para los cálculos y simulaciones se ha considerado la capa física de 802.11b a 11 Mbps con preámbulo largo (192 μ s), mensajes que transportan 50 bytes (más los 36 bytes de encabezado) y ACK de 14 bytes. Los resultados se presentan en Tabla 3 y Fig. 10.

Tabla 3. Mínimo período según cantidad de mensajes y tamaño fijo (50 bytes).

N° de mensajes	Mínimo período (ms)			Diferencia (%)
	RT-EDCA (Formula 6)	RT-EDCA (ns-2)	EDCA estándar (ns-2)	RT-EDCA vs EDCA
4	2,59	2,66	3,74	28,88 %
8	5,51	5,62	7,08	20,62 %
12	8,74	8,90	9,85	9,64 %
20	16,17	16,41	17,36	5,47 %
28	24,88	25,20	24,84	-1,45 %
40	40,34	40,80	35,63	-14,51 %

Se observa que, para los escenarios considerados, RT-EDCA presenta un mejor desempeño hasta 28 STA, y a partir de ahí la tasa de crecimiento del período mínimo para RT-EDCA aumenta considerablemente, debido a que cada mensaje que se agrega incrementa en un ST al valor de $AIFS_N$.

En la Tabla 3 se observa también que los resultados obtenidos para RT-EDCA mediante simulación coinciden con los valores calculados en base a (6).

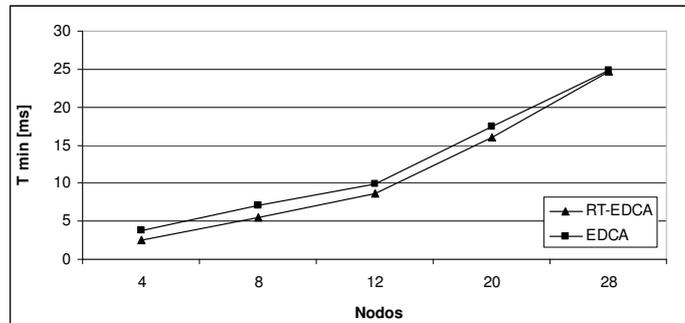


Fig. 10. Gráfico del período mínimo comparativo entre EDCA vs RT-EDCA de Tabla 3.

La última columna de la Tabla 3 muestra la diferencia porcentual entre los períodos mínimos simulados para RT-EDCA y EDCA estándar, obteniéndose mejoras superiores al 20% hasta 8 mensajes de RT.

Cabe mencionar que el período mínimo obtenido para RT-EDCA es fijo, mientras que para EDCA es un promedio, ya que su comportamiento probabilístico da lugar a la ocurrencia de colisiones y retransmisiones (aún en ambientes libres de ruido y/o interferencias) que relajan el tiempo necesario para despachar todos los mensajes, lo que eventualmente puede ocasionar pérdidas de vencimientos.

Al respecto, en la Tabla 4 se presentan las probabilidades de que un mensaje sufra una pérdida de su vencimiento y de que sufra una colisión, usando un período entre mensajes igual al obtenido como “Período mínimo” para “EDCA estándar” (Tabla 3). En cambio, para RT-EDCA usando el período mínimo correspondiente (que es inferior al de EDCA estándar) no hay pérdida de vencimientos ni colisiones.

Tabla 4. Probabilidad de pérdida de vencimientos y de colisión (EDCA estándar).

Probabilidad de:	Número de mensajes / Período (ms)				
	4 / 3,74	8 / 7,08	12 / 9,85	20 / 17,36	28 / 24,84
Pérdida de vencimiento	20 %	8 %	31 %	6 %	1 %
Colisión	40 %	58 %	43 %	66 %	108 %

Por lo general el funcionamiento de un NCS (o WNCS) se basa en la ejecución de un ciclo periódico, cuya duración (t_c) es un parámetro clave que normalmente se establece en la etapa de diseño y que caracteriza el desempeño global de la red [22]. El período mínimo necesario para el nodo de más baja prioridad determina el valor de t_c en un WNCS. La latencia es el tiempo máximo requerido por las STA (sensores, actuadores y controlador) de un WNCS para concretar una transmisión sobre la red. Latencia y período mínimo son parámetros críticos para los lazos de control de los WNCS. RT-EDCA asegura tiempos determinísticos en ambos. Mientras tanto, EDCA genera indeterminación y más aún la pérdida de tramas de datos dentro de t_c .

Por otra parte, se ve que aumentando el tamaño de las tramas, el período mínimo no crece en la misma proporción. Esto permite estimar que una cierta mezcla de mensajes cortos (supervisión y control) y largos (datos, imágenes, etc.) no reduciría sustancialmente la capacidad de manejo de tráfico de tiempo real. Asimismo, se

estima tener una importante mejora cuando sea posible agrupar varios mensajes por nodo con el mismo AIFS, incluso con mensajes de distintos tamaños. En próximos trabajos se tratará de definir la manera de obtener el agrupamiento más conveniente.

5. Conclusiones

RT-EDCA propone un mecanismo de MAC inalámbrico apto para tiempo real, basado en controlar adecuadamente la Ventana de Contención, el contador de retroceso y los AIFS de EDCA. El esquema propuesto permite acotar el mínimo período entre requerimientos de transmisión y evitar la pérdida de paquetes, a fin de utilizarlo como base para la implementación de NCS. La propuesta incluye un esquema de operación libre de colisiones.

Al evaluar el desempeño sobre patrones de tráfico típicos en redes de aplicación industrial, se pudo observar que hasta cierta cantidad de prioridades RT-EDCA presenta un comportamiento determinístico con buen rendimiento y que sería posible combinar mensajes cortos (supervisión y control) y mensajes largos (datos, imágenes, etc.), sin reducir en gran medida el desempeño en tiempo real. Se observó la reducción del rendimiento cuando hay gran cantidad de prioridades, que podría mejorarse mediante el agrupamiento de mensajes bajo una misma prioridad.

En futuros trabajos se propone desarrollar estrategias para implementar RT-EDCA sobre dispositivos estándar del tipo EDCA y por otra parte mejorar el desempeño agrupando mensajes en clases de prioridad.

Referencias

- [1] Willig A., Matheus K. and Wolisz A. "Wireless Technology in Industrial Networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6 (June), pp. 1130-1151 (2005).
- [2] Vanhatupa T., "Design of a Performance Management Model for Wireless Local Area Networks", Tesis Doctoral, Tampere University of Technology, Finlandia (2008).
- [3] "IEEE Std 802.11e; Part 11: Wireless LAN MAC and Physical Layer (PHY) Specifications and Amendment 8: MAC Quality of Service Enhancements" (2005).
- [4] "IEEE Std 802.11; Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", 1999, actualización: Junio (2007).
- [5] Vittorio S. and Lo Bello L., "An Approach to Enhance the QoS Support to Real-Time Traffic on IEEE 802.11e Networks", 6th Workshop On Real Time (RTN07) Italy, (2007).
- [6] Ferré P., Doufexi A., Nix A. and Bull D., "Throughput Analysis of IEEE 802.11 and IEEE 802.11e MAC", WCNC 2004, IEEE Communications Society (2004).
- [7] Pereira da Silva M. and Becker Westphall C., "Performance Analysis and Service Differentiation in the MAC SubLayer of IEEE 802.11e Ad Hoc Networks", Proceedings of the Advanced Industrial Conference on Telecommunications, IEEE (2005).

- [8] Alimenti O., Friedrich G. and Reggiani G., "A Free-Collision MAC Proposal for 802.11 Networks", 28th Edition (SBRC 2010) and 12th Brazilian (WTR 2010), Gramado, ISSN: 2177-496X, pp: 89 – 100 (cd), May 24 – 28, 2010, Brasil.
- [9] The Network Simulator- ns-2, <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html/>>, April 28, 2007.
- [10] Hespanha J. P., Naghshtabrizi P. and Xu Y., "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems", Proc. IEEE, Jan 2007, Vol. 95, pp: 138-162, ISSN: 0018-9219.
- [11] Rachana Ashok Gupta and Mo-Yuen Chow, "Networked Control System: Overview and Research Trends". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N° 7, July 2010.
- [12] Bensaou B., Wang Yu and Chi Chung Ko, "Fair Medium Access in 802.11 based Wireless Ad-Hoc Networks". IEEE/ACM The first Annual Workshop on Mobile Ad-hoc Networking Computing (MobiHoc'00), Boston, EUA, August (2000).
- [13] Willig A., "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection", IEEE Transactions On Industrial Informatics, Vol. 4, N° 2, May (2008).
- [14] Cano C., Bellalta B., et all, "Tuning the EDCA parameters in WLANs with heterogeneous traffic: A flow-level analysis". Computer Networks 54 (2010), 2199–2214, Elsevier.
- [15] Ye Ge, Hou J. C. and Choi S., "An Analytic Study of Tuning Systems Parameters in IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access," Computer Networks, 51(8), pp. 1955-1980, June 2007.
- [16] Serrano P., Banchs A., Patras P. and Azcorra A., "Optimal Configuration of 802.11e EDCA for Real-Time and Data Traffic". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 5, June 2010, pp. 2511-2528.
- [17] Yang-Jing Wu, Jen-Hung Chiu and Tsang-Ling Sheu, "A Modified EDCA with Dynamic Contention Control for Real-Time Traffic in Multi-hop Ad Hoc Networks". Journal of Information Science and Engineering 24, 1065-1079 (2008).
- [18] Moraes R., Vasques F., Portugal P., Fonseca J. A., "How to use the IEEE 802.11e EDCA Protocol when Dealing with Real-Time Communication". 11th Brazilian Workshop on Real-Time and Embedded Systems, May 2009.
- [19] CAN Specification 2.0, Robert Bosch GmbH, can2spec.pdf (1991).
- [20] Liu and Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment", Journal of the ACM, Vol. 20 N° 1, pp. 46-61 Jan. (1973).
- [21] Lehoczky J., Sha L., Ding Y., "The rate monotonic scheduling algorithm: Exact characterization and average case behaviour". Proc. IEEE RTSS, pp. 166-171 (1989).
- [22] Gamba G., Seno L., Vitturi S., "Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks". 8th IEEE Intl. Workshop on Factory Comm. Systems, 2010.
- [23] Friedrich G., O. Alimenti and G. Reggiani, "WRTMAC: A MAC Proposal for 802.11 Networks in Factory Automation". 15th IEEE International Conference ETFA'2010, ISBN: 978-1-4244-6849-2. IEEE Cat N° CFP10ETF-CDR. September 13-16, 2010, Bilbao, Spain.
- [24] Li Gui, Yu-Chu Tian, Colin Fidge, "Performance Evaluation of IEEE 802.11 Wireless Networks for Real-time Networked Control Systems". Proc. of The 2007 International Conference on Embedded Systems and Applications, Las Vegas, Nevada, USA.
- [25] Friedrich G., Alimenti O., Reggiani G., Maidana F., Tonietti S. y De Marco D., "Evaluación de una Variante de Control de Acceso al Medio Inalámbrico para Tiempo Real Basada en 802.11e", XVI CACIC 2010-III WARSO 2010, Bs As - Argentina, octubre, 2010.