

Tuning Mechanism For IEEE 802.11e EDCA Optimization

S. Pérez, J. Campos, H. Facchini and L. Bisaro

Abstract— The overall performance of a WLAN 802.11e is determined, among other things, by the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) parameters, typically configured with default and static values. The same does not vary according to the dynamic requirements of Quality of Service (QoS) of the network. To achieve significant improvements in the performance of the network, and simultaneously comply with the specifications of QoS, a new algorithm of tuning is proposed to make the adjustment of these parameters dynamically, which we call Algorithm for the Differentiation of Traffic Multiple (MTDA). The algorithm has been evaluated in realistic scenarios with noise, reaching a initialization effective, rapid convergence, and the differentiation of effective multiple wireless traffic (voice, video and best effort with Pareto distribution). It adopted a model of wireless station implemented in Hierarchical Stochastic Activities Networks (HSANs), which runs on the simulator Möbius.

Keywords— Tuning, EDCA parameters, Modeling, Simulation, WLAN 802.11e

I. INTRODUCCIÓN

EN ESTE documento se presentan soluciones novedosas que permiten mejores prestaciones, y además, el cumplimiento de las especificaciones de QoS en las comunicaciones de redes Wi-Fi. Específicamente, el foco principal ha sido el análisis de alternativas complementarias a aplicar sobre el protocolo EDCA IEEE 802.11e, para soportar QoS en un ambiente de comunicaciones compartido con tráfico diverso.

La provisión de QoS en redes Wi-Fi es uno de los más grandes desafíos en las redes de datos, debido a los altos niveles de ráfagas de pérdidas de tramas, de latencia y de jitter. Hay algunas formas de caracterizar la QoS a través de requerimientos estrictos que se expresan en términos de valores cuantitativos, tales como velocidad de datos, umbrales de pérdida de rendimiento, tasas de pérdidas de tramas, y límites máximos de retardos y de jitter. Y dentro de la familia de protocolos 802.11, con el estándar 802.11e se propuso una nueva función de capa MAC llamada Hybrid Coordination Function (HCF) que usa el método de acceso al canal basado en la contención EDCA [1]. EDCA se diseñó para proveer QoS priorizada mejorando la Distributed Coordination Function (DCF) del estándar 802.11 original.

Los resultados de este trabajo permiten comparar y complementar los obtenidos por los trabajos presentados en la literatura sobre la conducta de las redes Wi-Fi, y de EDCA en particular. Estos trabajos plantean cómo hacer un análisis de la conducta de los nodos en particular, y de la red en general, desde la colección de trazas, analíticamente o por simulación.

El análisis de trazas es un primer paso necesario para hacer modelos realistas que son cruciales para el diseño, simulación y evaluación de protocolos de red [2-10]. Lamentablemente, algunos autores suelen llamar modelo a la interpretación de la colección de trazas, cuando sólo se obtienen conclusiones desde las trazas, buscando características del comportamiento del tráfico.

La otra forma de efectuar el análisis de prestaciones de las redes de comunicaciones IEEE 802.11e ha sido desarrollando modelos de evaluación desde dos puntos de vista distintos: analíticos y simulación. Los modelos analíticos [11-28] tienen la ventaja de proveer expresiones/formalismos que ayudan a analizar la influencia de los diferentes parámetros. Además, usualmente proveen también resultados rápidos. Sin embargo, este tipo de solución típicamente obliga a la adopción de suposiciones de simplificación. Para el desarrollo de escenarios realistas, como los previstos en este trabajo, se consideró que el uso de modelos analíticos no era una aproximación adecuada por las siguientes razones: a) las simplificaciones usualmente empleadas sobre estos modelos no pueden capturar apropiadamente importantes aspectos que son objeto de nuestra evaluación, como las diversas métricas que se obtienen con simulación, b) la mayor parte de estos modelos asumen fuentes de tráfico Poisson, dificultando la modelación exacta de otros tipos de tráfico, c) con el uso de simuladores apropiados es posible una mayor flexibilidad para configurar y comparar diversos escenarios de evaluación.

Para escenarios más realistas, algunos análisis de simulación han sido hechos usando las herramientas Network Simulator (NS-2) [29], OPNET [30] o IP TRAFFIC [31]. La herramienta NS-2 es un simulador de eventos discretos de fuente abierto, siendo la más usada de las tres. Mientras que la herramienta OPNET ha sido desarrollado por OPNET Technologies, Inc. También resultan útiles herramientas de generación de tráfico simulado, como IP Traffic desarrollada por ZTI Telecom. Todas son especialmente apropiadas para hacer análisis de prestaciones de las redes de comunicaciones. En el caso puntual de NS-2, algunos trabajos [32-33] muestran su uso en la simulación de la conducta de IEEE 802.11e, en comunicaciones de tiempo real. Sin embargo, en [32] han sido identificadas y explicadas algunas inconsistencias, y lo difícil que es implementar cualquier leve modificación de los protocolos o sus características de temporización.

S. Pérez, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, santiagocp@frm.utn.edu.ar

J. Campos, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, jcampos@unizar.es

H. Facchini, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, higiniofac@frm.utn.edu.ar

L. Bisaro, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, lbisaro@frm.utn.edu.ar

En la literatura y trabajos de investigación, no son muchos los documentos disponibles que usen Stochastic Petri Nets (SPNs) como un formalismo de modelación para analizar los protocolos de comunicaciones IEEE 802.11. En [34], se propuso uno de los primeros modelos de SPN de simulación para evaluar las prestaciones del IEEE 802.11 original. El modelo de simulación tiene el requerido detalle para describir las características principales del protocolo. El modelo asume ciertas condiciones de canal ideal y no considera ciertos aspectos del protocolo. Posteriormente, el modelo se extendió para incorporar más detalles [35-36].

Aunque desde el punto de vista de la modelación, los modelos previos establecieron en su momento contribuciones importantes, su implementación en la mayoría de las herramientas SPNs sufre de limitaciones, o implica superar importantes dificultades para caracterizar escenarios de simulación más complejos. Esto ocurre especialmente debido a la ausencia, en esas herramientas de modelación, de un formalismo que ayude a construir automáticamente algunas réplicas del modelo. Esto es esencial en la evaluación de escenarios compuestos por algunas estaciones similares con una mezcla de diversos tipos de tráficos.

Por lo expuesto, se adoptó un modelo base usando HSANs [37-39] (una variante de SPNs) que respeta en detalle el estándar EDCA IEEE 802.11e [49], desarrollado en la Universidad de Porto, y simulado sobre la herramienta Möbius [41-43] de la Universidad de Illinois. A mayor conocimiento de los autores, esta es la primera implementación de EDCA usando SPNs. Estos recursos subsanan las observaciones discutidas previamente, y facilitan el estudio preciso de la QoS de las redes Wi-Fi.

Atento a ello, las contribuciones principales de este documento son: i) La especificación de un nuevo algoritmo de sintonización que llamamos MTDA, que selecciona los parámetros EDCA futuros dados los valores actuales y el estado corriente de la WLAN, ii) La demostración de que las características de mecanismo estándar EDCA IEEE 802.11e combinado con un algoritmo de sintonización son apropiadas para soportar mejores prestaciones y la QoS demandada de todo tipo de tráfico de datos multimedia, de tiempo real y control automático en los ambientes administrativos e industriales de próxima generación, y iii) Los aportes y conclusiones realizados usando un modelo EDCA con HSANs que complementan, enriquecen y facilitan la comparación con los antecedentes y conocimientos de las redes Wi-Fi obtenidos desde colecciones de trazas puras, u otros tipos de estudios analíticos o modelaciones con otras herramientas matemáticas, para diferentes contextos reales e hipotéticos.

Las conclusiones experimentales del algoritmo MTDA se obtuvieron por simulación utilizando múltiples escenarios, sobre la capa física IEEE 802.11a, con una velocidad de datos de 36 Mbps, en presencia de ruido de 1.10^{-4} BER (bit error rate). Con el objeto de definir los valores iniciales de MTDA, se especificó y experimentó una nueva metodología de análisis cuantitativo para determinar el grado de impacto diferenciado de los parámetros EDCA (AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP).

El resto de este documento se estructura como sigue: en

la Sección II se ofrece una visión general del estándar EDCA 802.11e; en la Sección III se presenta el Modelo de estación de wireless construido con HSANs y el Escenario de simulación definido para la evaluación experimental; en la Sección IV se presenta la Experimentación EDCA con parámetros por defecto; en la Sección V se describe la propuesta del Algoritmo de Sintonización MTDA y su comportamiento sobre el escenario; en la Sección VI se plantea un Caso de Estudio, y finalmente, en la Sección VII se establecen las más importantes conclusiones.

II. EDCA 802.11e

Con la DCF de 802.11 original sólo se provee el servicio de mejor esfuerzo [1]. Las aplicaciones multimedia limitadas en tiempo (por ejemplo, voz sobre IP, videoconferencias) requieren ciertas garantías de ancho de banda, retardo y jitter.

El punto es que con DCF, todas las estaciones compiten por el canal con la misma prioridad. No hay mecanismo de diferenciación para proveer mejor servicio para el tráfico multimedia de tiempo real que para las aplicaciones de datos. Las limitaciones de QoS de DCF han motivado numerosos esfuerzos de investigación para mejorar las prestaciones de MAC [44-51].

Con HCF 802.11e, se propuso EDCA que opera concurrentemente con el método HCF Controlled Access (HCCA) basado en polling (Fig. 1). Los Access Points (APs) y aquellas Stations (STAs) que implementan las facilidades de QoS son llamadas APs con QoS realizadas (QAPs) y STAs con QoS realizadas (QSTAs), respectivamente.

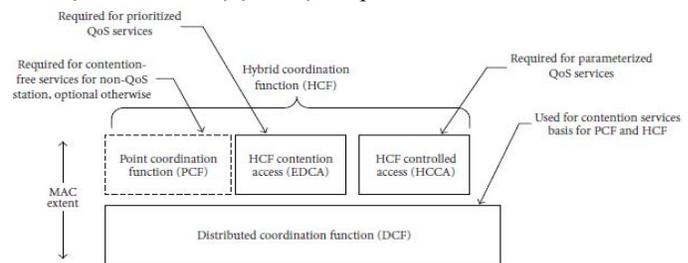


Figura 1. Arquitectura MAC de 802.11e (Fuente: IEEE Std 802.11 2007).

Antes de entrar en la capa MAC, cada paquete de datos recibido desde la capa superior tiene asignado un valor de prioridad de usuario específico. En la capa MAC, EDCA introduce cuatro diferentes colas first-in first-out (FIFO), llamadas categorías de acceso (ACs). Cada paquete de datos desde la capa superior, con una prioridad de usuario específica, debería estar mapeado en una AC correspondiente. Diferentes clases de aplicaciones (por ejemplo, tráfico background, tráfico de mejor esfuerzo, tráfico de video y tráfico de voz) pueden estar dirigidos a diferentes ACs. Cada AC se comporta como una simple entidad DCF compitiendo con sus propios parámetros de contención ($CWmin[AC]$, $CWmax[AC]$, $AIFS[AC]$ y $TXOPLimit[AC]$), los cuales son anunciados por el QAP periódicamente en tramas beacon.

Básicamente, a más pequeño los valores de $CWmin[AC]$, $CWmax[AC]$, y $AIFS[AC]$, más cortos los retardos de acceso

de canal para el correspondiente AC, y más alta la prioridad para acceder al medio.

El propósito de usar diferentes parámetros de contención para diferentes colas es dar a una clase de prioridad baja un tiempo de espera superior que una clase de prioridad alta, de modo que la clase de prioridad alta probablemente pueda acceder el medio más rápido que la clase de prioridad baja. Se debe notar que los tiempos de backoff de diferentes ACs en una QSTA son generados aleatoriamente y pueden alcanzar cero simultáneamente. Esto puede causar una colisión interna. En tal caso, un planificador virtual en cada QSTA le permite solo transmitir tramas a la AC de más alta prioridad.

En EDCA se introduce un nuevo tipo de IFS, el IFS de arbitrario (arbitrary IFS-AIFS), en lugar de DCF IFS (DIFS en DCF (Fig. 2). Cada AIFS tiene un intervalo IFS con longitudes de arbitrio definidas como:

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times slot\ time,$$

donde $AIFSN[AC]$ es el número IFS de arbitrio.

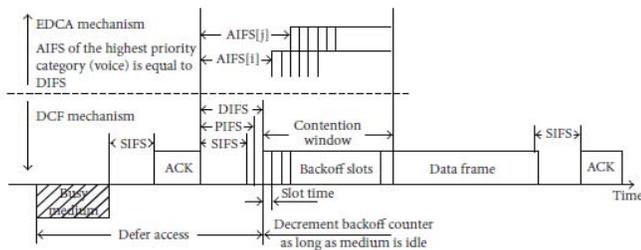


Figura 2. IFS en DCF y EDCA (Fuente: IEEE Std 802.11 2007).

También, en 802.11e está previsto un mecanismo de control de admisión, basado en contención, que necesitan soportar tanto el QAP y las QSTAs.

III. MODELO Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Con el objeto de evaluar experimentalmente las limitaciones del mecanismo EDCA 802.11e, y la propuesta del algoritmo de sintonización, se adoptó un modelo de simulación implementado en HSAN, que se ejecuta sobre el simulador Möbius. Las HSAN son una versión de las Redes de Petri. Este modelo comprende una implementación precisa y detallada de la función EDCA asociada a las estaciones con QoS, considerando tanto su perspectiva funcional y temporal. Y ha sido suficientemente validado y contrastado por sus autores [52], con trabajos publicados y reconocidos internacionalmente [53-55]. Para el presente estudio, se repitieron los ensayos de validación.

Además, y dadas sus características, el modelo también exhibe una importante flexibilidad en los siguientes aspectos: facilidad para incluir modificaciones o refinamientos; pueden obtenerse un gran número de medidas de prestaciones de diferentes tipos, desde el mismo sin modificaciones estructurales, y puede ser usado como una estructura base para construir modelos más complejos y de más alto nivel.

Preliminarmente, se utilizaron versiones de este modelo basado en HSANs, para el análisis y la evaluación del impacto

al ajustar parámetros de temporización y otros del protocolo, en diversas configuraciones de red.

Una ventaja importante, para evitar el proceso de construir un modelo de red para cada uno de los escenarios de simulación, es que el modelo adoptado representa una simple estación inalámbrica que soporta QoS. Luego, este modelo se replica, para obtener el escenario de simulación requerido. El número de réplicas se parametriza por el usuario y está totalmente automatizado por la herramienta de modelación Möbius. Esto provee una importante flexibilidad en el proceso de evaluación, como la aceleración en el análisis de diferentes escenarios de red.

Además, el modelo de la estación incluye un submodelo de error. Se trata de una variante del modelo de error de Gilbert-Elliot [56]. Se adoptó un BER medio de 10^{-4} , y probabilidades de estado estable de encontrar el canal en interferencia del 13,3%.

Se propusieron diversos escenarios de simulación para analizar el comportamiento del algoritmo MTDA. Estos escenarios tuvieron en cuenta la conducta de las categorías de acceso mas altas (voz y video) del mecanismo EDCA, cuando estas categorías interactúan entre si, en presencia fuentes de trafico de mejor esfuerzo.

Uno de los escenarios de evaluación consideró el tráfico generado por estaciones operando en la misma banda de frecuencias, variando la carga al incrementar el número de estaciones activas desde 1 a 20, como indica la Fig. 3.

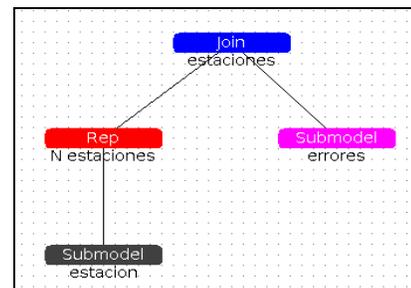


Figura 3. Representación del escenario usando la herramienta Möbius.

Todas las simulaciones experimentales se obtuvieron usando el modelo de simulación EDCA, previamente descrito, y con un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 5%.

Las métricas de prestaciones fueron: rendimiento absoluto, rendimiento relativo, pérdida de paquetes, retardo de cola promedio y tamaño de cola promedio.

IV. EXPERIMENTACIÓN CON PARÁMETROS POR DEFECTO.

Varios autores introdujeron la discusión sobre las ventajas del framework 802.11e, las debilidades de la configuración por defecto, y la flexibilidad provista por el estándar para ulterior mejora de las prestaciones sobre las configuraciones de parámetros básicas. De [57-58], se adoptaron los parámetros generales 802.11a en 36 Mbps y de configuración EDCA por defecto. Y se configuraron las estaciones para la transmisión de 3 diferentes ACs: un flujo isócrono de voz con

periodos fijos de 20 ms, un flujo de video Poisson, y un flujo de mejor esfuerzo con distribución Pareto y factor de forma 1.9 [59], (con rendimiento medio equivalente a la distribución Poisson). Los valores de todos los parámetros y valores de configuración se indican en las Tablas I y II.

TABLA I
CONJUNTO DE PARÁMETROS DCF Y EDCA POR DEFECTO

Parameters	CWmin	CWmax	DIFS/AIFS _N
DCF	aCWmin	aCWmax	2
	AC_BK	aCWmin	7
EDCA	AC_BE	aCWmin	3
	AC_VI	(aCWmin+1)/2-1	2
	AC_VO	(aCWmin+1)/4-1	2

TABLA II
PARÁMETROS 802.11 A EN 36 MBS Y EDCA POR DEFECTO UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

	Voice	Video	Best Effort
AIFS _N	2	2	3
CW _{min}	3	7	15
CW _{max}	7	15	1023
TXOP	1504 ms	3008 ms	--
Paquet	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps
Rate 803.11a		36 Mbps	
aSIFS _{Time}		16 μs	
aSlot _{Time}		9 μs	
ACCA _{Time}		4 μs	
aAirPropagation _{Time}		1 μs	
aRxTxTurnaround _{Time}		2 μs	
aPreambleLength		16 μs	
aPLCPHeaderLength		4 μs	
Maximum size of queue		50	
N ^o max retries		7	
BERaverage		1.10 ⁻⁴	

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestra en la Fig. 4. Se destaca que EDCA provee la diferenciación de servicio esperado entre los diferentes tipos de tráfico. Además, se observa que el rendimiento de los flujos de voz y de video de más alta prioridad, se mantienen más estables que el flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El tráfico de voz alcanza un pico de 0,924 Mbps en la estación 19, aunque hay una pérdida gradual del rendimiento, desde la estación 10. El tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 10,285 Mbps en la estación 10, luego el rendimiento decae rápidamente. También decae el rendimiento del tráfico de video, aunque más levemente y a partir de la estación 18. En dicha estación alcanza un rendimiento máximo de 10,856 Mbps.

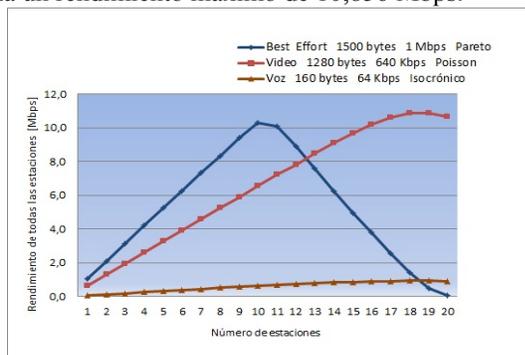


Figura 4. Rendimiento de los tráfico de voz, video y mejor esfuerzo.

El análisis de simulación muestra que: i) El número creciente de estaciones en el dominio de red influye fuertemente en la conducta del tráfico, produciendo un rendimiento menor, independientemente del tráfico; y ii) Se observa el efecto indeseado que se tiene en el rendimiento de voz y video, cuando se trata de aplicaciones muy estrictas en sus requerimientos.

Por lo tanto, se concluye que los parámetros por defecto utilizados en el mecanismo EDCA no son capaces de garantizar los requerimientos de QoS de comunicaciones del tráfico de mayor prioridad, cuando la voz y el video comparten el canal entre ellos, en presencia o ausencia de tráfico de datos generales de mejor esfuerzo. Esto a menos que el número de estaciones se mantenga por debajo de 10 estaciones aproximadamente. Estas y similares conclusiones han motivado muchos trabajos de investigación, para proponer nuevas y mejores aproximaciones, con el objeto de habilitar el uso de las redes 802.11e, soportando estas comunicaciones simultáneamente.

V. ALGORITMO DE SINTONIZACIÓN MTDA

Un algoritmo de sintonización de parámetros EDCA es la función o mecanismo que selecciona los parámetros futuros a partir de los valores actuales y el estado corriente de la WLAN que asegure el cumplimiento de premisas de prestaciones de uno o mas tráfico, con un cierto orden de prioridad, y de la red como un todo.

Varias clasificaciones de los algoritmos de sintonización de los parámetros EDCA, dadas en [60], se basan en las siguientes consideraciones: Estáticos - Adaptativos, Basados en Medidas - Basados en Modelo, Centralizado - Distribuido, Iterativos - No iterativos, o según el número de parámetros involucrados. La mayoría de las propuestas solo considera cambiar los parámetros CW_{min} y CW_{max} . Otros trabajos solo varían el AIFS, o el valor TXOP. Sin embargo, hay algoritmos que tienen en cuenta todos los parámetros MAC.

El objetivo del trabajo fue proponer y experimentar por simulación un algoritmo de sintonización, que llamamos MTDA. El algoritmo MTDA es adaptativo, basado en modelos, centralizado, iterativo e incluye todos los parámetros MAC. E introduce novedades, como su funcionamiento en escenarios más realistas, una inicialización efectiva y de rápida convergencia, y la diferenciación eficiente de múltiples tráfico wireless (voz, video y de mejor esfuerzo con distribución Pareto).

A) Inicialización de los Parámetros EDCA en MTDA

Preliminarmente, se efectuó un estudio especial sobre los parámetros de sintonización, con el objeto de la selección más apropiada para una rápida convergencia.

Conservando las características del tráfico generado para el escenario adoptado, se procedió a evaluar el rendimiento relativo de los tráfico, pero variando cada uno de los parámetros de diferenciación de servicio: AIFS_N, CW_{min} , CW_{max} y TXOP.

A título ilustrativo, la Fig. 5 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de voz en función de diferentes combinaciones de valores de AIFSN, manteniendo las configuraciones por defecto de CWmin, CWmax y TXOP. Los valores de AIFSN corresponden al tráfico de voz, video y mejor esfuerzo, en ese orden. Se observa que los valores 2-2-3, correspondientes a la configuración por defecto, producen el comportamiento más negativo, dejando una pérdida del rendimiento relativo de voz del orden del 28% para 20 estaciones. Además, se destaca que la prestación del tráfico de voz tiene menos pérdida cuando se asignan valores distintos para el tráfico de voz y video. Es de esperar este comportamiento cuando se usa AIFSN distintos, para priorizar el tráfico de voz sobre el de video. Para los valores 2-3-5 la pérdida se reduce al 15%, y con los valores 2-4-6 al 11%.

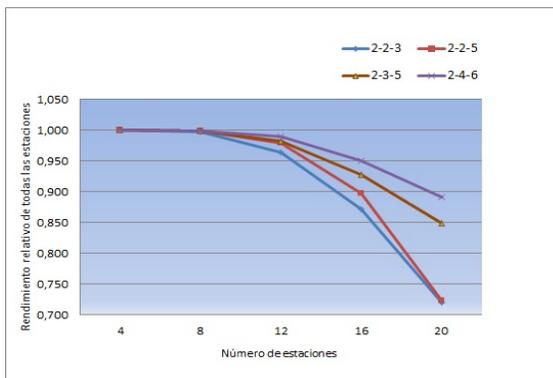


Figura 5. Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN.

Con el objeto de mejorar las prestaciones, los resultados sugieren asignar un valor distinto de AIFSN para los flujos de voz, de video y de mejor esfuerzo; especialmente cuando el valor de AIFSN del tráfico de mejor esfuerzo se aleja del valor de AIFSN de video, y este del AIFSN del tráfico de voz. Este último criterio puede aplicarse también a los parámetros CWmin y CWmax, dado que al aumentar estos valores en el tráfico de video y de mejor esfuerzo se favorece al tráfico de voz. Y por último, se observó el efecto contrario que tiene el valor de los TXOPs. A valores más grandes, especialmente en el tráfico de video y mejor esfuerzo, se producen mejoras en sus prestaciones. Por el contrario, en el tráfico de voz se produce una desmejora cuando se usan valores mayores de TXOP en el resto del tráfico.

La Tabla III presenta los valores que se utilizaron en la inicialización de los parámetros EDCA en el algoritmo MTD. Estos valores fueron seleccionados por ser de mejora, para satisfacer ciertas premisas y objetivos, y apropiados para este y similares escenarios. En la Tabla, el valor 1,504 ms para un TXOP es equivalente a 1 en el algoritmo MTD.

B) Detalles del algoritmo MTD

Se planteó como objetivo que el algoritmo de sintonización de los parámetros MAC permitiera: a) una diferenciación de tráfico dinámica que incremente la prioridad (y así la protección) de los flujos de tiempo real, manteniendo

niveles de rendimiento o de pérdidas establecidos b) Maximizar el rendimiento agregado obtenido en la red para los diferentes flujos, incluyendo los otros no prioritarios elásticos, c) Asegurar la adaptación a los cambios sobre el estado de la WLAN (definido como la mezcla instantánea de los flujos activos) encontrando la asignación más apropiada de los recursos del canal en cada situación.

TABLA III
PARÁMETROS EDCA UTILIZADOS EN LA INICIALIZACIÓN

	Voz	Video	Mejor Esfuerzo
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps

El diseño del algoritmo de sintonización EDCA, tuvo en cuenta los valores de inicialización de los parámetros (descritos en el apartado previo), el estado dinámico del sistema, buscando los puntos óptimos, indiferente de los cambios aleatorios en el tráfico WLAN. Esto pudo obtenerse sintonizando los parámetros EDCA de todos los tipos de tráfico, en los instantes de llegada o partida de un requerimiento, y focalizando especialmente sobre aquellos asociados con la regulación del tráfico de mejor esfuerzo (elástico).

El algoritmo, que se detalla a continuación, es una variante y extensión del algoritmo dado en [61]. Se caracteriza por su sencillez, su rápida convergencia y la captura de las tendencias observadas en los múltiples tráficos presentes y en la propia red:

1. Esperar por la primera solicitud de flujo
2. Inicializar el vector de parámetros y su rango de valores según el flujo requerido
3. Esperar por una nueva solicitud de flujo. Resguardar parámetros ξ vigentes hasta el momento. Ajustar el vector de parámetros y su rango de valores ξ temporales según el nuevo flujo requerido.
4. Usando los parámetros con la nueva solicitud de tráfico, verificar el cumplimiento de los objetivos de rendimiento, delay y descarte (μ), etc. ó si el número máximo de iteraciones se ha alcanzado. Si es así, Ir al paso 6. De lo contrario, Ir al paso 5.
5. Incrementar/Decrementar secuencialmente (solo un cambio en cada iteración):
 - $AIFSN_{be} \rightarrow AIFSN_{be} + 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.
 - $AIFSN_{vi} \rightarrow AIFSN_{vi} + 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.
 - $CW_{min,be} \rightarrow CW_{min,be} \times 2 + 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.
 - $TXOP_{voz} \rightarrow TXOP_{voz} + 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.
 - $TXOP_{be} \rightarrow TXOP_{be} - 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.
 - $TXOP_{video} \rightarrow TXOP_{video} - 1$. Actualizar ξ . Ir al Paso 4.

(Si el nuevo valor de un parámetro produce un alejamiento del cumplimiento de μ , restaurar el valor anterior del parámetro, y mantenerlo fijo por el resto de las iteraciones del presente requerimiento).
6. Si no se ha verificado el cumplimiento de μ rechazar solicitud, o proponer requerimientos posibles de satisfacer, y restaurar parámetros ξ previos resguardados a la solicitud. De lo contrario configurar los parámetros de trabajo con ξ temporal. Ir al paso 2.

VI. CASO DE ESTUDIO.

A los fines del funcionamiento del algoritmo MTDA se fijó una caída del rendimiento de voz de a lo sumo 0,5%. Es decir, que superado dicho umbral, MTDA deberá ajustar los parámetros para sostener las prestaciones de dicho tráfico.

A) *Funcionamiento del algoritmo MTDA*

La Tabla IV presenta la evolución del algoritmo MTDA, con los detalles de su estado en la medida que crece el número de estaciones. Además, se observan los valores medios del rendimiento (en Mbytes/seg), del rendimiento relativo y del descarte para el tráfico de voz por estación. También, se muestran los valores que van tomando sucesivamente los parámetros EDCA ante cada requerimiento de acceso de una nueva estación. En la Tabla, se destaca en rojo (verde) los puntos en que se viola (cumple) el umbral de rendimiento relativo de voz o video según corresponda.

TABLA IV
EVOLUCIÓN DEL ALGORITMO MTDA

Nº Estaciones	Paso Algorítmico	Rendimiento Voz	Rendimiento relativo Voz	Descarte
17 Estaciones	Ajuste MTDA	0,0079547	99,43%	0,57%
	AIFSNbe+6	0,0079631	99,54%	0,46%
18 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0079480	99,35%	0,65%
	AIFSNvi+4	0,0079800	99,75%	0,25%
19 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0079742	99,68%	0,32%
	No Ajuste MTDA	0,0079652	99,56%	0,44%

Se sobreentiende que hasta la solicitud de alta de la estación 16, el algoritmo ejecutó un vez la secuencia 1-2-3-4-6 y varias veces la secuencia 3-4-6, dado que no era necesario ajustar los parámetros EDCA. Es decir, hasta la estación 16 se utilizaron los valores de inicialización de los parámetros indicados en la Tabla III. Esta es una medida de la inicialización efectiva y la rápida convergencia del algoritmo.

Estando en el paso 3 del algoritmo, se observa que cuando llega la solicitud de alta de la estación 17, demandando servicio para sus tráficos de voz, video y mejor esfuerzo, es necesario ejecutar el paso 4 de cálculo de las métricas para verificar el cumplimiento de las consignas de QoS. Con la incorporación eventual de esta nueva estación, el sistema quedaría con un rendimiento promedio de voz por estación de 0,0079547 Mbytes/seg (por debajo de los 0,008 Mbytes/seg óptimos), que el rendimiento relativo de 99,43% caería por debajo del umbral de 0,95% y que el descarte superaría el 0,57%. Dado que no se cumplen las condiciones establecidas para el tráfico de voz, es necesario aplicar el paso 5 del algoritmo.

En la segunda fila de la Tabla IV, se indica simbólicamente con AIFSNbe+6 que el algoritmo se encuentra en el paso 5 y ha efectuado temporalmente el ajuste del parámetro AIFSN de mejor esfuerzo, incrementado su valor en 1, es decir, cambiando su valor de 5 a 6. El algoritmo debe verificar vía cálculo, a través de un modelo analítico apropiado, el cumplimiento de los objetivos de prestaciones. Como se observa, al cambiar el valor de AIFSN de mejor esfuerzo a 6, se mejora el rendimiento promedio de voz por estación a 0,0079631 Mbytes/seg, mientras que el rendimiento relativo

sube a 99,54% y el descarte se reduce a 0,46%. Es decir, que con este ajuste en el parámetro AIFSN del tráfico de mejor esfuerzo, se alcanzaría nuevamente el cumplimiento de los objetivos. Entonces, el algoritmo pasa al paso 6 para aceptar la solicitud de alta de la estación 17, pero configurando el parámetro de trabajo AIFSN de los tráficos de mejor esfuerzo de todas las estaciones, con el valor algorítmico temporal 6. Luego, se vuelve al paso 3 a la espera de una nueva solicitud.

Cuando en el paso 3 del algoritmo (3^{ra} fila de la Tabla) se produce el requerimiento de la estación 18, los valores de parámetros vigentes vuelven a dejar el sistema por debajo de los objetivos. La incorporación eventual de la estación 18, haciendo los cálculos previstos en el paso 4, dejaría el sistema con un rendimiento promedio de voz por estación de 0,0079480 Mbytes/seg, el rendimiento relativo en 99,35%, y por lo tanto, el descarte en 0,65%. Dado que nuevamente no se cumplen las premisas para el tráfico de voz, es necesario pasar al paso 5 del algoritmo.

En la cuarta fila de la Tabla, se simboliza con AIFSNvi+4 que el algoritmo se encuentra en el paso 5, y se ha modificado temporalmente el parámetro AIFSN de video, incrementado su valor en 1, es decir, cambiando su valor de 3 a 4. En este paso, el algoritmo verifica el cumplimiento de los objetivos de prestaciones, al cambiar el valor de AIFSN de video a 4. Como se observa, el rendimiento promedio de voz por estación sube a 0,0079800 Mbytes/seg, mientras que el rendimiento relativo alcanza 99,75% y, entonces, el descarte se reduce a 0,25%. Con esta modificación del parámetro AIFSN del tráfico de video de todas las estaciones se alcanzaría otra vez el cumplimiento de los objetivos. En esta situación, el algoritmo pasa al paso 6 para aceptar el alta de la estación 18, pero reconfigurando el parámetro de trabajo AIFSN de los tráficos de video, con el valor temporal 4. Posteriormente, el algoritmo continúa en el paso 3 a la espera de una nueva solicitud.

Antes los requerimientos de alta de las estaciones 19 y 20, (5^{ta} y 6^{ta} fila de la Tabla), los valores de parámetros de trabajo usados en la estación 18, no sacan al sistema de los objetivos propuestos. El rendimiento relativo se mantiene sobre 99,50%.

El proceso se repite iterativamente para las sucesivas solicitudes de alta, modificando nuevos y/o los mismos parámetros, de acuerdo al algoritmo. En alguna estación, deberá rechazarse la solicitud, o proponerse otros requerimientos posibles de satisfacer. En cualquiera de estos dos casos, se restauran los parámetros resguardados previos a la solicitud.

B) *Comparación del rendimiento y tamaño de cola usando los parámetros por defecto y el algoritmo MTDA*

En las Fig. 6, 7 y 8 se observan las comparaciones del rendimiento promedio de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo de las estaciones, configurados usando el algoritmo MTDA y con los parámetros por defecto. Y en las Fig. 9, 10 y 11 se presentan las comparaciones de los tamaños de colas promedio.

El tráfico de voz con los parámetros MTDA alcanza un máximo de 1,274 Mbps en la estación 20, con una mejora del 37,98%. Mientras que el tráfico de video alcanza un máximo

de 13,106 Mbps en la estación 20, mejorando en 20,73% respecto a si se usa la configuración por defecto.

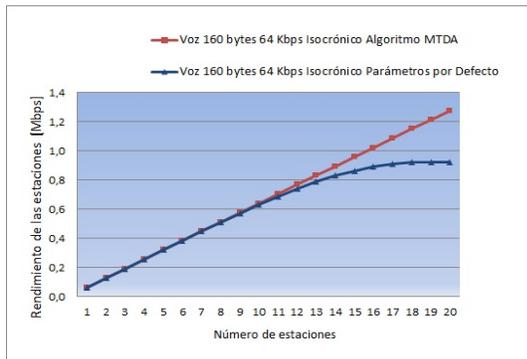


Figura 6. Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando el algoritmo MTDA y con parámetros por defecto.

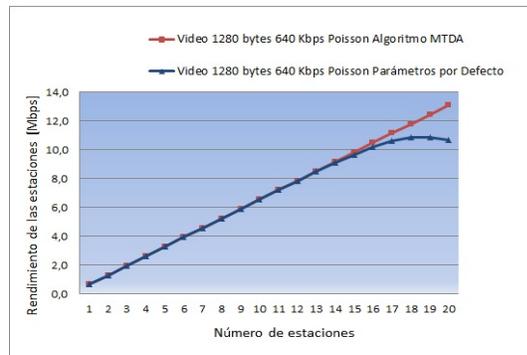


Figura 7. Comparación del rendimiento del tráfico de video usando el algoritmo MTDA y con Parámetros por defecto.

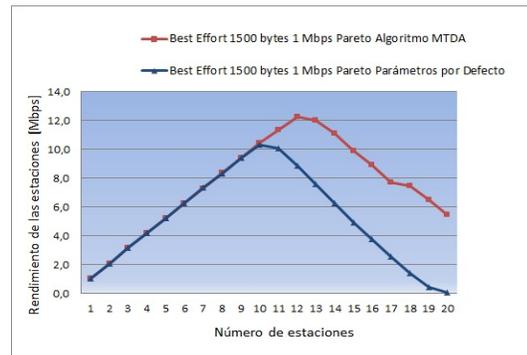


Figura 8. Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando el algoritmo MTDA y con Parámetros por defecto.

Mientras que el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 12,226 Mbps en la estación 12, desde donde el rendimiento decae. Se alcanza una mejora del 18,87% en el rendimiento máximo.

El tamaño de la cola promedio de voz con los parámetros MTDA alcanza un máximo de 0,375 paquetes en la estación 20, respecto a los 0,539 cuando se usan los parámetros por defecto, con una mejora del 30,47%. Esta disminución del tamaño de la cola de voz se corresponde con la necesidad de mantener su rendimiento dentro del umbral establecido.

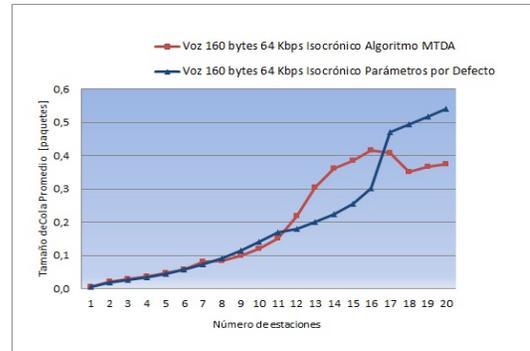


Figura 9. Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz usando el algoritmo MTDA y con parámetros por defecto.

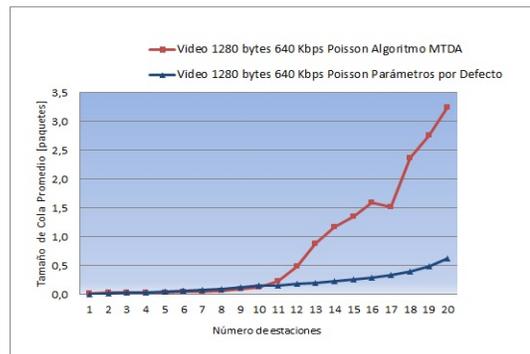


Figura 10. Comparación del tamaño de cola del tráfico de video usando el algoritmo MTDA y con parámetros por defecto.

El tamaño de la cola promedio de video con los parámetros MTDA alcanza un máximo de 3,240 paquetes en la estación 20, respecto a los 0,620 cuando se usan los parámetros por defecto, con una desmejora del 422 %. En el caso de mejor esfuerzo, con los parámetros MTDA se alcanza un máximo de 43,002 paquetes en la estación 20, respecto a los 49,986 cuando se usan los parámetros por defecto, con una mejora del 13,97 %. Esta mejora general en el comportamiento del tamaño de la cola de mejor esfuerzo se corresponde con la premisa de mantener las prestaciones de mejor esfuerzo, mientras lo permitan las consignas del tráfico de voz y de video, en ese orden.

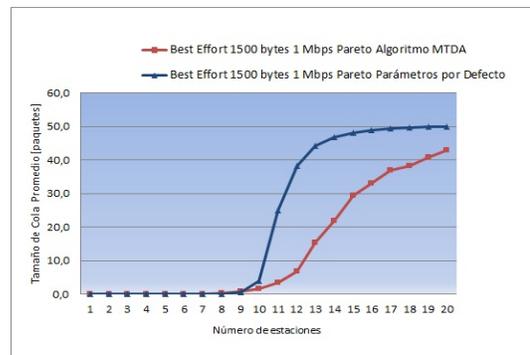


Figura 11. Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo usando el algoritmo MTDA y con parámetros por defecto.

VII. CONCLUSIONES.

El objetivo del presente trabajo fue proponer soluciones novedosas que permitan mejores prestaciones y el cumplimiento de las especificaciones de QoS en las comunicaciones de redes Wi-Fi. Usando variantes de un modelo de simulación preciso, construido con HSANs, se evaluó las condiciones del protocolo EDCA 802.11e para soportar QoS en escenarios 802.11a en 36 Mbps, con tráfico diverso, interferencias electromagnéticas, y usando una configuración estática por defecto de los parámetros AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP. En este contexto se verificó que es erróneo asumir que los parámetros estáticos por defecto aseguren las mejores prestaciones y QoS en todas las condiciones.

Y además, se propuso y experimentó un novedoso algoritmo de sintonización que llamamos MTDA. Se demostró que tiene en cuenta el estado dinámico del sistema, adaptando los parámetros EDCA. Para el escenario presentado, se obtuvieron mejoras en el rendimiento del orden del 40% para el tráfico de voz, y del 25% para la red toda, al variar el número de estaciones activas de 1 a 20.

Puede concluirse que EDCA 802.11e, por sí sola, asegura la diferenciación de tráfico, y que un algoritmo de sintonización puede complementar el protocolo, con mejores prestaciones y el cumplimiento de las restricciones de QoS, aún en las condiciones de alta carga, en ambientes de baja interferencia o industriales.

REFERENCIAS

- [1] ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition (R2007), 2007.
- [2] M. Balazinska and P. Castro, "Characterizing Mobility and Network Usage in a Corporate Wireless Local Area Network", Laboratorio para la Ciencia de la Computación MIT, Centro IBM de Investigación Watson, 2001.
- [3] W. Hsu and A. Helmy, "Principal Component Analysis of User Association Patterns in Wireless LAN Trace", Department of Electrical Engineering, University of Southern California, 2003.
- [4] W. Hsu and A. Helmy, "On Modeling User Associations in Wireless LAN Traces on University Campuses", Department of Electrical Engineering, University of Southern California, 2004.
- [5] W. Hsu and A. Helmy, "On Nodal Encounter Patterns in Wireless LAN Traces", Second International Workshop On Wireless Network Measurement, 2006.
- [6] C. Taduce and T. Gross, "A Mobility Model Based on WLAN Traces and its Validation", Proceedings of IEEE INFOCOM, 2003.
- [7] M. Papadopouli, H. Shen, H. and M. Spankis, "Characterizing the Duration and Association Patterns of Wireless Access in a Campus", 11th European Wireless Conferences 2005, Nicosia, Cyprus, 2005.
- [8] T. Henderson and D. Kotz, D., "The Changing Usage of a Mature Campus-wide", Proceedings of ACM MobiCom 2004, 2004.
- [9] X. Meng, S. Wong, Y. Yuan and S. Lu, "Characterizing Flows in Large Data Networks", Proceedings of ACM MobiCom, 2004.
- [10] CRAWDAD project (Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth), <<http://au.crawdad.org/>>, (Accessed May 26th, 2013).
- [11] X. Ling, K. H. Liu, Y. Cheng, X. Shen and J. W. Mark, "A novel performance model for distributed prioritized MAC protocols", in Proceedings of the 50th Annual IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), pp. 4692–4696, Washington, DC, USA, November 2007.
- [12] K. Kosek-Szott, M. Natkaniec and A. R. Pach, "A simple but accurate throughput model for IEEE 802.11 EDCA in saturation and non-saturation conditions", Computer Networks, Journal homepage: <www.elsevier.com/locate/comnet>, oct 2010,. (Accessed May 26th, 2013).
- [13] Y. Lin and V. W. S. Wong, "Saturation throughput of IEEE 802.11e EDCA based on mean value analysis", in Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '06), pp. 475–480, Las Vegas, Nev, USA, April 2006.
- [14] Y. Xiao, "Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 4, pp. 1506–1515, 2005.
- [15] J. Hui and M. Devetsikiotis, "A unified model for the performance analysis of IEEE 802.11e EDCA", IEEE Transactions on Communications, vol. 53, no. 9, pp. 1498–1510, 2005.
- [16] K. Xu, Q. Wang, and H. Hassanein, "Performance analysis of differentiated QoS supported by IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function (EDCF) in WLAN", in Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '03), pp. 1048–1053, San Francisco, Calif, USA, December 2003.
- [17] J. W. Robinson and T. S. Randhawa, "Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 22, no. 5, pp. 917–928, 2004.
- [18] I. Inan, F. Keceli, and E. Ayanoglu, "Modeling the 802.11e enhanced distributed channel access function", in Proceedings of the 50th Annual IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), pp. 2546–2551, Washington, DC, USA, November 2007.
- [19] L. Xiong and G. Mao, "Saturated throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA", Computer Networks, vol. 51, no. 11, pp. 3047–3068, 2007.
- [20] H. Wu, X. Wang, Q. Zhang and X. Shen, "IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) throughput analysis", in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '06), pp. 223–228, Montreal, Canada, July 2006.
- [21] T. C. Tsai and M. J. Wu, "An analytical model for IEEE 802.11e EDCA", in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '05), pp. 3474–3478, Seoul, Korea, May 2005.
- [22] Z. N. Kong, D. H. K. Tsang, B. Bensaou and D. Gao, "Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 22, no. 10, pp. 2095–2106, 2004.
- [23] Y. Yan and C. Pan, "An improved analytical model for IEEE 802.11e enhanced distributed channel access", in Proceedings of the International Symposium on Information Technology Convergence (ISITC '07), pp. 135–139, Jeonju, Korea, November 2007.
- [24] Z. Tao and S. Panwar, "Throughput and delay analysis for the IEEE 802.11e enhanced distributed channel access", IEEE Transactions on Communications, vol. 54, no. 4, pp. 596–603, 2006.
- [25] J. W. Tantra, C. H. Foh and A. B. Mnaouer, "Throughput and delay analysis of the IEEE 802.11e EDCA saturation", in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '05), pp. 3450–3454, Seoul, Korea, May 2005.
- [26] P. E. Engelstad and O. N. Osterbo, "Analysis of the total delay of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF", in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '06), pp. 552–559, Montreal, Canada, July 2006.
- [27] W. Zhang, J. Sun, J. Liu and H. B. Zhang, "Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA in wireless LANs", Journal of Zhejiang University, vol. 8, no. 1, pp. 18–23, 2007.
- [28] Nada Chendeb Taher, Yacine Ghamri-Doudane, Bachar El Hassan and Nazim Agoulmine, "An Accurate Analytical Model for 802.11e EDCA under Different Traffic Conditions with Contention-Free Bursting", Hindawi Publishing Corporation, Journal of Computer Networks and Communic., Volume 2011, Article ID 136585, 24 page, March 2011.
- [29] NS-2/3 network simulator - version 2.35, Available at <http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/User_Information>, 2013, (Accessed May 26th, 2013).
- [30] O. Tech. OPNET, Available at: <<http://www.opnet.com>> 2013, (Accessed May 26th, 2013).
- [31] IP Traffic, ZTI, Available at: <<http://www.zti-telecom.com>>, 2013, (Accessed May 26th, 2013).
- [32] J. W. T. Robinson, "An analytical model for the service delay distribution of IEEE 802.11e enhanced distributed channel access", Master's thesis, School of Engineering Science, 2005.
- [33] R. Moraes, F. Vasques, P. Portugal and J. A. Fonseca, "A traffic separation mechanism (TSM) allowing the coexistence of CSMA and real-time traffic in wireless 802.11e networks", WSEAS Transactions on Communications, vol. 5, no. 5, pp. 890 – 897, 2006.

- [34] R. German and A. Heindl, "Performance evaluation of IEEE 802.11 wireless LANs with stochastic Petri nets", Proceedings 8th International Workshop on Petri Nets and Performance Models, pp. 44 – 53, 1999.
- [35] A. Heindl and R. German, "Performance modeling of IEEE 802.11 wireless LANs with stochastic Petri nets", Performance Evaluation, vol. 44, no. 1-4, pp. 139 – 64, 2001.
- [36] A. Heindl, "The impact of backoff, EIFS, and beacons on the performance of IEEE 802.11 wireless LANs", Proceedings IEEE International Computer Performance and Dependability Symposium (IPDS), pp. 103 – 12, 2000.
- [37] W. Sanders and J. Meyer, "Stochastic Activity Networks: Formal Definitions and Concepts", Lectures Notes in Computer Science, Vol. 2090, pp. 315–343, 2001.
- [38] M. Abdollahi Azgomi and A. Movaghar 2004, "A Modelling Tool for Hierarchical Stochastic Activity Networks", Proc. of 11th Int. Conf. on Analytical and Stochastic Modelling Tech. and App. (ASMTA04), pp.141-146, Magdeburg, Germany, 2004.
- [39] J. F. Meyer, A. Movaghar and W. H. Sanders, "Stochastic activity networks: structure, behavior and application", Proc. International Workshop on Timed Petri Nets, pp. 106-115, 1985.
- [40] F. Vasques, "Wireless Real-Time Communication for Industrial Environments using the IEEE 802.11e Communication protocol", <<http://paginas.fe.up.pt/~vasques/ieee80211e/>>, July 22th, 2009, (Accessed May 26th, 2013).
- [41] A. L. Williamson, "Discrete Event Simulation in the Möbius Modelling Framework", M.S. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1998.
- [42] A. J. Stillman, "Model Composition in the Möbius Modelling Framework", M.S. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1999.
- [43] W. H. Sanders et al., "Model-Based Environment for Validation of System Reliability, Availability, Security, and Performance", <<https://www.mobius.illinois.edu/>>, (Accessed May 26th, 2013).
- [44] R. Moraes, P. Portugal and F. Vasques, "Simulation analysis of the IEEE 802.11e EDCA protocol for an industrially-relevant real-time communication scenario", in Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 202–209, 2006.
- [45] J. Villalón, P. Cuenca, L. Orozco-Barbosa and A. Garrido, "B-EDCA: a QoS mechanism for multimedia communications over heterogeneous 802.11/802.11e WLANs", Computer Communications 31 (17), pp. 3905–3921, 2008.
- [46] S. Szottl, M. Natkaniec and R. Canonico, "Detecting backoff misbehaviour in IEEE 802.11 EDCA", European Transactions on Telecommunications, Volumen 22, pag. 31-34, January 2011.
- [47] Y.-J. Wu, J.-H. Chiu and T.-L. 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 (4), pp. 1065–1079, 2008.
- [48] A. Hamidian, U. Körner, An enhancement to the IEEE 802.11e EDCA providing QoS guarantees, Telecommunication Systems 31 (2–3), pp. 195–212, 2006.
- [49] S. Szott, M. Natkaniec and A. Pach, "An IEEE 802.11 EDCA Model with Support for Analysing Networks with Misbehaving Nodes", EURASIP Journal on Wireless Comm. and Networking 2010, 2010.
- [50] A. P. Garg, R. Doshi, R. Greene, M. Baker, M. Malek and X. Cheng, "Using IEEE 802.11e MAC for QoS over wireless", Conference Proceedings of the 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, pp. 537 – 42, 2003.
- [51] Y. Tanigawa, J.O. Kim, H. Tode and K. Murakami, "Proportional and deterministic differentiation methods of multi-class QoS in IEEE 802.11e wireless LAN", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences 91 (7), pp. 1570–1579, 2008.
- [52] R. Moraes, P. Portugal and F. Vasques, "A Stochastic Petri Net Model for the Simulation Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Communication Protocol", In Proceedings 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Prague, Czech Republic, pp. 38-45, September 20-22, 2006
- [53] S. Mangold, C. Sunghyun, O. Klein, G. Hiertz and L. Stibor, "IEEE 802.11 wireless LAN for quality of service" European Wireless 2002, vol. 1, pp. 32–39, 2002.
- [54] S. Wiethoelter and C. Hoene, "Design and verification of an IEEE 802.11e EDCA simulation model in NS-2.26 (TKN-03-19)", Technical University Berlin - Telecommunication Networks Group, Tech. Rep., 2003
- [55] S. Wiethoelter, M. Emmelmann, C. Hoene and A. Wolisz, "TKN EDCA model for NS-2 (TKN-06-003)", Technical University of Berlin - Telecommunication Networks Group, Tech. Rep., 2006.
- [56] A. Willig and A. Wolisz, "Ring stability of the PROFIBUS tokenpassing protocol over error-prone links", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 5, pp. 1025 – 1033, 2001
- [57] Q. Ni, L. Romdhani and T. Turetli, "A Survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 Wireless LAN", Wiley J. Wireless and Mobile Comp., vol. 4, no. 5, pp. 547–66, Aug. 2004.
- [58] Q. Ni, "Performance analysis and enhancements for IEEE 802.11e wireless networks", IEEE Network 19 (4), pp. 21–27, 2005.
- [59] S. Pérez, H. Facchini, G. Mercado and L. Bisaro, "Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar en Redes Wi-Fi", WICC 2012, 2012, XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, Misiones, Argentina, 2012 <<http://wicc2012.fceqyn.unam.edu.ar/>>, <<http://latys.griditcs.frm.utn.edu.ar/>>, (Accessed May 26th, 2013)
- [60] B. Bellalta and M. Meo, "Call Admission Control in WLANs, Resource, Mobility and Security Management in Wireless Networks and Mobile Communications", Auerbach Publications, CRC Press, USA, 2006.
- [61] C. Cano, B. Bellalta, A. Sfairopoulou and J. Barceló, "Tuning the EDCA parameters in WLANs with heterogeneous traffic: A flow-level analysis", Computer Networks, March 2010.



Santiago Perez received the Engineering degree in Electronic from Universidad Tecnológica Nacional - Regional Mendoza, Mendoza, Argentina, in 1985, and the Magister degree in Data Networks from Universidad Nacional de La Plata, in 2006. He is a PhD Engineering student in Telematics and Telecommunications in the Universidad de Mendoza. Currently, he is the Codirector of GRID TICs, Research Center in Information and Communications Technologies. His current research interest is applications in data network, traffic analysis and techniques to model using SPNs-HSANS.



Javier Campos received the M.Sc. degree in mathematics (1986) and the Ph.D. degree in computer science (1990) from the University of Zaragoza, Spain, where he is Professor of Computer Science since 2005. He is the President of the Spanish Concurrent and Distributed Computing Society. He has been Co-Chair of the IEEE IES Technical Subcommittee on Industrial Automated Systems and Controls, Guest Editor of the Special Section on Formal Methods in Manufacturing of IEEE Transactions on Industrial Informatics, and Associate Editor of IEEE Transactions on Industrial Informatics. His research interests include performance modelling and evaluation of computer, communication and manufacturing systems.



Higinio Facchini received the Engineering degree in Electronic from Universidad Tecnológica Nacional - Regional Mendoza, Mendoza, Argentina, in 1985, and the Specialist degree in Data Networking from Universidad Nacional de La Plata, in 2011. Currently, he is the Area Director of GRID TICs, Research Center in Information and Communications Technologies. His current research interest is applications in data network, and traffic analysis of wired and wireless networks.



Luis Bisaro is student of Electronic Engineering from Universidad Tecnológica nacional – Regional Mendoza, Mendoza, Argentina. Currently, he is a member of GRID TICs, Research Center in Information and Communications Technologies. His current research interest is applications in data network, traffic analysis and techniques to model using SPNs-HSANS.