

## Adaptación del Protocolo EDCA para Sistemas en Tiempo Real

Guillermo Friedrich<sup>1</sup>, Guillermo Reggiani<sup>1</sup>, Ricardo Cayssials<sup>1</sup>, Sergio Pellegrino<sup>1</sup>  
Gabriela Velasquez<sup>1</sup> y Lorena Cofre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo SITIC – Universidad Tecnológica Nacional – FRBB  
{gfried, ghreggiani, rcayssials, spellegrino}@frbb.utn.edu.ar,  
cofrelorena@gmail.com, gabrielavelasquez2112@hotmail.com

### Resumen.

El Control de Acceso al Medio (MAC) del estándar 802.11e, EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), proporciona cuatro niveles diferenciados de calidad de servicio (QoS) que, si bien es una mejora importante de su mecanismo MAC, no garantiza un retardo limitado en el envío de paquetes. Los sistemas de control de red (NCS) en redes inalámbricas (WNCS) son muy sensibles a las características impredecibles tales como latencia, jitter y pérdida de paquetes. En este trabajo se propone una alternativa que limita la latencia de transmisión y la pérdida de paquetes haciendo un manejo adecuado de la ventana de contención (CW), contador backoff y arbitraje-inter-frame-espacio (AIFS) de EDCA. Las simulaciones fueron realizadas en ns-2.

**Palabras claves:** Wireless LAN, Prioridades, AIFS, EDCA, Determinístico, ns-2.

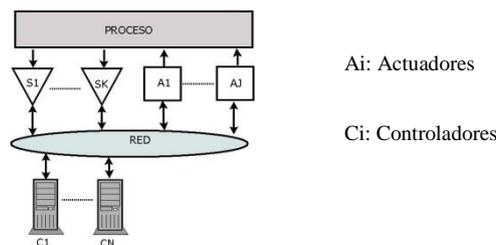
### 1 INTRODUCCION

Las redes locales inalámbricas (WLAN) representan una alternativa de interés para ser utilizadas en ambientes industriales, debido a que permiten reducir el tiempo y costo de instalación, mantenimiento de cableado y conectores y disminuir el impacto que pueden sufrir en ambientes agresivos; como así también favoreciendo la integración de sistemas móviles [1]. Sin embargo ciertos factores, como las interferencias en el canal de radio frecuencia (RF), la movilidad de estaciones y la incertidumbre en el retardo de acceso al medio que presentan ciertos protocolos, afectan a su performance y confiabilidad. A pesar de existir diversas opciones de conectividad inalámbrica, el presente trabajo está centrado en las redes basadas en IEEE 802.11.

El desempeño del protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) es decisivo en el rendimiento de una red [2]. El estándar IEEE 802.11 propone dos mecanismos MAC: Función de Coordinación Puntual (PCF) y Función de Coordinación Distribuida (DCF). En el modo PCF, libre de contención, el Punto de Acceso (Access Point: AP) coordina el acceso de las estaciones (STA) a la red. En DCF, las STAs y, eventualmente, el AP compiten por el acceso al medio. A pesar de sus diferencias, PCF y

DCF emplean CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision-Avoidance) como mecanismo para controlar el acceso al canal. Originalmente IEEE 802.11 no soportaba Calidad de Servicio (QoS) para diferenciar tipos de tráfico. Posteriormente, en 802.11e se agregaron dos esquemas de QoS: Acceso al Canal en Forma Distribuida Mejorada (EDCA) y Acceso al Canal Controlado por Función de Coordinación Híbrida (HCCA) [3]. EDCA es una extensión de DCF que diferencia el tipo de tráfico en cuatro Categorías de Acceso (AC) priorizadas [4], lo que permite mejorar la tasa de transferencia y el tiempo de respuesta. Sin embargo, la reducida cantidad de AC que limita la diferenciación de tráfico con distintas restricciones temporales [5] y la base probabilística de EDCA, son desfavorables para aplicaciones de tiempo real (RT).

El campo de aplicación que se tiene como objetivo en el presente trabajo es el de los sistemas de control basados en red [6] (NCS), en particular aquellos basados en redes inalámbricas (WNCS) (Fig. 1). Las funciones de estos sistemas son la adquisición de información (sensores y/o usuarios), comando (controladores y/o usuarios) y control (actuadores), usando una red inalámbrica como nexo entre los distintos elementos.



**Fig. 1.** Estructura típica de un NCS / WNCS

El presente trabajo está orientado a adecuar determinados parámetros de 802.11e, que permitan utilizarlo como base para implementar WNCS [7]. El objetivo es lograr una latencia predecible para el acceso al medio basado en EDCA, mediante la modificación del manejo de la Ventana de Contención (CW), el contador de retroceso (backoff) y los Espacios entre Tramas para Arbitraje (AIFS). Inicialmente se propone utilizar tantas AC, como tipos de mensajes se vayan a transferir por la red [8][9], para luego agregar la opción de agrupar mensajes en “clases de prioridad”, a fin de optimizar el rendimiento [10][11]. En este trabajo se propone usar hasta cuatro AC por nodo, a fin de mantener la compatibilidad con EDCA en cuanto a la cantidad de AC que puede manejar cada nodo: cuatro. Por ese motivo, la propuesta inicial se había denominado WRTMAC (Wireless Real-Time MAC) y esta otra se ha denominado RT-EDCA (Real-Time EDCA), dando a entender que es una variante de EDCA para tiempo real. La mencionada diferencia también se reflejada en los ensayos y simulaciones. Los resultados teóricos fueron comprobados mediante simulaciones usando ns-2 [12], comparándolos con EDCA estándar.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: en 2 se describe la operación de EDCA, en 3 se analizan sus limitaciones para tiempo real, en 4 se presentan los resultados de las simulaciones sobre ns-2 y en 5 las conclusiones.

## 2 EDCA en 802.11e.

EDCA controla el acceso al medio inalámbrico en base a un mecanismo de QoS que cuenta con cuatro AC para mapear los ocho niveles de Prioridad de Usuario (UP) definidos en 802.1p /802.1q. Se destina AC\_BK (Background) para los niveles de prioridad inferiores (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). Cada AC ejecuta un proceso de espera (backoff) independiente, denominado ventana de retroceso (BW: backoff window), para determinar el instante de inicio de la transmisión de sus tramas. El proceso de BW para cada AC ( $AC_i$ ), está definido por cuatro parámetros configurables: AIFS,  $CW_{\min}$ ,  $CW_{\max}$  y  $TXOP_{\limite}$  [13].

La  $AC_i$  que tiene una trama para transmitir espera que el canal permanezca ocioso durante un tiempo  $AIFS_i$ , entonces inicializa el contador BW con un valor aleatorio dentro del rango  $[0, CW_{i-1}]$  (donde  $CW_i$  es la ventana de contención de la  $AC_i$ ). El contador de BW cuenta ranuras de tiempo (ST: slot-time) en forma decreciente. Si la cuenta llega a cero la STA inicia la transmisión. Si el medio es ocupado por otra transmisión antes de que BW llegue a cero, se suspende la cuenta hasta que el medio vuelva a estar ocioso durante un tiempo  $AIFS_i$ . En el caso de que BW llegue a cero en dos o más  $STA_s$  al mismo tiempo se producirá una colisión.

$CW_i$  comienza con un valor mínimo  $CW_{i-\min}$ ; si el contador de  $BW_i$  llega a cero estando el medio ocupado o bien si se produce una colisión, se duplica el valor de  $CW_i$  para el próximo intento (hasta un máximo igual a  $CW_{i-\max}$ ).

Luego de un tiempo SIFS (tiempo corto de separación entre tramas) posterior a la correcta recepción de una trama, la STA receptora envía una trama de reconocimiento (ACK) (Fig. 2). Si la STA transmisora no recibe el ACK, asume que una colisión o interferencia (ruido) ha corrompido la trama y en consecuencia es necesario efectuar una retransmisión.

Tanto la competencia por el acceso al medio basada en esperas aleatorias como la eventual necesidad de efectuar retransmisiones contribuyen a causar incertidumbre en el tiempo necesario para concretar una transmisión.

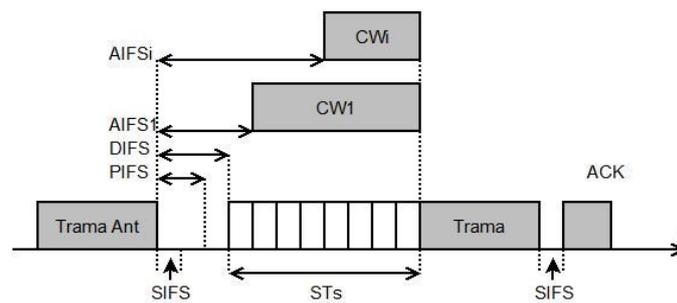


Fig. 2. Esquema básico de EDCA.

En la Fig. 3 se muestra la relación entre los intervalos  $AIFS_i$  y  $CW_{\min}$  para las cuatro AC. Se observa que hay superposición parcial entre  $CW$  de distintas clases, por lo que cabe la posibilidad de que una trama de menor prioridad sea transmitida antes que otra de mayor prioridad, o bien que colisionen tramas de diferente prioridad.

Este comportamiento probabilístico de EDCA lo hace poco apto para aplicaciones que requieran garantizar una cierta latencia máxima entre la llegada del requerimiento de transmisión y la recepción del correspondiente ACK.

Sin embargo, resulta de interés que, mediante la selección de valores adecuados de  $AIFS_i$ ,  $CW_{\min}$  y  $CW_{\max}$  se pudiera lograr un desempeño adecuado para los requerimientos específicos de un determinado sistema [14][15][16].

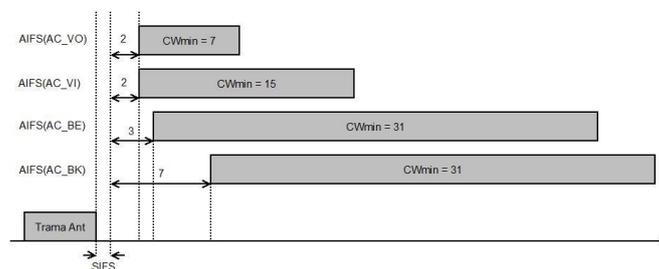


Fig. 3. Esquema EDCA:  $AIFS_i$  y  $CW_{\min}$  para cada  $AC_i$ .

En el presente trabajo se propone un esquema de acceso al medio libre de colisiones que garantice el tiempo de respuesta. La idea es utilizar una  $AC_i$  por cada tipo de mensaje que se vaya a cursar por la red y forzar  $CW$  a cero, de forma tal que si el canal está ocioso por un período de tiempo igual a  $AIFS_i$ , la STA de clase  $AC_i$  podrá transmitir una trama sin colisionar con otras.

### 3 RT-EDCA: EDCA en Tiempo Real.

El objetivo propuesto es configurar los parámetros de EDCA [15], para eliminar los factores probabilísticos y garantizar 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 y condiciones de funcionamiento:

- A cada tipo de trama le corresponde una determinada prioridad, conocida desde el instante inicial y diferente a cualquier otra (a la manera del bus CAN).
- La prioridad se indica mediante un valor numérico comprendido entre cero (máxima) y N (mínima). N depende de la cantidad de clases de mensajes que se van a manejar en el contexto de la aplicación.
- En caso de haber dos o más requerimientos simultáneos, se debe transmitir siempre el de mayor prioridad.
- Todas las STA se escuchan entre sí (no hay 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 no recepción de ACK, implica que la transmisión de la trama o el ACK fue alterada por ruido o interferencia.

RT-EDCA introduce las siguientes variantes a EDCA:

- $CW_{\min} = CW_{\max} = 0$ , por lo que:  $BW=0$ .
- El tiempo de arbitraje  $AIFS_i$  es distinto para cada tipo de trama, siendo el menor  $AIFS_i$  para la máxima prioridad.

La Fig. 4 presenta los aspectos básicos de RT-EDCA. Una STA debe esperar que el medio permanezca inactivo durante un tiempo  $AIFS_i$  para iniciar su transmisión. Si durante la espera se detecta que el medio fue ocupado, a diferencia de EDCA, se aborta el intento para reiniciarse desde cero cuando el medio vuelva a quedar libre.

El uso de diferentes  $AIFS_i$  evita las colisiones y brinda determinismo, porque en caso de competencia el mensaje de mayor prioridad (menor  $AIFS_i$ ) obtendrá el acceso al medio. Esto se debe a que no hay dos nodos con igual  $AIFS_i$ .

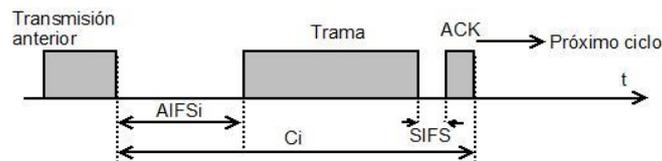


Fig. 4. RT-EDCA: Esquema Básico.

En la Fig. 5 se muestra el ordenamiento de tres tramas de prioridades 2, 3 y 4. Tres STA intentan transmitir, pero como  $AIFS_2$  es el menor se abortan los intentos de Trama<sub>3</sub> y Trama<sub>4</sub>. Estas se reinician luego de finalizado el ciclo de Trama<sub>2</sub>.

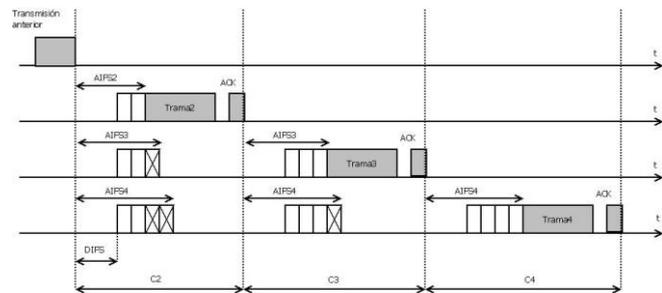


Fig. 5. Ordenamiento de transmisiones según la prioridad de los mensajes.

La duración de  $AIFS_i$  depende de los valores de DIFS (Espacio de Separación entre Tramas Distribuido) y el ST correspondientes a la capa física (PHY):

$$AIFS_i = DIFS + i * ST \tag{1}$$

$C_i$  es la duración del ciclo de transmisión de una trama de prioridad  $i$ , compuesto por AIFS <sub>$i$</sub> , el tiempo de transmisión de la trama ( $t_{TRAMA_i}$ ), SIFS y el tiempo de transmisión del ACK ( $t_{ACK}$ ), según lo expresa la siguiente fórmula:

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

En la Tabla 1 se presentan los valores de SIFS, DIFS y ST correspondientes a distintas variantes de capa física.

En caso de no recibirse el ACK, la entidad MAC de RT-EDCA no reintenta la retransmisión, sino que notifica a las capas superiores que la transmisión ha fallado. Éstas deben tomar la decisión con respecto a que acciones ejecutar, ya que conocen la lógica y las restricciones temporales de la aplicación. La misión de RT-EDCA es brindar un servicio de comunicación del “mejor intento” (best-effort), con comportamiento determinístico en cuanto a la latencia máxima.

**Table 1.** PARÁMETROS DE 802.11 SEGÚN LA CAPA FÍSICA

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

RT-EDCA permite planificar el envío de mensajes periódicos según Prioridades Monotónicas Crecientes (PMC) [17], asignando prioridades en orden inverso a los períodos. Conociendo  $t_{TRAMA_i}$  para todos los mensajes, se puede calcular el mínimo período posible ( $T_i$ ) para un dado mensaje  $msj_i$ , en función de todos los demás mensajes  $msj_j$  de mayor prioridad que  $msj_i$  (siendo  $j < i$ ). En base a la clásica fórmula con la que se analiza la factibilidad de un conjunto de tareas periódicas de tiempo real sobre un procesador [18], se puede calcular el mínimo período [19] posible para un mensaje de prioridad  $i$ , de la siguiente manera:

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

Donde:  $T_i$ ,  $T_j$ ,  $C_i$ ,  $C_j$ : Períodos y ciclos de transmisión de mensajes de prioridad  $i$  y  $j$ .

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

El análisis precedente no incluye retardos adicionales causados por colisiones. Para evitar las colisiones es necesario que la red trabaje al límite de la saturación, es decir, que siempre haya al menos un requerimiento de transmisión pendiente a la espera de que finalice la transmisión actual. Si se produjeran intervalos de silencio prolongados (mayores que AIFS <sub>$n$</sub> ), el desfasaje entre los relojes locales de los distintos nodos

podría conducir a la ocurrencia de una colisión, ya que los temporizadores AIFS<sub>1</sub> se reinician con el evento de finalización de cada transmisión [9].

A tal fin, la STA con la menor prioridad (AIFS<sub>n</sub>) siempre debe efectuar una transmisión. Para ello, si al vencimiento de AIFS<sub>n</sub> dicha STA no tiene pendiente un requerimiento real de transmisión, deberá enviar una trama vacía (“dummy”), para ocupar el medio y permitir que las demás STA<sub>s</sub> se sincronicen con el fin de la misma.

### 3.1 Inversión de Prioridad.

Se produce una inversión de prioridad cuando la transmisión de una trama resulta diferida hasta la finalización de otra de menor prioridad. A modo de ejemplo, la Fig. 6 muestra el requerimiento casi simultáneo de la Trama<sub>2</sub> y la Trama<sub>3</sub>. Como el requerimiento de la Trama<sub>2</sub> arribó un instante después de vencido AIFS<sub>2</sub>, su transmisión debe esperar al próximo ciclo. La Trama<sub>2</sub> 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 que podría sufrir la Trama<sub>2</sub> es:

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

Generalizando, el bloqueo por inversión de prioridad para la Trama<sub>i</sub>, es:

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

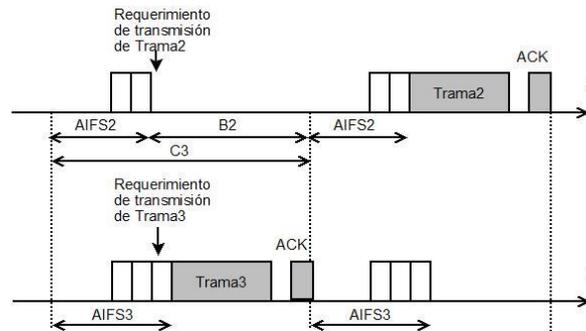


Fig. 6. Inversión de prioridad: Trama3 transmitida antes que Trama2

Luego, 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  $T_i$  mínimo calculado para la tarea de menor prioridad, garantiza que no habrá casos de inanición para los mensajes de baja prioridad.

### 3.2 Agrupamiento de mensajes en Clases de Prioridad.

Como el rendimiento de RT-EDCA tiende a degradarse al aumentar la cantidad de mensajes, porque cada uno que se agrega incrementa el valor de  $AIFS_n$  (y  $C_n$ ) en un ST, sería deseable que  $AIFS_n$  pudiera ser menor que la cantidad de tipos de mensajes.

Esto es posible en el caso de mensajes originados en un mismo nodo, ya que podrían utilizar el mismo valor de  $AIFS_i$  sin colisionar entre sí. La idea es agrupar varios mensajes por AC. Cada AC representaría a una “clase de prioridad”, según un concepto similar al de planificación de tareas con número limitado de prioridades [20]. A cada AC le corresponde un  $AIFS_i$  único en todo el conjunto.

Por compatibilidad con EDCA, cada nodo podrá soportar hasta cuatro AC, siendo estas distintas en cada uno de ellos. De este modo, en las capas superiores se podría aplicar el esquema de prioridades de usuario (UP) definido por 802.1D, mapeando cada UP a una de las cuatro AC.

Un objetivo debería ser utilizar la mínima cantidad de clases necesaria, a fin de minimizar el valor de  $AIFS_N$ . Lo ideal sería utilizar un único  $AIFS_i$  por nodo, si esto permitiera cumplir con las restricciones de tiempo real de todos los mensajes.

El ordenamiento de mensajes dentro de cada clase se realiza mediante una cola, sin distinguir prioridades.

Las pautas de operación de RT-EDCA con agrupamiento en clases son:

- En caso de competencia, siempre se enviará primero aquel mensaje perteneciente a la clase con menor  $AIFS_i$ .
- Como dentro de una clase no se distinguen prioridades, y los mensajes se despachan de acuerdo al orden de llegada, la posibilidad de que ocurra una inversión de prioridad deberá ser tenida en cuenta durante el análisis de factibilidad.

### 3.3 Análisis de factibilidad para un conjunto de mensajes agrupados en clases

El análisis anterior, que concluye en la fórmula (6), debe ser reformulado para tener en cuenta el agrupamiento de mensajes en clases de prioridad.

Se considera un conjunto de  $M$  mensajes:  $\{msj_1, \dots, msj_i, \dots, msj_M\}$ , con período  $T_i$  y duración  $t_{TRAMa_i}$ , agrupados en  $Q$  clases:  $\{AC_0, AC_1, \dots, AC_{Q-1}\}$  ( $AC_0$  es la de máxima prioridad y  $AC_{Q-1}$  la de mínima). El tiempo de arbitraje entre tramas correspondiente a la clase  $AC_k$  es:

$$AIFS_k = DIFS + k * ST \quad (7)$$

Se define  $K(msj_i)$ , que indica la clase a la que pertenece  $msj_i$  ( $0 \leq K(msj_i) < Q$ ), lo que permite expresar la fórmula (7) en función de la clase a la que pertenece  $msj_i$ :

$$AIFS_{msj_i} = DIFS + K(msj_i) * ST \quad (8)$$

Teniendo en cuenta el tiempo de arbitraje calculado mediante (8), se puede reescribir (2) para calcular el tiempo total de transmisión para la trama  $i$ -ésima:

$$C_i = AIFS_{msj_i} + t_{trama_i} + SIFS + t_{ACK} \quad (9)$$

Para determinar si un dado conjunto de mensajes agrupados en clases podrá cumplir con los requerimientos de tiempo real, se debe evaluar si el período de cada mensaje  $msj_i$  cumple con la siguiente condición:

$$T_i \geq \sum_{\forall j|K(msj_j) < K(msj_i)} \left[ \frac{T_i}{T_j} \right] C_j + \sum_{\forall j|K(msj_j) < K(msj_i)} C_j + B_i \quad (10)$$

El primer término de (10) computa el tiempo requerido para transmitir todas las tramas pertenecientes a las clases de mayor prioridad que la clase a la que pertenece  $msj_i$ , que hubieran sido requeridos hasta el instante  $T_i$ . El segundo término computa el tiempo total requerido para transmitir una vez todas las tramas de la clase a la que pertenece  $msj_i$  (incluido  $msj_i$ ) (se considera el peor caso posible para  $msj_i$ , que sea transmitido luego de todos los demás mensajes de su clase). El último término computa el tiempo de bloqueo por inversión de prioridad que podría sufrir  $msj_i$ , de acuerdo a lo detallado en 3.1.

#### 4 Evaluación del Desempeño.

Los NCS (y WNCS) por lo general utilizan mensajes periódicos de pequeño tamaño [21], lo que se ha tenido en cuenta para la evaluación del desempeño de RT-EDCA. A tal fin se han realizado dos ensayos, el primero adoptando para los cálculos y simulaciones (ns-2) los parámetros de capa física de 802.11b, a 11 Mbps, preámbulo largo (192  $\mu$ s), carga útil de 50 y 500 bytes (más 36 bytes de encabezado) y ACK de 14 bytes. El segundo fue realizado solo para una carga de 50 bytes, para comparar los tiempos de respuesta de EDCA vs RT-EDCA.

En el primer ensayo se considera un conjunto de 40 nodos que transmiten mensajes periódicos de igual tamaño y período. Partiendo de un instante crítico, se evaluó mediante simulaciones el tiempo requerido para completar la última transmisión. El resultado obtenido es el mínimo período que debería asignarse a cada uno de los mensajes de este conjunto.

En la Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones, tanto para RT-EDCA como para EDCA estándar. Se observa que RT-EDCA presenta un mejor desempeño hasta 28 nodos (con paquetes de 50 bytes) y hasta 40 nodos (con paquetes de 500 bytes). A partir de allí es superado por EDCA, debido a que los valores crecientes de AIFS aumentan la duración del ciclo de transmisión de cada trama. En tal sentido coincide con lo esperado, tal como se señaló en la sección 3.

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).

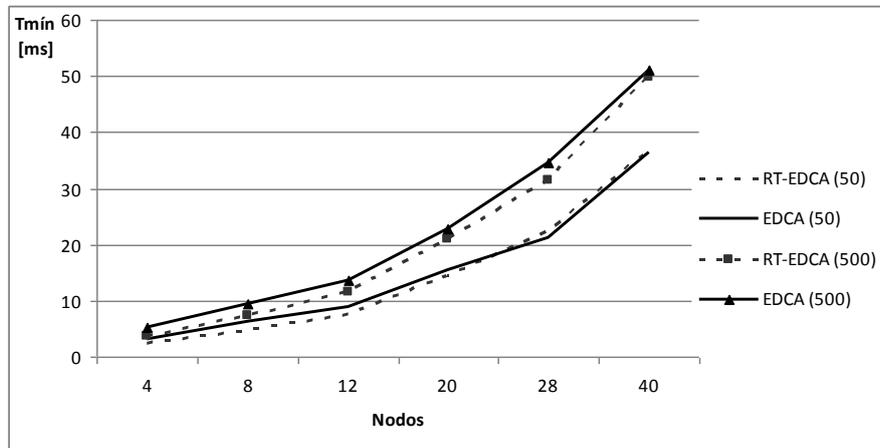
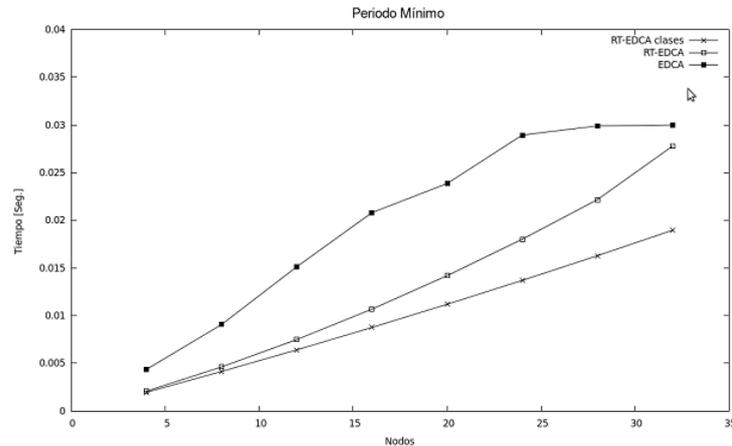


Fig. 7. Período mínimo comparativo entre RT-EDCA vs EDCA.

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 [18]. El período mínimo requerido por el nodo de más baja prioridad, determina el valor de  $T_c$ . La latencia es el tiempo máximo que pueden tolerar las STA (sensores, actuadores y controlador) para concretar una transmisión. Latencia y período mínimo son parámetros críticos para los NCS (y WNCS). RT-EDCA brinda determinismo en ambos parámetros, mientras que EDCA genera indeterminación y pérdida de mensajes. Por otra parte, se ve que aumentando el tamaño de las tramas, el período mínimo no crece en igual proporción. Esto permite suponer que sería posible una cierta mezcla de mensajes cortos (supervisión y control) y largos (datos, imágenes, etc.), sin reducir sustancialmente el manejo de tráfico de tiempo real.

El segundo ensayo (Fig. 8) considera un escenario con 32 nodos que transmiten mensajes periódicos de igual tamaño y período, donde se comparan los resultados para EDCA (estándar), RT-EDCA (sin clases) y RT-EDCA con clases de prioridad, agrupando los 32 mensajes en 8 nodos de 4 mensajes por nodo. Aquí se evalúa el tiempo de respuesta, es decir el tiempo que tarda un mensaje desde que sale del nodo emisor hasta que llega el ACK del nodo receptor.



**Fig. 8.** Tiempo de Respuesta: EDCA vs RT-EDCA con y sin clases.

Puede observarse que RT-EDCA con clases tiene un mejor rendimiento que RT-EDCA sin clases y EDCA, teniendo un tiempo de respuesta menor de hasta un 30%.

## 5 Conclusiones.

RT-EDCA propone un mecanismo de MAC inalámbrico apto para ser usado en la implementación de WNCS. Se basa en modificar parcialmente los parámetros (CW, BW y AIFS) de EDCA sobre hardware estándar. El esquema propuesto permite garantizar una latencia máxima de transmisión y, en escenarios típicos, soporta mensajes con tiempos de vencimiento inferiores a los que admite EDCA.

El punto de partida fue tratar de eliminar los aspectos probabilísticos de EDCA, como por ejemplo las colisiones, que impiden garantizar la respuesta temporal.

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. Se observó la reducción del rendimiento cuando se maneja una gran cantidad de prioridades, lo que se soluciona mediante el agrupamiento de mensajes en clases de prioridad.

A futuro está previsto continuar trabajando sobre los siguientes tópicos: evaluar RT-EDCA con tráfico mixto (mensajes cortos para supervisión y control; mensaje largos para datos, imágenes, etc.); implementar RT-EDCA sobre dispositivos EDCA estándar; desarrollar un procedimiento para la asignación óptima de clases y prioridades.

## 6 Referencias

1. Willig A., Matheus K. and Wolisz A., "Wireless Technology in Industrial Networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6 (June 2005), pp. 1130-1151.

2. 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, 2000.
3. "IEEE Std 802.11; Part 11 (2007): Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", 1999.
4. 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, Italy, 2007.
5. 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.
6. Hespanha J., Naghshtabrizi P. and Xu Y., "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems", Proc. IEEE, Jan 2007, Vol. 95, pp: 138-162.
7. Rachana Ashok G. and Mo-Yuen Chow, "Networked Control System: Overview and Research Trends", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, N° 7.
8. Pereira da Silva M. and Becker Westphall C., "Performance Analysis and Service Differentiation in the MAC SubLayer of IEEE 802.11e Ad Hoc Networks", Proc. of the Advanced Industrial Conf. on Telecommunications, IEEE, 2005.
9. Alimenti O., Friedrich G. and Reggiani G., "A Free-Collision MAC Proposal for 802.11 Networks", 28th Ed. (SBRC 2010) and 12th Brazilian (WTR 2010), Gramado, Brasil, pp: 89-100, May 24- 28.
10. Friedrich G., O. Alimenti and G. Reggiani., "WRTMAC: A MAC Proposal for 802.11 Networks in Factory Automation". 15th IEEE Intl. Conference ETFA'2010, 13-16 Sep 2010, Bilbao, Spain.
11. 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
12. The Network Simulator-ns-2 <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>
13. Willig A., "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection", IEEE Transactions On Industrial Informatics, 2008, Vol. 4, N° 2.
14. 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, 2009.
15. Serrano P., Banchs A., Patras P. and Azcorra A., "Optimal Configuration of 802.11e EDCA for Real-Time and Data Traffic". IEEE Trans. on Vehicular Tech., Vol. 59, No. 5, Jun 2010, pp. 2511-2528.
16. 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, 2008, pp. 1065-1079.
17. Liu and Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment", JACM, Vol. 20 N° 1, pp. 46-61, 1973.
18. Lehoczky J., Sha L., Ding Y., "The rate monotonic scheduling algorithm: Exact characterization and average case behaviour", Proc. IEEE RTSS, 1989, pp. 166-171.
19. Gamba G., Seno L., Vitturi S., "Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks". 8th IEEE Intl. Workshop on Factory Comm. Systems, 2010.
20. Katcher, D., S. Sathaye, y J. Strosnider, "Fixed priority scheduling with limited priority levels", IEEE Trans. on Computers, 1996, 44, 9.
21. Li Gui, Yu-Chu Tian, Colin Fidge, "Performance Evaluation of IEEE 802.11 Wireless Networks for Real-time Networked Control Systems". Proc. Intl. Conf. Embedded Syst. and Appl., Las Vegas, 2007.