

## **Análisis del Tiempo de Respuesta en entorno de Tiempo Real sobre el MAC 802.11e.**

Omar Alimenti<sup>1,2</sup>, Guillermo Friedrich<sup>1</sup>, Guillermo Reggiani<sup>1</sup>, Santiago Tonietti<sup>1</sup>,  
Gabriela Velazquez<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.**

Las redes inalámbricas ocupan un lugar preponderante en el campo industrial debido a ciertos beneficios tales como bajo costo y facilidad de instalación.

Los Sistemas de Control basado en red sobre redes inalámbricas presentan problemas de confiabilidad y temporizado propio de los canales de radio y de los mecanismos de control de acceso al medio que provocan latencias impredecibles y pérdida de paquetes. El mecanismo EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) del estándar 802.11e provee Calidad de Servicio otorgando cuatro niveles de prioridades según el dato que desea enviar, sin embargo no garantiza un retardo acotado para el envío de paquetes.

Una variante de este mecanismo, denominado RT-EDCA (Real Time EDCA), propone ciertas modificaciones sobre la Ventana de Contención, el contador de retroceso (backoff) y los espacios entre tramas de EDCA que permiten acotar la latencia de transmisión y evitar la pérdida de paquetes.

Este trabajo analiza el comportamiento de RT-EDCA y evalúa el Tiempo de Respuesta sobre distintos escenarios simulados mediante el simulador ns-2 y grafica los resultados empleando el módulo GNUPLLOT.

**Palabras claves:** EDCA, RT-EDCA, AIFS, CW, QoS, ns2, Tiempo de Respuesta.

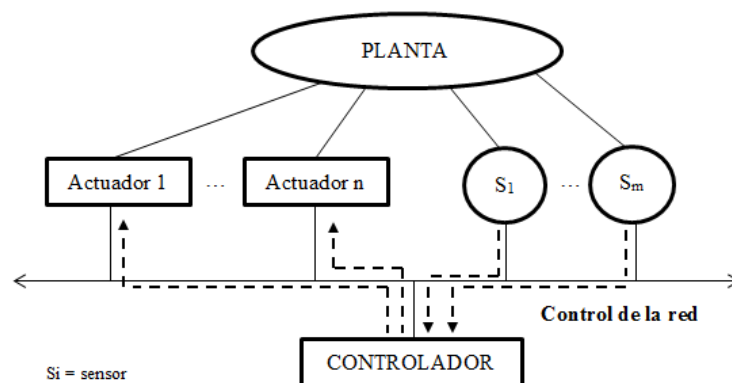
## **1 Introducción**

Las redes de tecnología inalámbrica (WLAN) han cobrado popularidad en campo de la computación industrial, sobre todo a partir de la década del '90 las cuales han sido adaptadas a diferentes dispositivos. Estas presentan numerosas ventajas sobre las redes de área local cableadas (LAN) en entornos industriales. A modo de ejemplo podemos mencionar 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]. Como contrapartida la confiabilidad de la redes WLAN suele verse afectada por factores como las interfe-

rencias 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 objetivo del presente trabajo se centra en las WLANs basadas en IEEE 802.11.

El protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) es decisivo en el rendimiento de una red [2]. El estándar 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 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 Calidad de Servicio (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, que diferencia cuatro Categorías de Acceso (AC) priorizadas [4]. EDCA mejora la tasa de transferencia y el tiempo de respuesta con respecto a DCF. A pesar de ello, la reducida cantidad de AC (que limita la diferenciación de tráfico con restricciones temporales [5]) 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 Sistemas de Control basado en red (NCS) [6] (Fig.1) y en particular los WNCS (NCS inalámbrico), cuyas capacidades son la adquisición de información (sensores/usuarios), el comando (controladores/usuarios), el control (actuadores) y la red.

El presente trabajo está orientado a la evaluación del mecanismo RT-EDCA presentado en [7], 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 parámetro a evaluar fue el tiempo de respuesta mediante simulaciones sobre ns-2 [11] y comparados con EDCA estándar. El tiempo de respuesta se define como el tiempo transcurrido entre el pedido de transmisión y la recepción del ACK. Se utilizó el modulo GNUPLLOT para realizar las gráficas.

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 sobre ns-2 y en V se presentan las conclusiones.

## 2 Mecanismo EDCA

En esta sección se describirá brevemente el funcionamiento del mecanismo EDCA.

EDCA especifica el soporte de QoS sobre redes WLANs 802.11. Este mecanismo controla el acceso al canal inalámbrico en base a un sistema (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.

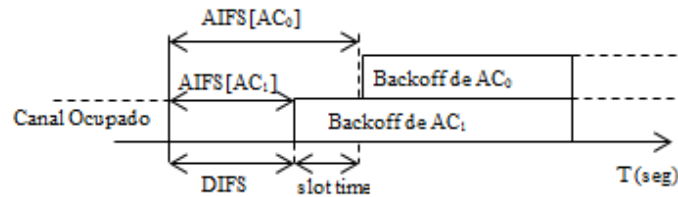


Fig. 2. Esquema de temporizado de EDCA

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  $TXOP_{\limite}$  [12].

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  $\text{AIFS}_i$ , 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 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  $CW_{i-m\acute{a}x}$ ). 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. 3). 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.

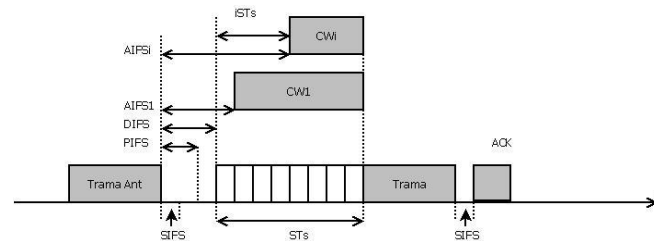


Fig. 3. Esquema básico de EDCA con ACK

### 3 RT-EDCA

RT-EDCA es un mecanismo basado en el MAC inalámbrico de EDCA realizando modificaciones sobre la Ventana de Contención (CW), el contador de retroceso (backoff) y los espacios entre tramas (AIFS) que permiten acotar la latencia de transmisión y evitar la pérdida de paquetes. A continuación se detallarán los cambios efectuados en EDCA para RT-EDCA.

EDCA, está basado en las siguientes pautas y condiciones de funcionamiento:

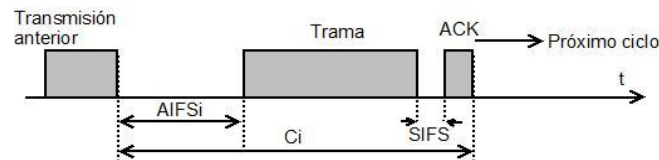
- A cada tipo de trama le corresponde una determinada prioridad, conocida desde el instante inicial y diferente a cualquier otra (a la manera del bus CAN).
- La prioridad se indica mediante un valor numérico comprendido entre cero (máxima) y N (mínima). N depende de la cantidad de clases de mensajes que se van a manejar en el contexto de la aplicación.
- En caso de haber dos o más requerimientos simultáneos 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.

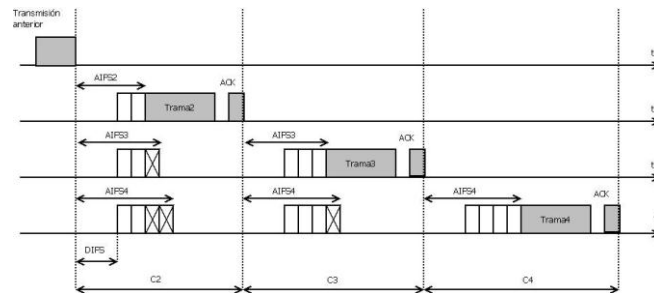
La Fig. 4 presenta los aspectos básicos de RT-EDCA. Una STA debe esperar que el medio permanezca inactivo durante un tiempo  $AIFS_i$  para iniciar su transmisión. Si durante la espera se detecta que el medio fue ocupado, a diferencia de EDCA, se aborta el intento para reiniciarse desde cero cuando el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



**Fig. 4.** Esquema básico de RT-EDCA

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  $AIFS_i$ .

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 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 ( $t_{TRAMAI}$ ), SIFS y el tiempo de transmisión del ACK ( $t_{ACK}$ ), según lo expresa la siguiente fórmula:

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

En caso de no recibirse el ACK, la entidad MAC de RT-EDCA no reintenta la re-transmisión, sino que notifica a las capas superiores que la transmisión ha fallado.

El objetivo de RT-EDCA es brindar un servicio de comunicación del “mejor intento” (best-effort), con comportamiento determinístico en cuanto a la latencia máxima.

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 [13], se puede calcular el mínimo período [14] posible para un mensaje de prioridad  $i$ , tal como se determinó en [7]:

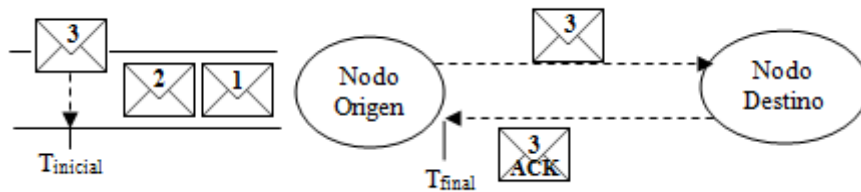
$$T_i \geq \sum_{\forall j < i} \left\lceil \frac{T_i}{T_j} \right\rceil C_j + C_i \quad (3)$$

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.

Para ello sería necesario el agrupamiento de mensajes en clases de prioridades [7], alternativa que no se evaluará en el presente trabajo.

#### 4 Evaluación del tiempo de respuesta.

Para la evaluación de RT-EDCA se realizaron simulaciones de distintos escenarios y se utilizó el tiempo de respuesta como parámetro de medición respecto a EDCA estándar. El tiempo de respuesta ( $T_R$ ) se obtiene de (4) y se muestra en la Fig. 6:



**Fig. 6.** Tiempo de Respuesta de un mensaje

$$T_{Rmensaje(i)} = T_{final} - T_{inicial} \quad (4)$$

El tiempo de respuesta de un nodo en el sistema durante todo el periodo simulado es igual a:

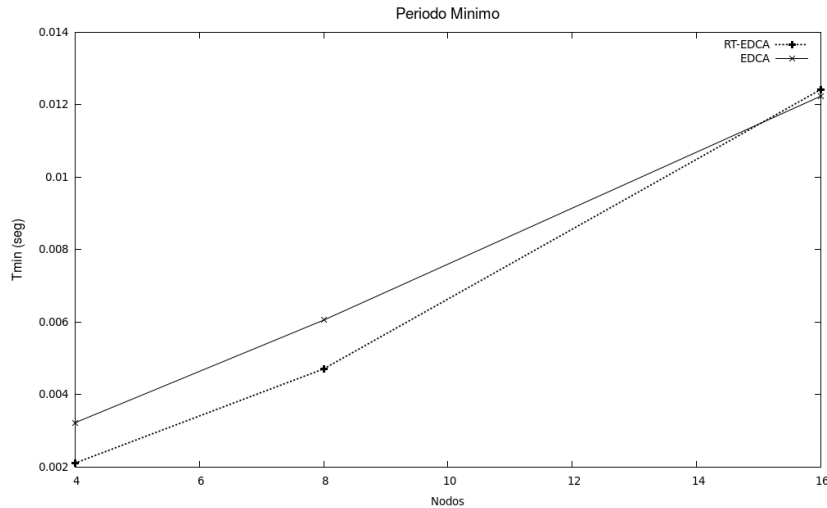
$$T_R = \frac{\sum_{i=1}^n T_{R\text{mensaje}(i)}}{n} \quad (5)$$

donde  $n$  es el número de mensajes transmitidos por el nodo dentro del periodo evaluado.

Los WNCSSs utilizan mensajes periódicos de pequeño tamaño [15], por tal motivo para los ensayos se adoptaron 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.

Las simulaciones se realizaron con el simulador ns-2, asumiendo el peor caso de carga y que todos los nodos tienen el mismo periodo de generación de mensajes. Los resultados obtenidos fueron graficados con el modulo GNUPLOT [16].

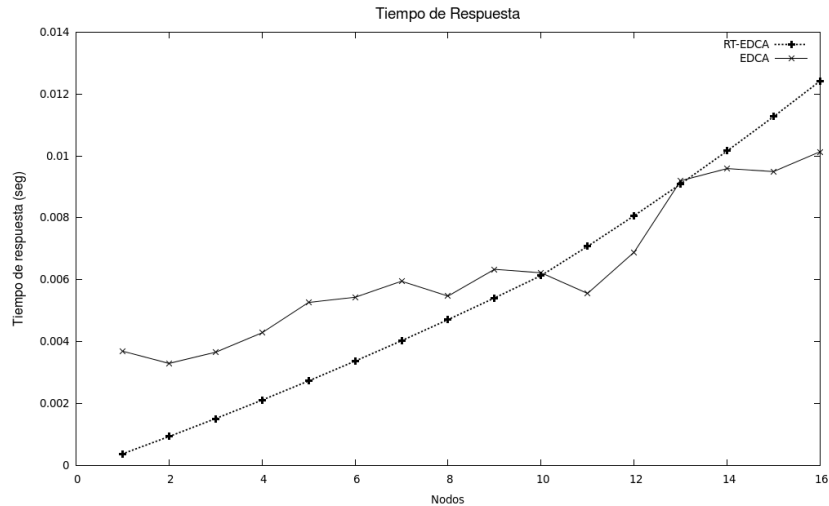
La Fig. 7 muestra el periodo mínimo que necesitan los nodos para transmitir sus mensajes de acuerdo a la prioridad asignada [7].



**Fig. 7.** Periodo Mínimo según la cantidad de nodos

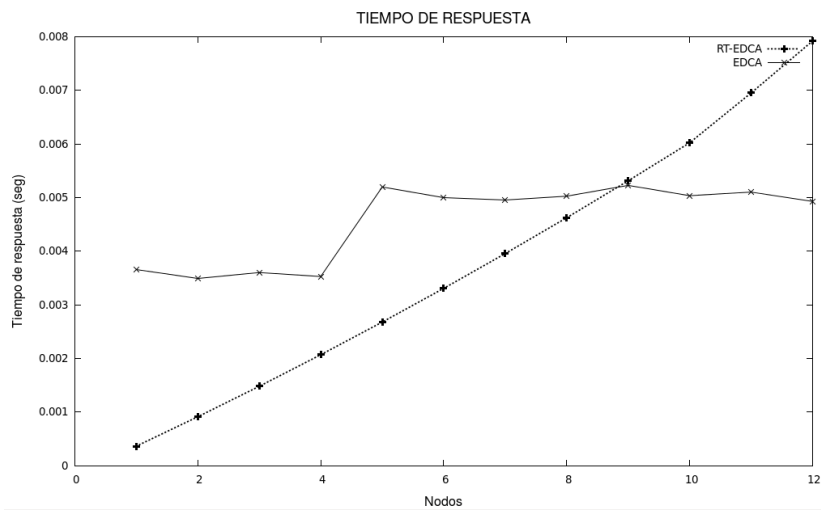
Como puede observarse RT-EDCA, hasta 15 nodos, admite un menor periodo de generación de mensajes que EDCA estándar.

La Fig. 8 muestra el tiempo de respuesta en función del número de nodos y con un periodo de generación de mensajes de 100 mseg. La curva del  $T_R$  para RT-EDCA presenta un comportamiento determinístico, con la misma tendencia que para el caso del periodo mínimo.



**Fig. 8.** Tiempo de Respuesta para un periodo de 100 msec.

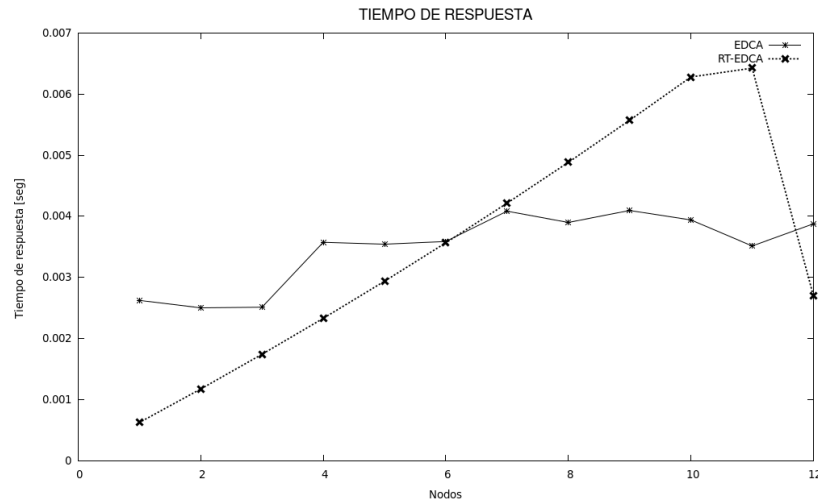
La Fig. 9 muestra el tiempo de respuesta de un escenario con un periodo de generación de mensajes de 10 msec. Con estas condiciones, EDCA aumenta la probabilidad de colisiones y retransmisiones. Como puede observarse, el comportamiento de RT-EDCA sigue siendo estable e igual al escenario anterior, con un resultado óptimo para redes con poca cantidad de nodos.



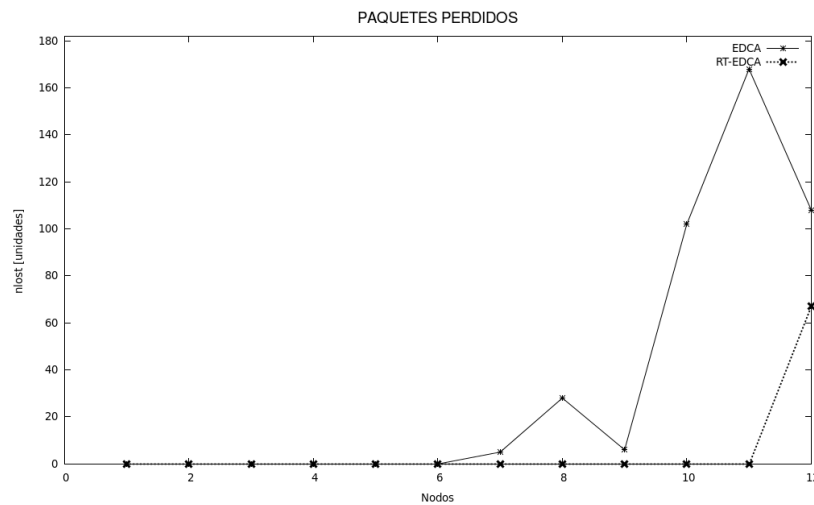
**Fig. 9.** Tiempo de Respuesta para un periodo de 10 msec



Por último la Fig. 10 y Fig. 11 muestran el tiempo de respuesta y la cantidad de paquetes perdidos respectivamente, para un escenario con una alta carga de trabajo, con un periodo de generación de mensajes de 8 mseg.



**Fig. 10.** Tiempo de respuesta con periodo de 8 mseg.



**Fig. 11.** Paquetes Perdidos para un periodo de 8 mseg.

Se observa que RT-EDCA mantiene en 0 la cantidad de paquetes perdidos hasta una red compuesta de 11 nodos, con un tiempo de respuesta creciente en función a la cantidad de nodos. La mejora de EDCA en el tiempo de respuesta a partir de los 6

nodos obedece a que comienza a perder paquetes. Situación similar se da en RT-EDCA para 12 nodos.

## 5 Conclusiones

RT-EDCA propone un mecanismo de MAC inalámbrico apto para ser usado en la implementación de WNCS, modificando parcialmente la operación estándar de EDCA y la configuración de sus parámetros (CW, BW y AIFS). 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 presente trabajo evalúa el tiempo de respuesta comparando RT-EDCA vs EDCA. El resultado muestra el comportamiento determinístico de RT-EDCA garantizando el cumplimiento de las restricciones temporales del sistema.

Además se observa que, para escenarios relajados, el tiempo de respuesta de RT-EDCA es menor en redes de hasta 12 nodos. Sin embargo, en entornos con alta carga de trabajo, la respuesta de RT-EDCA mejora, dado que EDCA tiene un alto número de paquetes perdidos.

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  $AIFS_n$  en un ST. En [7] se demostró que el sistema mejora haciendo un agrupamiento de mensajes por clase de prioridades.

Actualmente se está trabajando en el simulador para incorporar el agrupamiento por clase de prioridades para el análisis del tiempo de respuesta.

## 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. 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.

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. Willig A., "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection", IEEE Transactions On Industrial Informatics, 2008, Vol. 4, N° 2.
13. Lehoczyk J., Sha L., Ding Y., "The rate monotonic scheduling algorithm: Exact characterization and average case behaviour", Proc. IEEE RTSS, 1989, pp. 166-171.
14. Gamba G., Seno L., Vitturi S., "Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks". 8th IEEE Intl. Workshop on Factory Comm. Systems, 2010.
15. 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, USA, 2007.
16. <http://www.gnuplot.info/>