

## Evaluación de EDCA 802.11e en Tiempo Real con Agrupamiento por Clases de Prioridad

Omar Alimenti<sup>1,2</sup>, Guillermo Reggiani<sup>1</sup>, Guillermo Friedrich<sup>1</sup>, Santiago Tonietti<sup>1</sup>,  
Gabriela Velasquez<sup>1</sup> y Lorena Cofre<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>IIIE - Universidad Nacional del Sur – DIEC  
iealimen@criba.edu.ar

**Resumen.** Un sistema de control basado en red (NCS) sobre redes inalámbricas (WNCS) presenta problemas de confiabilidad y temporizado propios de los canales de radio y de los mecanismos de control de acceso al medio (MAC) que provocan latencias impredecibles y pérdida de paquetes. El MAC de EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), del estándar 802.11e, provee cuatro niveles de Calidad de Servicio (QoS) diferenciados, que no garantizan un retardo acotado para el envío de paquetes. En [1] se propuso una variante de EDCA para tiempo real, denominada RT-EDCA (Real Time EDCA). RT-EDCA ofrece dos alternativas, la primera asigna una prioridad a cada mensaje y la segunda asigna una prioridad a un grupo de mensajes (agrupamiento por clases de prioridades). Este trabajo compara el rendimiento de RT-EDCA en sus dos alternativas y EDCA. El tiempo de respuesta y el periodo mínimo fueron los parámetros evaluados por medio de simulaciones realizadas en ns-2, para llevar a cabo las comparaciones.

**Palabras claves:** MAC, EDCA, NCS, Redes Inalámbricas, Tiempo de Respuesta.

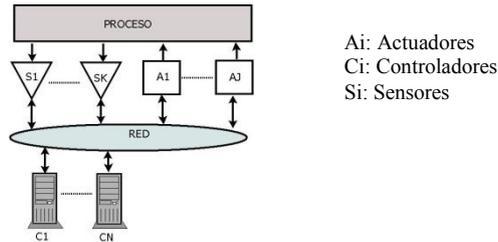
### 1 Introducción

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 [2].

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 WLANs basadas en IEEE 802.11.

El protocolo de MAC es decisivo en el rendimiento de una red de datos [3]. El estándar 802.11e [4] 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 propone cuatro Categorías de Acceso (AC) priorizadas [5]. A pesar de ello, 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).



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

El campo de aplicación que se tiene como objetivo es el de los NCS (Fig. 1) [7] y en particular los WNCS, cuyas capacidades son la adquisición de información (sensores/usuarios), el comando (controladores/usuarios), el control (actuadores) y la red.

En [1] se presenta una mejora al mecanismo EDCA, denominado RT-EDCA, el cual logra un retardo de acceso al medio predecible sobre el esquema EDCA, modificando el manejo de la Ventana de Contención (CW), el contador de retroceso (backoff) y los espacios entre tramas para el arbitraje (AIFS) del MAC. RT-EDCA esta basado en una propuesta inicial que consiste en utilizar tantas AC como tipos de mensajes existan en la red [8] [9] y opcionalmente agrupar mensajes en “clases de prioridad” [10].

El presente trabajo está orientado a la evaluación del mecanismo RT-EDCA presentado en [1], el cual logra un retardo de acceso al medio predecible sobre el esquema EDCA. Los parámetros para la evaluación son el Tiempo de Respuesta y el Período Mínimo. La simulaciones fueron realizadas en ns-2 [11] y las gráficas en GNUPLOT [12].

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: en II se resume el funcionamiento de EDCA, en III se presenta el mecanismo RT-EDCA, en IV se muestran los resultados obtenidos mediante simulaciones y en V se presentan las conclusiones.

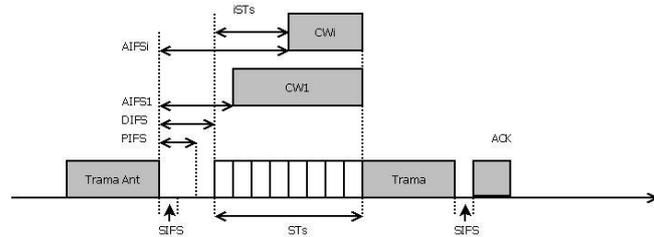
## 2 Funcionamiento de EDCA

EDCA controla el acceso al canal inalámbrico en base a un mecanismo (Fig. 2) 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 alguna de esas cuatro categorías.

Cada AC ejecuta un proceso de tiempo 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, está definido por cuatro parámetros configurables: Espacio de Separación Entre Tramas para Arbitraje (AIFS),  $CW_{\min}$ ,  $CW_{\max}$  y TXOPlímite [13].

Una categoría de nivel de prioridad  $i$  ( $AC_i$ ) que tiene una nueva trama a transmitir, monitorea la actividad en el canal. Si el canal está ocioso por un período de tiempo igual a  $AIFS_i$ , la  $AC_i$  comienza el proceso de backoff inicializando al contador BW con un valor aleatorio dentro del rango  $(0, CW_{i-1})$ , donde  $CW_i$  es la ventana de contención de la  $AC_i$ . BW es un contador decreciente de ranuras de tiempo (ST: slot-time), que dependen de la capa física. Si el medio permanece ocioso durante  $CW_i$ , la estación (STA) inicia la transmisión.  $CW_i$  comienza con un valor mínimo  $CW_{i-\min}$ , y si  $BW_i$  llega a cero estando el medio ocupado o bien si se produce una colisión,  $CW$  duplica su valor para el siguiente intento (hasta un máximo igual a  $CW_{i-\max}$ ). 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  $AIFS_i$ . Por otra parte, si  $BW$  llega a cero en dos o más STAs al mismo tiempo se producirá una colisión.

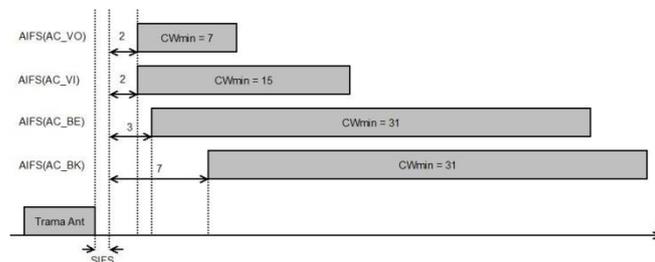
Luego de un tiempo SIFS (tiempo corto de separación entre tramas) posterior a la correcta recepción de una trama, la STA receptora envía una trama de reconocimiento (ACK) (Fig. 2). Si la STA transmisora no recibe el ACK, asume que pudo haber ocurrido una colisión o interferencia (ruido) en el medio físico y entonces es necesario efectuar una retransmisión. Esto causa una incertidumbre en el tiempo requerido para concretar una transmisión, impidiendo asegurar una latencia máxima necesaria para aquellas aplicaciones con requerimientos temporales estrictos. El tiempo de latencia se define como el tiempo transcurrido desde el arribo de una solicitud de transmisión, hasta la llegada del ACK.



**Fig. 2.** Esquema básico EDCA

La Fig. 3 muestra 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 es posible que una trama de menor prioridad se transmita antes que otra de mayor prioridad, o bien que colisionen tramas de distinta prioridad.

Este comportamiento probabilístico de EDCA lo hace poco apto para aplicaciones que requieran un cierto tiempo de latencia máximo garantizado. 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 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 la siguiente sección describiremos el mecanismo RT-EDCA propuesto en [1] el cual optimiza el rendimiento de EDCA.

### 3 Mecanismo RT-EDCA

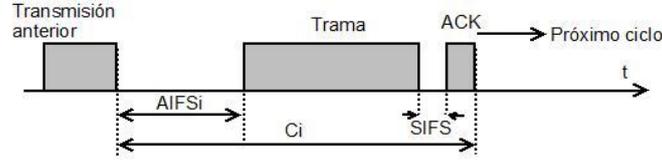
En esta sección se describe el funcionamiento de RT-EDCA [1], el cual se basa en las siguientes pautas:

- 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 de transmisión, 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 el medio 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.



**Fig. 4.** RT-EDCA: Esquema básico

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  $AIFS_i$ .

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

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

$C_i$  es la duración del ciclo de transmisión de una trama de prioridad  $i$ , compuesto por  $AIFS_i$ , 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 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.

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 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  $j$

### 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. 5 muestra el requerimiento casi simultáneo de Trama<sub>2</sub> y Trama<sub>3</sub>. Como el requerimiento

de Trama<sub>2</sub> arribó un instante después de vencido AIFS<sub>2</sub>, su transmisión debe esperar al próximo ciclo. 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 Trama<sub>2</sub> es:

$$B_2 = \text{máx}(C_j) - AIFS_2 \quad \forall j > 2 \quad (4)$$

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

$$B_i = \text{máx}(C_j) - AIFS_i \quad \forall j > i \quad (5)$$

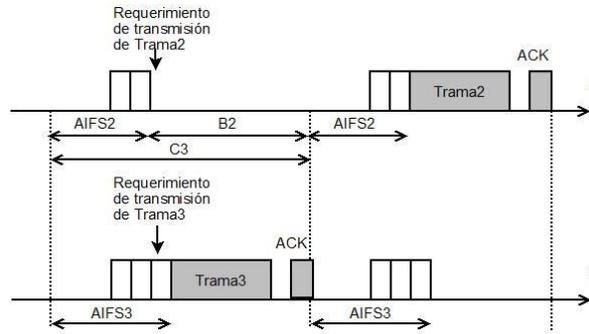


Fig. 5. Ejemplo de inversión de prioridad. Trama<sub>3</sub> es transmitida antes que Trama<sub>2</sub>

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<sub>n</sub> (y C<sub>n</sub>) en un ST, sería deseable que AIFS<sub>n</sub> 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<sub>i</sub> 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. A cada AC le corresponde un AIFS<sub>i</sub> único en todo el conjunto.

Por compatibilidad con EDCA, cada nodo podrá soportar hasta cuatro AC. 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.

La implementación de RT-EDCA con agrupamiento en clases plantea los siguientes dos problemas a resolver:

- a) Dado un cierto conjunto de nodos y mensajes agrupados en clases, se debe contar con un procedimiento que permita determinar si se logrará cumplir con las metas temporales de todos los mensajes. Una solución a este problema es desarrollada más adelante, en el presente trabajo.
- b) Dado un cierto conjunto de nodos y mensajes, se debe contar con un procedimiento que permita determinar el esquema de agrupamiento más conveniente. Ésto será tratado en un próximo trabajo, como continuación del presente.

#### *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  $t_{TRAMai}$ , 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 describir (2) para calcular el tiempo total de transmisión para la trama  $i$ -ésima:

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

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:

$$T_i \geq \sum_{\substack{\forall j, \\ K(msj_j) < K(msj_i)}} \left\lceil \frac{T_i}{T_j} \right\rceil C_j + \sum_{\substack{\forall j, \\ K(msj_j) < K(msj_i)}} C_j + B_i \quad (10)$$

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

La evaluación de desempeño de RT-EDCA se llevó a cabo realizando la comparación con el mecanismo EDCA de 802.11e, mediante simulaciones en ns-2. Para tal fin se emplearon mensajes periódicos de pequeño tamaño (típicos en los NCS) y se efectuaron dos ensayos, adoptando para los cálculos y simulaciones los parámetros de capa física de 802.11b, a 11 Mbps, preámbulo largo (192  $\mu$ s), carga útil de 50 bytes (más 36 bytes de encabezado) y ACK de 14 bytes.

En el primer ensayo se considera un conjunto de 32 nodos que transmiten mensajes periódicos de igual tamaño y período. Partiendo de un instante crítico, se evaluó 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. Para RT-EDCA con agrupamiento por clases de prioridad, se establecieron 8 nodos con 4 mensajes por nodo.

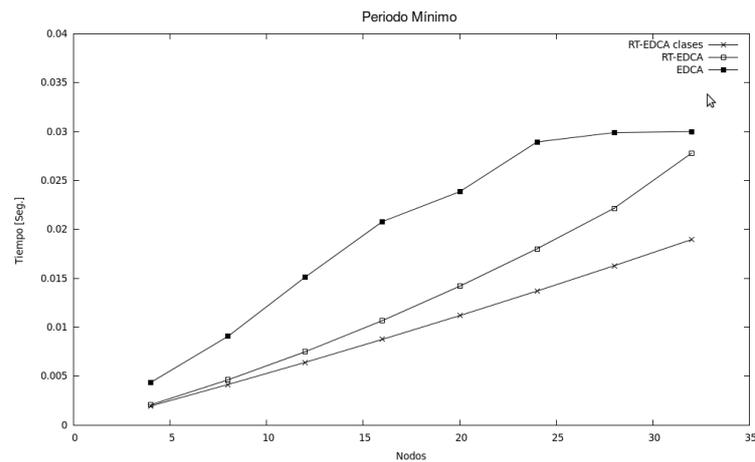
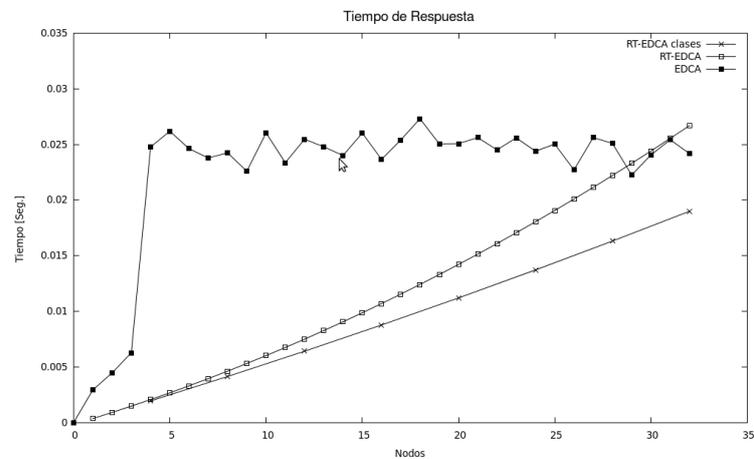


Fig. 6. Período Mínimo

La Fig. 6 muestra el mínimo periodo que necesitaría cada mecanismo. Como puede observarse RT-EDCA tiene un comportamiento determinístico y a su vez requiere de un periodo menor para volver ejecutar la tarea (enviar un mensaje) con respecto a EDCA. También se nota que RT-EDCA con clases es el mecanismo que menos tiempo necesita para volver enviar un mensaje, estando un 40% inferior a los otros dos mecanismos, RT-EDCA sin clases y EDCA.

Para el segundo ensayo se considera el mismo escenario pero 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. La Fig. 7 muestra el resultado de este ensayo.



**Fig. 7.** Tiempo de Respuesta

Puede observarse que, como en el caso anterior, 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 Conclusión

RT-EDCA propone un mecanismo de MAC inalámbrico apto para ser usado en la implementación de WNCS. Se basa en modificar parcialmente la operación estándar de EDCA y el uso de sus parámetros (CW, BW y AIFS), logrando con esto garantizar una latencia máxima de transmisión.

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo a través de simulaciones la comparación del rendimiento de RT-EDCA en sus dos alternativas y EDCA. El tiempo de respuesta y el periodo mínimo fueron los parámetros evaluados.

Como pudo observarse, RT-EDCA tiene un comportamiento determinístico y un mejor rendimiento con respecto a EDCA.

RT-EDCA con clases a su vez es el mecanismo con el menor tiempo de respuesta y periodo, un 30% a un 40% por debajo de RT-EDCA sin clases y EDCA.

Futuros trabajos apuntan a realizar pruebas experimentales basadas en sistemas de desarrollo embebidos.

## Referencias

1. O. Alimenti, G. Friedrich, G. Reggiani, F. Maidana, S. Tonietti y D. Gómez De Marco, "An Adjustment of EDCA Protocol for Real-Time", Computing System Engineering (SBESC), 2011 Brazilian Symposium Florianopolis, Brasil, ISBN: 978-1-4673-0427-6, page 145 a 150, del 7 al 11 de Noviembre de 2011 publicado en la librería digital IEEEExplore.
2. 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.
3. 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.
4. "IEEE Std 802.11; Part 11 (2007): Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", 1999.
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, 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.
7. 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
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", Proceedings of the Advanced Industrial Conference on Telecommunications, IEEE, 2005.
9. 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, Brasil.
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, ISBN: 978-1-4244-6849-2. IEEE Cat N° CFP10ETF-CDR, 13-16 Sep 2010, Bilbao, Spain.
11. The Network Simulator-ns-2 <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>.
12. <http://www.gnuplot.info/>
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 Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 5, June 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", Journal of the ACM, 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.