



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Análisis de técnicas de acceso al medio avanzadas basadas en colas distribuidas y mecanismos Cross-Layer para sistemas de comunicaciones inalámbricas

TITULACIÓN: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació

AUTORA: Nadia Mohedano Troyano

DIRECTOR: Luis G. Alonso Zárate

DIRECTOR EXTERNO: Christos Verikoukis (CTTC)

FECHA: 19 de diciembre de 2007

Título: Análisis de técnicas de acceso al medio avanzadas basadas en colas distribuidas y mecanismos Cross-Layer para sistemas de comunicaciones inalámbricas

Autor: Nadia Mohedano Troyano

Director: Luis G. Alonso Zárate

Director Externo: Christos Verikoukis (CTTC)

Fecha: 19 de diciembre de 2007

Resumen

El uso de las redes inalámbricas 802.11 está en continua expansión en la actualidad. Este hecho provoca que cada vez se requiera un mayor control para garantizar una cierta calidad de servicio (QoS) en diferentes aplicaciones, especialmente las que trabajan en tiempo real.

Un primer objetivo de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento de un sistema WLAN haciendo uso de la variación MS de un protocolo MAC de alta eficiencia llamado DQCA (*Distributed Queueing Collision Avoidance*), dando soporte a cuatro clases de servicio, diferenciando y priorizando cada servicio. Este escenario ha requerido realizar la adaptación del funcionamiento del protocolo para dar soporte a la situación multi-servicio. Otro objetivo era poder estudiar el sistema haciendo uso de la capa física del estándar 802.11g partiendo de la base de los estudios ya realizados a partir de la capa física de 802.11b. Una vez realizado el primer paso y obtenido un sistema DQCA multiservicio (MS systems) con cuatro clases de servicios de diferente prioridad, se han propuesto y estudiado dos técnicas basadas en el diseño Cross-Layer, con el fin de mejorar la eficiencia y el aprovechamiento de los recursos disponibles en redes WLAN. La idea fundamental del diseño Cross-Layer consiste en permitir un intercambio de información entre las capas del modelo OSI que forman el sistema de comunicaciones. En el presente trabajo se han propuesto técnicas Cross-Layer que utilizan la información proveniente de la capa física en la capa MAC, adaptando las transmisiones según el estado del canal radio.

El estudio del rendimiento de las diferentes técnicas se han llevado a cabo con simulaciones por ordenador, que han permitido evaluar y cuantificar las mejoras que las técnicas propuestas ofrecen en distintos escenarios significativos.

El análisis de los resultados obtenidos ha permitido concluir que las técnicas propuestas ofrecen mejoras significativas en los distintos escenarios de trabajo considerados, especialmente en términos de *throughput* y retardo medio. Sus principales virtudes son la sencillez de implementación y los buenos resultados que ofrecen en cuanto al aprovechamiento de los recursos del sistema.

Tras el estudio realizado concluimos que las técnicas propuestas permiten mejorar la eficiencia de sistemas WLAN de forma significativa y por tanto se trata de propuestas interesantes a tener en cuenta en el diseño de futuras redes inalámbricas.

Title: Analysis of Advanced Medium Access Techniques based on Distributed Queues and Cross-Layer Mechanisms for Wireless Communications Systems

Author: Nadia Mohedano Troyano

Director: Luis G. Alonso Zárate

External Director : Christos Verikoukis (CTTC)

Date: December 19th, 2007

Overview

The use of 802.11 wireless LANs is in constant expansion at this moment. For this cause, every day more and more control to guarantee a certain quality of service (QoS) in different applications is needed, specially the ones which work in real time.

An objective of this project has been to study the WLAN system's behaviour using the Multi-Service variation from a high efficient MAC protocol called DQCA (Distributed Queueing Collision Avoidance), giving support to four different service classes and giving different priorities to each service. This scenario has required the adaptation of the protocol's operation mode in order to give support for the multi service situation. Another objective was to study the system using the physical layer of the 802.11g standard, similarly to other studies already done for other PHY standards like 802.11b. Once the first step has been done, obtaining a MS DQCA system supporting four classes of services with different priorities, we have proposed and studied two techniques based on Cross-Layer design in order to improve system efficiency and available resources utilization. The main idea of Cross-Layer design is to allow an information exchange between OSI model layers. The Cross-Layer techniques proposed make use of certain PHY information in the MAC layer so that data packets transmissions are adapted according to the radio channel state.

The study of the performance of the different techniques has been done with computer simulations that have allowed to evaluate and measure the benefits of the proposed techniques in different representative scenarios.

The analysis of the results obtained show that the proposed techniques provide significant enhancements under the several considered scenarios, especially in terms of throughput and average delay. They are also simple to implement and they have a very high efficiency in the use of the transmission resources.

After the study done, we can conclude that the proposed techniques provide significant efficiency enhancements for WLAN systems so that all of them may be taken into account in future wireless networks.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS	2
1.1. Introducción a las redes locales inalámbricas	2
1.2. Introducción a los principales protocolos MAC	3
1.3. Introducción al diseño Cross-Layer	3
1.4. Motivación y objetivos del trabajo	4
CAPÍTULO 2. SISTEMAS WLAN	6
2.1. Introducción	6
2.2. 802.11	6
2.3. DQCA.....	6
2.4. Sistemas MultiServicio (“MS systems”).....	8
2.5. 802.11e	9
2.6. MSDQCA	9
CAPÍTULO 3. ENTORNO DE TRABAJO	11
3.1. Introducción	11
3.2. Escenario de trabajo	11
3.2.1 Sistema WLAN 802.11b.....	11
3.2.2 Sistema WLAN 802.11g.....	12
3.2.3 Parámetros MSDQCA.....	13
3.2.4 Modelos de canal.....	14
3.2.5 Modelos de tráfico.....	18
CAPÍTULO 4. GESTIÓN DE RECURSOS	23
4.1 Introducción	23
4.2. MSDQCA básico	23
4.2.1. MSDQCA-P (with Priority).....	23
4.3. MSDQCA con técnicas Cross-Layer.....	24
4.3.1. MSDQCA+CLLA (with Cross-Layer Link Adaption technique).....	25
4.3.2. MSDQCA+CLVPF	25
CAPÍTULO 5. SIMULADOR DQCA	27
5.1 Introducción	27

5.2 Estructura general del simulador	27
CAPÍTULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS	30
6.1 Introducción	30
6.2 Parámetros de las simulaciones	30
6.3 MSDQCA básico (NP y P)	31
6.3.1. Conclusiones con acceso MSDQCA básico.....	34
6.4 Resultados con acceso MSDQCA con técnicas Cross Layer.....	34
6.4.1. MSDQCA+CLLA	35
6.4.2. Conclusiones acerca del rendimiento de la técnica CLLA	38
6.4.3. MSDQCA+CLVPF	39
6.4.4. Conclusiones acerca del rendimiento de la técnica CLVPF.....	42
6.5. Conclusiones generales tras el análisis de resultados.....	43
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	45
7.1. Conclusiones finales.....	45
7.2. Consideraciones medioambientales	46
7.3. Línea futuras de investigación.....	46
REFERENCIAS.....	48
ANEXO 1. PRINCIPALES PROTOCOLOS MAC PARA SISTEMAS INALÁMBRICOS.....	1
1.1 ALOHA.....	1
1.2 Carrier Sense Multiple Access (CSMA).....	1
1.3 Inhibit Sense Multiple Access (ISMA).....	2
1.4 Distributed Queueing Request Update Multiple Acces (DQRUMA)	2
ANEXO 2. MAC 802.11	3

INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas WLAN son hoy en día muy conocidas y utilizadas en nuestra sociedad. No sólo los propietarios de equipos portátiles con capacidades WLAN prefieren no usar cables. Muchos hogares también se suman a esta práctica forma de transmitir información y las redes inalámbricas permiten a los usuarios acceder a la información y los recursos en tiempo real sin necesidad de estar físicamente en un sólo lugar.

A pesar de la gran cantidad de nuevas versiones que han ido surgiendo del estándar más extendido para WLAN (IEEE 802.11), siguen existiendo ciertas limitaciones en términos de eficiencia y estabilidad. Muchas de estas limitaciones son inherentes de las tecnologías inalámbricas, pero otras muchas como se ha demostrado en los últimos años se solucionan mediante el uso de nuevos protocolos más eficientes, como los de la familia DQ*, por ejemplo DQCA o DQMAN.

Por otro lado, también se ha demostrado que las técnicas 'Cross-Layer', cuya idea fundamental es la de permitir un intercambio de información entre capas con el fin de optimizar la utilización de los recursos disponibles en el sistema, son más eficientes que la clásica visión del sistema de comunicaciones como pila de protocolos formada por capas aisladas que no interaccionan entre sí (modelo OSI).

Partimos de los resultados previos realizados sobre el rendimiento de protocolos de la familia DQ* para sistemas de comunicaciones inalámbricas junto con el uso de mecanismos Cross-Layer, que mejoran sustancialmente las comunicaciones en términos de throughput, retardo y jitter de los paquetes.

La finalidad del presente trabajo es la de analizar a partir de simulaciones el rendimiento de las mejoras propuestas recientemente sobre los protocolos MAC para un sistema que se caracteriza por ofrecer cuatro servicios y ocho tasas diferentes de transmisión, correspondientes al set básico de la capa física de 802.11g.

El método básico de análisis del sistema ha sido la realización de simulaciones por ordenador a nivel de enlace. Inicialmente disponíamos de un simulador programado en lenguaje C++ con una versión del protocolo DQCA mono-servicio y basada en la capa física de 802.11b. Por un lado se ha modificado dicho simulador para soportar cuatro servicios y las velocidades de transmisión de 802.11g. Por otro lado, se han analizado los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas tanto de priorización como de diálogo Cross-Layer y se han estudiado sus prestaciones.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

1.1. Introducción a las redes locales inalámbricas

Una red local inalámbrica (WLAN - Wireless Local Area Networks) es una red inalámbrica en la cual varios dispositivos (típicamente ordenadores portátiles pero últimamente, en aumento, PDAs, impresoras, servidores, etc.) se comunican con el resto sin la necesidad de cables. WLAN utiliza una tecnología basada en ondas radio para establecer la comunicación entre dos dispositivos en un área geográfica limitada. La mayor ventaja de esta tecnología es que da a los usuarios la movilidad para moverse en una amplia área de cobertura mientras ofrece tasas altas de transmisión.

El primer estándar de WLAN fue creado por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) el año 1997 y se denomina IEEE 802.11. Este estándar únicamente recogía las especificaciones de la capa física (PHY) y capa MAC de la pila OSI [1]. Desde su aparición, varios organismos internacionales han desarrollado gran actividad centrada en el proceso de estandarización de normativa de WLAN y han generado un amplio abanico de nuevos estándares. En Estados Unidos la mayor parte del trabajo la ha llevado a cabo el IEEE con los estándares 802.11 y sus variantes (b, g, a, e, h, n, etc.) mientras que en Europa ha sido el ETSI con sus actividades en el estándar HIPERLAN/2. La Tabla 1.1 muestra las características técnicas de los principales estándares WLAN.

Tabla 1.1. Características de los estándares WLAN más extendidos

Estándar WLAN	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	HIPERLAN/2	IEEE 802.11n
Organismo	IEEE (USA)	IEEE (USA)	IEEE (USA)	ETSI (Europe)	IEEE (USA)
Año finalización	1999	2002	2003	2000	2008
Banda de frecuencia	2.4 GHz ISM	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz o 5 GHz
Velocidad máxima	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	54Mbps	540 Mbps
Interfaz Aire	DSSS	OFDM	OFDM	OFDM	MIMO

IEEE 802.11b es el protocolo más utilizado desde su aparición, su evolución, IEEE 802.11g, ya está comenzando su disponibilidad en el mercado. Hiperlan/2 probablemente ha perdido la carrera comercial respecto a ambos protocolos debido a su retraso para introducirse en el mercado, a pesar de resolver algunos problemas asociados con el 802.11g en temas relacionados con la robustez frente a interferencias y QoS (calidad de servicio).

Actualmente los estándares más extendidos son el 802.11b y el 802.11g, lo cuál hace que sean la opción por la que optan la mayoría de fabricantes. Nosotros fijaremos nuestra atención en el estándar 802.11g mayoritariamente, aunque utilizaremos el 802.11b para comparar las prestaciones dadas. Como vemos en la Tabla 1.1, 802.11g opera en la banda de 2.4 GHz ISM. A pesar de particularizar el estudio realizado a dicho estándar, las técnicas Cross-Layer propuestas, junto con el protocolo DQCA, son aplicables a cualquier otro estándar WLAN puesto que son independientes de la capa física aplicada.

1.2. Introducción a los principales protocolos MAC

En los sistemas de comunicaciones, a menudo es necesario que varios usuarios compartan un medio de transmisión. Para gestionar el uso de este recurso común deben establecerse ciertas estrategias de gestión o protocolos de acceso.

El protocolo de acceso al medio (MAC) es el mecanismo que determina qué usuario y cuando tiene acceso al medio de transmisión. Los protocolos MAC son los encargados de organizar los accesos de manera que se eviten las colisiones entre usuarios, o en su defecto que los usuarios sepan qué deben hacer cuando están ocurriendo.

Por cuestiones de restricciones de espacio, en el Anexo 1 se describen a grandes rasgos los principales protocolos de acceso al medio para sistemas inalámbricos.

1.3. Introducción al diseño Cross-Layer

Las líneas de investigación para las comunicaciones inalámbricas es una de las áreas que recientemente ha sufrido un mayor progreso y desarrollo. El sistema de capas es la metodología de diseño dominante para los protocolos utilizados en las comunicaciones inalámbricas. El modelo de capas OSI está basado en la independencia entre capas, ese es su principal principio. A pesar de que esta consideración simplifica el diseño del protocolo, parece ser perjudicial para los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Esto es debido al hecho que el medio inalámbrico es alcanzable por múltiples usuarios que intentan obtener acceso y transmitir su información. Además, los sistemas inalámbricos añaden una elevada tasa de error, ráfagas de errores y una capacidad variable en el tiempo.

La eficiencia, en términos de QoS, de muchos sistemas puede ser optimizada cuando consideramos un intercambio vertical de información entre las capas de la pila de protocolos. Este concepto general es conocido como optimización Cross-Layer [10] y [11]. Además, muchos parámetros de la capa física deben estar disponibles para capas superiores y, basados en esta información, protocolos de capas superiores pueden adaptar su comportamiento para

mejorar las prestaciones de la red. El concepto Cross-Layer es más evidente en la interfaz entre la capa física y la capa MAC, en este caso, los protocolos de dichas capas pueden beneficiarse del conocimiento de características variantes en el tiempo del canal radio. Todos estos protocolos administran los recursos radio e intentan dar cierto nivel de calidad de servicio (QoS) a usuarios móviles evitando o al menos reduciendo colisiones.

1.4. Motivación y objetivos del trabajo

En este punto describiremos las motivaciones y objetivos, una vez emplazado el presente trabajo en su contexto.

La naturaleza de la información transmitida a través de las redes de comunicaciones ha sufrido una incesante evolución en los últimos años. La cantidad de información transmitida en modo paquete crece día a día. Incluso los flujos de voz están empezando a transmitirse a través de redes basadas en el protocolo IP (voz sobre IP) y convirtiéndose también en un flujo discontinuo de datos. De esta manera, es especialmente interesante centrar los esfuerzos de investigación en estrategias que tengan en cuenta este modo de transmisión.

En los últimos años, a pesar de haberse mantenido la tradicional visión del sistema de comunicaciones como una pila de capas estáticas, aisladas e independientes (modelo OSI), las distintas versiones del estándar más extendido para WLAN (IEEE 802.11x) surgidas han consistido principalmente en modificaciones de la capa física con el fin de alcanzar tasas de transmisión superiores. Sin embargo, recientes trabajos de investigación [2], [3], [4], [5], demuestran que es posible alcanzar cotas de eficiencia superiores mediante la aplicación de modificaciones en la capa MAC y la interacción entre las capas que forman el sistema (Cross-Layer).

Las nuevas versiones surgidas para WLAN también presentan cambios en la velocidad máxima de transmisión. En el estándar 802.11b la velocidad máxima es de 11Mbps, en el 802.11g de 54Mbps y el reciente 802.11n presenta una de 540Mbps.

Con este marco de referencia, el presente trabajo se centra en la propuesta y comparativa de funcionamiento del protocolo MAC de alta eficiencia DQCA entre un entorno de un solo servicio con un entorno con varias clases de servicio presentes. Se considerará en todo momento el diseño para transmisiones realizadas en modo paquete. Se ha considerado la capa física del estándar 802.11g, aunque los estudios son generales y aplicables a cualquier otro estándar de capa física. Se han llevado a cabo simulaciones por ordenador que han permitido evaluar el funcionamiento de este protocolo MAC partiendo de las mejoras conocidas de la utilización del protocolo DQCA para un entorno basado en la capa física de 802.11b [8] y [9].

Los objetivos del presente trabajo pueden resumirse del siguiente modo:

- Estudiar y analizar las características del protocolo de acceso DQCA y de la familia de protocolos MAC basados en colas distribuidas para sistemas de comunicaciones inalámbricas.
- Proponer las adaptaciones necesarias del protocolo DQCA para poder soportar diversas clases de servicio.
- Diseñar nuevos mecanismos de gestión de recursos radio para dotar de diferentes prioridades de transmisión a diversas clases de servicio en sistemas de comunicaciones inalámbricos basados en el uso de protocolos MAC de colas distribuidas como DQCA.
- Evaluar el rendimiento de los mecanismos propuestos en diferentes escenarios significativos de trabajo. Esta evaluación se realizará en base a simulaciones por ordenador.
- Diseñar mecanismos de gestión de recursos radio basados en técnicas Cross-Layer para mejorar el rendimiento de los sistemas inalámbricos considerados.
- Evaluar la mejor obtenida por las técnicas Cross-Layer en escenarios significativos. El estudio comparativo se basará en simulaciones por ordenador.
- Incluir en el sistema nuevos modelos de canal preparados para estudiar sistemas basados en técnicas actualizadas de transmisión como la del estándar 802.11g, y evaluar las prestaciones de todas las propuestas anteriores en este nuevo escenario.
- Obtener conclusiones prácticas que puedan permitir mejorar los sistemas de comunicaciones inalámbricos del futuro.

CAPÍTULO 2. SISTEMAS WLAN

2.1. Introducción

El estándar IEEE 802.11 para WLAN define dos topologías de red posibles de red posibles: Red Ad Hoc y Red en modo Infraestructura. A continuación nos proponemos describir brevemente dos protocolos MAC diseñados para gestionar el acceso al medio en sistemas WLAN en modo Infraestructura, los cuales son los protocolos considerados en el presente estudio.

2.2. 802.11

El protocolo MAC utilizado en el estándar 802.11 proporciona un acceso al medio equitativo compartido a través de dos mecanismos distintos: un protocolo de acceso de uso obligatorio basado en contención, llamado *Distributed Coordination Function* (DCF), y un protocolo basado en sondeo (*polling*), llamado *Point Coordination Function* (PCF). El mecanismo PCF raramente se utiliza en los dispositivos comerciales disponibles en el mercado actual y es ineficiente para transmisiones en modo paquete. El mecanismo DCF está basado la técnica CSMA/CA y hace uso de un tiempo de transmisión virtual (VTT) en el cual se realizan las transmisiones de datos. Este tiempo de transmisión virtual incluye las transmisiones de reconocimientos ACK, períodos de contención, intervalos IFS (*Inter Frame Spaces*) y la posibilidad de múltiples intentos de retransmisión debidos a colisiones o recepciones erróneas.

El protocolo MAC definido en el estándar 802.11 hace uso de un elevado número de intervalos de tiempo no destinados a la transmisión de datos, tales como los períodos de *backoff* o los intervalos IFS. Dichos períodos disminuyen de forma considerable la eficiencia del esquema MAC utilizado en redes inalámbricas 802.11.

En el Anexo 2 se incluye una descripción más detallada acerca del funcionamiento del MAC 802.11.

2.3. DQCA

DQCA es un protocolo de acceso al medio diseñado para entornos WLAN que ofrece un funcionamiento mejorado respecto al protocolo MAC DCF implementado en el estándar 802.11 [3]. Debido a las restricciones de espacio, el propósito de esta sección es destacar las características de DQCA que son esenciales para el entendimiento de los mecanismos de selección propuestos y otras mejoras. Una explicación detallada de DQCA, junto con las reglas funcionamiento del protocolo las podemos encontrar en [3] y [4]. En pocas palabras, el aspecto más relevante del protocolo DQCA es que pasa de forma

transparente y progresiva de un sistema del tipo Slotted-ALOHA de acceso libre para cargas de tráfico bajas (minimizando así el retardo), a un sistema de reserva cuando el tráfico es alto (evitando las colisiones y mejorando el caudal) de modo que se retienen las ventajas de ambos mecanismos.

Consideraremos una red en la que N nodos comparten un canal wireless para comunicarse con un Access Point (AP). El eje del tiempo se divide en tramas DQCA las cuales consisten en tres partes (ver Figura 2.1).

La primera parte, también conocida como Ventana de Contención (Contention Window, CW). La Ventana de Contención se divide en m minislots de control, durante los cuales los nodos pueden hacer la petición de acceso al canal mandando un ARS (Access-Request Signal) al AP. El ARS es simplemente una ráfaga de energía la cual no contiene ninguna información. Debido a esto, la duración del ARS puede ser significativamente reducida por eso se minimiza el *overhead*. La segunda parte es el slot de datos, dedicado a la transmisión de paquetes de datos en el uplink. Sólo un nodo puede estar transmitiendo a un slot de datos dado. En la tercera parte el AP manda un FBP (Feedback Packet) con alguna información requerida. La información enviada juega un papel importante en DQCA. Básicamente, conoce el paquete de datos transmitido previamente y envía la información sobre el estado de los minislots. Cada minislot puede encontrarse en tres situaciones: no intento de transmisión (idle), transmisión satisfactoria por un nodo (success) o intento de transmitir por más de un nodo (collision). En cada trama DQCA el AP detecta el estado de todos los slots (los m slots de control y el de datos) e incorpora esta información del estado en el FBP. Un intervalo SIFS (Short Inter Frame Space) se añade para el procesamiento.

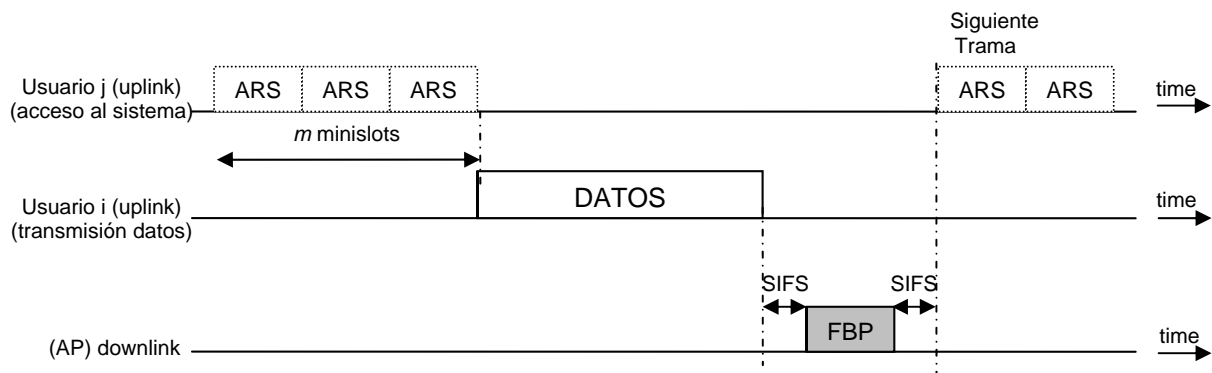


Figura 2.1 Estructura de la trama DQCA

El protocolo utiliza dos colas distribuidas: la cola de resolución de colisiones (CRQ) y la cola de transmisión de datos (DTQ). Un nodo con un nuevo mensaje para transmitir, escoge aleatoriamente uno de los m minislots y envía un ARS. Cuando dos o más nodos transmiten un ARS en el mismo minislot, ocurre una colisión. El nodo es consciente de la colisión porque consta en el FBP. El nodo involucrado entra en la cola CRQ y en la próxima trama se aplica el algoritmo de resolución de colisiones: los nodos en la cabeza de la CRQ reenvían un ARS en un minislot de acceso seleccionado aleatoriamente en la próxima trama. Si ellos colisionan otra vez, vuelven a entrar en la CRQ y se

repite el proceso hasta que su petición se resuelve satisfactoriamente. Para prevenir inestabilidades, no se permite que los nodos envíen nuevos ARS mientras la CRQ no esté vacía. Los nodos que envían una petición de acceso satisfactoriamente entran en la DTQ y esperan su turno para transmitir su mensaje. La resolución de colisiones y el proceso de transmisión de datos trabajan en paralelo.

Una característica clave de DQCA es que las dos colas son distribuidas. Esto significa que en cualquier momento, cada nodo conoce el estado de las colas y su posición en ambas, si es el caso. La información acerca de las colas no es transmitida directamente por el AP, en su lugar es enviada a cada nodo a través del procesamiento del FBP enviado por el AP, y la ejecución de un conjunto de reglas predefinidas al final de cada trama DQCA. Esto es muy importante ya que la posición de cada nodo en las colas define su acción en la siguiente trama: un nodo en la cabeza de la CRQ puede transmitir un ARS en la siguiente trama para intentar resolver su colisión, mientras el nodo en la cabeza de la DTQ puede transmitir un paquete de datos la siguiente trama. Para esta operación, solo cuatro contadores integer son guardados en cada nodo: TQ, RQ, pTQ y pRQ. TQ y RQ representan el número de nodos en la DTQ y en la CRQ respectivamente, además tienen el mismo valor para todos los nodos. pTQ y pRQ indican la posición de cada nodo en la respectiva cola. pTQ debería tener diferentes valores para cada nodo, aunque los nodos que colisionen en el mismo minislot tendrán el mismo valor de pRQ. Remarcamos aquí que los valores de TQ y RQ deben ser siempre los mismos para todos los nodos (ellos representan las colas distribuidas) mientras que pTQ y pRQ pueden diferir entre dos nodos ya que indican las posiciones en las que se encuentra el nodo en cada cola.

Este trabajo se centra en el uso de DQCA como una mejora del protocolo MAC 802.11, concretamente en el caso del protocolo 802.11b y 802.11g. Con la implementación de técnicas Cross-Layer en el caso del último.

2.4. Sistemas MultiServicio (“MS systems”)

Los sistemas multiservicio permiten establecer una diferenciación entre los diferentes clases de servicio que corresponden normalmente a diferentes aplicaciones con distintos requisitos de calidad (voz, datos, video, best-effort, etc). En la mayoría de sistemas se tratan todos los paquetes por igual pero desde hace un tiempo se están empezando a utilizar sistemas MultiServicio los cuales están preparados para tratar más de una clase de servicio y darle a cada grupo de paquetes un trato diferenciado, lo que también es conocido como “service differentiation”.

Basándonos en los sistemas multiservicio surgidos hasta el momento, estableceremos 4 colas distintas según el tipo de servicio. Esto permite dar prioridad a cierto tráfico y, de esta forma, prevenir colisiones y retrasos, por lo cual mejorará la experiencia VoIP, por ejemplo. Se establece una priorización entre las clases de servicio, de manera que la categoría más prioritaria reduzca

su retardo de acceso al sistema. El tráfico de voz es el de máxima prioridad, pues este tipo de servicios no admite demoras. Luego se ha definido el tráfico de video como el siguiente en prioridad, y finalmente el tráfico de datos se ha dividido en dos flujos de diferente prioridad. En la última clase, la menos prioritaria, se incluye a todas las aplicaciones que no están diseñadas para requerir ningún nivel de QoS.[13]

2.5. 802.11e

El estándar 802.11e es el claro ejemplo de Sistema Multiservicio de la familia de protocolos para WLAN 802.11. Fue desarrollado para subsanar carencias que presenta el 802.11 desde sus inicios a la hora de ofrecer calidad de servicio, de ahí que sea conocido como el estándar de QoS.

El modo de acceso al medio DCF del estándar básico 802.11 no aporta ninguna posibilidad de priorizar diferentes tipos de tráficos, todas las estaciones tienen la misma probabilidad de acceder al canal. Por este motivo se desarrolló una mejora del DCF, el EDCA (Enhanced Distributed Channel Access Function). Este mecanismo ofrece la posibilidad de priorizar distintos tipos de tráfico a la hora de obtener el acceso al canal durante el periodo de contención. El mecanismo EDCA incluye, al igual que su antecesor DCF, el protocolo CSMA/CA, los tiempos backoff, etc. También existe la evolución de PCF hacia el HCCA (Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access). Sin embargo, las prioridades se aplican en base a criterios estadísticos, lo cual no permite en la práctica garantizar unos parámetros de QoS estrictos ni asegurar la estabilidad del sistema para cualquier carga de tráfico. Estos problemas se pueden afrontar de mejor modo con protocolos MAC de diseño completamente diferente, como los utilizados en el presente trabajo.

2.6. MSDQCA

MSDQCA es la variante del protocolo DQCA propuesta en el presente trabajo. La descripción básica de DQCA está en la sección 2.3. Además de las mejoras ofrecidas por el protocolo DQCA en sí mismo, debemos sumarle las prestaciones que MSDQCA ofrece para dar soporte a un sistema MS. A continuación explicaremos las modificaciones realizadas en la implementación de este esquema basándonos en la explicación del protocolo DQCA básico.

Al tratarse de un sistema MultiServicio, MSDQCA gestiona la transmisión de datos con un sistema de P Colas de Transmisión de Datos (DTQ's). Cada cola corresponde a una clase de servicio diferente. Esta clasificación en distintas colas nos permite asignar a cada clase un nivel de prioridad diferente y ofrecer ciertas garantías de QoS, aunque esto se explicará más adelante. El protocolo MSDQCA básico, igual que el DQCA básico, no asigna prioridades y transmite el tráfico a medida que se genera, sin tener en cuenta el tipo de servicio.

El primer cambio que se ha debido realizar en MSDQCA respecto a la implementación de DQCA es referente al número de contadores de gestión necesarios para el correcto funcionamiento del protocolo. Cada nodo debe tener P contadores, llamados TQ_i ($1 \leq i \leq P$), que representan el número de elementos en cada cola distribuida DTQ_i . Otro contador (pTQ) es necesario para indicar la posición del nodo en la cola en la que se encuentra (asumiendo que el nodo sólo puede pertenecer a una cola al mismo tiempo y que conoce a qué clase de servicio pertenece). Se requieren dos contadores (RQ y pRQ) para el subsistema de resolución de colisiones y $(P+1)$ contadores para el subsistema de transmisión de datos. La Figura 2.2 muestra el subsistema de datos y el subsistema de resolución de colisiones.

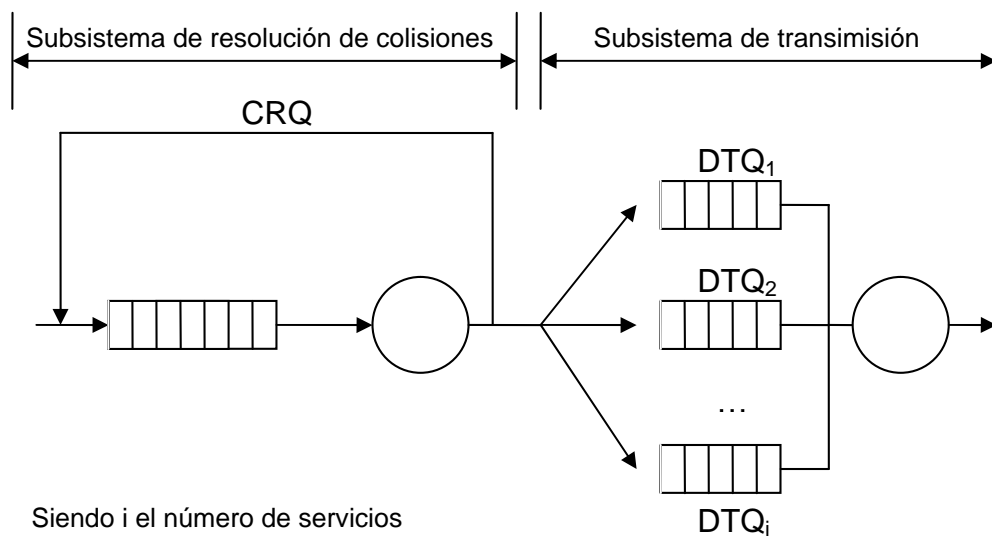


Figura 2.2. Estructura de la trama DQCA

Se da por supuesto que hay P tipos de ARS distintos, uno para cada clase de servicio. Cuando un mensaje se genera, el nodo correspondiente designa la clase de servicio apropiada y transmite el correspondiente ARS. Si el ARS es satisfactorio, el nodo asigna el respectivo DTQ_i y todos los nodos pueden actualizar el contador correspondiente. La estructura del FBP continúa siendo la misma.

CAPÍTULO 3. ENTORNO DE TRABAJO

3.1. Introducción

En este capítulo describiremos detalladamente los principales elementos que forman el sistema de comunicaciones que constituyen el entorno de trabajo sobre el cual se ha realizado el estudio. En nuestro caso debemos considerar dos entornos de trabajo, cuyos resultados compararemos posteriormente.

El capítulo se estructura en dos partes. En la primera de ellas, correspondiente al punto 3.2, se describen los dos escenarios simulados que posteriormente compararemos y se detallan también las hipótesis y aproximaciones adoptadas en la programación de las simulaciones.

En el punto 3.3 se definen los parámetros o medidas relevantes para la evaluación de los beneficios que las técnicas Cross-Layer pueden ofrecer a sistemas WLAN.

3.2. Escenario de trabajo

3.2.1 Sistema WLAN 802.11b

El primer escenario de trabajo es un sistema WLAN en modo Infraestructura basado en el estándar 802.11b. El protocolo MAC utilizado en el estudio es el protocolo DQCA (véase capítulo 2).

Los nodos y el AP implementan la capa física del estándar 802.11b. La Tabla 3.1 resume los valores de los principales parámetros de esta capa física.

Tabla 3.1. Principales parámetros de la capa física 802.11b

Banda de Frecuencias	2.4 - 2.4835 GHz
Técnica de espectro ensanchado	DSSS
Potencia de transmisión	100 mW
Tasas de transmisión disponibles	1, 2, 5.5, 11 Mbps

Los nodos transmiten una potencia constante de 100 mW. Es por este motivo que los nodos deben variar sus tasas de transmisión en función de las pérdidas del canal. Al aumentar las pérdidas del canal radio y puesto que la potencia de transmisión es constante, la potencia recibida en el AP disminuye, la relación señal-ruido (SNR) disminuye y por lo tanto se debe transmitir a una tasa inferior

si se desea mantener el nivel de probabilidad de error en el bit (P_b). De esta manera, los nodos transmiten sus paquetes de datos a 1, 2, 5.5 o 11 Mbps en función de las pérdidas del canal. Tal y como establece el estándar 802.11b, las transmisiones de tráfico de control se realizan a la tasa mínima, es decir a 1 Mbps, independientemente de las pérdidas del canal, con el fin de garantizar una recepción libre de errores.

Por otro lado, los nodos o terminales presentes en el sistema, han sido modelados como dispositivos que generan mensajes de información según un determinado modelo de tráfico. Los modelos de tráfico utilizados se describen en el punto 3.2.5. Estos mensajes de información se almacenan en un *buffer* con capacidad para 200 mensajes y tienen una longitud variable de bits. Esta longitud no es necesariamente igual a la longitud del paquete de datos que se envía en cada trama. Si un nodo genera un mensaje de longitud superior a la que puede enviarse en una sola trama, deberá fragmentar su mensaje en diversos paquetes y utilizar más de una trama DQCA para la transmisión del mensaje completo. La Figura 3.2 muestra un diagrama donde se representa el modelo de nodos usado.

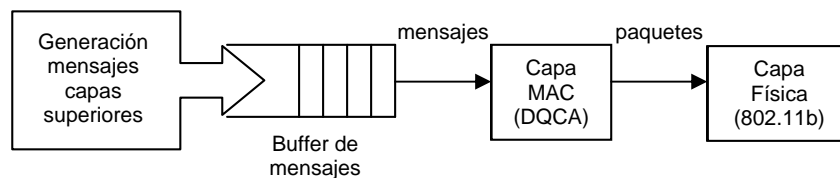


Fig. 3.1. Diagrama funcional de un nodo

3.2.2 Sistema WLAN 802.11g

El segundo escenario de trabajo también es un sistema WLAN en modo Infraestructura, en este caso basado en el estándar 802.11g [14]. El protocolo MAC utilizado en el estudio es también el protocolo DQCA (capítulo 2).

Los nodos y el AP implementan la capa física del estándar 802.11g. La Tabla 3.2. resume los valores de los principales parámetros de esta capa física.

Tabla 3.2. Principales parámetros de la capa física 802.11b

Banda de Frecuencias	2.4 - 2.4835 GHz
Técnica de espectro ensanchado	OFDM
Potencia de transmisión	100 mW
Tasas de transmisión disponibles	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps

La potencia de transmisión de los nodos es la misma que para el estándar 802.11b (100 mW). En el caso del estándar 802.11g la única variación respecto al 802.11g es la tasa de transmisión de los nodos, transmiten sus paquetes de datos a 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 o 54 Mbps en función de las pérdidas del canal. Tal y como establece el estándar 802.11g, las transmisiones de tráfico de control se realizan a la tasa mínima, es decir a 6 Mbps, con el mismo fin que lo hacía 802.11b, garantizar una recepción libre de errores.

Los modelos de tráfico utilizados y la forma de almacenar los mensajes generados siguen el mismo patrón que 802.11b.

3.2.2 Hipótesis de transmisión

En este punto se detallan las principales hipótesis de transmisión adoptadas en el estudio. Algunas de las hipótesis y aproximaciones presentadas a continuación se han tomado con el fin de simplificar el escenario de trabajo de tal forma que su empleo no desvirtúe los resultados obtenidos.

- **Selección de tasa binaria y probabilidad de error en el bit (P_b):** Se considera un mecanismo de selección de tasa ideal de manera que la P_b es nula tanto en el enlace ascendente como en el descendente a la velocidad de transmisión considerada. Es decir, todos los bits enviados a través del canal radio a la tasa seleccionada se reciben correctamente.
- **Control de potencia:** No se implementa mecanismo de control de potencia y la potencia de transmisión es constante.
- **Codificación de canal:** No se utiliza mecanismo de codificación de canal explícito, es decir, se asume que todos los bits transmitidos son bits útiles del plano de usuario.

3.2.3 Parámetros MSDQCA

En este apartado se detallan los valores implementados en las simulaciones relacionados con el protocolo MSDQCA. Como tenemos dos escenarios de simulación, habrá parámetros utilizados por el protocolo MSDQCA que variarán en función del estándar utilizado.

En ambos escenarios la duración de los paquetes ARS es de 2 μ s. Por otro lado, el FBP contiene 6 bytes con la información suficiente para que los nodos puedan ejecutar las reglas del protocolo. El tamaño total del FBP es de 13 bytes y está formado por:

- 2 bytes para el campo *Frame Control* (control de trama).
- 1 byte para el reconocimiento ACK.
- 6 bytes para incluir la información del estado de los minislots, necesaria para el funcionamiento de MSDQCA (ver sección 2.3.).

- 4 bytes para el campo FCS (control de errores).

El tamaño del FBP aumenta al aplicar técnicas Cross-Layer ya que añadimos un nuevo campo con la información Cross-Layer. El nuevo campo añadido en el FBP incluye la información sobre el estado del canal de todos los usuarios para poder hacer la gestión CL (véase [15]). Los otros campos no se ven modificados debido a la utilización de técnicas Cross-Layer.

Los valores de los parámetros relacionados con el protocolo DQCA se muestran en la Tabla 3.3 y 3.4 según el escenario simulado.

Tabla 3.3. Valor de los parámetros DQCA de capa física y MAC para 802.11b

Número de minislots de control (m)	3
Duración ARS	2 μ s
Intervalo SIFS	10 μ s
Tiempo de propagación	1 μ s
Cabecera física de los paquetes	96 μ s
Cabecera MAC	34 bytes
Tamaño paquete datos (L)	1000 bytes
ACK	14 bytes

Tabla 3.4. Valor de los parámetros DQCA de capa física y MAC para 802.11g

Número de minislots de control (m)	3
Duración ARS	2 μ s
Intervalo SIFS	10 μ s
Tiempo de propagación	1 μ s
Cabecera física de los paquetes	20 μ s
Cabecera MAC	34 bytes
Tamaño paquete datos (L)	2000 bytes
ACK	14 bytes

3.2.4 Modelos de canal

Con el fin de estudiar la eficiencia de las técnicas Cross-Layer propuestas, se ha implementado un modelo de canal surgido de la combinación de dos que se explicarán a continuación. El primero se ha utilizado para simular el inicio de funcionamiento del sistema y el segundo para simular el funcionamiento en régimen permanente. De esta manera hemos intentado obtener unas simulaciones lo más reales posibles.

Por un lado, se ha utilizado un modelo de canal extraído de [6], denominado modelo de canal 'Good-Bad'. Por otro lado, se ha propuesto un modelo de

canal con cierta memoria, con el fin de simular la correlación existente en los canales móviles reales, utilizado para el régimen permanente. Puesto que este modelo de canal se puede representar mediante una cadena de Markov de múltiples estados, el modelo ha sido denominado modelo de canal 'Markov'. A continuación se describen las principales características de ambos modelos.

3.2.4.1 Modelo de canal Good-Bad

Se trata de un modelo de canal que simula la variación de un canal radio mediante una cadena de Markov discreta de dos estados. Con este modelo, el canal puede estar en dos estados posibles, favorable (*good*) y desfavorable (*bad*), dentro de los cuales una variable aleatoria uniforme determina la relación señal-ruido disponible para las transmisiones. La Tabla 3.5 muestra los valores elegidos para las probabilidades de estado y la variable aleatoria que determina la relación señal-ruido.

Tabla 3.5. Parámetros del modelo de canal Good-Bad

Estado del canal	Probabilidad	SNR (v.a. uniforme)
<i>Good</i>	0.8	[10-20] dB
<i>Bad</i>	0.2	[0-10] dB

Consecuentemente, se han definido un conjunto de umbrales de relación señal-ruido para la selección adecuada de las tasas de transmisión. Estos umbrales se han seleccionado a partir de los resultados presentados en [7] para el caso del estándar 802.11b y se muestran a continuación en la Tabla 3.6. Para el estándar 802.11g los umbrales escogidos se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.6. Umbrales de SNR para la selección de tasas según el modelo Good-Bad (802.11b)

Tasas	1 Mbps	2 Mbps	5.5 Mbps	11 Mbps
SNR	<4 dB	4-7.5 dB	7.5-11 dB	>11 dB

Tabla 3.7. Umbrales de SNR para la selección de tasas según el modelo Good-Bad (802.11g)

Tasas	6 Mbps	9 Mbps	12 Mbps	18 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
SNR	< 4 dB	4 -7.5 dB	7.5 - 11 dB	11 - 14 dB	14 - 17 dB	17 - 20 dB	20 - 23 dB	> 23 dB

3.2.4.2 Modelo de canal Markov

A pesar de caracterizarse por ser variante en el tiempo, los canales móviles presentan cierta correlación respecto a sus propias condiciones. Es decir, las condiciones del canal, en un determinado instante de tiempo, dependen de las condiciones del mismo en un instante anterior. Este hecho, teóricamente, imposibilita que, un nodo transmitiendo datos a una tasa baja, pueda transmitir a una tasa elevada en un instante posterior inmediato (y viceversa), es decir, existe una cierta correlación entre el estado de transmisión actual y el estado futuro inmediato.

Esta característica no se tiene en cuenta en el modelo de canal Good-Bad donde una vez transcurrido el tiempo de coherencia del canal, e independientemente de la tasa de transmisión anterior, una variable aleatoria uniforme determina la nueva relación señal-ruido y por lo tanto la nueva tasa de transmisión disponible.

El canal Markov se diseñó con el fin de simular la correlación entre el estado de transmisión actual y el inmediato anterior. Para ello se define una matriz de transiciones (véase Figura 3.2 para el estándar 802.11b y Figura 3.3 para el estándar 802.11g) cuyos valores determinan la probabilidad de utilizar una determinada tasa de transmisión, una vez transcurrido el tiempo de coherencia. Estos valores dependen de la última tasa de transmisión utilizada.

		estado futuro			
		1	2	5.5	11
estado actual	1	0.1	0.1	0.8	0
	2	0.1	0.1	0.7	0.1
	5.5	0	0.1	0.1	0.8
	11	0	0	0.2	0.8

Fig. 3.2. Matriz de probabilidades de transición del canal Markov (802.11b)

		estado futuro							
		6	9	12	18	24	36	48	54
estado actual	6	0.4	0.4	0.1	0.1	0	0	0	0
	9	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0	0	0
	12	0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0	0
	18	0	0	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0
	24	0	0	0	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2
	36	0	0	0	0	0.1	0.3	0.3	0.3
	48	0	0	0	0	0	0.2	0.5	0.3
	54	0	0	0	0	0	0	0.4	0.6

Fig. 3.3. Matriz de probabilidades de transición del canal Markov (802.11g)

Las filas de la matriz de transiciones representan el estado de transmisión actual o la tasa a la que el nodo puede transmitir. Las columnas representan el estado de transmisión futuro o la tasa a la que el nodo podrá transmitir una vez transcurrido el tiempo de coherencia. Los valores de la matriz determinan la probabilidad de pasar de un estado a otro. Tal como se ha descrito al inicio de este apartado, la probabilidad de pasar de una tasa elevada a una baja, y viceversa, debería ser muy baja para obtener unos resultados coherentes con lo teórico. Sin pérdida de generalidad en el estudio, en la matriz de ejemplo utilizada en la evaluación del sistema se ha considerado que la probabilidad de pasar a tasas elevadas es mayor que la de mantenerse en la tasa o pasar a una tasa baja.

Debe recalcar que, el modelo de canal Markov únicamente determina las probabilidades de transición entre los diferentes estados de transmisión. Por tanto, no determina la probabilidad inicial de estar en un estado sino las probabilidades de pasar de uno a otro. En las simulaciones realizadas haciendo uso de este modelo, se ha utilizado el modelo Good-Bad para la determinación del primer estado de transmisión de los nodos al inicio de la simulación. A partir de ese momento, se ha utilizado la matriz de transiciones para determinar en cada instante la tasa a la que los nodos pueden transmitir. Las Tablas 3.8 y 3.9 muestran las probabilidades de estado en régimen permanente haciendo uso del modelo de canal Markov según el escenario en el que nos encontremos.

Tabla 3.8 Probabilidades de estado en régimen permanente para el canal Markov (802.11b)

$P[r_b = 1 \text{ Mbps}]$	<i>0.003</i>
$P[r_b = 2 \text{ Mbps}]$	<i>0.022</i>
$P[r_b = 5.5 \text{ Mbps}]$	<i>0.195</i>
$P[r_b = 11 \text{ Mbps}]$	<i>0.78</i>

Tabla 3.9 Probabilidades de estado en régimen permanente para el canal Markov (802.11g)

$P[r_b = 6 \text{ Mbps}]$	<i>0.00047</i>
$P[r_b = 9 \text{ Mbps}]$	<i>0.00085</i>
$P[r_b = 12 \text{ Mbps}]$	<i>0.00121</i>
$P[r_b = 18 \text{ Mbps}]$	<i>0.00371</i>
$P[r_b = 24 \text{ Mbps}]$	<i>0.01927</i>
$P[r_b = 36 \text{ Mbps}]$	<i>0.12811</i>
$P[r_b = 48 \text{ Mbps}]$	<i>0.42047</i>
$P[r_b = 54 \text{ Mbps}]$	<i>0.42591</i>

3.2.5 Modelos de tráfico

En este punto vamos a detallar los modelos de tráfico que se han utilizado en el sistema.

3.2.5.1 Datos genéricos

Este tipo de tráfico engloba todos los servicios y conexiones que no tienen ningún patrón de tráfico específico.

El modelo de generación de tráfico utilizado resulta de considerar llegadas de al sistema con estadística de Poisson y suponer que cada mensaje generado tiene una longitud cuyo valor es una variable aleatoria exponencial. El tamaño medio es $10 \cdot L_d$, siendo L_d el número de bytes transmitido en cada trama a nivel MAC (definido como longitud paquete datos en la Tabla 3.10.). Al inicio de cada trama MSDQCA los nodos tienen una cierta probabilidad p_0 de generar un mensaje en dicha trama. La modificación del valor de p_0 permite variar el volumen de carga ofrecida al sistema manteniendo constante el número de usuarios presentes en el mismo. Los parámetros que definen esta clase de tráfico se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Parámetros para la generación del tráfico de datos

<i>Tipo de servicio</i>	Datos (<i>best-effort</i>)
<i>Modelo generación tráfico</i>	Poisson
<i>Longitud paquete datos (bytes)</i>	$L_d = 1000$ (802.11b) $L_d = 2000$ (802.11g)
<i>Longitud media de los mensajes</i>	$10 \cdot L_d$ bytes
<i>Distribución longitud mensajes</i>	Exponencial

3.2.5.2 Voz (ON-OFF)

Se utiliza este modelo para representar a usuarios que generan paquetes de datos correspondientes a un flujo de audio vocal. El modelo utilizado es un modelo clásico ON-OFF representado por el diagrama de estados mostrado en la Figura 3.4. Los usuarios parten de un estado OFF o de silencio, en el que no generan información. Cada cierto tiempo tienen una probabilidad α de pasar al estado ON o activo, en el que generan paquetes de información (son los llamados *talkspurts* o ráfagas vocales). En este estado tienen a su vez una probabilidad β de volver al estado OFF. Por tanto, el tiempo medio de estancia en cada estado es una variable aleatoria exponencial de media $1/\alpha$ y $1/\beta$ respectivamente.

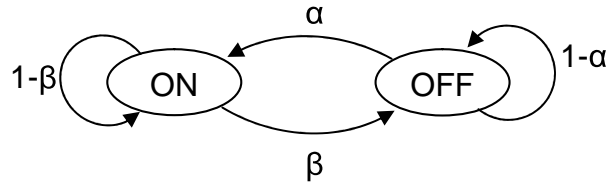


Fig. 3.4 Modelo de tráfico de voz ON-OFF

Los valores de las probabilidades α y β dependen del tiempo medio real de estancia en cada estado y de la duración de las tramas DQCA. Estos valores, junto con el resto de parámetros de calidad de servicio definidos para este tipo de tráfico se detallan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Valores de los parámetros usados para el tráfico de voz

Tipo de servicio	Voz
Modelo generación tráfico	ON-OFF
Duración media de los períodos ON	1'41 s
Duración media de los períodos OFF	1'74 s
Tasa generación en estado ON (CBR)	13 kbps
Tamaño paquete voz	100 bytes
Retardo máximo paquetes admitido	300 ms
Porcentaje máximo paquetes perdidos	1%

3.3 Definición de parámetros relevantes

En este punto, definimos los parámetros que se han utilizado para cuantificar la eficiencia del sistema y por tanto evaluar las mejoras que el diseño Cross-Layer aporta. Se trata de parámetros asociados a redes de comunicación que proporcionan información útil acerca de la eficiencia las mismas. En el capítulo 6, donde se exponen los resultados obtenidos, se hace referencia a estos parámetros según la definición aquí expuesta.

3.3.1 Throughput

El throughput es un término comúnmente utilizado en ámbitos de telecomunicaciones aunque recibe múltiples definiciones según el entorno o aplicación. Típicamente se define como 'medida de la tasa de transferencia de datos a través de un sistema de comunicaciones'. Por lo tanto, las unidades del throughput son bits/s o bytes/s.

A continuación se muestra la expresión considerada para el cálculo del throughput medido en el AP:

$$\text{Throughput} = \sum_i \rho_i \sigma_i r_{bi} = \frac{\text{bits_enviados_correctamente}}{T_{\text{simulación}}} \quad (3.1)$$

Donde:

- r_{bi} : Tasa de transmisión i-ésima de las disponibles en el sistema.
- ρ_i : Eficiencia de las tramas DQCA haciendo uso de la tasa r_{bi} (ver más adelante).
- σ_i : Porcentaje de utilización de la tasa de transmisión i-ésima.

En sistemas de comunicaciones donde el canal debe ser compartido por diversos usuarios, el throughput es uno de los parámetros más relevantes en la medida de la eficiencia de un sistema. En un entorno WLAN con protocolo de acceso DQCA, la eficiencia global del sistema en términos de throughput dependerá de la relación entre los intervalos destinados a la transmisión de datos (slot de datos) y los destinados a tráfico de control (principalmente, períodos de contención y paquete de *downlink*). Por lo tanto, cuanto mayor sean los paquetes transmitidos en el slot de datos y menor sean los intervalos destinados a tráfico de control, mayor será el throughput.

En un sistema WLAN 802.11 con protocolo de acceso DQCA, el throughput máximo alcanzable depende de tres factores:

- **Tasas de transmisión posibles (r_{bi}):** Tasas de transmisión a las que se pueden transmitir los paquetes. Según la capa física del estándar 802.11b, cuatro tasas son posibles: 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. Según el estándar 802.11g, ocho tasas son posible en el llamado 'Basic set': 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps.
- **Eficiencia de las tramas DQCA (ρ_i):** Definida como el porcentaje de trama DQCA destinado a transmisión de datos. Será mayor cuanto mayor sea el tamaño del paquete de datos transmitido en la trama. Además, depende de dicho tamaño y de la tasa a la que el mismo es transmitido, por lo tanto, tendrá un valor distinto para cada combinación de tamaños de paquetes y tasas a las que se trasmite. Se puede calcular como el cociente entre la duración del slot de datos (T_{datos}) y la duración total de la trama DQCA (T_{trama}):

$$\rho = \frac{T_{\text{datos}}}{T_{\text{trama}}} \quad (3.2)$$

- **Utilización de las tasas de transmisión (σ_i):** Definida como el porcentaje de tramas en el que se utiliza la tasa de transmisión r_{bi} .

3.3.2 Retardo medio de los mensajes

Definimos el retardo de un mensaje como el intervalo de tiempo transcurrido desde que un mensaje es generado por un nodo hasta que es recibido correctamente por el AP. El retardo medio de los mensajes se define entonces como el valor medio de los retardos sufridos por todos los mensajes enviados. A continuación se muestra la expresión utilizada para el cálculo del retardo medio de los mensajes:

$$\text{Retardo medio mensajes} = \frac{\sum_i \text{retardo_mensaje}_i}{\text{Total_mensajes_enviados}} \quad (3.3)$$

Donde:

retardo_mensaje_i: retardo sufrido por el mensaje i-ésimo.

Total_mensajes_enviados: N^o total de mensajes recibidos por el AP.

3.3.3 Desviación típica del retardo de los mensajes

Definida como la 'dispersión respecto al valor medio', la desviación típica del retardo de los mensajes se ha utilizado para cuantificar las diferencias entre los retardos de los mensajes mediante la siguiente expresión:

$$\text{Desv. típica retardo} = \sqrt{E[\text{retardo_mensajes}^2] - (E[\text{retardo_mensajes}])^2} \quad (3.4)$$

Se trata de un parámetro utilizado para cuantificar las diferencias entre los retardos sufridos por los mensajes. Ciertas aplicaciones requieren que la desviación típica del retardo esté acotada, es decir, no solo es importante que los mensajes sufran un retardo medio bajo sino que las diferencias entre los retardos de los mismos sean mínimas.

3.3.4 Porcentaje máximo de paquetes perdidos

Definimos el porcentaje de paquetes perdidos como:

$$\% \text{ paquetes perdidos} = \frac{\text{Total_paquetes_perdidos}}{\text{Total_paquetes_generados}} \times 100 \quad (3.5)$$

Donde:

Total_paquetes_perdidos: N^o total de paquetes de voz que sufren un retardo superior a 300 ms.

Total_paquetes_generados: N° total de paquetes de voz generados por todos los usuarios presentes en el sistema.

Se trata de un parámetro de especial relevancia en entornos dónde se transmite tráfico de voz. Principalmente, el tráfico de voz presenta dos restricciones para que sus comunicaciones se puedan mantener. Por un lado, el retardo que sufren los paquetes debe ser inferior a 300 ms para que el oído humano no perciba degradación alguna. Por otro lado, el porcentaje máximo de paquetes perdidos, o porcentaje de paquetes que sufren un retardo superior a 300 ms, no debe superar el 1%.

CAPÍTULO 4. GESTIÓN DE RECURSOS

4.1 Introducción

En este capítulo describiremos detalladamente las distintas formas de gestionar los recursos que hemos simulado en ambos escenarios (802.11b y 802.11g).

El capítulo se estructura en dos apartados correspondientes a las distintas formas de gestionar los recursos que hemos estudiado: MSDQCA básico y MSDQCA con Cross-Layer. MSDQCA básico contiene un subapartado correspondiente a una variación del protocolo MSDQCA con la inclusión de prioridades: MSDQCA-P. MSDQCA con Cross-Layer se divide en dos subapartados correspondientes a las dos técnicas Cross-Layer utilizadas: MSDQCA+CLLA y MSDQCA+CLVPF.

4.2. MSDQCA básico

La versión básica del protocolo MSDQCA, la cual no implementa ninguna técnica Cross-Layer, establece que en cada trama debe transmitir el nodo que ocupe la primera posición de la cola DTQ, independientemente de la clase de servicio a la que pertenezca o el estado del canal radio entre el nodo afectado y el punto de acceso. Esta regla del protocolo provoca que en cada trama los nodos transmitan sus paquetes independientemente de la tasa de transmisión a la que puedan transmitir. Tal y como se describió en el capítulo 2, la duración del slot de datos es variable y depende de la velocidad de transmisión y del tamaño del paquete. Si suponemos un tamaño de paquete constante, los nodos a mayor distancia requerirán más tiempo para transmitir sus paquetes puesto que sus velocidades de transmisión serán menores, provocando así una menor eficiencia en el uso de los recursos. Parece evidente que si todos los nodos pudiesen transmitir a la velocidad máxima, el tiempo necesario para transmitir sus paquetes sería el mínimo posible y se minimizaría así el retardo que sufren los paquetes. Además, el número de bits enviados por unidad de tiempo aumentaría y en definitiva, mejoraría la eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

Para evitar confusiones, a la versión del protocolo MSDQCA sin prioridades, de ahora en adelante la llamaremos MSDQCA-NP (Non Priorities, sin prioridades)

4.2.1. MSDQCA-P (with Priority)

La diferenciación de clases de servicio que hace el protocolo MSDQCA permite asignar a cada clase un nivel de prioridad diferente. En el caso concreto de

este trabajo hemos considerado cuatro clases de servicio, pero podrían considerarse cualquier número de ellas.

La versión MSDQCA-P nos permite priorizar distintos tipos de tráfico a la hora de obtener acceso al canal durante el período de contención. Los servicios se implementan como cuatro colas distintas. Hemos considerado el servicio de voz como la categoría más prioritaria, seguida de tres clases más, todas ellas de datos genéricos, caso Datos_A, Datos_B y Datos_C, donde la prioridad entre ellas va decreciendo desde la tipo A hacia la C. El tráfico de voz es el de máxima prioridad pues este tipo de servicio no admite retardos. Con esta priorización ofreceremos ciertas mejoras en la QoS que no ofrecíamos con MSDQCA-NP.

La variación más significativa en la implementación se encuentra a la hora de transmitir. En MSDQCA-NP se transmite a medida que se va generando el tráfico, manteniendo un orden FIFO en la secuencia de transmisión, en cambio en MSDQCA-P para que el nodo de la clase i transmita, deben estar vacías las colas DTQ con mayor prioridad y el nodo debe ser el primero de la cola DTQ en la que se encuentra. Por tanto, se rompe la dinámica FIFO y se mejora la QoS de las clases de servicio más prioritarias.

4.3. MSDQCA con técnicas Cross-Layer

En una red WLAN 802.11 los terminales pueden transmitir sus paquetes hacia el Punto de Acceso (a partir de ahora, AP) a cuatro (802.11b) u ocho (802.11g) tasas o velocidades de transmisión posibles: 1, 2, 5.5, 11 Mbps para 802.11b y 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps para 802.11g. Además cabe recordar que se ha considerado una potencia de transmisión de los nodos constante (100mW), es decir, no se implementa ningún mecanismo de control de potencia. La elección de una u otra velocidad depende por tanto de la relación señal-ruido (SNR) en recepción. Esta relación depende a su vez del nivel de potencia recibida el cual variará en función de las pérdidas del canal debidas a diversos factores como la distancia entre los terminales y el AP o la atenuación producida por obstáculos situados entre transmisor y receptor. Por ejemplo, considerando únicamente la atenuación debida a la distancia, cuando un nodo se encuentra a más de 175 metros del AP debe seleccionar la velocidad de transmisión mínima con el fin de mantener aproximadamente constante la probabilidad de error en el bit. En cambio, cuando un terminal se encuentra a menos de 25 metros del AP, debe seleccionar la máxima velocidad de transmisión (11 Mbps en el caso de 802.11b y 54 Mbps para 802.11g) para transmitir sus paquetes de datos.

Parece evidente que si todos los nodos pudiesen transmitir a la velocidad máxima, el tiempo necesario para transmitir sus paquetes sería el mínimo posible y se minimizaría así el retardo que sufren los paquetes. Además, el número de bits enviados por unidad de tiempo aumentaría y en definitiva, mejoraría la eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

Las técnicas Cross-Layer propuestas para sistemas WLAN consisten en utilizar cierta información proveniente de la capa física en la capa MAC, en la cual se implementa el protocolo MSDQCA, como puede ser la SNR para seleccionar la tasa de transmisión más adecuada como se ha explicado en líneas anteriores. En el capítulo 6 se detallan los resultados obtenidos tras la simulación y el análisis de cada una de las técnicas.

4.3.1. MSDQCA+CLLA (with Cross-Layer Link Adaption technique)

En esta variación del protocolo MSDQCA se implementa una técnica CL probada en anteriores estudios del funcionamiento del protocolo DQCA en entornos 802.11 como [8], [9] y [12].

Asumiendo que la capa física soporta transmisiones a distintas tasas, el AP mide la SNR del enlace cuando recibe un ARS (que utiliza por tanto también a modo de beacon de medida) y selecciona la tasa máxima que puede soportar para transmitir los datos desde el nodo respectivo. Esta tasa se incluye en el FBP para que el nodo pueda ajustar adecuadamente su modulación y codificación para la transmisión de datos.

MSDQCA+CLLA mantiene la priorización de clases de servicio explicada para MSDQCA-P. Esto significa que para que un nodo pueda transmitir no basta con seleccionar la tasa adecuada o tener la tasa más elevada. Para que un nodo pueda transmitir, como explicamos en 4.2.1., deben estar vacías las colas DTQ con mayor prioridad y ser el nodo con la tasa de transmisión más elevada de la DTQ en la que se encuentra.

4.3.2. MSDQCA+CLVPF

En esta variación del protocolo se implementa una técnica CL distinta a la anterior pero también probada en anteriores estudios del funcionamiento del protocolo DQCA en entornos 802.11 como [9] y [12].

La idea básica de este modelo es incluir parámetros de la capa física en las decisiones de la capa MAC. En particular, el orden de transmisión de los nodos que están esperando en la DTQ viene determinado por la siguiente Función Virtual de Prioridades (en adelante VPF, *Virtual Priority Function*):

$$VPF = \alpha \cdot (1 + (\text{numero_servicios} - \text{serv})) + \beta \cdot \frac{R}{pTQ} \quad \text{siendo } \beta = 1 - \alpha \quad (4.1)$$

La definición de la VPF es conocida por todos los nodos y el AP es el responsable de proporcionar el *feedback* necesario para que, al final de cada trama, cada nodo sea capaz de calcular los valores VPF para todos los nodos

de la DTQ, incluyéndose él mismo. El nodo con el valor de la VPF más elevado será el nodo que transmitirá. Si más de un nodo tiene el mismo valor de VPF, entonces la prioridad se da al que lleva más tiempo esperando en la DTQ, el que tiene un valor de pTQ menor.

La VPF puede ser seleccionada de diferentes maneras dependiendo de los parámetros de la capa física y MAC y los objetivos perseguidos, entre los cuales siempre se encuentran maximizar el throughput y la equidad. El coste de esta nueva técnica CL es la introducción de información adicional de una cabecera de control en el FBP que depende de la implementación particular de la VPF. Si la VPF se define como una constante, la transmisión se convierte en FIFO y estaremos implementando la versión básica con prioridad (MSDQCA-P).

El algoritmo implementado se explica a continuación. En cada trama, el AP recoge los parámetros necesarios de las capas física y MAC para el cálculo de los valores de la VPF de los nodos de la DTQ. Un esquema de codificación predefinido es utilizado para que estos parámetros puedan ser representados por poco bits por nodo. El AP forma un vector a partir de estos bits ordenándolos según el valor de su pTQ (el tiempo que llevan en la DTQ). Cabe destacar que la pTQ tiene un valor único para cada nodo en la DTQ, siendo pTQ=1 el nodo que lleva más tiempo en la cola. Cuando el nodo recibe el FBP, utiliza el vector de *feedback* para calcular el valor VPF de cada nodo en la DTQ. Entonces, ellos ordenan estos valores en orden descendente de VPF y en caso de que dos o más valores sean iguales se posiciona primero el que tiene una pTQ menor.

Como estamos hablando de la utilización de esta técnica CL sobre MSDQCA debemos considerar que el ARS debe ser diferenciable por cada clase de servicio y el vector de *feedback* en el FBP debe incluir el identificador de la clase de servicio de todos los nodos que haya en la DTQ.

CAPÍTULO 5. SIMULADOR DQCA

5.1 Introducción

En este capítulo se describe la estructura y las principales características del simulador utilizado para la comparativa del estándar 802.11g utilizando el protocolo MSDQCA (con ocho tasas de transmisión posibles) con el estándar 802.11b utilizando el protocolo MSDQCA (con cuatro tasas de transmisión posibles) en sistemas WLAN y sus variantes que incluyen técnicas CL.

5.2 Estructura general del simulador

Partimos de una versión implementada en el lenguaje de programación orientado a objetos C++. Con la posibilidad de implementar técnicas Cross-Layer para dichos servicios.

Gran parte del trabajo realizado ha consistido en la modificación de dicho simulador para pasar a dar servicio a diferentes clases de servicio. Este cambio ha supuesto una gran reestructuración en la implementación del simulador, especialmente en lo referente a valor de los parámetros utilizados, el cálculo de los tiempos de trama, cabeceras, etc., debido a un mayor número de servicios.

Además una vez realizados los cambios necesarios para la correcta simulación del funcionamiento del protocolo MSDQCA para el 802.11b (cuatro tasas de transmisión) hemos tenido que readaptar de nuevo nuestro código para una correcta simulación del protocolo MSDQCA para el 802.11g (ocho tasas de transmisión). Con esta readaptación del código podremos obtener resultados con una capa física más realista y utilizada en la actualidad.

El simulador, realizado con un diseño orientado a los objetos, define diversas clases y sus métodos para la implementación de los objetos que conforman el escenario de trabajo descrito en el capítulo 3: nodos, canal, *buffers* de mensajes, tramas del protocolo MAC, etc. Además se implementa una entidad denominada 'gestor de transmisión' que es la encargada de gestionar las prioridades en las transmisiones según el protocolo MSDQCA y los criterios Cross-Layer (si se da el caso). El simulador realiza un número de iteraciones de simulación, cada una de las cuales corresponde con una trama a nivel MAC. El número de iteraciones de simulación es variable pero se ha ajustado de tal forma que el tiempo total de simulación $T_{simulación}$ garantice que se alcanza el régimen permanente durante un tiempo significativo y los resultados obtenidos sean fiables.

A continuación se describen brevemente las principales clases utilizadas:

- **Clase 'movilDQCA'**: Utilizada para la definición del objeto que representa a un móvil o nodo en el sistema. Contiene los parámetros DQCA necesarios como los números enteros correspondientes a la gestión distribuida de las colas, diversos parámetros de transmisión como la relación señal-ruido, el número identificador del nodo, así como parámetros estadísticos para el cálculo de los parámetros definidos en el capítulo 3. Implementa los métodos necesarios para la aplicación de las reglas del protocolo DQCA, la generación de mensajes según los modelos de tráfico descritos en el capítulo 3 y la gestión del *buffer* de mensajes. En esta clase se encuentran dos de las funciones donde se ha realizado el cambio más significativo para la readaptación del código para la simulación del 802.11g (*selecciona_rb* y *actualiza_estado_canal*).
- **Clase 'cola_mensajes'**: Utilizada para la definición del objeto que representa el *buffer* o cola de mensajes en el cual los nodos mantienen sus mensajes una vez generados y a la espera de ser transmitidos. Simula una cola FIFO de 200 posiciones en cada una de las cuales se almacena la información relacionada con cada mensaje generado (tamaño en bits e instante en el que se genera el mensaje). Ofrece los métodos necesarios para la gestión de la cola (mecanismos de *push* y *pop*) y el proporciona información acerca de su nivel de ocupación (número de mensajes generados).
- **Clase 'canal'**: Se utiliza para representar el canal de comunicaciones. Contiene parámetros de capa física como la duración de las tramas DQCA o el estado de los *m* períodos de contención. Implementa métodos de consulta utilizados por otros objetos para obtener cierta información relacionada con el canal. Por ejemplo, los objetos de la clase 'movilDQCA' en cada trama utilizan un método de la clase 'canal' para conocer el estado de los períodos de contención y poder aplicar las reglas DQCA.
- **Clase 'slot'**: Representa la trama DQCA completa en la cual se realizan las peticiones de acceso y las transmisiones de los paquetes de datos generados por los nodos. Controla la información relacionada con este intervalo de tiempo como puede ser el número de bits transmitidos en cada trama DQCA o el número de transmisiones de datos realizadas.
- **Clase 'MiniSlot'**: Cada objeto de esta clase representa un único período de contención en el cual los objetos de la clase 'movilDQCA' realizan sus peticiones de acceso. Contiene información como la duración del período de contención, el número de peticiones de acceso que se han realizado y el identificador del móvil que ha realizado la petición.
- **Clase 'gestor_transmision'**: Implementa una entidad centralizada que gestiona y controla las transmisiones de datos. Contiene diversos vectores para el almacenamiento de diversos parámetros de capa física de los nodos en el sistema. Realiza el procedimiento de selección del nodo transmisor en cada trama según las reglas DQCA o según los criterios Cross-Layer en caso de que se implementen. En esta clase se

encuentra la función *calcula_quien_TX* dónde se ha realizado el cambio más significativo para pasar de dos a cuatro servicios.

El núcleo principal de simulación del protocolo consiste en un bucle que realiza un cierto número de iteraciones de simulación. A continuación se describe mediante pseudocódigo las principales tareas realizadas en este bucle:

```
Para cada iteración
{
  Para todos los nodos :
  {
    GENERACIÓN MENSAJES (según modelo de tráfico);

    Si (tiempo_transcurrido > tiempo_coherencia) :
    {
      ACTUALIZAR ESTADO CANAL;
      SELECCIONAR NUEVA  $R_{bi}$ ;
    }

    APLICACIÓN DE LAS REGLAS DQCA;
  }

  ACTUALIZACIÓN PARAMETROS POR PARTE DEL GESTOR_TX;
}
```

CAPÍTULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Introducción

En este capítulo vamos a mostrar y analizar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el fin de estudiar los beneficios que el uso de técnicas Cross-Layer puede aportar a sistemas WLAN y la diferencia entre un sistema WLAN 802.11b (cuatro tasas de transmisión) y uno 802.11g (ocho tasas de transmisión).

Los escenarios de trabajo utilizados son los descritos en el capítulo 3. Además en este apartado se añadirá la descripción de más detalles necesarios para una correcta simulación del sistema.

6.2 Parámetros de las simulaciones

Para todos los escenarios hemos considerado un número fijo de usuarios de cada clase de servicio: 10 usuarios de Voz, 50 usuarios de Datos_A (los datos más prioritarios) y 40 usuarios de Datos_B y Datos_C.

Se han realizado distintas simulaciones variando la carga de los usuarios de los distintos servicios. De las tres clases de servicio se ha variado la carga de una de ellas y se han dejado fijas las cargas del resto para poder analizar cómo afectan las prioridades a los distintos casos. Esta variación de la carga se ha realizado sin cambiar el número de usuarios de cada clase, únicamente variando la carga generada por usuario.

Para el sistema 802.11b hemos considerado unos paquetes de tamaño 1000 bytes (véase 3.2.5.1.). Debemos recordar que las tasas de transmisión posibles son 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. Para el sistema 802.11g el tamaño de los paquetes es de 2000bytes (véase 3.2.5.1.) y las tasas a las que puede transmitir el sistema son: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps.

Según las especificaciones del estándar 802.11b, el tráfico de señalización y control debe transmitirse a la mínima velocidad de las posibles que presenta el sistema (1 Mbps), de esta forma obtendremos una simulación más realista. Para el estándar 802.11g hemos seguido el mismo criterio y fijado la velocidad de transmisión del tráfico de señalización y control a la mínima, 6 Mbps. En algunas simulaciones de otros estudios no se considera esta variación de la velocidad, por lo que pueden mostrarse unos resultados muy teóricos pero que difieren de la práctica.

6.3 MSDQCA básico (NP y P)

En esta primera fase del estudio, y para tener una primera referencia sobre el rendimiento del protocolo MSDQCA básico, se han obtenido las cotas máximas de *throughput* alcanzables por este protocolo. Como tratamos de analizar y comparar dos sistemas distintos, mostraremos paralelamente los resultados para ambos sistemas.

En las simulaciones para este sistema se ha fijado la carga de Datos_B y Datos_C y se ha aumentado la de Datos_A progresivamente, para así poder observar el efecto de las prioridades y su correcto funcionamiento. Estas simulaciones muestran cómo afecta a cada clase de servicio la priorización de clases.

La Figura 6.1 muestra la comparación entre el throughput obtenido utilizando dos técnicas distintas del protocolo MSDQCA sin y con prioridad, MSDQCA-NP y MSDQCA-P para el sistema 802.11b. La Figura 6.2 muestra lo mismo pero para el sistema 802.11g. En cambio, para el sistema 802.11g hemos considerado interesante mostrar el efecto de la priorización en los retardos sufridos por los paquetes como se muestra en la Figura 6.3. Para alcanzar las cotas máximas se ha supuesto, una situación en la que todos los nodos siempre poseen mensajes que transmitir en sus *buffers* (saturación).

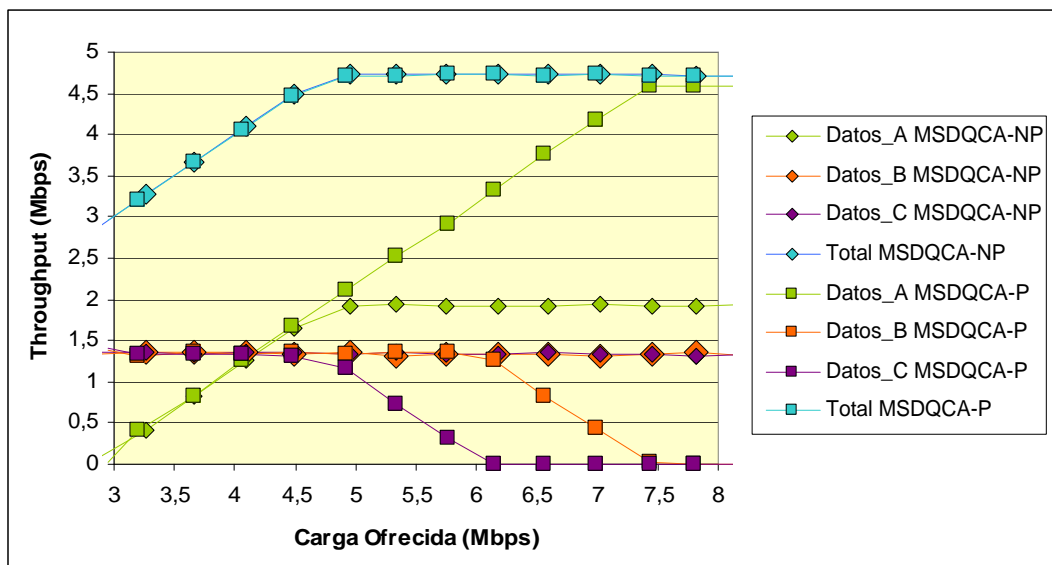


Fig. 6.1. Cotas máximas de throughput alcanzables con el acceso MSDQCA básico (802.11b)

Para el sistema 802.11b, se observa que el máximo throughput alcanzable, que se obtiene considerando unos paquetes de 1000 bytes, toma el valor máximo de 4.7 Mbps, valor que está muy lejos de la capacidad máxima del canal (11Mbps). También cabe destacar que hemos considerado que el tráfico de señalización y control se transmite a una velocidad de 1Mbps.

En ambos casos vemos que el *throughput* máximo alcanza el mismo valor. La variación está en la distribución del *throughput* entre las diversas clases y el punto de saturación. En la simulación sin prioridades (MSDQCA-NP) el sistema se satura con cargas de tráfico ofrecido menores. Cuando el valor de la carga de Datos_A aumenta hasta la capacidad máxima del canal se mantiene el *throughput* a un valor constante a pesar de que los datos generados siguen aumentando. En cambio para el caso de MSDQCA-P cuando llegamos al punto de capacidad máxima del canal, como Datos_A tiene mayor prioridad que el resto, disminuye primero el *throughput* de Datos_C y posteriormente Datos_B. De este modo se permite que Datos_A transmita los datos generados a la tasa máxima que permite el canal.

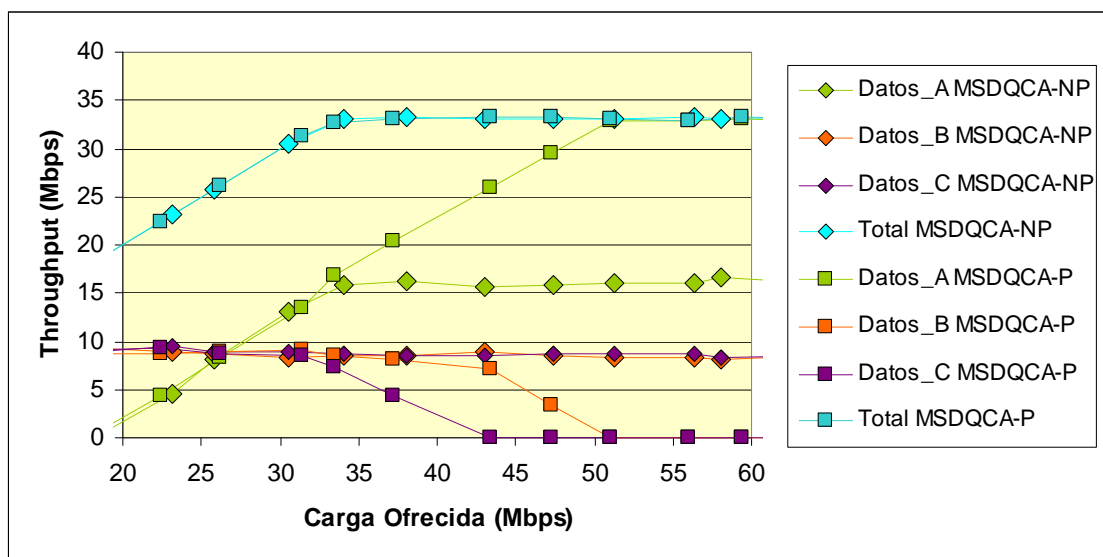


Fig. 6.2. Cotas máximas de throughput alcanzables con el acceso MSDQCA básico (802.11g)

Para el sistema 802.11g, se observa que el máximo *throughput* alcanzable que se obtiene considerando unos paquetes de 2000 bytes, toma el valor máximo de 33 Mbps, valor que, igual que en el caso anterior, está muy lejos de la capacidad máxima del canal (54 Mbps). En este caso también hemos considerado que el tráfico de señalización y control se transmite a una velocidad de 6Mbps. Según [14], siguiendo el mismo criterio que se sigue para escoger la velocidad de transmisión para el tráfico de señalización y control, se escoge el valor de 6 Mbps ya que es la menor velocidad a la que puede transmitir nuestro sistema, por lo tanto es la velocidad que más garantiza que no haya pérdidas ni errores en la transmisión. La elección de esta velocidad hace que la simulación sea lo más realista posible.

En este caso se muestra el efecto de la priorización de una clase de servicio sobre otra pero en un sistema con ocho tasas posibles de transmisión. Se comprueba que como cabía esperar el efecto no varía, cuando aplicamos la

técnica MSDQCA-NP el sistema se satura antes, cuando Datos_A genera más tráfico del que puede soportar el canal, el sistema se satura. La diferencia del sistema con el caso de 802.11b, es que, como es obvio, la carga ofrecida soportada es mayor en este caso, ya que las tasas de transmisión también son mayores, por lo que el canal transmite más en el mismo tiempo. Para la técnica MSDQCA-P el punto de saturación es mucho mayor, casi para el doble de carga de tráfico. Debido a esta saturación del sistema, el *throughput* disminuye progresivamente, primero para Datos_C (clase de servicio menos prioritaria) y posteriormente el de Datos_B, para permitir así la transmisión del tráfico generado por Datos_A, la clase más prioritaria después de los usuarios de Voz, a la tasa máxima que permite el canal.

En la Figura 6.3 observamos cómo afecta la priorización de las clases de servicio a los retardos de los paquetes de datos. Para el sistema sin prioridades se comprueba que prácticamente las tres clases de servicio tienen el mismo retardo, incluso Datos_A, la más prioritaria, tiene un retardo ligeramente mayor al ofrecer más carga al sistema que las otras clases. En cambio, cuando aplicamos el sistema con prioridades, observamos que para cargas de tráfico crecientes empiezan a sufrir un retardo no acotado en primer lugar los paquetes menos prioritarios. Como es evidente, este comportamiento se mantiene hasta el punto en el que el sistema está completamente saturado, y en esa situación incluso el servicio más prioritario sufre retardos no acotados en la transmisión de paquetes.

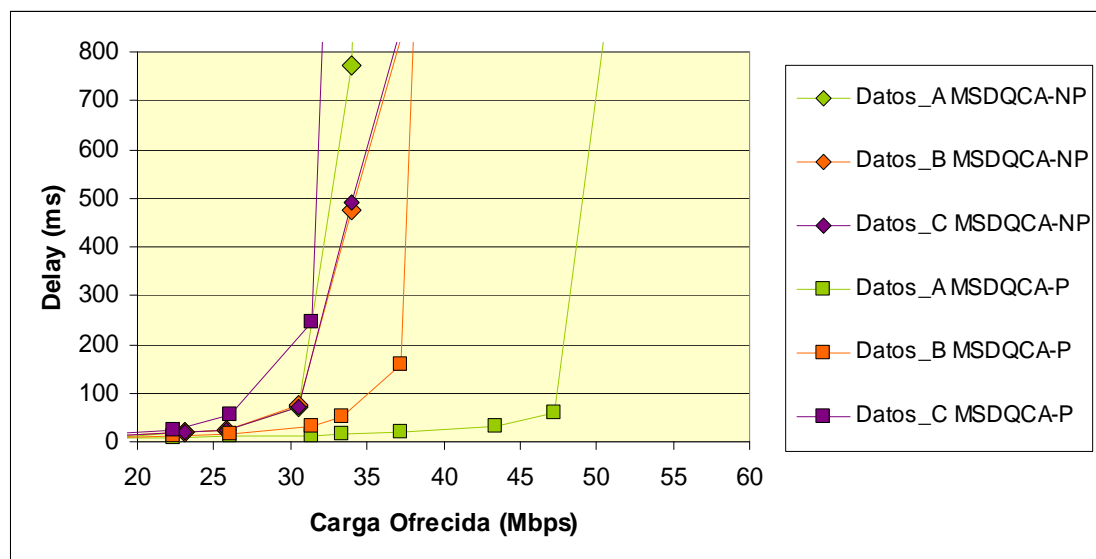


Fig. 6.3. Retardo Medio para un sistema MSDQCA básico 802.11g

Como puede verse, los resultados obtenidos por el protocolo MSDQCA son prometedores, ya que simplemente priorizando clases de servicio logramos retardar el punto de saturación y transmitir los datos más prioritarios antes que el resto de datos.

6.3.1. Conclusiones con acceso MSDQCA básico

Tras el análisis de los resultados obtenidos para el protocolo MSDQCA básico podemos concluir que la utilización de un sistema multiservicio con prioridades nos permite una mayor y mejor utilización de la capacidad del canal, así como proporcionar una mejora en la QoS para los servicios más prioritarios. En cuanto a las diferencias entre el sistema 802.11b y el 802.11g, el funcionamiento, en general y como era de esperar, es el mismo, la única diferencia son las tasas de transmisión alcanzadas, por lo tanto el valor del *throughput* máximo y la carga ofrecida en saturación, que son más elevadas para el último gracias a tener unas tasas de transmisión más elevadas.

6.4 Resultados con acceso MSDQCA con técnicas Cross Layer

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones del protocolo MSDQCA con la implementación de técnicas Cross Layer.

En la figura 6.4 se muestra la variación del *throughput* respecto a la carga ofrecida donde se aprecia la relación del *throughput* máximo en saturación para una de las técnicas explicadas en el punto 6.2 (MSDQCA-P) y para una de las dos que explicaremos a continuación (MSDQCA+CLLA), para así poder hacernos una idea del efecto de estas últimas.

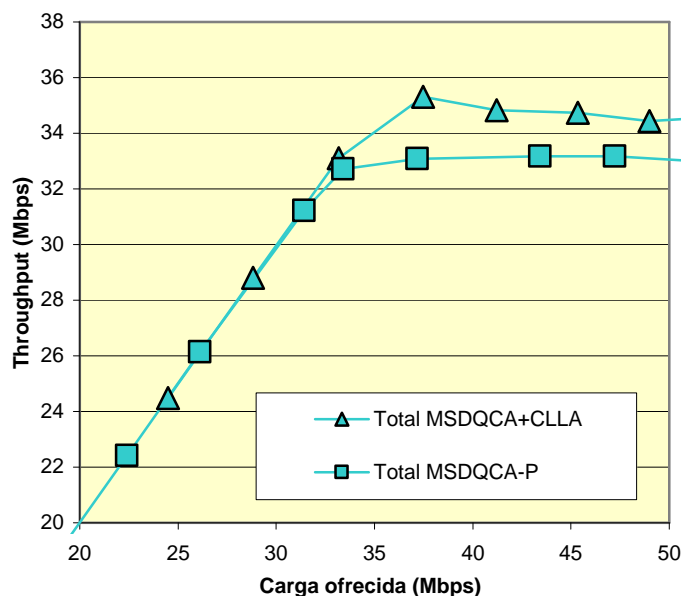


Fig. 6.4. Cotas máximas de throughput alcanzables sin y con técnicas Cross-Layer

Como observamos, la aplicación de las técnicas Cross-Layer producen un aumento del throughput total lo que supone una mejora positiva. El valor del

Throughput total corresponde a la suma de los throughputs de todas las clases de servicio.

En efecto, el throughput máximo alcanzable depende de la eficiencia de las tramas MSDQCA (ρ_i) que depende a su vez de la longitud de los paquetes y la tasa a la que estos se transmiten, y de los porcentajes de utilización (σ_i) de las tasas de transmisión disponibles (r_{bi}). Cuanto mayor sea el tamaño del paquete transmitido en el slot de datos, mayor será la eficiencia de las tramas. Además, cuanto mayor sea el porcentaje de utilización de las tasas de transmisión elevadas, mayor será el *throughput* máximo alcanzable. Por este mismo motivo, como se ha dicho en el punto 6.2, la longitud de los paquetes es mayor en 802.11g ya que al tratarse de tasas más elevadas, las cabeceras son más largas proporcionalmente a la parte de datos que se envían, lo cual no es eficiente. Si aumentamos el tamaño del paquete, para una misma cabecera enviamos más información útil, lo cual optimiza la transmisión.

6.4.1. MSDQCA+CLLA

En las simulaciones para este sistema inicialmente se ha fijado la carga de Datos_B y Datos_C y se ha aumentado la de Datos_A progresivamente para observar el efecto de las prioridades y su correcto funcionamiento. Después se ha fijado la de Datos_A y Datos_C y se ha variado Datos_B para observar la variación del funcionamiento del protocolo.

Con el fin de apreciar las mejoras que el uso de esta técnica ofrece, se han obtenido mediante simulaciones las curvas del *throughput* máximo alcanzable para distintos casos, considerando variable una de las cargas de Datos y para el modelo de canal de Markov. Para la obtención de los resultados se ha considerado que el paquete de *downlink* incluye la información de control de la capa física necesaria para la implementación de esta nueva técnica y por lo tanto los resultados obtenidos son lo más realistas posibles.

En estas simulaciones, también se ha considerado que la información de control se envía a la velocidad mínima (1 Mbps para 802.11b y 6Mbps para 802.11g) según establece el estándar 802.11 y como se ha comentado en 6.2. Estos valores son útiles para obtener una primera aproximación acerca de las mejoras potenciales que el diseño Cross-Layer ofrece.

En las figuras 6.5 y 6.6 se representan como referencia las curvas de *throughput* obtenidas utilizando el acceso MSDQCA básico. Para estas simulaciones se ha fijado la carga de Datos_B y Datos_C y se ha ido aumentando la de Datos_A.

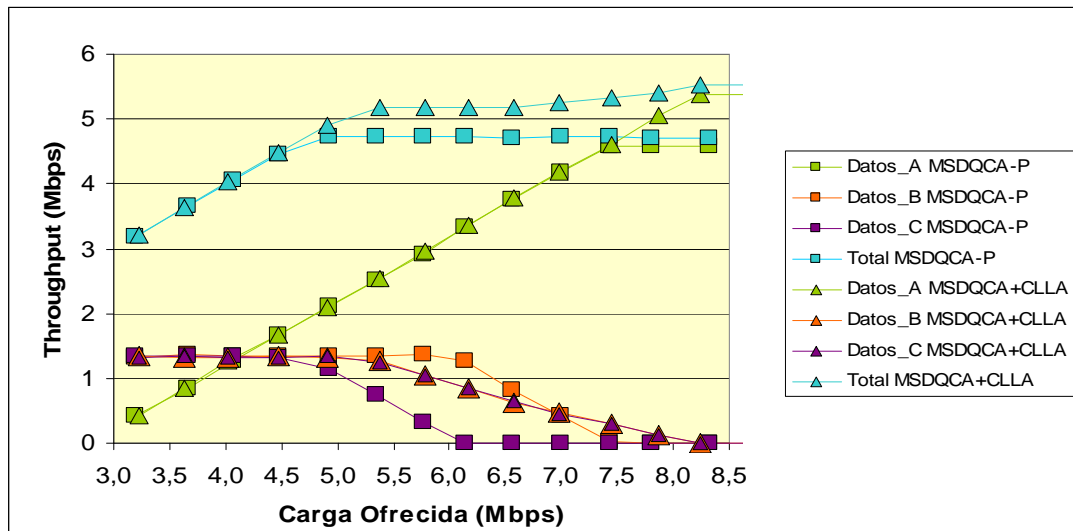


Fig. 6.5. Cotas máximas de throughput alcanzables con el acceso MSDQCA-P y MSDQCA+CLLA (802.11b)

Para el caso del sistema 802.11b (Figura 6.5), observamos que el *throughput* máximo alcanzable de MSDQCA+CLLA aumenta hasta 5.5 Mbps (4.7 Mbps para MSDQCA-P). Sigue siendo inferior a la capacidad máxima del canal, exactamente la mitad, pero mejora respecto al *throughput* obtenido sin la utilización de técnicas CL.

En la Figura 6.5 observamos que cuando la carga de Datos_A hace llegar la carga ofrecida a su capacidad máxima, el sistema se saturaría de no ser por las prioridades y por la aplicación de la técnica CLLA. Observamos como el valor de Carga en el que el sistema se satura es mayor cuando se utiliza la técnica MSDQCA+CLLA y los valores de *throughput* también son mayores para todas las clases de servicio. Esta simulación muestra la mejora que supone utilizar técnicas CL.

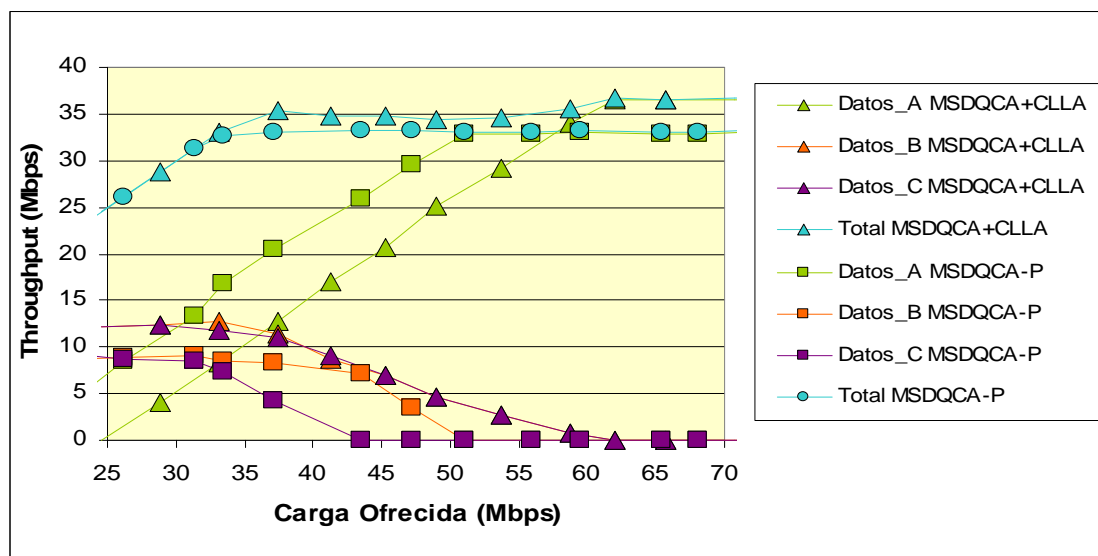


Fig. 6.6. Cotas máximas de throughput alcanzables con el acceso MSDQCA-P y MSDQCA+CLLA (802.11g)

Obsérvese que se trata prácticamente de la misma gráfica que para el sistema 802.11b simplemente variando los valores de *throughput* y de carga ofrecida debido a que se trata de un sistema con mayores tasas de transmisión. En este caso obtenemos un *throughput* máximo de 36.6 Mbps, un poco más cercano a la tasa máxima de transmisión (54Mbps). Son por tanto válidas las mismas conclusiones sobre el sistema explicitadas anteriormente.

En la Figura 6.7 se muestra el resultado de realizar las mismas simulaciones pero variando la carga de Datos_C y fijando la de Datos_A y Datos_B.

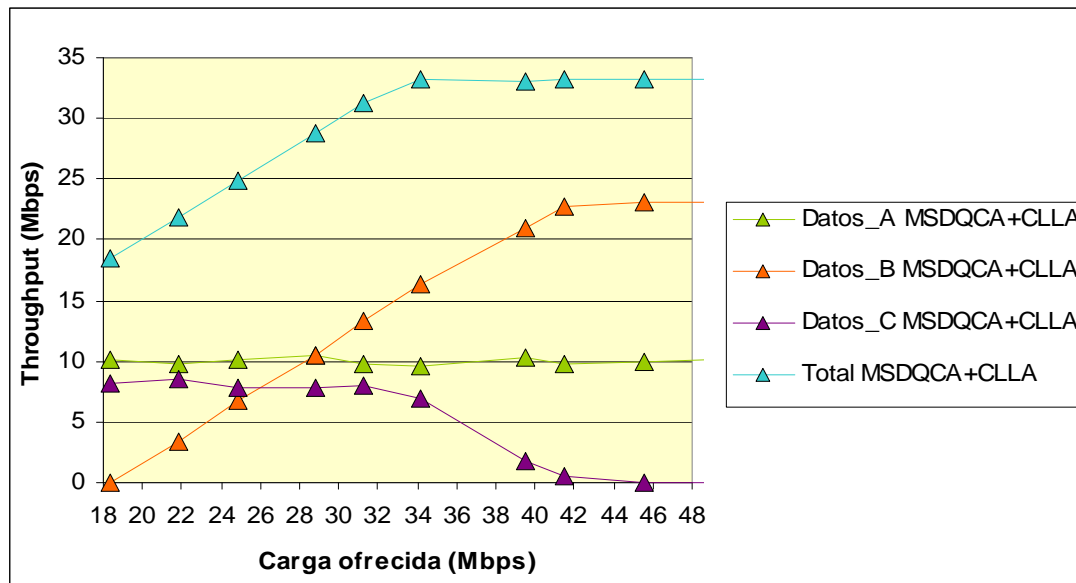


Fig. 6.7. Valor Throughput máximo para MSDQCA+CLLA (802.11g) variando Datos_B

En este caso la clase de servicio que aumenta progresivamente su *throughput* es Datos_B, esto es debido, como ya hemos dicho, a que es justamente esta clase la que ofrece una carga variable. El valor de *throughput* para Datos_B aumenta hasta que la carga llega a su capacidad máxima. Para valores algo inferiores al valor de carga en el que el sistema entra en saturación, Datos_C, la clase menos prioritaria, empieza a disminuir su *throughput*, transmitiendo menos mensajes para así asegurar la transmisión de los mensajes de Datos_A, la clase más prioritaria. Si observamos la Figura 6.8 podemos ver cómo afecta este comportamiento al retardo medio (Delay)

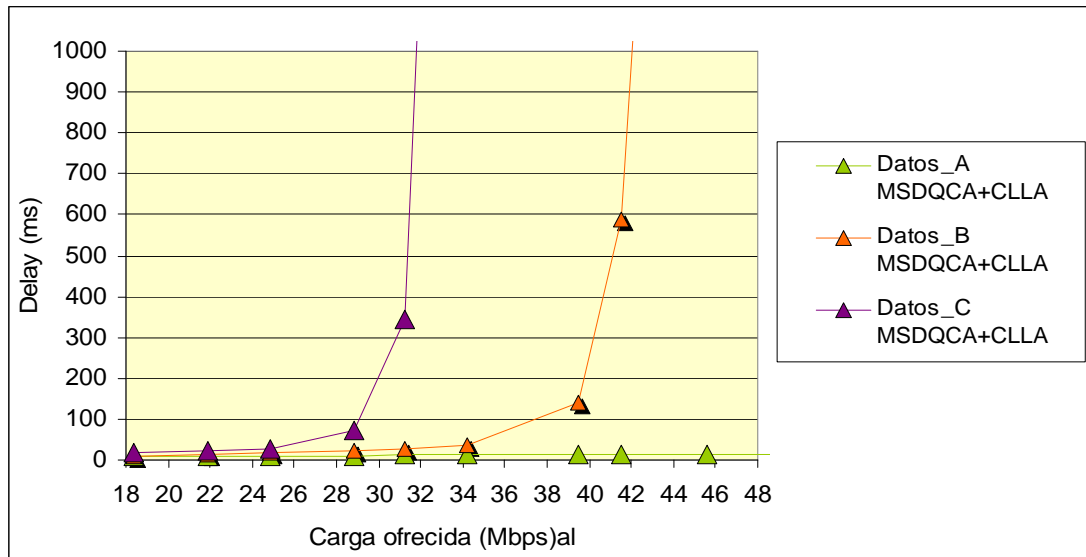


Fig. 6.8. Retardo Medio para MSDQCA+CLLA (802.11g) variando Datos_B

A diferencia de la Figura 6.3, en la que se muestra el retardo medio sufrido por los mensajes transmitidos en un sistema sin la utilización de técnicas CL, en la figura 6.8 observamos como los paquetes de Datos_A mantienen retardos acotados en su transmisión ya que la correcta distribución de los recursos nos permiten asegurar cierta QoS, al menos, para las clases más prioritarias. Además, como ya hemos dicho, el punto de saturación se produce para un valor de carga más elevado, por lo que los paquetes también sufren un retardo no acotado para cargas superiores.

6.4.2. Conclusiones acerca del rendimiento de la técnica CLLA

Tras el análisis de los resultados obtenidos a través de la primera técnica Cross-Layer, podemos concluir que se han cumplido los objetivos marcados puesto que gracias al uso de esta técnica se mejora la eficiencia global del sistema y se permite un mayor aprovechamiento de los recursos del mismo.

Concretamente, se resumen a continuación los principales aspectos beneficiosos de la técnica CLLA:

- Permite alcanzar cotas de *throughput* superiores a las alcanzables con un acceso MSDQCA básico en el cual no se implementa ningún intercambio de información explícito entre las capas MAC y física. Esto es cierto incluso a pesar de requerir un leve aumento de la carga de tráfico de control en el sistema.
- Permite obtener una mejora del rendimiento del sistema en términos de *throughput*.

- Se obtiene una mejora significativa también en términos de retardo medio de los mensajes. Se reducen los niveles de retardo medio de los mensajes respecto al acceso básico con protocolo MSDQCA de tal forma que permite aumentar el volumen de carga ofrecida al sistema.
- Se produce un pequeño incremento de la desviación típica del retardo de los mensajes inherente al funcionamiento de la propia técnica. Este incremento se puede considerar despreciable teniendo en cuenta las mejoras obtenidas en la eficiencia global del sistema.

Por todo ello, concluimos que la técnica CLLA analizada permite mejorar la eficiencia de sistemas WLAN de forma significativa y por tanto es una buena propuesta a tener en cuenta en el diseño de redes inalámbricas.

6.4.3. MSDQCA+CLVPF

A continuación se detallan los resultados obtenidos con las simulaciones de sistema realizadas aplicando la técnica CLVPF, descrita anteriormente en el capítulo 4.3.2.

Para este sistema se ha considerado variable la carga de Datos_A y fija la de Datos_C y Datos_B para realizar las simulaciones. Además, la longitud de los paquetes como se ha descrito en el capítulo 6.2 es 1000 bytes para 802.11b y 2000 bytes para 802.11g

En todas las simulaciones realizadas para el análisis de los resultados obtenidos con la técnica CLVPF se han continuado utilizando unas condiciones realistas en relación al tráfico de control, la información de control se transmite a la tasa mínima disponible, 1 Mbps para 802.11b y 6 Mbps para 802.11g (véase 6.2).

Todas las simulaciones con la técnica CLVPF se han realizado considerando un valor de alfa = 0.5 (véase fórmula 4.1 capítulo 4).

Las figuras 6.9 y 6.10 muestran los resultados de *throughput* obtenidos a través de la técnica CLVPF para los dos escenarios simulados (802.11b y 802.11g).

Se muestran además a modo de referencia, los resultados obtenidos mediante el acceso básico sin prioridades y la suma de *throughputs* para el caso de MSDQCA-P y MSDQCA+CLLA, que se indican con la etiqueta 'Total'.

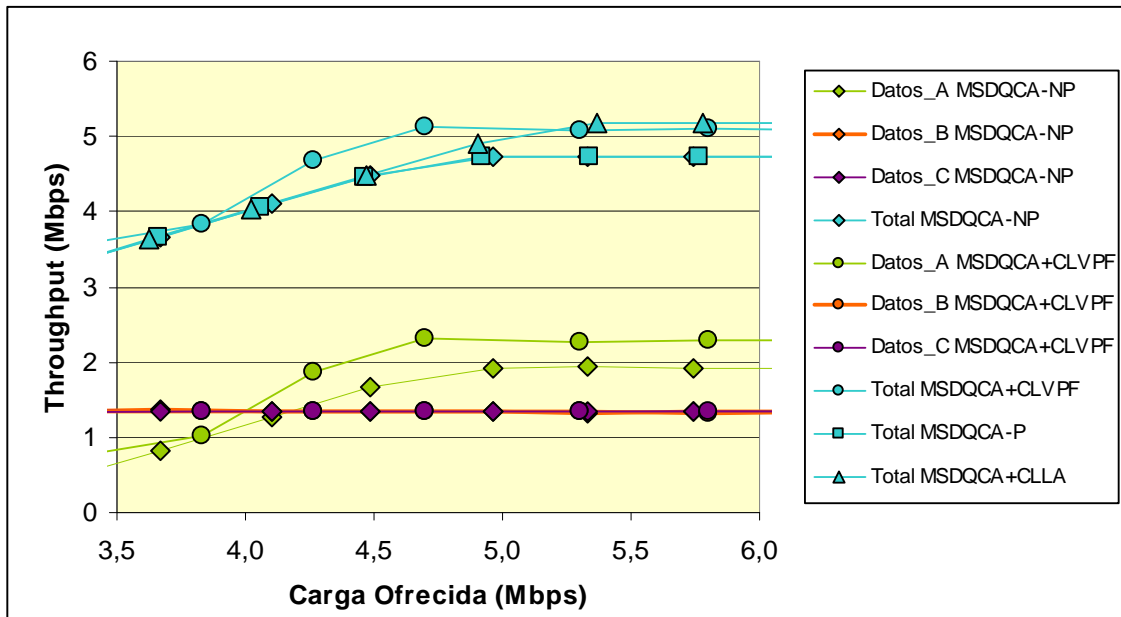


Fig. 6.9. Throughput alcanzable con el acceso MSDQCA-NP y MSDQCA+CLVPF (802.11b)

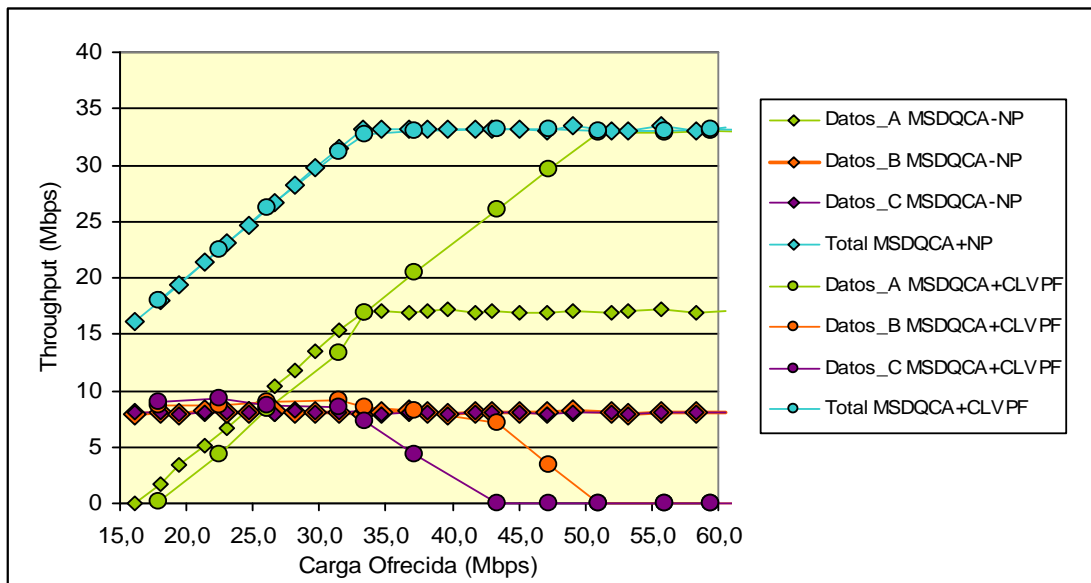


Fig. 6.10 Throughput alcanzable con el acceso MSDQCA-NP y MSDQCA+VPF (802.11g)

Podemos observar como la técnica CLVPF permite alcanzar cotas de *throughput* máximo superiores a las alcanzables mediante el acceso básico con MSDQCA para ambos sistemas. Este aumento del *throughput* se obtiene gracias a la priorización en la transmisión de datos que se realiza con la aplicación de esta técnica. La técnica CLVPF da mayor prioridad en la transmisión a los nodos con disponibilidad de transmisión a tasas elevadas pero de un modo diferente a CLLA (ver capítulo 4).

La metodología de funcionamiento de la técnica CLVPF, al igual que la técnica CLLA, provoca una modificación de los porcentajes de utilización de las tasas de transmisión posibles. Puesto que se da prioridad en la transmisión a los nodos cuya tasa de transmisión sea más elevada, el aumento del número de tramas en las cuales se han transmitido datos a velocidades elevadas, provoca un aumento del *throughput* máximo respecto al acceso básico.

De todas formas, tal y como se puede apreciar en las Figuras 6.9 y 6.10, el incremento del *throughput* máximo no es tan grande para la técnica CLVPF como el obtenido con la técnica CLLA. Esto es debido a que en ciertas situaciones, un nodo que disponga de una tasa de transmisión baja puede obtener mayor prioridad en la transmisión de datos que un nodo que disponga de una tasa mayor, si el primero ocupa una posición de la cola DTQ más lejana de la cabeza de la misma (véase descripción de la técnica CLVPF capítulo 4.3.2.). Es decir, el modo CLVPF tiene en cuenta, además del estado del canal, el estado de las colas distribuidas y el tiempo de espera de los paquetes en el sistema. Con esto se consigue obtener un trato más equitativo de los diferentes paquetes en el sistema. Este hecho se puede corroborar observando los valores de la desviación típica del retardo de los paquetes, y su reducción al aplicar la técnica CLVPF (ver Figura 6.11).

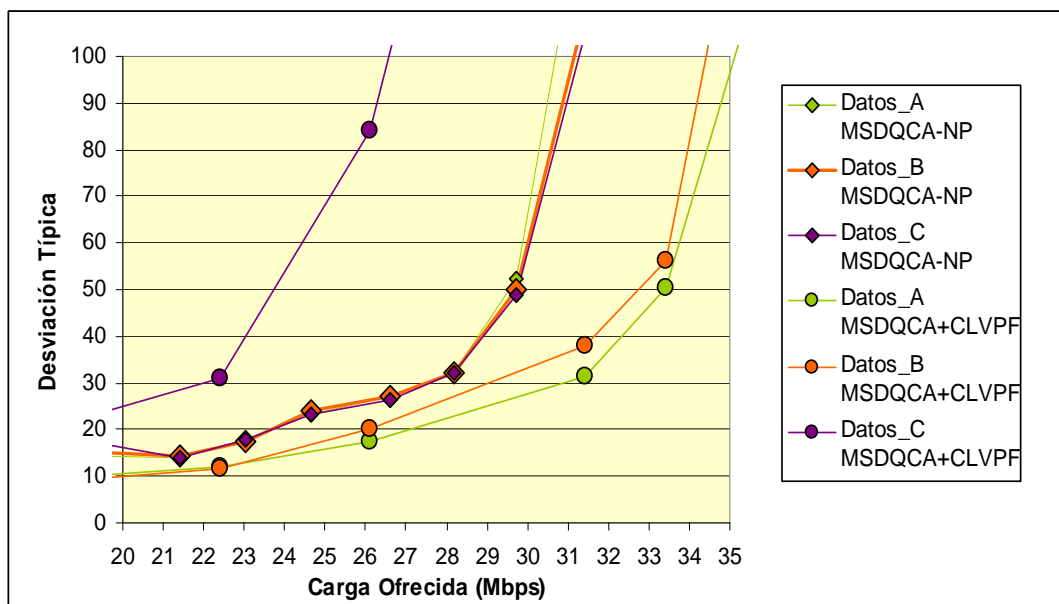


Fig. 6.11. Desviación típica del retardo con MSDQCA-NP y MSDQCA+VPF (802.11g)

En relación al retardo medio de los mensajes, la técnica CLVPF permite obtener niveles de retardo medio inferiores a los obtenidos haciendo uso del acceso básico con MSDQCA (Figura 6.12). A priori podríamos esperar una reducción del retardo medio respecto a la técnica CLLA puesto que la técnica CLVPF en ciertas situaciones permite obtener mayor prioridad en la

transmisión a nodos en la cola DTQ situados lejos de la primera posición de la misma y sin posibilidad de transmitir a tasas elevadas; pero realmente esta reducción no se produce. Esto es debido a que a menudo con la técnica CLVPF, algunos nodos transmiten a tasas bajas porque su posición en la cola DTQ les ha permitido alcanzar la primera posición de la cola VDTQ. Por lo tanto, se pueden producir transmisiones a tasas bajas provocando que la duración de algunas tramas sea mayor y por tanto se aumente el retardo de los mensajes.

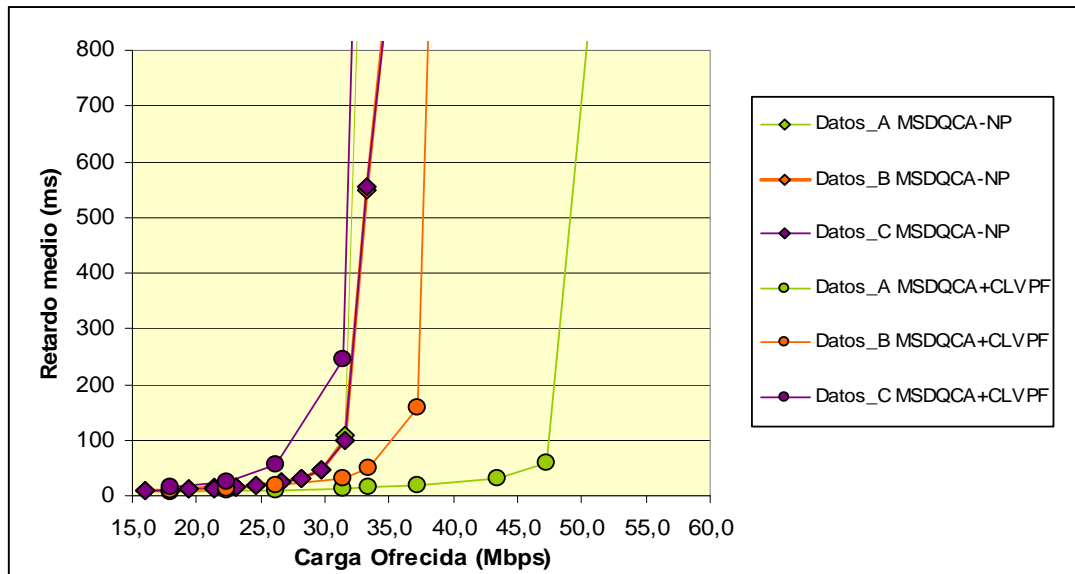


Fig. 6.12 Retardo medio de los mensajes (802.11g)

6.4.4. Conclusiones acerca del rendimiento de la técnica CLVPF

Tras analizar los resultados de la denominada técnica CLVPF, obtenidos mediante simulaciones a nivel de sistema, podemos concluir que en este caso también se han cumplido los objetivos marcados puesto que se trata de una técnica que, tal y como han mostrado las gráficas obtenidas, proporciona mejoras, tanto en términos de *throughput* como de retardo medio y desviación típica del retardo de los mensajes, siempre respecto al caso sin aplicar CL. De esta manera, la eficiencia global del sistema WLAN es mejorada respecto al sistema que implementa un control de acceso básico mediante el protocolo MSDQCA.

Por lo tanto, se resumen a continuación las principales conclusiones extraídas tras el análisis de resultados de la técnica CLVPF:

- La técnica CLVPF proporciona un aumento del máximo *throughput* alcanzable puesto que da prioridad en la transmisión de datos a los nodos con posibilidad de transmitir sus paquetes a tasas elevadas. Su

implementación únicamente requiere un leve incremento de la carga de tráfico de control.

- La ganancia obtenida en términos de *throughput* gracias a la técnica CLVPF es algo inferior a la obtenida con el uso de la técnica CLLA, puesto que la priorización también tiene en cuenta el estado de las colas distribuidas y el tiempo de espera de los paquetes en el sistema.
- En términos de retardo medio de los mensajes, la técnica CLVPF permite obtener niveles inferiores a los obtenidos con el acceso básico mediante MSDQCA y muy similares a los niveles obtenidos mediante la técnica CLLA.

Por todo ello, concluimos que la técnica CLVPF permite mejorar la eficiencia de sistemas WLAN y por tanto cumple los objetivos marcados al inicio del presente trabajo.

6.5. Conclusiones generales tras el análisis de resultados

Con el fin de mejorar la eficiencia y aprovechamiento de los recursos en sistemas WLAN 802.11g, se han realizado diversas propuestas de técnicas basadas en el diseño Cross-Layer definidas en otros estudios para sistemas sin diferenciación de clases de servicio y con una implementación de la capa física distinta. Dichas técnicas nos han permitido estudiar la eficiencia y posible aplicación a diversas situaciones del sistema WLAN 802.11g.

Las técnicas propuestas proporcionan beneficios gracias a un intercambio de información entre la capa física y MAC del sistema. En esta última capa se ha hecho uso del protocolo de alta eficiencia MSDQCA el cual permite este intercambio de información de forma sencilla y sin necesidad de un aumento elevado de la carga de tráfico de señalización y control en el sistema.

Las técnicas estudiadas permiten alcanzar cotas de eficiencia significativamente mejoradas, especialmente en términos de *throughput* y retardo medio. Se ha estudiado su comportamiento mediante simulaciones por ordenador y se ha comprobado la bondad de su funcionamiento y el cumplimiento de los objetivos marcados. Sus virtudes más importantes son la sencillez de implementación y los buenos resultados que ofrecen en cuanto al aprovechamiento de los recursos del sistema.

La implementación de un sistema con diferenciación de clases de servicio permite hacer un uso más eficiente de los recursos disponibles y mejorar la QoS de determinados paquetes. De esta forma se solucionan muchos de los actuales problemas con los que nos encontramos si sobrecargamos un sistema transmitiendo datos y queremos utilizar a la vez recursos de voz. Esta diferenciación nos asegurará el correcto funcionamiento de un sistema más prioritario frente a otro de menor prioridad.

Por todo ello, concluimos que las técnicas estudiadas ofrecen mejoras significativas y son propuestas válidas a tener en cuenta en el diseño de futuros sistemas de comunicaciones inalámbricas, tanto redes de área local como otros tipos de sistemas de comunicaciones.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Conclusiones finales

Bajo la perspectiva del actual crecimiento de los mercados asociados con las comunicaciones inalámbricas y en especial, de las redes locales inalámbricas, el presente trabajo de fin de carrera se ha centrado en adaptar el protocolo DQCA para poder soportar diversas clases de servicio. Una vez cumplido dicho objetivo nuestro trabajo se ha centrado en la aportación y estudio de nuevas técnicas de gestión de los recursos radio para sistemas basados en la capa física del estándar 802.11g. Las técnicas propuestas se basan en ideas de diseño Cross-Layer. Se han llevado a cabo simulaciones por ordenador con el fin de evaluar las mejoras que estas técnicas ofrecen en distintos escenarios significativos.

Así, a continuación se resumen las principales conclusiones finales a las que se ha llegado tras el presente estudio:

- La diferenciación de clases de servicio nos permite mejorar la QoS de determinados paquetes, separación que no podíamos ofrecer en los sistemas convencionales.
- Se ha podido verificar la bondad de las propuestas realizadas mediante el uso de simulaciones por ordenador, comparando las cotas de *throughput* máximas con el uso del protocolo MAC MSDQCA.
- Se han diseñado dos mecanismos de gestión de recursos radio basados en técnicas Cross-Layer que ofrecen beneficios en diferentes situaciones en los sistemas inalámbricos considerados. Se han llamado, respectivamente, CLLA y CLVPF.
- Con respecto a la técnica CLLA, se han obtenido curvas que muestran la mejora obtenida términos de *throughput* y retardo medio. En términos de *throughput* los resultados son significativamente beneficiosos en tanto que se alcanzan incrementos del *throughput* máximo respecto a los niveles obtenidos mediante el acceso básico con MSDQCA.
- La técnica CLVPF proporciona un aumento del máximo *throughput* alcanzable respecto al caso de no usar CL puesto que da más prioridad en la transmisión de datos a los nodos con posibilidad de transmitir sus paquetes a tasas elevadas. La ganancia obtenida en términos de *throughput* gracias a la técnica CLVPF es algo inferior a la obtenida mediante el uso de la técnica CLLA puesto que también se tiene en cuenta en la prioridad el estado de las colas distribuidas y el tiempo de espera de cada paquete. Esto redundará a cambio en una mejora de la

equidad en el trato de todos los paquetes. En términos de retardo medio de los mensajes, la técnica CLVPF permite obtener niveles inferiores a los obtenidos mediante el acceso básico con MSDQCA y muy similares a los obtenidos mediante la técnica CLLA.

En definitiva, se han estudiado técnicas avanzadas de gestión de los recursos radio basadas en el diseño Cross-Layer para sistemas WLAN, cuyos beneficios han sido evaluados en distintas condiciones de trabajo mediante simulaciones por ordenador. El posterior análisis de los resultados obtenidos ha permitido comprobar la bondad de las técnicas propuestas. Las virtudes más importantes de estas técnicas son su sencillez de implementación y los buenos resultados ofrecidos en cuanto al aprovechamiento de los recursos del sistema.

Por todo ello, podemos afirmar que tras la realización del presente trabajo de fin de carrera se han alcanzado los objetivos marcados en un principio.

7.2. Consideraciones medioambientales

El presente trabajo ha propuesto y analizado distintas técnicas de gestión de los recursos que no únicamente resultan beneficiosas para sistemas inalámbricos sino que su implementación permite a su vez minimizar el impacto medioambiental de estos sistemas. Se ha demostrado que estas técnicas permiten hacer un uso más eficiente de recursos disponibles tales como el espectro electromagnético o la energía eléctrica. Su implementación puede redundar en una reducción del nivel de contaminación electromagnética y puede suponer grandes beneficios en términos de ahorro de energía. El presente trabajo ha propuesto

7.3. Líneas futuras de investigación

A partir del trabajo realizado, se han abierto un conjunto de posibilidades sobre las que puede resultar de interés profundizar, y que a continuación se enumeran:

- En primer lugar, en relación a la técnica CLVPF, queda como línea futura el posible estudio acerca de la óptima elección de la función de prioridad (VPF_i) que asigna las prioridades en la transmisión de datos entre los nodos del sistema. Un estudio detallado podría determinar si es posible hallar nuevas expresiones para esta función que permitan optimizar ciertos parámetros como el retardo o el *throughput*.
- Estudio del rendimiento de técnicas Cross-Layer sobre escenarios que consideren condiciones distintas a las estudiadas. En este sentido, puede resultar interesante analizar los siguientes aspectos:

- Efecto de la probabilidad de error en el bit (*BER*) sobre las técnicas Cross-Layer, tanto en el canal ascendente como descendente. Utilización de mecanismos de codificación de canal.
- Estudio de la afectación de la velocidad de movimiento de los nodos sobre la eficiencia de técnicas Cross-Layer.
- Estudio del efecto de hipotéticos mecanismos de control de potencia y su interacción con el diseño Cross-Layer.
- Estudio de nuevas técnicas Cross-Layer que hagan uso de parámetros de capa física no contemplados en el presente trabajo como el tiempo de ocupación de las colas.
- Estudio de nuevas técnicas Cross-Layer basadas en el uso de mecanismos de predicción de canal que permitan utilizar información del futuro en las interacciones Cross-Layer.

REFERENCIAS

- [1] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Standard. IEEE. 1997.
- [2] L. Alonso, R. Ferrús, R. Agustí, "MAC-PHY Enhancement for 802.11b WLAN Systems via Cross-layering" *IEEE VTC'03 Fall, Orlando, October 2003*.
- [3] L. Alonso, R. Ferrús, R. Agustí, "WLAN Throughput Improvement via Distributed Queuing MAC", *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No. 4, Page(s): 310 - 312, April 2005.
- [4] L. Alonso, R. Agustí, O. Sallent, "A Near-Optimum MAC Protocol Based on the Distributed Queueing Random Access Protocol (DQRAP) for a CDMA Mobile Communication System", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 9, pp. 1701-1718, September 2000.
- [5] L. Alonso, "Técnicas de acceso y gestión de recursos para garantizar calidad de servicio en sistemas de comunicaciones móviles basados en CDMA", *Tesis doctoral realizada en la Universidad Politécnica de Cataluña*, Mayo 2001.
- [6] D. Qiao, S. Choi, K.G. Shin, "Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 1, No. 4, pp. 278-292, October-December 2002.
- [7] J. Del Prado, S. Choi, "Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement", *ICC'03*, pp. 1108-1113, Anchorage, Alaska, may 2003.
- [8] E. Kartsakli, A. Cateura, C. Verikoukis, L.Alonso, "A Cross-Layer Scheduling Algorithm for DQCA-based ELAN Systems with Heterogeneous Voice-Data Traffic", *LANMAN*, 2005
- [9] E. Kartsakli, A. Cateura, J. Alonso-Zárate, C. Verikoukis, L.Alonso, "Cross-Layer Enhancement for WLAN Systems with Heterogeneous Traffic based on DQCA", *IEEE Communications Letters*, 2005.
- [10] G Sanjay Shakkottai, Theodore S. Rappaport, Peter C. Karlsson, "Cross-Layer Design for Wireless Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, No. 10, Oct. 2003, pp.74 – 80.
- [11] G. Carneiro, J. Ruela, M. Ricardo, "Cross-layer design in 4G wireless terminals", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 2, April 2004, pp. 7-13.

- [12] E. Kartsakli, A. Cateura, J. Alonso-Zárate, C. Verikoukis, L. Alonso, "Opportunistic Scheduling using an Enhanced Channel State Information Update Scheme for WLAN Systems with DQCA", *IEEE VTC 2007*
- [13] S. Bouam, J. B. Othman, "A 802.11 Multiservices Cross-Layer Approach for QoS management", *IEEE*, 2004
- [14] E. Lopez-Aguilera, J. Casademont, J. Cotrina, "Outdoor IEEE 802.11g Cellular Network Performance", *IEEE Communications Society Globecom 2004*
- [15] A. Cateura, L. Alonso, C. Verikoukis, "Opportunistic Scheduling for WLAN systems using Cross-Layer Techniques and a Distributed MAC" *IEEE VTC'05 Fall, October 2005*.

ANEXOS

ANEXO 1. PRINCIPALES PROTOCOLOS MAC PARA SISTEMAS INALÁMBRICOS

1.1 ALOHA

El protocolo ALOHA fue el primero que se utilizó en los sistemas de comunicaciones vía radio. ALOHA establece que, cuando un usuario tiene datos para transmitir, accede al canal y realiza la transmisión libremente. Si dos o más usuarios realizan una transmisión simultáneamente, se produce una colisión. El equipo receptor de la información debe notificar la correcta recepción de la misma mediante un mensaje de control. Cuando un usuario que ha transmitido sus datos no ha recibido dicho mensaje de control tras un determinado tiempo, debe suponer que se ha producido una colisión y reintentar la transmisión tras un tiempo de espera aleatorio. Este tiempo de espera aleatorio es necesario para reducir la probabilidad de que se produzcan nuevas colisiones.

ALOHA ofrece un buen rendimiento cuando la carga de tráfico es pequeña sin embargo, es poco eficiente cuando la carga de tráfico aumenta ya que a medida que crece el número de colisiones, el número de retransmisiones aumenta y estas a su vez aumentan la carga de tráfico ofrecido, lo que genera más colisiones. Es por lo tanto, un protocolo inestable cuando la carga de tráfico ofrecido al sistema aumenta. Esta inestabilidad puede llegar a saturar el sistema y bloquear las transmisiones.

Cabe destacar que existen dos versiones de ALOHA que pretenden mejorar su eficiencia: Slotted-ALOHA y R-ALOHA. El primero surge como mejora del ALOHA puro y permite duplicar el número máximo de paquetes transmitidos correctamente a partir de una segmentación del eje de tiempo. El segundo también divide el eje de tiempos en una sucesión de intervalos, unos destinados a la reserva de recursos y otros a la transmisión de datos. Es a su vez una mejora del Slotted-ALOHA.

1.2 Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

CSMA y sus variaciones son mejoras basadas en el ALOHA puro. La idea principal es que los usuarios tratan de evitar las colisiones a partir de la escucha del canal antes de realizar una transmisión. Este método de acceso se describe en detalle en el capítulo 2 debido a su importancia en el estándar 802.11.

1.3 Inhibit Sense Multiple Access (ISMA)

Este protocolo es una variación del CSMA y está especialmente pensado para adaptar las ideas de CSMA a entornos de transmisión por radio. En ISMA, los usuarios no escuchan el canal sino que reciben la información sobre su ocupación a través de un canal de control.

ISMA no evita las colisiones en la transmisión ya que éstas se producen cuando dos o más usuarios inician sus transmisiones al mismo tiempo haciendo uso de un recurso indicado como libre.

1.4 Distributed Queueing Request Update Multiple Acces (DQRUMA)

DQRUMA consiste en una extensión de R-ALOHA en la cual los intervalos de tiempo se dividen en minislots de acceso y en slots de transmisión de datos. Los usuarios solicitan recursos de transmisión mediante peticiones transmitidas en los mismos minislots mediante la técnica Slotted-ALOHA. Una entidad central (normalmente, una estación base) recibe las peticiones de todos los usuarios, las coloca en una cola y gestiona esta cola según un cierto algoritmo para asignar los permisos de transmisión adecuados a cada usuario.

Es un mecanismo de gestión totalmente centralizado que permite a la estación base tener el control absoluto de las transmisiones. La aplicación de un algoritmo de gestión adecuado puede permitir dar prioridades a unas conexiones respecto a otras, aunque no elimina el problema de inestabilidad inherente al acceso ALOHA utilizado en los minislots de acceso.

ANEXO 2. MAC 802.11

El protocolo MAC utilizado en el estándar 802.11 proporciona un acceso al medio equitativo compartido a través de dos mecanismos distintos: un protocolo de acceso de uso obligatorio basado en contención, llamado *Distributed Coordination Function* (DCF), y un protocolo basado en sondeo (*polling*), llamado *Point Coordination Function* (PCF). El mecanismo PCF raramente se utiliza en los dispositivos comerciales disponibles en el mercado actual así que nos centraremos en el mecanismo DCF, el cual es un protocolo MAC distribuido basado en la técnica CSMA/CA.

Básicamente, el mecanismo DCF funciona de la siguiente manera: antes de iniciar una transmisión de datos, el nodo debe 'escuchar' el medio para determinar si está ocupado. Si el nodo detecta que el medio ha estado desocupado durante un tiempo superior a un intervalo denominado DIFS (*Distributed Inter Frame Space*), el nodo puede transmitir el paquete inmediatamente. Si en cambio, el nodo determina que el medio está ocupado, debe esperar hasta que esté desocupado para esperar entonces otro intervalo DIFS. Si el medio se mantiene desocupado, se inicia el procedimiento de *backoff* (cuenta atrás) seleccionando un valor para el contador de *backoff*. Mientras el medio está desocupado, el contador de *backoff* se va decrementando y cuando alcanza el valor 0, el nodo transmite su paquete. El procedimiento establecido por la DCF está representando en la figura 2.1 mediante un diagrama.

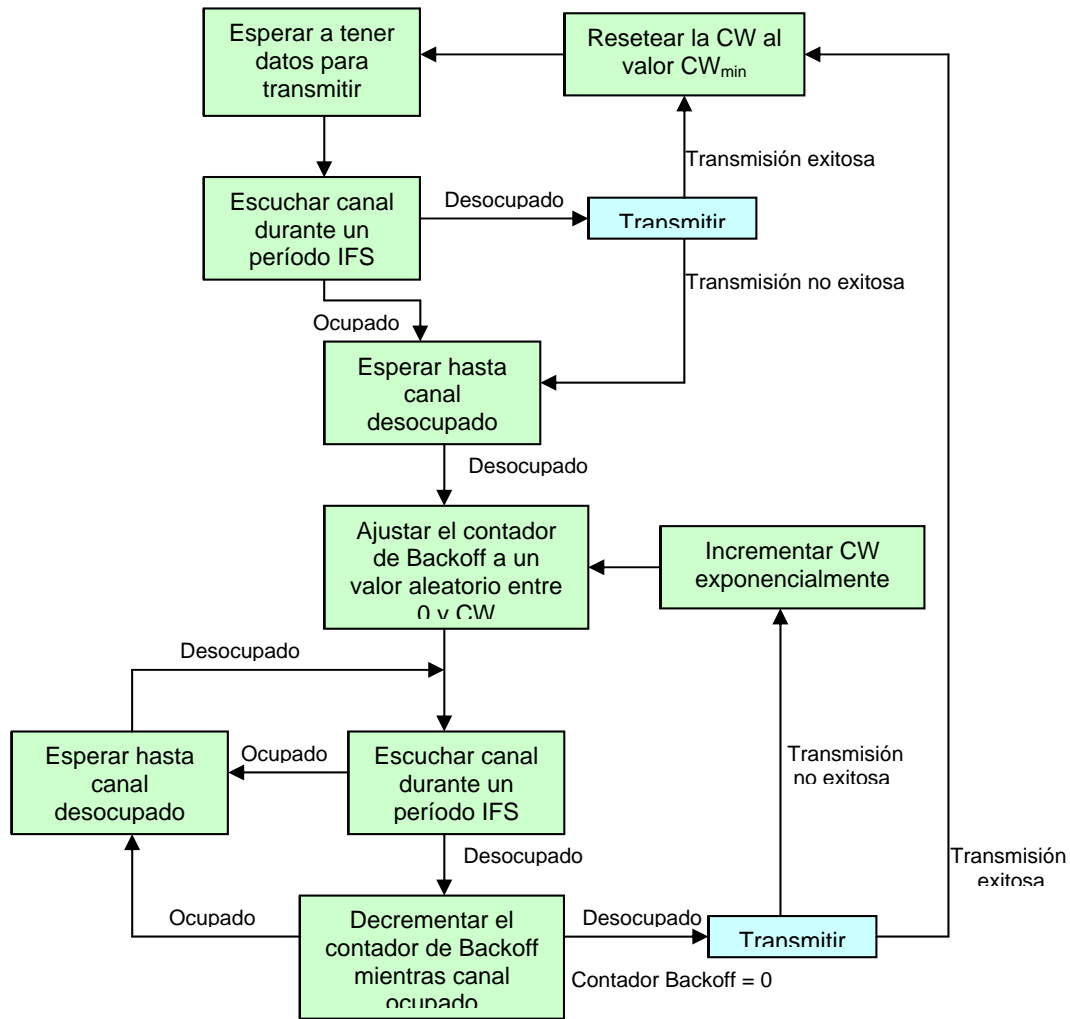


Fig. 2.1 Diagrama del proceso descrito por la *Distributed Coordination Function* (DCF)

La prioridad en el acceso al medio se gestiona mediante el uso de intervalos de tiempo denominados *Inter Frame Spaces* (IFS), es decir, intervalos de tiempo entre transmisiones de paquetes consecutivos. El estándar define 4 tipos de intervalos IFS: Short IFS (SIFS), PCF IFS (PIFS), DCF IFS (DIFS) y Extended IFS (EIFS). El método de acceso básico haciendo uso de los intervalos IFS está mostrado en la figura 2.2.

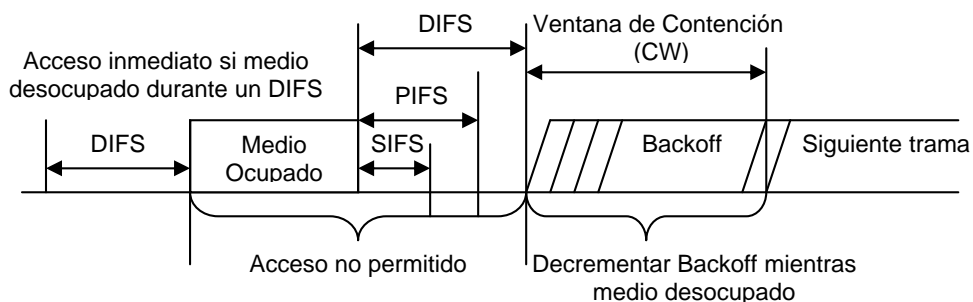


Fig. 2.2 Acceso al medio mediante DCF

El mecanismo básico de acceso puede ser ampliado haciendo uso del intercambio de paquetes denominados RTS/CTS (*Ready To Send/Clear to Send*). En este caso, tras conseguir el acceso al medio y antes de iniciar la transmisión de un paquete de datos, un pequeño paquete de control (RTS) es enviado al nodo destinatario anunciando la inminente transmisión. Este paquete es respondido por el nodo destinatario con otro pequeño paquete de control (CTS) que indica al emisor que el receptor está listo para recibir el paquete de datos. Ambos paquetes RTS y CTS contienen la longitud del paquete de datos y permiten que el resto de nodos conozcan durante cuánto tiempo el canal va a estar ocupado. Este mecanismo resuelve un problema común en redes WLAN, denominado *The Hidden Terminal Problem* o el problema del terminal oculto.