

# PROYECTO FIN DE CARRERA

---

## ESTUDIO Y ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE ACCESO Y ALGORITMOS DE ADAPTACIÓN DINÁMICA DE TOPOLOGÍA DE REDES INALÁMBRICAS AD HOC AUTOCONFIGURABLES

---

**Autor:**

*Jesús Alonso Zárate*

**Director del proyecto:**

*Luis Alonso Zárate*



Departament de Teoria  
del Senyal i Comunicacions



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de Barcelona  
Grupo de Comunicaciones Radio**

*3 de Marzo 2004*

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1	Redes inalámbricas	5
1.2	Las redes móviles ad hoc	5
1.3	Protocolos de acceso al medio (MAC)	6
1.3.1	Concepto de protocolo MAC	6
1.3.2	Situación actual de los protocolos MAC	7
<b>2</b>	<b>Motivaciones y objetivos del Proyecto</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>UN NUEVO PROTOCOLO MAC: DQCA AD HOC</b>	<b>8</b>
3.1	Síntesis del algoritmo DQRAP	8
3.2	Adaptación a entornos ad hoc: DQCA AD HOC	9
3.3	Sincronismo mixto	9
3.4	Red dinámica auto-configurable	9
3.5	Fase asíncrona: dos rangos de recepción	10
3.6	Fase síncrona: estructura de la trama DQCA AD HOC	11
3.7	Control de enlace (reconocimiento de paquetes, ACK)	12
<b>4</b>	<b>Simulador de redes ad hoc</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Rendimiento de DQCA AD HOC</b>	<b>13</b>
5.1	Redes single-hop	14
5.2	Redes multi-hop	15
5.3	Comparativa con IEEE 802.11b	16
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>19</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Redes inalámbricas

Uno de los principales motores del mercado de las telecomunicaciones en los últimos años ha sido la tecnología de redes inalámbricas, también llamadas *Wireless Local Area Networks (WLAN)*. La sociedad actual valora cada vez con más peso la libertad de poder estar comunicado en cualquier momento y desde cualquier lugar sin la necesidad de estar “enchufado” a un cable. Es por ello, que en los últimos años se han dedicado multitud de esfuerzos a desarrollar nuevas tecnologías que permitan este tipo de comunicación sin cables.

Con los últimos avances en tecnologías VLSI (diseño de microprocesadores) y los últimos avances en tecnologías inalámbricas, se han reducido drásticamente el tamaño y los requisitos de consumo de potencia de los terminales móviles, aumentando su portabilidad y haciendo realizable el sueño de lograr una comunicación sin cables.

Es indudable el hecho de que la tecnología inalámbrica ha ganado muchos adeptos y popularidad en los últimos años en gran diversidad de mercados tales como hospitales, fábricas, bodegas, tiendas, pequeños negocios, entornos académicos o simplemente, en el propio hogar. Este éxito se debe, fundamentalmente, a la posibilidad que ofrece este tipo de tecnologías de tener acceso a la información y la comunicación sin tener que estar en un lugar físico específico. Además, este tipo de redes son baratas y de muy fácil instalación, ya que no requieren de un despliegue de cableado ni de una planificación de red.

Por lo tanto, el futuro de las redes inalámbricas se presenta prometedor, ya que en la actualidad se prevé un crecimiento masivo en el ámbito de las comunicaciones móviles, y en concreto las WLAN, debido a la creciente exigencia de ancho de banda motivada por la gran popularización de internet y la necesidad de tener acceso a aplicaciones multimedia.

## 1.2 Las redes móviles ad hoc

El concepto de *red ad hoc* hace referencia a las redes en las que no hay una infraestructura previa, es decir, no hay más que los propios terminales móviles. En contraposición a las redes centralizadas, también son llamadas redes distribuidas.

En el caso de tecnologías inalámbricas, las redes ad hoc reciben el nombre de MANETs, del inglés, *Mobile Ad Hoc Networks*, y se trata de redes en las que los terminales móviles tienen un comportamiento nómada al moverse libremente por un territorio. Los terminales crean y destruyen vínculos entre ellos para llevar a cabo una comunicación efectiva y fiable. Es indispensable la colaboración entre todos los nodos para poder llevar a cabo una comunicación en un escenario en el que no hay un director de orquesta, tal y como sí sucede en las comunicaciones centralizadas en las que una estación base, o punto de acceso, se encarga de regir el orden y protocolo en las comunicaciones.

Inicialmente, el uso de la tecnología de redes ad hoc estaba limitado a entornos militares, tales como para el despliegue de tropas en terreno desconocido y hostil, para misiones de rescate en alta mar o en la montaña, o para situaciones de crisis tales como guerras o desastres naturales. Con el tiempo, los continuos avances en el campo tecnológico han permitido ampliar este tipo de comunicaciones más allá del ámbito militar:

- Uso comercial (exhibiciones, conferencias, presentaciones, etc.)
- Uso didáctico (clases virtuales)
- Uso industrial (comunicación entre sensores situados en plataformas móviles)
- Uso familiar (conexión a internet desde casa sin cables)

Son multitud las ventajas que ofrecen este tipo de tecnologías y que, por tanto, están dando pie a un creciente e imparable crecimiento de su demanda y su implantación. Entre otras muchas destacan la flexibilidad de este tipo de redes, la escalabilidad de las mismas, el rápido y económico despliegue de las mismas, la liberación del uso de cables y, por consiguiente, la posibilidad de poder estar conectado desde cualquier lugar...

Por todo ello, es imprescindible que la comunidad científica continúe invirtiendo tiempo y esfuerzo en desarrollar una tecnología que ofrece tal cantidad de beneficios para la sociedad de nuestros días.

### **1.3 Protocolos de acceso al medio (MAC)**

#### **1.3.1 Concepto de protocolo MAC**

Las redes inalámbricas se caracterizan por utilizar el canal radio como medio de transmisión. Este medio es compartido por el conjunto de usuarios de la red inalámbrica. Al tratarse de un medio compartido, es imprescindible establecer una serie de normas o leyes que rijan de una manera eficiente y ordenada el acceso a dicho medio. Este conjunto de normas son los llamados protocolos de acceso al medio, protocolos MAC, del inglés, *Medium Access Control protocols*. El propósito de los protocolos MAC en entornos inalámbricos es el de gestionar de una manera eficiente los escasos recursos radio disponibles. Su principal objetivo es el de optimizar el uso del canal radio, ya que el espectro de frecuencia disponible es limitado y el número de usuarios crece día a día, y no sólo el número de usuarios, si no que también los requerimientos de dichos usuarios. La creciente demanda de información multimedia, la combinación de voz y datos, el envío de video y audio, etc., exige nuevos y más estrictos requisitos en términos de grandes anchos de banda necesarios para cada usuario y, en muchos casos, con exigencia de calidad asegurada (QoS, del inglés, *Quality of Service*). Todo ello lleva a la necesidad de diseñar y proponer nuevos protocolos de acceso capaces de responder a las exigencias actuales.

Para el caso concreto de las redes ad hoc, la ausencia de infraestructura previa capaz de gestionar y controlar el acceso al canal radio, hace imprescindible la cooperación entre todos los usuarios para poder llevar a cabo un uso eficiente de los recursos. Sin duda, esta falta de centralización no es más que una dificultad añadida y un nuevo reto para el diseño de protocolos MAC eficientes.

### 1.3.2 Situación actual de los protocolos MAC

Son muchos los protocolos de acceso que se han propuesto hasta la fecha, aunque no todos han sido utilizados en sistemas comerciales de telecomunicaciones. La mayoría de estos protocolos de acceso se han desarrollado, principalmente, para entornos centralizados donde tan sólo hay un receptor y muchos transmisores. Este clásico modelo de sistema no encaja con el modelo de redes distribuidas ad hoc, donde las redes se deben configurar dinámicamente y adaptarse a los cambios de la topología de red.

Los primeros y más sencillos protocolos MAC fueron los protocolos ALOHA y Slotted-ALOHA, que han sido ampliamente utilizados como protocolos de acceso aleatorio a pesar de su baja eficiencia (18% y 36% de utilización máxima de canal, respectivamente) y su poca estabilidad en condiciones de elevada carga ofrecida de tráfico. Los inconvenientes presentados por los protocolos ALOHA y S-ALOHA dieron pie a los llamados algoritmos de resolución de colisiones, también llamados CRA (*Collision Resolution Algorithm*). Algunos de estos, llamados algoritmos en árbol [2] alcanzan eficiencias del 56%, mientras que otros, mediante el uso de ranuras temporales reservadas a la petición de acceso alcanzan eficiencias muy superiores, como por ejemplo el *Arrival Random Access Protocol* (AARA) [3], que alcanza valores del 86% usando tres ranuras de acceso por cada slot de datos. El *Distributed Queue Request Update Multiple Access* (DQRUMA) [4] es otro de los protocolos ampliamente utilizados que utiliza ranuras de acceso. La principal característica de este protocolo es que todo el control de acceso queda centralizado en la estación base, facilitando así la modificación sobre la marcha de los criterios de asignación de recursos de transmisión de los terminales en función de las necesidades del sistema. También destacan los protocolos basados en escuchas del canal radio *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) [5] con sus variantes de detección y evasión de colisiones, que se utilizan en algunos estándares de comunicaciones como el IEEE 802.11 (Ethernet). Los sistemas de paso de testigo (*token ring*) también han sido ampliamente utilizados ya que evitan por completo la existencia de colisiones. Para el caso de los sistemas de comunicaciones móviles se han desarrollado algunos protocolos que tratan de realizar tareas equivalentes a la detección del estado del canal que realizan los pensados para redes fijas. Entre este grupo de protocolos destaca el *Inhibit Sense Multiple Access* (ISMA) [6].

Como ya se ha comentado, la mayoría de estos protocolos se han desarrollado para entornos centralizados, y hasta el momento, son pocos los esfuerzos dedicados al desarrollo de protocolos para redes distribuidas. En la actualidad, la norma IEEE 802.11b especifica el protocolo MACA como protocolo de acceso en modo AD HOC [9].

En este sentido, el trabajo realizado en este proyecto supone una aportación a la comunidad científica, y por qué no, a la comunidad empresarial y comercial, proponiendo un novedoso protocolo de acceso diseñado para redes distribuidas ad hoc.

## 2 Motivaciones y objetivos del Proyecto

En 1992, W. Xu y G. Campbell, del Illinois Institute of Technology, propusieron un esquema de control de acceso al medio para distribución de señal de televisión por cable

llamado DQRAP (*Distributed Queuing Random Access Protocol*) [7]. El sistema para el que inicialmente diseñaron este protocolo consistía en una serie de terminales que debían comunicarse con una estación central por un medio común con multiplexación del tipo TDMA. Los propios autores hicieron notar que el mismo esquema de acceso era en realidad aplicable a cualquier entorno con estas características, y en particular para sistemas de transmisión por radio, como *wireless LAN* o sistemas celulares [10].

Posteriormente, en Febrero de 2001, L. Alonso y R. Agustí, profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña, propusieron una adaptación de DQRAP para sistemas de telefonía móvil de tercera generación. A su propuesta la llamaron DQRAP/CDMA [11].

Con estos antecedentes, y motivados por los prometedores resultados obtenidos tanto para entornos TDMA centralizados como para sistemas celulares de tercera generación, nos propusimos el diseño de un protocolo de acceso al medio, basado en algunas ideas de DQRAP y DQRAP/CDMA, y adaptado al entornos de redes distribuidas ad hoc. Se ha llamado a esta nueva propuesta, protocolo DQCA AD HOC (*Distributed Queuing Collision Avoidance protocol for Ad Hoc Networks*).

Teniendo en mente una posible aplicación práctica y comercial del protocolo, se impuso el requisito de mantener la total compatibilidad con la capa física establecida en la norma IEEE802.11b, fijando por tanto, un multiplexado temporal (TDMA).

### **3 UN NUEVO PROTOCOLO MAC: DQCA AD HOC**

#### **3.1 Síntesis del algoritmo DQRAP**

El protocolo DQRAP es un protocolo diseñado para redes centralizadas, basadas en un esquema de multiplexado en tiempo (TDMA), donde un nodo central se encarga de obtener cierta información de control que distribuye entre los terminales móviles para que estos puedan mantener actualizadas las dos colas distribuidas que rigen el acceso al canal radio, así como el algoritmo de resolución de colisiones. Estas colas son:

- cola de transmisión de paquetes (**DTQ**, del inglés, *Data Transmisión Queue*)
- cola de resolución de colisiones (**CRQ**, del inglés, *Collision Resolution Queue*).

La cola DTQ rige el orden de acceso al canal para transmitir datos, mientras que la cola CRQ es la que se encarga del algoritmo de resolución de colisiones.

Se citan a continuación, las características fundamentales del protocolo DQRAP:

- Es un protocolo basado en un sistema sincronizado, donde se reservan y separan recursos radio para las peticiones de acceso, para la transmisión de datos y para la distribución de información de control. Por lo tanto, se define una trama temporal que se repite periódicamente.
- Tras cada trama, un nodo central se encarga de distribuir entre los terminales móviles cierta información de control, que les permite mantener actualizadas las colas distribuidas DTQ y CRQ.
- Cuando hay nodos en la cola de resolución de colisiones se deniega el permiso a nuevas peticiones de acceso, ofreciendo una elevada estabilidad del protocolo ante altas cargas de tráfico.

- El protocolo se comporta como un protocolo de acceso libre cuando la carga de tráfico ofrecida al sistema es baja y cambia de manera automática y transparente para el usuario a un protocolo bajo reserva cuando la carga de tráfico total ofrecida al sistema aumenta.
- El protocolo DQRAP ofrece un rendimiento cercano al máximo teórico.

### **3.2 Adaptación a entornos ad hoc: DQCA AD HOC**

En el caso de redes inalámbricas móviles ad hoc, la falta de infraestructura previa, y por lo tanto, de un nodo central o estación base, imposibilita la implantación del protocolo DQRAP en este tipo de sistemas.

En el presente proyecto se ha desarrollado una alternativa que permite adaptar dicho protocolo a entornos distribuidos obteniendo resultados muy similares a los obtenidos en redes centralizadas.

Para ello, se han realizado tres tareas fundamentalmente:

- Modificar el algoritmo de actualización y mantenimiento de las colas distribuidas del protocolo de acceso al medio.
- Definir un protocolo de enlace que permita una comunicación fiable entre terminales.
- Definir un esquema master-esclavo dinámico en el tiempo y auto-configurable por la propia red, que permita la implantación del protocolo DQCA en entornos ad hoc.

A continuación, se ofrece una breve descripción de las características fundamentales del nuevo protocolo DQCA AD HOC. Por cuestión de síntesis, no se entrará en detalle de cada una de las funcionalidades del protocolo, las cuales pueden encontrarse en la memoria completa del Proyecto Final de Carrera.

### **3.3 Sincronismo mixto**

En términos de sincronismo, DQCA AD HOC, se comporta de un modo mixto. Los terminales móviles operan de modo asíncrono cuando no hay actividad en la red. En el momento que un nodo tiene datos a transmitir, inicia una fase de establecimiento de sincronismo entre los terminales vecinos para iniciar la comunicación. Por lo tanto, es requisito indispensable el establecimiento de dicho sincronismo para iniciar la transmisión de datos. Por otro lado, dos terminales que no se encuentran en el mismo rango de transmisión pueden trabajar en modos diferentes en un mismo instante. Uno puede estar en modo **síncrono**, mientras el otro lo hace en modo **asíncrono**.

### **3.4 Red dinámica auto-configurable**

DQRAP exige la presencia de estaciones centrales encargadas de distribuir información de control a los nodos y mantener el sincronismo en la red. Puesto que en el caso de las redes ad hoc, no hay presencia de estructuras preestablecidas, son los propios nodos los que deben realizar dichas funciones de control. Para ello, se definen en DQCA AD HOC tres modos de funcionamiento para los nodos:

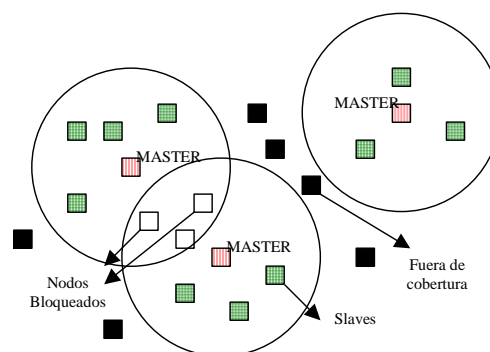
- **Master:** son aquellos nodos que inician una fase de sincronismo y ejecutan funciones de control, emulando a las estaciones base de las redes centralizadas.
- **Slave:** son aquellos nodos que, estando en el rango de cobertura de un nodo master, siguen el sincronismo y las reglas establecidas por los nodos master.
- **Libres:** son aquellos nodos, sin datos a transmitir, que permanecen fuera del alcance de cualquier nodo master y, por lo tanto, permanecen a la escucha del canal.

Cuando en una misma red, más de un nodo asume el rol de **master**, se crea una estructura pseudo-celular. En este caso, se pueden dar dos fenómenos indeseados:

- Nodos bloqueados:** si un nodo permanece en el rango de transmisión de dos o más nodos master simultáneamente, queda bloqueado sin poder entrar en el sistema al no poder recibir correctamente ningún paquete de control.
- Nodos fuera de cobertura:** si un nodo detecta actividad en el canal, pero es incapaz de recibir un paquete de control (debido a la debilidad de la señal), no puede iniciar su propio sincronismo ni conectarse al de otro nodo master, por lo que tampoco puede entrar en el sistema y, por lo tanto, transmitir o recibir paquetes.

Para evitar o minimizar el efecto de estas situaciones indeseadas que reducen el rendimiento del uso del canal radio, es necesaria una cierta movilidad en la red, ya sea por la propia movilidad de los terminales o por una baja carga de tráfico que fuerce la reconfiguración de la red. Puesto que estas dos situaciones no tienen por qué darse y son ajenas al propio protocolo, DQCA AD HOC incorpora un *time-out* para los nodos master, que limita el tiempo consecutivo durante el que un nodo puede trabajar como master. Pasado ese tiempo, deben entrar en modo libre y tener una probabilidad menor de reactivarse como nodos master que el resto de nodos vecinos. Este mecanismo además funciona como control de consumo energético de los terminales, aspecto fundamental a tratar en el caso de redes inalámbricas móviles.

A continuación se muestra un gráfico que expone un escenario en el que tres nodos asumen el rol de master simultáneamente.



**Figura 1 Estructura MASTER-SLAVE**

A continuación se esboza el funcionamiento de la fase asíncrona y síncrona del protocolo DQCA AD HOC.

### **3.5 Fase asíncrona: dos rangos de recepción**



Durante la fase asíncrona del protocolo no es posible la transmisión de datos. Para tal cometido, debe establecerse el sincronismo. Por lo tanto, la fase asíncrona del protocolo constituye dos funcionalidades:

- a) Funcionamiento de la red cuando no hay actividad de datos
- b) Periodo temporal de configuración de la red. Durante esta fase, cada nodo debe fijar su modo de funcionamiento; libre, slave o master.

Cuando un nodo permanece en estado libre, debe permanecer a la escucha del canal. Se definen dos sensibilidades de recepción:

- a) Rango de recepción de datos,
- b) Rango de recepción de actividad en el canal.

Estos dos rangos, definen a su vez 3 posibles estados del canal detallados en la Tabla 1:

Estados del canal detectables	
<b>Libre</b>	No hay actividad en el canal.
<b>Actividad</b>	Se detecta actividad, pero no con el suficiente nivel de señal como para decodificar correctamente los paquetes.
<b>Transmisión de datos</b>	Se detecta actividad y con el suficiente nivel de señal como para procesar correctamente los paquetes recibidos.

Tabla 1 Posibles estados del canal detectables por un nodo

### 3.6 Fase síncrona: estructura de la trama DQCA AD HOC

Una vez que un nodo asume el rol de master, debe enviar periódicamente un paquete de control FBP (del inglés, *FeedBack Packet*) que, además de contener información de control, actúa como marca de sincronismo (*time stamp*).

Todos los nodos conectados a un nodo master, siguen la siguiente estructura de trama:

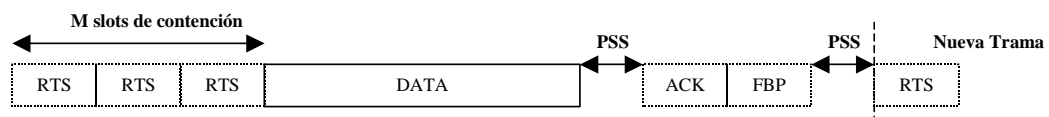


Figura 2 Estructura de la trama DQCA AD HOC

Se definen 6 ranuras temporales:

- 1) **Ventana de contención:** dividida en tres *minislots* reservados para el envío de paquetes de petición de acceso al sistema RTS (*Request to Send*).
- 2) **Transmisión de datos:** periodo reservado a la transmisión de datos.
- 3) **Intervalo de procesamiento de datos:** se reserva un tiempo PSS (*Processing Slot Silence*) reservado para el procesamiento de los datos recibidos por parte de los terminales.
- 4) **Reconocimiento:** reservada para el envío de paquetes ACK (*acknowledgement*) para el reconocimiento de paquetes a nivel de red.
- 5) **Información de control:** exclusiva para el envío de paquetes por parte de los nodos master con la información de control necesaria para mantener actualizadas las colas distribuidas definidas para DQCA AD HOC. Estos paquetes reciben el nombre de FBP (*Feedback Packets*)

- 6) **Intervalo de procesamiento de datos** para realizar el procesamiento e interpretación del paquete de control enviado por el master para el resto de nodos esclavos.

Cuando un nodo conectado a un master deja de recibir el paquete FBP de control, se pierde el sincronismo con el master y se reinicia una fase asíncrona.

### **3.7 Control de enlace (reconocimiento de paquetes, ACK)**

El control de enlace se ejecuta mediante el envío de paquetes de reconocimiento entre el nodo receptor de los paquetes y el nodo transmisor.

- Todos los nodos esclavos deben permanecer a la escucha del canal.
- En caso de que un nodo reciba un paquete del que es el destino, este debe responder con un paquete de reconocimiento (ACK) en la misma trama.
- El nodo master, por su parte, también debe reconocer el paquete con un bit destinado a tal cometido en el paquete de control.

Este tipo de reconocimientos permite validar los paquetes o solicitar retransmisiones cuando sea necesario, con el objetivo de garantizar una comunicación fiable.

Por otro lado, en DQCA AD HOC se ha desarrollado un protocolo de integridad de PDU (*Protocol Data Units*) que se encarga de asegurar que todos los paquetes de un mismo mensaje llegan a un mismo destino, es decir, que o bien alcanzan el destino o bien son enrutados por el nodo master. Este mecanismo de integridad solo se ejecuta cuando los mensajes deben ser separados en diferentes paquetes para ser transmitidos.

## **4 Simulador de redes ad hoc**

Con objeto de evaluar el rendimiento del protocolo DQCA AD HOC en diferentes entornos de comunicaciones, se ha diseñado un simulador software de redes Wi-Fi. Utilizando la tecnología **.NET de Microsoft**, basada en orientación a objetos, se ha independizado el protocolo MAC del resto de clases, permitiendo que la vida útil del simulador no acabe en el estudio del protocolo propuesto en este Proyecto Final de Carrera. Dicho en otras palabras, el protocolo MAC de los terminales es un módulo independiente del resto del simulador, por lo que su reprogramación es muy sencilla.

Teniendo en cuenta que la aplicación de la tecnología de redes ad hoc está en pleno auge, y se prevé que continúe así durante los próximos años, se considera que la herramienta creada para este proyecto supone una aportación a la comunidad científica de cara a posteriores estudios, ya se trate de optimizaciones del protocolo DQCA AD HOC, o bien nuevas propuestas de protocolos de acceso al medio.

A grandes rasgos, el simulador de redes ad hoc ofrece las siguientes características:

- Posibilidad de reconfigurar, por pantalla, multitud de parámetros, permitiendo una gran versatilidad para evaluar diferentes escenarios de comunicaciones. Algunos de estos parámetros se muestran a continuación en la Figura 3.

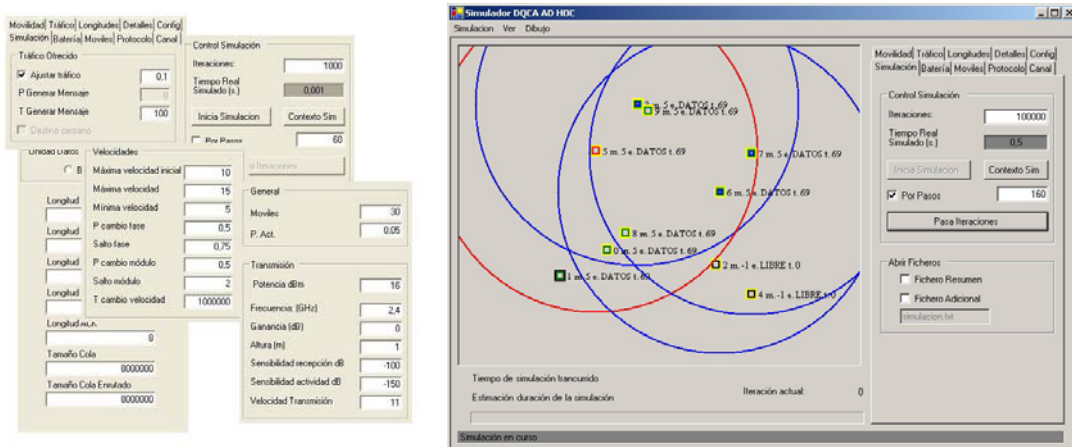


Figura 3 Entrada de parámetros del simulador y ventana del simulador

- Ventana gráfica en tiempo de simulación, que permite ver por pantalla y en tiempo real la evolución del sistema. Los terminales móviles están representados gráficamente, del mismo modo que las transmisiones y recepciones de los mismos (Figura 3).
- Información visual sobre la evolución del protocolo, lo cual permite realizar un seguimiento exhaustivo del sistema y, por lo tanto, comprender qué está sucediendo en cada momento. De esta manera es posible detectar situaciones indeseadas y, ayudados por el gráfico, encontrar o idear posibles soluciones.
- Monitorización de parámetros de funcionamiento de todos los terminales e imprime ficheros en formato texto con los resultados de la simulación. Estos ficheros de texto siguen unas plantillas definidas en formato Excel que permiten su inmediata exportación a Excel, desde el que se pueden extraer gráficas y cálculos que permitan extraer conclusiones y resultados.

## 5 Rendimiento de DQCA AD HOC

Haciendo uso del simulador diseñado a tal efecto y descrito en el apartado anterior, se ha evaluado el rendimiento del protocolo DQCA AD HOC. En este apartado se muestran los resultados más relevantes, clasificándolos en dos grandes escenarios:

- *Single-hop networks*, redes en las que todos los terminales se encuentran en el mismo rango de transmisión.
- *Multi-hop networks*, redes en las que no todos los terminales se encuentra en el mismo rango de transmisión.

Para cuantificar la eficiencia del protocolo se define el *throughput absoluto* como sigue:

$$\text{Throughput}_{\text{absoluto}} = \frac{\text{Trafico}_{\text{cursado}} (\text{bits})}{\text{Tiempo}_{\text{total}} (\text{seg})} (\text{bps})$$

En el desarrollo del Proyecto Final de Carrera se han evaluado multitud de parámetros y variables del sistema, pero en este resumen sólo se muestran los resultados en términos de throughput.

Asimismo, en este resumen tan sólo se muestran los resultados obtenidos para un escenario genérico en el que 30 nodos se desplazan aleatoriamente en un espacio cuadrado de dos dimensiones generando paquetes con una distribución estándar de Poisson. Todos los nodos tienen la misma tasa de generación de paquetes. La carga total ofrecida al sistema es la suma de todas y cada una de las cargas de tráfico ofrecidas por todos los nodos de la red. La potencia de transmisión se ha fijado a 20 dBm y la velocidad de transmisión se ha fijado en 11 Mbps, siguiendo el modelo del actual estándar IEEE 802.11b, que a día de hoy es el estándar comercial más extendido.

## 5.1 Redes single-hop

Cuando todos los nodos tienen comunicación directa entre sí, es decir, todos los nodos están en el mismo rango de transmisión, el rendimiento del protocolo es casi óptimo. El *throughput* del sistema se muestra a continuación en la Figura 4. Para cargas de tráfico bajas, el *throughput* crece linealmente con la carga ofrecida por todos los nodos de la red. **Cuando la carga ofrecida es igual o superior a la capacidad máxima de transmisión del canal, el *throughput* permanece constante independientemente de la carga ofrecida.** Este es uno de los puntos clave del protocolo DQCA AD HOC.

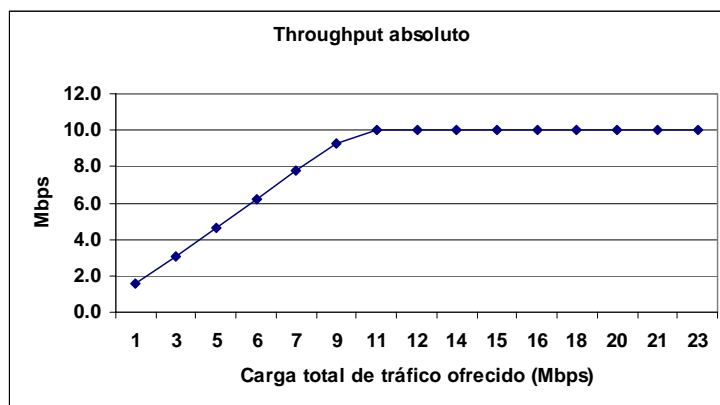


Figura 4 Throughput absoluto en función de la carga ofrecida al sistema

En términos de retardo medio, los resultados se muestran en la Figura 5. El retardo aumenta suave y progresivamente a medida que la carga de tráfico ofrecida al sistema aumenta. Una vez se alcanza la máxima capacidad del canal, si la carga ofrecida al sistema aumenta, no todos los paquetes pueden ser procesados por el sistema, por lo que el retardo se dispara.

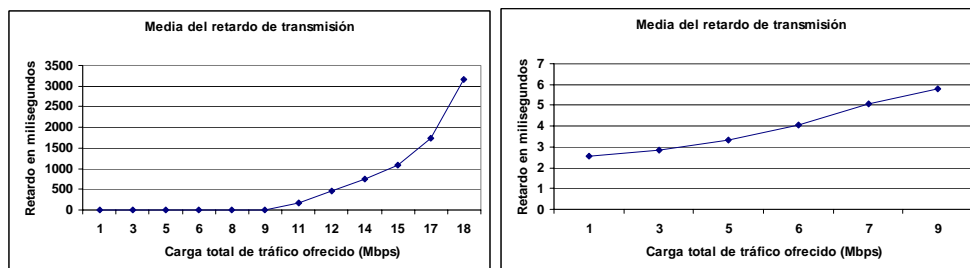


Figura 5 Retardo de transmisión en función de la carga total ofrecida

Estos resultados ponen de manifiesto que cuando todos los nodos se encuentran en el mismo rango de transmisión, el protocolo propuesto ofrece resultados cercanos al máximo teórico. Esto se debe a que DQCA AD HOC evita por completo las colisiones en el tiempo reservado a la transmisión de datos, y estas sólo se producen en la ranura temporal reservada para las peticiones de acceso.

## 5.2 Redes multi-hop

Son redes multi-hop aquellas en las que no todos los nodos se encuentran en el mismo rango de transmisión. En este caso, más de un nodo puede asumir el rol de master, formándose, por lo tanto, la estructura pseudo-celular propuesta en DQCA AD HOC. En este caso, dos nodos conectados a nodos master diferentes pueden interferir en sus transmisiones. Por este motivo, el rendimiento de DQCA AD HOC en este tipo de situaciones es algo menor que para el caso de redes *single-hop*. A pesar de ello, el protocolo muestra, en cualquier caso, resultados mejores a los protocolos MAC propuestos hasta el momento. Estos resultados se muestran, en términos de throughput, en la Figura 6. Se muestran los resultados obtenidos para dos casos independientes en función de la velocidad media de los terminales. Concretamente para 3 y 15 m/s de media.

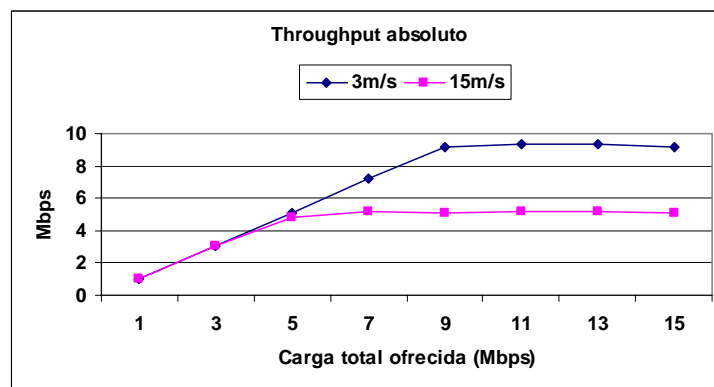


Figura 6 Throughput absoluto en función de la carga ofrecida al sistema

Cuando la velocidad de los terminales es relativamente elevada, el desplazamiento relativo entre los terminales fuerza la frecuente reconfiguración de la red cuando se producen colisiones. Estas reconfiguraciones implican una pérdida de rendimiento. Sin embargo, cuando la movilidad es relativamente baja, la red no debe ser reconfigurada constantemente y, por lo tanto, el protocolo muestra un elevado rendimiento.

En términos de retardo medio, los resultados se muestran a continuación en la Figura 7.

En este caso, igual que para el caso de redes *single-hop*, el retardo medio crece suavemente a medida que aumenta la carga total ofrecida. Una vez que se alcanza la máxima capacidad de transmisión del canal, el retardo se dispara a valores no acotados.

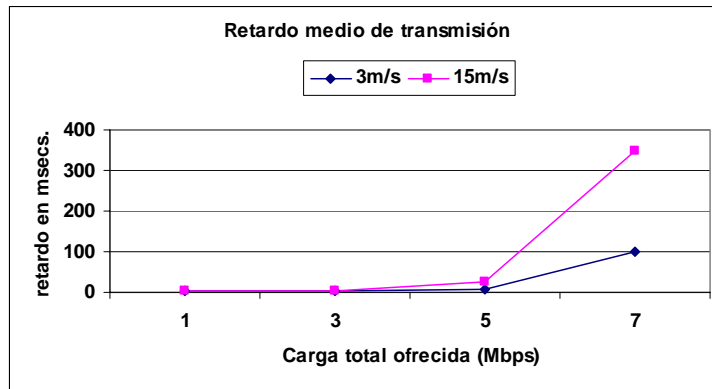


Figura 7 Retardo medio en función de la carga ofrecida al sistema

A pesar de que los resultados obtenidos para el caso de redes *multi-hop* es algo peor que el obtenido para los escenarios de redes *single-hop*, **en cualquier caso**, el protocolo **DQCA AD HOC** se comporta en términos de estabilidad ante elevadas cargas de tráfico y en términos de *throughput* del sistema, **siempre por encima del rendimiento obtenido por el estándar actual IEEE 802.11b**. A continuación se muestra una comparativa entre DQCA AD HOC y el protocolo MAC de la norma IEEE 802.11b.

### 5.3 Comparativa con IEEE 802.11b

Mediante el uso de un simulador de redes diseñado con el protocolo MACA, que constituye el protocolo de acceso al medio de la norma IEEE 802.11b, actualmente el estándar comercial más extendido, se ha realizado la comparativa entre el rendimiento del protocolo propuesto en el presente Proyecto Final de Carrera y el protocolo MACA.

Para el caso de redes *single-hop* el rendimiento de ambos protocolos es similar. El *throughput* crece linealmente con la carga total ofrecida al sistema, y se mantiene constante cuando se alcanza la máxima capacidad de transmisión del canal. Sin embargo, **la reducción de *overhead* impuesta por DQCA AD HOC en comparación con el *overhead* asociado al protocolo MACA hace que el protocolo DQCA AD HOC sea una mejor alternativa para este tipo de escenarios.**

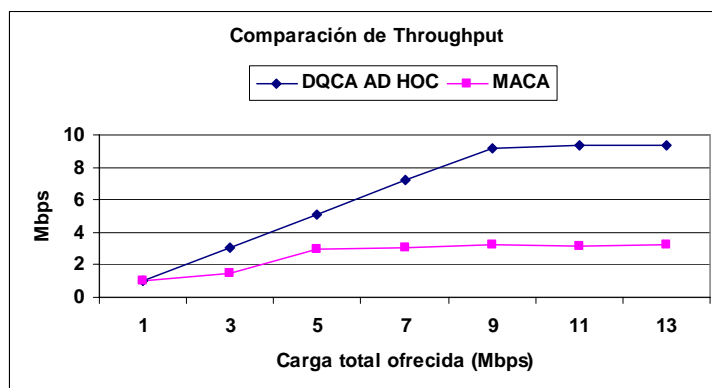


Figura 8 Throughput absoluto en función de la carga ofrecida al sistema

Por otro lado, si consideramos entornos *multi-hop*, los resultados, en términos de *throughput* se muestran en la Figura 8. **Estos resultados ponen de manifiesto que el**

**protocolo DQAC AD HOC mejora el rendimiento del protocolo MACA en más de un 100% cuando la carga de tráfico ofrecida es elevada.**

## **6 CONCLUSIONES**

El desarrollo de este proyecto supone una contribución para el desarrollo de las nuevas tecnologías inalámbricas móviles, en concreto, la tecnología de redes móviles ad hoc. La demanda de conexión a redes de datos desde cualquier parte del mundo y sin las ataduras que suponen los cables continúa creciendo y, conjuntamente, crece la complejidad de la naturaleza de las fuentes de datos. La información multimedia, que engloba datos, video y audio, requiere unas garantías de calidad de servicio, y en ese sentido, son imprescindibles nuevas ideas que permitan abordar los nuevos, y cada vez más complicados, retos que surgen para cubrir las necesidades.

En este sentido, este PFC presenta nuevas ideas en el ámbito de los protocolos de acceso al medio y algoritmos de enlace para redes distribuidas, y deja como herencia una herramienta software de simulación de redes ad hoc muy versátil y fiel a la realidad.

Tras realizar un estudio de la actual tecnología de redes inalámbricas y su situación en la sociedad actual, y realizar un proceso de análisis del **estado del arte** en cuanto a lo que protocolos de acceso al medio se refiere, se optó por realizar una innovadora propuesta de protocolo de acceso al medio que superara en términos de rendimiento a los estándares comerciales actuales.

Ideando y definiendo una estructura pseudo-celular dinámica en el tiempo y auto-configurable, basada en un esquema master-esclavo, se ha logrado adaptar un protocolo diseñado para redes centralizadas y con un rendimiento cercano al óptimo teórico, al escenario de las redes inalámbricas móviles ad hoc. La nueva propuesta ha recibido el nombre de DQCA AD HOC.

Cumpliendo (e incluso, sobrepasando) con los objetivos establecidos al inicio del desarrollo del proyecto, el rendimiento del protocolo DQCA AD HOC supera a los actuales estándares en más de un 200% cuando las condiciones de la red son favorables, y, en cualquier caso, ofrece un rendimiento muy por encima de los protocolos de acceso disponibles actualmente en el mercado. La aplicación de dicho protocolo en un entorno real y comercial, permitiría no sólo mejorar y optimizar el rendimiento de los sistemas actuales, si no que daría pie a soportar nuevas aplicaciones o llevar a cabo ideas que no han podido desarrollarse a día de hoy por la falta de mecanismos eficientes que ofrezcan grandes anchos de banda útiles y, en consecuencia, grandes tasas de velocidad de transmisión.

Junto con el desarrollo de la nueva propuesta de protocolo de acceso al medio, se ha desarrollado una herramienta software de simulación de redes ad hoc. Se ha diseñado de tal manera que puede ser válida para el estudio de cualquier tipo de protocolo de redes, ya sea de acceso al medio, de enrutado o de capas superiores. Su estructura visual hace muy fácil su uso, y su capacidad de emular diferentes entornos de comunicaciones es muy amplia. Con más de 50 parámetros reconfigurables en el simulador, las posibles combinaciones hacen que el simulador sea válido para el estudio de un amplio abanico de entornos.

Esta herramienta permite la evaluación práctica de nuevas propuestas de protocolos, necesarias para poder optimizar las nuevas ideas y fomentar el nacimiento de nuevas tecnologías. Las empresas del sector de las telecomunicaciones pueden evaluar sus protocolos y equipos antes de ponerlos en funcionamiento y, por lo tanto, encontrar los posibles defectos para su corrección, o potenciar sus virtudes. De esta manera pueden abaratar los costes que supone la implementación de nuevas tecnologías.

A modo de resumen final, se enumeran a continuación los objetivos alcanzados con el presente PFC:

- Se ha analizado la situación actual de la tecnología de redes inalámbricas Wi-Fi, centrandó el estudio en las redes inalámbricas ad hoc.
- Se ha propuesto un nuevo protocolo de acceso al medio MAC para trabajar en entornos ad hoc.
- Se ha desarrollado un simulador de redes ad hoc versátil y fácilmente reconfigurable para poder evaluar las prestaciones de protocolos de redes inalámbricas ad hoc.
- Se ha comparado el rendimiento de DQCA AD HOC con el estándar comercial más extendido en la actualidad, el definido en la norma IEEE 802.11b para redes ad hoc, y se ha comprobado que el rendimiento del nuevo protocolo supera las prestaciones del estándar actual en multitud de escenarios representativos de diversas aplicaciones reales.

Finalmente cabe destacar que los buenos resultados obtenidos en el presente Proyecto Final de Carrera y la aplicabilidad práctica que podría suponer en un futuro inmediato para el mundo industrial y comercial la implantación de las ideas mostradas en este trabajo, han motivado que este proyecto no acabe aquí, sino que sirva como punto de partida para la Tesis Doctoral que inicio en este curso 2004-2005.

Son varios las líneas futuras de investigación que quedan abiertas. Se citan a continuación algunas de ellas sobre las que se está trabajando en la actualidad:

- Incorporación de smart-antennas con haz direccionable,
- Uso de técnicas de multiplexado por código (CDMA) para reducir el efecto de las interferencias entre nodos master contiguos.
- Desarrollo de técnicas de Cross-Layer que permitan aumentar el rendimiento del protocolo en términos de throughput.



## 7 REFERENCIAS

- [1] L. Alonso, R. Ferrus, R. Agustí, “MAC-PHY Enhancement For 802.11b WLAN Systems Via Cross-Layering”, VTC’03 Fall, Orlando, October 2003.
- [2] Dimitri Bertsekas, Robert Gallager, *Data networks*, Prentice Hall International Editions. 1992.
- [3] T. Towsley, P.O. Vales, “Announced Arrival Random Access Protocols,” *IEEE Trans. On Communications*, vol. COM-35, No. 5, pp. 513-521, mayo 1987.
- [4] M. J. Karol, Z. Liu, K. Y. Eng, “Distributed-Queuein Request Update Multiple Access (DQRUMA) for Wireless Packet (ATM) networks,” *Proceedings ICC’95*, pp. 1224-1231, Seattle, WA.
- [5] L. Kleinrock and F. Tobagi, “Packet Switching in Radio Channels. I. Carries Sense Multiple Access Models and Their *Throughput* Delay Characteristics,” *IEEE Trans. On Communications*, vol. COM-23, no. 12, pp.1400-16, Diciembre 1975.
- [6] J. Pérez, R. Agustí, O. Sallent, “Performance analysis of an ISMA CDMA packet data network,” *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, VTC’99 Fall. Amsterdam, Septiembre 1999.
- [7] Wenxin Xu, Graham Campbell, “A Near Perfect Stable Random Access Protocol for a Broadcast Channel,” *IEEE Proceedings of ICC’92*, vol.1, pp. 0370,0374.
- [8] Wenxin Xu, Graham Campbell, “DQRAP – A Distributed Queuing Random Access Protocol for a Broadcast Channel,” *SIGCOMM ’93*, San Francisco, September 1993, y *Computer Communication Review*, vol.23, No. 4, pp. 270-178, October 1993.
- [9] E. Borgia, M. Conti, E. Gregori, “IEEE 802.11 Ad Hoc Networks: Performance Measurements,” *IEEE Computer Society*. 2003.
- [10] Harn-Jier Lin, Graham Campbell, “Using DQRAP for Local Wireless Communications,” *DQRAP Research Group Report 93-3*. Department of Computer Science. Illinois Institute of Technology. Chicago 1993.
- [11] L. Alonso, R. Agustí, O. Sallent, “A Near-Optimum MAC Protocol Based on the Distributed Queuing Random Access Protocol (DQRAP) for a CDMA Mobile Communication System,” *IEEE Journal On Selected Areas in Communications*, vol. 18, no.9, September 2000.