



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

Propuesta de arquitectura de QoS en entorno inalámbrico 802.11e basado en Diffserv con ajuste dinámico de parámetros

Autor:

D. Carlos García García

Director:

Dr. Jose Ignacio Moreno Novella

DEPARTAMENTO INGENIERÍA TELEMÁTICA

Leganes, Junio 2006

TESIS DOCTORAL

Propuesta de arquitectura de QoS en entorno inalámbrico 802.11e basado en Diffserv con ajuste dinámico de parámetros

Autor: D. Carlos García García

Director: Dr. José Ignacio Moreno Novella

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de 2006

A mis padres y a mi hermano
A Silvia

Agradecimientos

A través de este pequeño pero importante espacio, me gustaría dejar constancia del profundo agradecimiento que siento hacia todas aquellas personas que en algún momento de su vida han contribuido a formarme como persona, tanto en el ámbito personal como profesional.

No necesito enumerar quienes sois, y sabéis perfectamente como me habéis ayudado a forjar un adecuado carácter, marcado por afrontar la vida con un gran espíritu crítico, sin aceptar lo que se nos ofrece sin más, buscando alternativas y ofreciendo soluciones.

Espero que en esta nueva etapa de mi vida, una vez superado el doctorado, sigáis a mi lado ofreciéndome vuestros sabios consejos. ¡ Muchas gracias por estar ahí !

Una velada en que todos los presentes
estén absolutamente de acuerdo
es una velada perdida.
Albert Einstein

Resumen

Durante los últimos años hemos sido testigos de la eclosión de las **redes inalámbricas**, las cuales han facilitado la interconexión de equipos proporcionando una movilidad y flexibilidad en el acceso a Internet hasta la fecha impensables. La difusión de este tipo de redes en España ha venido acompañada de los accesos de banda ancha, de forma que nos resulta bastante natural disponer de un equipo inalámbrico para el acceso a Internet desde nuestros hogares.

Ambos avances han permitido el desarrollo de multitud de **servicios multimedia**, los cuales, hasta la fecha, no se habían desplegado debido a las limitaciones tecnológicas en el acceso. De esta forma, cada día resulta más común el poder acceder a un mapa de la zona donde nos encontramos, localizar la gasolinera más próxima, consultar la cartelera de cine o establecer una videoconferencia con un familiar.

Por desgracia, estos avances tecnológicos no han venido acompañados de algún mecanismo que nos asegure un adecuado acceso a estos servicios, es decir, un **soporte de Calidad de Servicio** (QoS por sus siglas en inglés). De hecho, seguimos disfrutando de un nivel similar al que teníamos hace bastantes años, aunque ahora dispongamos de una mayor velocidad de acceso.

En el caso de las tecnologías inalámbricas, caracterizadas por su extrema dependencia de las condiciones del entorno y su baja eficiencia en escenarios con múltiples dispositivos móviles, el soporte de calidad de servicio cobra un especial interés. En la búsqueda de una solución para estos entornos, en esta tesis, se propone una **arquitectura de red de acceso** que ofrece un soporte de calidad de servicio al mismo tiempo que permite una gestión óptima de los recursos de red.

Con respecto a la gestión de la calidad de servicio, se ha optado por el modelo de **servicios diferenciados**, el cual se ajusta a las especiales características de las redes inalámbricas. Y en relación a estas últimas, se decidió trabajar sobre el estándar de mayor difusión, 802.11, de forma que los resultados obtenidos en esta tesis pudiesen ser fácilmente aplicables a redes reales.

De esta forma, apoyándonos en la norma desarrollada por el grupo de trabajo IEEE 802.11e, **proponemos una arquitectura de red de acceso con soporte de calidad de servicio** basado en el modelo de servicios diferenciados para **dispositivos móviles 802.11e**.

La arquitectura permite, apoyándose en las herramientas proporcionadas por 802.11e, **maximizar el rendimiento de la red de acceso** ajustando de forma dinámica los parámetros de acceso de cada cliente en base a la carga de red.

La propuesta es finalmente validada mediante el empleo de la **técnica de simulación** sobre distintos escenarios de interés, a través de los cuales se constata la mejora del rendimiento planteada y, además, se ofrecen criterios de diseño para su aplicación.

Abstract

During the last years we have witnessed a wide spread of **wireless networks**, which have meant an easier way for network connectivity, by providing flexibility and mobility in the Internet access. The diffusion of this kind of networks in Spain has been accompanied by the development of wide band access, in such a way that it is common to find wireless equipments to Internet access at home.

Both advances have allowed the development of multiple **multimedia services**, which have not been implemented so far because of the technological limitations in the access. Therefore, it is increasingly common the fact of getting access to a map, finding a gas station, checking the billboard or establishing a videoconference with a colleague.

Unfortunately, these technological advances have not been accompanied by any mechanism that ensures a proper access to such services, that is to say '**Quality of Service (QoS) support**'. In fact, although we now enjoy a higher bandwidth, we still have the same QoS support we have had for many years.

The QoS support is especially interesting with wireless technologies. These networks are extremely dependent on the access conditions. In this thesis, seeking for a solution in these environments, we propose an **access network architecture** that provides QoS support, as well as an optimal management of the network resources.

Regarding the QoS management, the **Differentiated Service Model** has been chosen for its suitability to the special conditions of wireless networks. On the other hand, regarding the mentioned wireless networks, we have decided to make use of the worldwide most popular standard, 802.11, so that the results of the thesis can be easily implemented in real networks.

Thus, our analysis is based on the work developed by the working group IEEE 802.11e, and we **propose an access network architecture with QoS support** using the differentiated service model for **802.11e mobile nodes**.

The architecture determines the appropriate configuration in order to maximize the **network performance** in a dynamic way, by adjusting the access network parameters based on the network load.

The proposal is validated using **simulation techniques** in different environments, where the proposal improvements are put forward and design criterias for its implementation are defined.

Índice General

Capítulo 1 - Introducción y Objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos principales	4
1.3 Estructura de la memoria	6
Capítulo 2 – Estado del Arte	9
2.1 Introducción	9
2.2 Tecnologías de Red Inalámbricas	11
2.2.1 Norma IEEE 802.11	12
2.2.1.1 IEEE 802.11 MAC - Nivel de Enlace	14
2.2.1.2 Función de Coordinación Distribuida – DCF	16
2.2.1.3 Función de Coordinación Centralizada – PCF	17
2.2.1.4 Limitaciones de PCF para el soporte de QoS	19
2.2.2 Norma IEEE 802.11e	20
2.2.2.1 IEEE 802.11e MAC - Nivel de Enlace	20
2.2.2.2 Acceso a canal mejorado – EDCA	21
2.2.2.3 Acceso a canal controlado – HCCA	23
2.2.2.4 Especificaciones de tráfico – TSPEC	24
2.3 Soporte de Calidad de Servicio	25
2.3.1 Soporte de QoS en sistemas 3G: 3GPP	25
2.3.2 Servicios Integrados: Intserv	26
2.3.3 Servicios Diferenciados: Diffserv	29
2.4 Funcionamiento conjunto del modelo de Servicios diferenciados sobre IEEE 802.11e	34
2.5 Conclusiones	37

Capítulo 3 - Propuesta de Arquitectura	39
3.1 Introducción	39
3.2 Propuesta de Arquitectura con soporte de calidad de servicio en entorno 802.11e	41
3.2.1 Funciones de la Arquitectura.....	42
3.2.1.1 Recopilación de información	42
3.2.1.2 Procesamiento de la información.....	44
3.2.1.3 Configuración de elementos de red.....	51
3.2.2 Descripción de módulos.....	53
3.2.2.1 Terminal Móvil.....	53
3.2.2.2 Punto de acceso	54
3.2.3 Descripción de interfaces	57
3.2.4 Casos de Uso	61
3.2.5 Modo de operación: Perfiles de trabajo.....	65
3.3 Consideraciones especiales	66
3.3.1 Presencia de nodos no compatibles con 802.11e	66
3.3.2. Nodos configurados con diferentes tasas de transmisión.....	67
3.4 Conclusiones	68
Capítulo 4 - Validación de la Arquitectura mediante Simulación	69
4.1 Introducción	69
4.2 Entorno de simulación.....	70
4.2.1 Metodología y Consideraciones previas	71
4.3 Simulación de la Arquitectura.....	74
4.3.1 Análisis de tráfico perteneciente a un único grupo Diffserv.....	75
4.3.2 Análisis de tráfico perteneciente a diferentes grupos Diffserv: priorización	82
4.3.3 Análisis de tráfico perteneciente a diferentes grupos Diffserv: reparto proporcional... ..	96
4.3.4 Reparto proporcional entre subgrupos Assured Forwarding junto con priorización	109
4.3.5 Consideraciones especiales: Escenarios multi-rate.....	112
4.4 Conclusiones	115
Capítulo 5 - Conclusiones y Trabajos Futuros	117
5.1 Introducción	117
5.2 Conclusiones	118
5.3 Reflexiones Personales.....	120
5.4 Trabajos Futuros.....	121
Glosario	123
Referencias	125

Apéndice A - Entorno de Simulación	133
A.1 Introducción	133
A.2 Herramienta de simulación: ‘NS2 – Network Simulator’	134
A.2.1 Instalación de NS2 y extensiones.....	135
A.2.2 Validación de NS2 y la extensión 802.11e	138
A.2.2.1 Tiempo corto entre-tramas SIFS.....	141
A.2.2.2 Tiempo de transmisión de trama de datos	141
A.2.2.3 Tiempo de transmisión de trama de asentimiento (ACK)	144
A.2.2.3 Tiempo entre-tramas (AIFS) y Tiempo de <i>backoff</i> - sin colisiones.....	145
A.2.2.4 Tiempo entre-tramas (AIFS) y Tiempo de <i>backoff</i> - con colisiones.....	150
A.3 Conclusiones	153

Índice de Figuras

Figura 1-1. Comparativa de tecnologías de acceso	2
Figura 1-2. Comparativa de usuarios Wi-Fi y evolución del mercado a nivel mundial.....	3
Figura 1-3. Evolución de dispositivos Wi-Fi en España.....	3
Figura 2-1. Problemática RTS/CTS	15
Figura 2-2. Capas de la torre TCP/IP definidas por el estándar 802.11	16
Figura 2-3. Modelo de funcionamiento de DCF	17
Figura 2-4. Ejemplo de funcionamiento de DCF	17
Figura 2-5. Esquema de funcionamiento de periodos de contienda.....	18
Figura 2-6. Esquema de funcionamiento HCF.....	21
Figura 2-7. Modelo de funcionamiento de capa MAC 802.11e	22
Figura 2-8. Comparación de modelo de funcionamiento en 802.11 y 802.11e.....	23
Figura 2-9. Esquema de funcionamiento del modelo Intserv.....	26
Figura 2-10. Esquema de funciones internas de nodo Intserv	28
Figura 2-11. Elementos que conforman un dominio Diffserv.....	30
Figura 2-12. Campo de identificación Diffserv.....	30
Figura 2-13. Funciones de los nodos en un dominio Diffserv	32
Figura 2-14. Variación de la tasa de transmisión para las diferentes categorías de acceso.....	35
Figura 3-1. Esquema de red inalámbrica.....	41
Figura 3-2. Diagrama de módulos de los elementos de red	41

Figura 3-3. Visión modular de la Arquitectura - Captura de Red	43
Figura 3-4. Relación de flujos en función de CWmin y AIFS	46
Figura 3-5. Elemento 'EDCA Parameter Set'	51
Figura 3-6. Parámetros EDCA	52
Figura 3-7. Parámetros de acceso por defecto.....	52
Figura 3-8. Caso de uso A) Nuevo nodo ingresa en la red.....	61
Figura 3-9. Caso de uso B) Administrador modifica perfil de la red.....	62
Figura 3-10. Caso de uso C) Administrador modifica sistema de marcado.....	63
Figura 3-11. Caso de uso D) Modificación de la carga de la red y reconfiguración de clientes. 64	
Figura 3-12. Presencia de nodos no compatibles 802.11e	67
Figura 4-1. Red de acceso inalámbrica en modo infraestructura	73
Figura 4-2. Caudal efectivo para cada grupo Diffserv	76
Figura 4-3. Caudal efectivo usando optimización de CWmin y AIFS.....	77
Figura 4-4. Valor de CWmin empleado para la optimización	78
Figura 4-5. Retardo a nivel de aplicación.....	79
Figura 4-6. Retardo en modo no saturación (con barras de error).....	80
Figura 4-7. Retardo en modo no-saturación (sin barras de error)	81
Figura 4-8. Tráfico EF y BE: configuración por defecto 802.11e.....	84
Figura 4-9. Tráfico EF y BE: optimizando CWmin.....	85
Figura 4-10. Tráfico EF y BE: optimizando CWmin y AIFS	86
Figura 4-11. Tráfico EF y BE: optimizado.....	87
Figura 4-12. Un nodo BE frente a múltiples nodos EF.....	88
Figura 4-13. Un nodo EF frente a múltiples nodos BE.....	89
Figura 4-14. Retardo medido en el tráfico <i>Expedited Forwarding</i>	90
Figura 4-15. Porcentaje de descartes de tráfico <i>Expedited Forwarding</i>	90
Figura 4-16. Tráfico EF, AF y BE - Priorización.....	92
Figura 4-17. Tráfico EF, AF y BE - Priorización II.....	93
Figura 4-18. Tráfico EF, AF y BE - Priorización III.....	94
Figura 4-19. Relación de flujo en función de parámetros de acceso.....	98
Figura 4-20. Relación de flujos entre AF1x y AF2x usando parámetro AIFS.....	99
Figura 4-21. Relación de tráfico entre AF1x y AF2x usando parámetro CWmin.....	99
Figura 4-22. Relación de tráfico entre AF1x y AF2x optimizando parámetro CWmin.....	100
Figura 4-23. Relación entre tráfico AF.....	101
Figura 4-24. Relación entre tráfico AF optimizando CWmin	101
Figura 4-25. Relación entre tráfico AF en situación asimétrica I.....	102
Figura 4-26. Relación entre tráfico AF en situación asimétrica II.....	103
Figura 4-27. Relación de tráfico AF usando algoritmo para cálculo de AIFS (I)	106
Figura 4-28. Relación de tráfico AF usando algoritmo para cálculo de AIFS (II).....	107
Figura 4-29. Análisis de tráfico EF, AF y BE usando parámetros por defecto	111
Figura 4-30. Análisis de tráfico EF, AF y BE usando algoritmo de configuración	111
Figura 4-31. Priorización en escenarios multi-rate	113
Figura A-1. Instalación del parche 802.11e para NS2	136
Figura A-2. Configuración de las colas de acceso 802.11e.....	137
Figura A-4. Esquema de funcionamiento de mecanismo EDCA	140
Figura A-5. Retardo de transmisión en función del tamaño de la trama	143
Figura A-6. Formato de trama 802.11 de datos.....	143
Figura A-7. Tiempo de transmisión de trama (11 Mbps).....	144
Figura A-8. Tiempo de transmisión de trama (1 Mbps).....	144

Figura A-9. Formato de trama 802.11 de asentimiento (ACK).....	145
Figura A-10. Retardo de transmisión a nivel de aplicación en función del tamaño de paquete	146
Figura A-11. Caudal efectivo en función del tamaño de trama.....	148
Figura A-12. Caudal efectivo en función del tamaño de trama (5,5 Mbps).....	149
Figura A-13. Caudal efectivo en función del tamaño de trama (1 Mbps).....	149
Figura A-14. Caudal efectivo en función del número de nodos.....	150
Figura A-15. Caudal efectivo teórico en función del número de nodos.....	151
Figura A-16. Caudal efectivo con tamaño de trama 700 bytes	152
Figura A-17. Caudal efectivo con tamaño de trama 300 bytes	152
Figura A-18. Retardo en función del número de nodos	153

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Grupos de trabajo dentro de IEEE 802.11	13
Tabla 2-2. Características de los productos 802.11	13
Tabla 2-3. Mapeo de Prioridad de usuario a Categoría de Acceso	21
Tabla 2-4. Códigos DSCP para el perfil PHB AF.....	31
Tabla 2-5. Parámetros configurables en las categorías de acceso 802.11e	34
Tabla 2-6. Prioridad de las Categorías de Acceso 802.11e.....	35
Tabla 2-7. Tabla de mapeo DSCP - TCID	36
Tabla 3-1. Parámetros de interés de la red	42
Tabla 3-2. Tabla de mapeo y comportamiento (no saturación).....	48
Tabla 3-3. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo EF).....	48
Tabla 3-4. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo BE)	48
Tabla 3-5. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo AF)	49
Tabla 3-6. Tabla de mapeo y comportamiento (EF y BE)	50
Tabla 3-7. Tabla de mapeo y comportamiento (EF, AF y BE)	51
Tabla 4-1. Configuración de las colas de acceso EDCA.....	75
Tabla 4-2. Configuración de colas de acceso	100
Tabla 4-3. Configuración de las colas de acceso EDCA.....	109

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

Han pasado muchos años desde la aparición de Internet en nuestras vidas. El escaso ancho de banda que proporcionaban los antiguos módems de 14.4 kbps apenas permitía una navegación web basada principalmente en texto, acceso al IRC, o la descarga de pequeñas aplicaciones cuyo tamaño no solía superar algunos cientos de kilobits.

La progresiva aparición de nuevas tecnologías en la red de acceso (RDSI, ADSL, UMTS) y en el núcleo de la red (fibra óptica) ha permitido el desarrollo de aplicaciones con cada vez mayores requisitos en cuanto a ancho de banda o retardo se refiere. Aplicaciones como la video-conferencia, la descarga de videos bajo demanda, o el acceso a bases de datos con elevadas cargas de información son en la actualidad posibles gracias a estas mejoras.

Sin embargo desde el nacimiento de Internet poco hemos avanzado en relación a la **calidad de servicio** ofrecida al usuario. Podemos vanagloriarnos de disponer de lo que a día de hoy llamamos 'acceso de banda ancha', donde podemos disponer de un elevado caudal para acceder a cualquier tipo de información. Pero muchas veces ese acceso no asegura una adecuada disponibilidad de recursos en el transcurso de toda la comunicación. El exceso de variación en

el ancho de banda disponible o la variación en el propio retardo que sufren nuestras tramas de información (conocido como jitter), provocan que las aplicaciones más sensibles a estos parámetros no sean viables aún contando con un acceso de banda ancha.

Acompañando a esta explosión de ancho de banda que han experimentado los usuarios, y en los más recientes años, hemos podido vivir la eclosión de las **redes inalámbricas**, que ha llevado a la aparición masiva de puntos de acceso. Estos nuevos puntos de conexión nos llevan a vivir un acceso a la información en constante movimiento, donde se valora de forma especial la posibilidad de acceder a nuestros tradicionales servicios sin ataduras derivadas del sistema de cableado.

Los sistemas de comunicación inalámbricos cubren todas las posibilidades imaginables, desde los sistemas de menor cobertura, aplicables a las redes denominadas PAN, como puede ser Bluetooth, hasta sistemas que pueden cubrir la totalidad del globo terráqueo, como sistemas de comunicación basados en satélites. Esta evolución nos lleva a un entramado de siglas que resumen las posibilidades de conexión inalámbricas: Bluetooth, WLAN, WiMAX, LMDS, GSM, GPRS, UMTS,... En la Figura 1-1 mostramos un análisis cualitativo de estas tecnologías según la cobertura y el ancho de banda proporcionado.

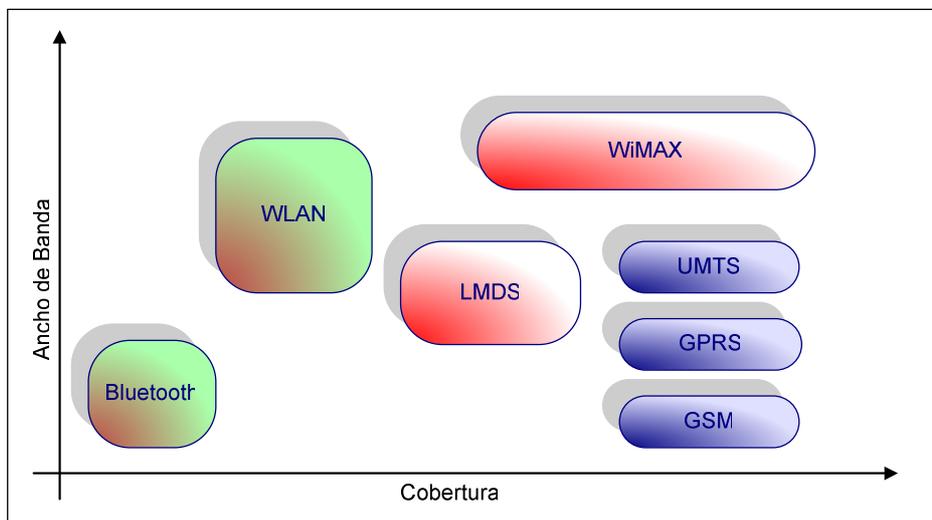


Figura 1-1. Comparativa de tecnologías de acceso

En esta tesis queremos centrarnos en las tecnologías conocidas como **WiFi**, que abarcan los diferentes estándares definidos por el IEEE en su grupo de trabajo 802.11. Este tipo de redes ha sufrido un crecimiento inesperado durante los últimos años, y se ha convertido en un estándar de facto para el acceso a Internet inalámbrico tanto para usuarios residenciales como para empresas, tal y como podemos apreciar en las figuras 1-2 y 1-3.

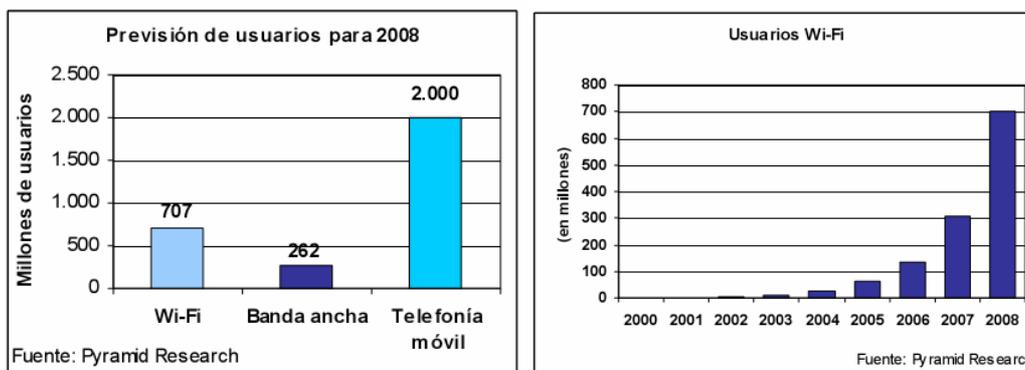


Figura 1-2. Comparativa de usuarios Wi-Fi y evolución del mercado a nivel mundial

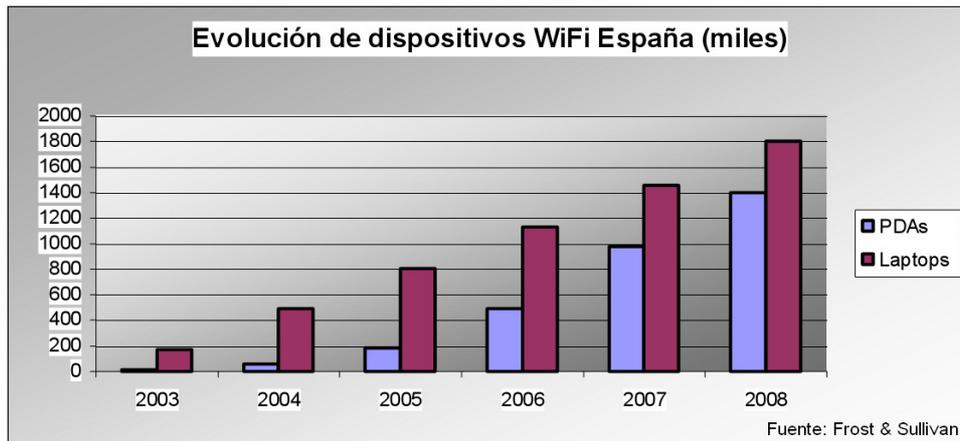


Figura 1-3. Evolución de dispositivos Wi-Fi en España

Al mismo tiempo se han desarrollado multitud de servicios de valor añadido sobre estas redes inalámbricas [Vidal2003] que han favorecido la difusión de esta tecnología.

Sin embargo, estas tecnologías inalámbricas siguen adoleciendo de la **falta de soporte de calidad de servicio** que anunciábamos anteriormente. Atendiendo a este problema debemos destacar enfoques desde las diferentes capas definidas en la torre TCP/IP. A nivel de red destaca el organismo de estandarización IETF (Internet Engineering Task Force – [IETF-WWW]) que ofrece dos propuestas diferentes para afrontar el soporte de calidad de servicio en Internet. Los grupos de trabajo de servicios integrados y servicios diferenciados, o también conocidos como Diffserv [Blake1998] e Intserv [Braden1997], proponen soluciones basadas en principios diferentes para alcanzar el mismo objetivo, la provisión de calidad de servicio. La primera de ellas, Diffserv, propone crear agregados de tráfico identificados por un marcador en cada paquete de información, de forma que puedan recibir tratamiento diferente en cada salto (router) según esta marca. La segunda, Intserv, pretende realizar una prereserva de recursos en cada elemento de conmutación (router) para cada flujo de datos, asegurando de esta forma los recursos necesarios (tiempo de encolamiento, capacidad de procesamiento, etc.) en la comunicación extremo a extremo. Ambas tecnologías presentan diferentes ventajas e inconvenientes que se analizarán en el estado del arte.

La solución propuesta por el grupo de trabajo de **servicios diferenciados**, permite básicamente la priorización de determinados flujos de tráfico respecto a otros. Si a esto unimos un control del tráfico de entrada en una red Diffserv será posible asegurar determinadas garantías de calidad de servicio. Este modelo no presenta los problemas de escalabilidad derivados de la solución de servicios integrados.

Debemos ser conscientes de que hasta el momento hemos afrontado el reto de la provisión de calidad de servicio desde el punto de vista de la capa de nivel de red. Esta capa se encarga de proveer conectividad extremo a extremo entre terminales que no se encuentran directamente conectados entre sí, es decir, añade la posibilidad de usar nodos intermedios para realizar la conexión extremo a extremo. En consecuencia, los recursos que se analizan son el ancho de banda disponible en los enlaces de estos nodos y los tiempos de encolamiento que presentan los mismos.

Sin embargo estos nodos de conmutación hacen uso de la capa de nivel de enlace para el acceso al medio. Si la tecnología que estamos utilizando no proporciona mecanismos que soporten la provisión de calidad de servicio todo el esfuerzo que realicemos en capas superiores puede resultar inútil.

Es necesario hacer énfasis en la necesidad de proporcionar calidad de servicio en la capa de nivel de enlace si pretendemos ofrecer al usuario unas prestaciones determinadas para su comunicación extremos a extremo. Tradicionalmente la calidad de servicio en la capa de enlace no ha sido analizada ya que los principales problemas de congestión suelen localizarse en los nodos de conmutación del núcleo de la red.

La tecnología de nivel de enlace más extendida en la actualidad es **Ethernet** [IEEE-802.3], y es importante destacar que no ofrece ningún tipo de provisión de calidad de servicio, al contrario que otras tecnologías previas como TokenRing [IEEE-802.5] o Token Bus [IEEE-802.4]. Sin embargo, la elevada velocidad con que esta tecnología ha evolucionado en cuanto a velocidad de transmisión (FastEthernet, GigaEthernet) provoca que exista una predisposición a apoyarse en el sobre-dimensionamiento para ofrecer unas adecuadas prestaciones en las comunicaciones.

El caso de las tecnologías de red inalámbricas para el acceso es radicalmente diferente. En primer lugar la velocidad de transmisión se encuentra bastante por debajo de cualquier tecnología cableada. Por ejemplo las tecnologías más avanzadas que podríamos encontrar en la actualidad en ambos ámbitos serían GigaEthernet (1 gbps) vs. 802.11g (54 mbps). Por otro lado el ancho de banda anunciado por las tecnologías inalámbricas dista bastante del caudal efectivo alcanzado, donde una eficiencia típica podría situarse en un 20%, lo que nos resultaría en un caudal efectivo de 10,8 mbps (20% de 54mbps) [Bianchi2000].

Disponiendo de un caudal de tráfico como el comentado, aplicaciones de videoconferencia o descarga de video bajo demanda de alta calidad, necesitarían disponer por completo de estos recursos para funcionar adecuadamente. La situación se agrava aún más si consideramos que una red será compartida entre diferentes aplicaciones y usuarios, lo que podría mermar la calidad percibida por el usuario drásticamente.

Este hecho provoca que la **provisión de calidad de servicio, para tecnologías de acceso inalámbricas**, sea de vital importancia de cara a permitir el uso de aplicaciones con elevados requisitos de calidad.

El propio IEEE afrontó este problema creando un grupo de trabajo (**802.11e** – [IEEE-802.11E]) que permitiese la provisión de calidad de servicio en redes 802.11. Este grupo de trabajo ha proporcionado un estándar donde a través de diferentes mecanismos se permite la priorización de flujos de tráfico entre aplicaciones y entre terminales.

El uso eficiente de tecnología 802.11 como red de acceso y un modelo Diffserv para alcanzar una calidad de servicio extremo a extremo constituye un interesante reto que ha sido abordado parcialmente por la comunidad científica y que será el núcleo central de esta tesis.

En esta tesis se propone el estudio de mecanismos eficientes para el soporte de tráfico Diffserv sobre redes de acceso 802.11e, de forma que se optimice el uso de recursos de la red.

1.2 Objetivos principales

En esta tesis doctoral se plantea como objetivo general la propuesta de una arquitectura de red con soporte de calidad de servicio donde, apoyándose en los mecanismos de priorización de tráfico proporcionados por 802.11e, se maximiza el rendimiento de la red de acceso ajustando de forma dinámica los parámetros de acceso de cada cliente en base a la carga de red siguiendo la filosofía de servicios diferenciados.

En la propuesta de tesis se considerarán escenarios mixtos donde convivan estaciones móviles con soporte 802.11e, y otro tipo de estaciones compatibles con estándares como

802.11a, 802.11b, 802.11g, etc. Se analizarán las implicaciones derivadas de la presencia de diferentes tipos de terminales móviles, y se propondrán guías de uso para maximizar la eficiencia en la red de acceso.

El estudio de este tipo de escenarios permitirá afrontar una etapa de transición donde lógicamente convivan terminales compatibles con este futuro estándar y terminales tradicionales, para terminar en un escenario donde todos los terminales sean compatibles con 802.11e y se maximice el rendimiento.

De igual forma se realizará un estudio pormenorizado de diferentes escenarios de interés. Para ello se estudiarán los requisitos que impone un administrador de red de cara a ofrecer diferentes niveles de calidad de servicio a los usuarios. Se analizarán las opciones de mayor interés y ofrecerán guías de uso para la configuración de diferentes escenarios.

De esta forma podemos identificar los diferentes sub-objetivos que se han llevado a cabo en el desarrollo de la tesis doctoral.

A) Diseño de la arquitectura

La principal contribución realizada en el ámbito de esta tesis será el diseño de una arquitectura para la red de acceso que permita la recopilación de información sobre el tráfico presente en la red, de manera que en base a las preferencias del administrador de la misma, permita la configuración de los diferentes elementos de red. El principal objetivo de dicha arquitectura será alcanzar un aprovechamiento óptimo de los recursos.

Esta descripción de arquitectura incluye la identificación de los módulos necesarios en cada elemento de red, descripción de interfaces y definición de las primitivas. Así mismo se definirán diagramas de señalización para las principales operaciones de red.

B) Estudio e identificación de escenarios de interés

Con la intención de validar posteriormente los resultados obtenidos, resulta de vital importancia identificar escenarios de interés sobre los que probar los beneficios derivados de la arquitectura propuesta. En este sentido centramos la búsqueda en escenarios de amplio uso en nuestra sociedad y que cubren los mayores ámbitos posibles: usuario residencial, usuario empresarial, usuario esporádico, etc.

La elección de los escenarios de interés va ligada con la identificación de los objetivos buscados. Es decir, se deciden que parámetros objetivos intentamos alcanzar (p.e. asegurar ancho de banda, fijar retardo máximo,...). Típicamente cada escenario va ligado a unos parámetros objetivo concretos, si bien algunos de ellos son compartidos por la mayoría de escenarios.

C) Evaluación y selección de estrategias para la configuración de parámetros de acceso

En base al análisis de parámetros objetivo de los diferentes escenarios se seleccionarán las estrategias que permitan alcanzar dichos objetivos. El análisis de algoritmos realizado en el estado del arte nos servirá para evaluar los que consideremos más adecuados y seleccionar el óptimo para cada caso.

D) Validación de la arquitectura y evaluación de los resultados

El proceso de validación de la arquitectura se llevará a cabo mediante una metodología de simulación, de forma que se evaluarán los diferentes escenarios propuestos a través de las oportunas simulaciones que nos lleven a verificar que los resultados alcanzados cumplen los objetivos propuestos.

Entre los diferentes simuladores de redes que se encuentran disponibles en la actualidad, elegiremos aquel que nos permita llevar a cabo las simulaciones oportunas en el ámbito de esta tesis. En este sentido resulta necesario elegir un simulador de redes que soporte redes inalámbricas, y en concreto el estándar IEEE 802.11e.

Una vez seleccionado un entorno de simulación de la arquitectura adecuado a nuestras necesidades se procederá a la validación del mismo, de forma que tengamos una certeza absoluta respecto a su correcto funcionamiento y la veracidad de los resultados obtenidos.

Se realizarán entonces las simulaciones oportunas para la medición de los parámetros objetivo identificados en el punto B.

Finalmente y en base a los resultados obtenidos en las simulaciones se ajustarán adecuadamente los diferentes parámetros de configuración de la arquitectura para lograr un funcionamiento óptimo de la misma. Estos resultados, de igual forma, demuestran los beneficios derivados de esta propuesta de tesis.

1.3 Estructura de la memoria

A continuación presentaremos un breve resumen de cada capítulo de esta tesis con la intención de facilitar la localización de información dentro de la misma.

En el presente **capítulo** se ha presentado una introducción sobre la evolución que las redes de acceso a Internet han sufrido desde su nacimiento, se ha destacado la importancia de las redes inalámbricas debido a la movilidad que proporcionan, y finalmente se ha indicado la necesidad de la provisión de cierto nivel de calidad de servicio sobre las mismas para el soporte de aplicaciones multimedia.

En el **capítulo dos** se analiza el estado del arte relacionado con la tesis, para lo que se profundiza en el funcionamiento a nivel de enlace de las redes inalámbricas 802.11, la problemática que conllevan para el soporte de calidad de servicio, y se describe la solución propuesta por el IEEE a través de su estándar IEEE-802.11e. De igual forma se analizan las soluciones propuestas a nivel de red por el IETF, basadas en los conceptos de servicios diferenciados y servicios integrados, para revisar las principales propuestas en cuanto a la integración de servicios diferenciados y redes de acceso 802.11e.

Una vez identificada la problemática que abordará esta tesis, en el **capítulo tres** se propone la arquitectura necesaria para el soporte del mecanismo de ajuste dinámico de parámetros de acceso. Dentro de la descripción de arquitectura se identifican los diferentes módulos de software que deben ejecutarse tanto en el punto de acceso como en los terminales móviles, los interfaces existentes entre los módulos descritos, y las primitivas que conforman cada uno de estos interfaces.

En el siguiente capítulo, el **cuatro**, se indica el entorno de simulación elegido, Network Simulator 2 (NS2), para proceder a la validación de la arquitectura, de forma que podamos evaluar los beneficios derivados de la apropiada configuración de los parámetros de acceso al medio. En primer lugar se validará el correcto funcionamiento del propio entorno de simulación, comprobando que los resultados obtenidos se ajustan al modelo que rige el funcionamiento de las redes 802.11. A continuación se procede a realizar las simulaciones oportunas que permiten corroborar los beneficios derivados de la propuesta de arquitectura realizada en esta tesis basándonos en los diferentes escenarios previamente seleccionados.

Finalmente, en el **capítulo cinco** se procederá a resumir los principales resultados alcanzados en la tesis, y se identificarán futuras líneas de trabajo abiertas a partir del trabajo desarrollado en la misma.

A modo de corolario, en el **apéndice A**, se detalla el proceso de selección del entorno de simulación que se emplearía para proceder a la validación de la arquitectura, y de igual forma se completa realizando los oportunos experimentos que demuestran el correcto funcionamiento del mismo acorde al modelo matemático que rige las redes inalámbricas IEEE 802.11e.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Introducción

A continuación analizaremos el estado del arte relacionado con la presente tesis, para ello realizaremos una revisión de las principales tecnologías en cuanto a calidad de servicio y comunicaciones inalámbricas se refiere, basándonos en los esfuerzos realizados por organizaciones de estandarización como IEEE e IETF. Así mismo, repasaremos las principales contribuciones en el campo de la investigación con respecto a la provisión de calidad de servicio en comunicaciones inalámbricas de área local.

Comenzaremos revisando el estado actual de tecnologías de red inalámbricas, y nos centraremos en la familia de protocolos IEEE 802.11, que es el estándar que mayor madurez y difusión ha alcanzado en cuanto a redes locales inalámbricas se refiere. Este estándar ha permitido un despliegue a nivel mundial, gracias a su bajo coste y altas prestaciones, que lo ha convertido en la tecnología por defecto en redes de área local inalámbricas.

Se profundizará en el funcionamiento de la capa de enlace, común para las extensiones de mayor difusión en la actualidad, 802.11a/b/g, describiendo las diferentes funciones de acceso

al medio. Este esquema hereda el funcionamiento de las redes cableadas Ethernet basado en un modelo de competición para el acceso al medio. En consecuencia surgen los mismos problemas respecto a la provisión de calidad de servicio.

A continuación estudiaremos el resultado del grupo de trabajo 802.11e encargado de la provisión de calidad de servicio sobre redes inalámbricas 802.11. Analizaremos las principales aportaciones basadas en la modificación de las funciones de acceso al medio, y como permiten gestionar y ofrecer cierta calidad de servicio.

Sin embargo, el soporte de calidad de servicio desde el nivel de enlace no tiene ningún sentido si no existe una gestión adecuada desde el nivel de red. En este sentido estudiaremos las dos principales propuestas del IETF, servicios integrados y servicios diferenciados, de forma que podremos comprobar como esta última se adapta mejor a las características intrínsecas de las redes inalámbricas 802.11.

Finalmente se analizarán los principales trabajos existentes en cuanto al soporte de servicios diferenciados sobre redes 802.11e se refiere, identificando algunas lagunas que dan lugar a la principal contribución de esta tesis, una propuesta de arquitectura de QoS en entorno inalámbrico 802.11e basado en Diffserv con ajuste dinámico de parámetros.

2.2 Tecnologías de Red Inalámbricas

Desde el nacimiento de Internet las diferentes tecnologías de red de área local estuvieron marcadas por la presencia de cables entre los diferentes terminales. La evolución de los sistemas de transmisión, cada vez más inmunes a las interferencias, ha permitido la migración de estas redes hacia sistemas inalámbricos.

Estos sistemas de acceso a la red basados en un medio inalámbrico han aportado una movilidad, flexibilidad y comodidad nunca antes ofrecida en las tecnologías de acceso. En consecuencia, su despliegue durante la última década ha superado cualquier expectativa, y ha permitido la generación de nuevos modelos de acceso a Internet (redes vecinales, acceso desde bares,...).

El reciente desarrollo de estas tecnologías inalámbricas permitió que en su diseño se afrontase el soporte de calidad de servicio como una de sus principales funcionalidades. De esta forma las más recientes tecnologías de acceso inalámbricas, como **Bluetooth o WiMAX**, proporcionan diferentes mecanismos para el control y gestión de la calidad de servicio.

No sucedió lo mismo con el estándar **IEEE 802.11**, el cual, inspirado en su exitoso predecesor de redes cableadas, IEEE 802.3, sigue la misma filosofía democrática de acceso al medio. Y, en consecuencia, no permite ofrecer ningún tipo de calidad de servicio, de forma que las prestaciones alcanzadas dependen por completo del número de usuarios presentes en la red, condiciones del medio, y posibles interferencias.

El organismo IEEE, consciente de la importancia de la gestión de calidad de servicio en la era multimedia, decidió crear un grupo de trabajo para el estudio del soporte QoS sobre 802.11. Este grupo de trabajo dio como resultado un nuevo estándar a finales del pasado año 2005, dando lugar al conocido IEEE 802.11e.

Destacaremos a continuación las principales características ofrecidas por las tecnologías Bluetooth [IEEE-802.15.1] y WiMAX [IEEE-802.16], para pasar a centrarnos en IEEE 802.11 y su evolución 802.11e.

Bluetooth

Fue diseñado inicialmente por Ericsson en 1998 con la intención de crear un chip estándar para la comunicación radio que fuese pequeño y barato, de manera que se pudiese instalar en cualquier tipo de dispositivo. Más tarde nacería el grupo de trabajo SIG (Special Interest Group) integrado por diferentes empresas punteras en el sector de las telecomunicaciones con la intención de ofrecer de manera gratuita esta tecnología para lograr una rápida implantación. Posteriormente se convirtió en el estándar IEEE 802.15.1.

Una de las principales características de esta tecnología es su bajo consumo [McDermott2005], lo cual resulta especialmente interesante en dispositivos no conectados a la red eléctrica. Derivado del bajo consumo, el radio de cobertura suele ser inferior a los 10 metros y la tasa de transmisión máxima de 712kbps. La cobertura máxima ha sido ampliada a través de extensiones que permiten alcanzar hasta 100 metros.

Bluetooth permite el soporte de diferentes perfiles de acceso en función de la información que desean intercambiar los dispositivos. La gestión de calidad de servicio se realiza de forma centralizada a través de un dispositivo denominado *Máster*, el cual gestiona el acceso del resto de dispositivos, *Esclavos*.

Existen diferentes líneas de investigación de gran interés alrededor de Bluetooth, las cuales abordan temas como la movilidad, seguridad o compatibilidad en redes 802.11 [Garcia2002].

WiMAX

Se trata de un estándar para la transmisión inalámbrica de datos en entornos metropolitanos (MAN), logrando una cobertura de hasta 48 kilómetros de radio con velocidades que alcanzan los 70 Mbps. WiMAX [Ghosh2005] engloba dos estándares, el IEEE 802.16 americano y el HyperMAN europeo.

A finales del pasado año 2005, se aprobó una extensión del estándar, el IEEE 802.16e. Esta extensión permite el uso de terminales en movimiento, lo que proporciona a esta tecnología un nuevo nicho de mercado.

Esta tecnología ofrece soporte de calidad de servicio basado en planificación desde un nodo central denominado estación base. Este dispositivo se encarga de organizar el acceso al medio en función de los requisitos indicados por cada cliente, otorgando un determinado tiempo de acceso en el cual no será interrumpido por ningún dispositivo.

2.2.1 Norma IEEE 802.11

Esta tecnología es en la actualidad la más extendida como red de acceso inalámbrica. Desde que el primer estándar vio la luz en 1997 se ha extendido por todo el mundo a un ritmo inimaginable en su nacimiento. Desde un principio han ofrecido significativas ventajas respecto a las tradicionales redes de acceso cableadas. Por un lado el ahorro derivado del despliegue y mantenimiento de la infraestructura.

El protocolo IEEE 802.11 es un estándar de comunicaciones del IEEE [IEEE-WWW] que define la capa física y de enlace para una transmisión inalámbrica. El estándar original fue publicado por el IEEE en 1997, y es conocido como *IEEE 802.11-1997*, dos años más tarde se actualizaría dando lugar al *IEEE 802.11-1999* [IEEE-802.11ST]. Este estándar permitía unas velocidades de transferencia desde 1 hasta 2 Mbps, y trabajaba en la banda ISM (*Industrial Scientific Medical*) a una frecuencia de 2,4 GHz en la que no se precisa licencia. Existen diferentes grupos de trabajo dentro de 802.11 promovidos por el IEEE que trabajan en sub-estándares del mismo. Podemos comprobar las principales características de los mismos en la tabla 2-1.

Grupo de trabajo	Características
<i>IEEE 802.11</i>	Estándar original con tasas de 1 y 2 Mbps trabajando a 2.4 GHz
<i>IEEE 802.11a</i>	Tasas de hasta 54 Mbps en 5 GHz
<i>IEEE 802.11b</i>	Mejoras sobre la norma 802.11 para tasas de hasta 11 Mbps
<i>IEEE 802.11d</i>	Itinerancia internacional
<i>IEEE 802.11e</i>	Mejoras para el soporte de calidad de servicio
<i>IEEE 802.11f</i>	Protocolo para la comunicación entre puntos de acceso
<i>IEEE 802.11g</i>	Tasas de hasta 54 Mbps en 2.4 GHz (compatible con 802.11b)
<i>IEEE 802.11h</i>	Trabaja en 5 GHz y propone extensiones para la compatibilidad con Europa
<i>IEEE 802.11i</i>	Mejoras en seguridad

<i>IEEE 802.11j</i>	Extensiones para Japón
<i>IEEE 802.11k</i>	Medidas en los recursos radio
<i>IEEE 802.11n</i>	Mejoras mayores en la tasa de transmisión
<i>IEEE 802.11p</i>	Uso de 802.11 en vehículos
<i>IEEE 802.11r</i>	Itinerancia rápida
<i>IEEE 802.11s</i>	Redes GRID inalámbricas
<i>IEEE 802.11t</i>	Predicción de rendimiento en redes inalámbricas
<i>IEEE 802.11u</i>	Uso conjunto con otras redes no-802
<i>IEEE 802.11v</i>	Gestión de redes inalámbricas

Tabla 2-1. Grupos de trabajo dentro de IEEE 802.11

En la tabla 2-2 resumimos las principales características de los productos basados en 802.11 existentes en la actualidad.

Estándar	Modulación	Frecuencias	Tasas de Transferencia soportadas (Mbps)
802.11	FHSS, DSSS, IR	2.4 GHz, IR	1, 2
802.11b	DSSS, HR-DSSS	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11
802.11b - No_Estándar	DSSS, HR-DSSS (PBCC)	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11, 22, 33, 44
802.11a	OFDM	5.2, 5.8 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
802.11g	DSSS, HR-DSSS, OFDM	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54

Tabla 2-2. Características de los productos 802.11

802.11a

Alcanza velocidades de hasta 54Mbps, ajustándose al estándar, y hasta el doble usando técnicas de desdoblamiento por el fabricante. Usa OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), una técnica de multiprotadora que permite mayores tasas de transmisión. Opera en el rango de los 5Ghz. Sus principales inconvenientes son su incompatibilidad con 802.11b y 802.11g, que no incorpora mecanismos de calidad de servicio, y que la banda de frecuencias que utiliza no se encuentra disponible en Europa. Actualmente existen diferentes propuestas para lograr mayores velocidades de transmisión [Simoens2003].

802.11b

Es la implementación de 802.11 que mayor aceptación ha tenido por los usuarios. Trabaja con frecuencias en el rango de los 2.4Ghz es decir en la banda reservada para usos industriales, científicos y médicos (ISM), y maneja distintas tasas de transmisión: 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps y 11Mbps; además implementa DRS (*Dynamic Rate Shifting*) que ajusta la tasa de transmisión según las condiciones del entorno. Estos valores de tasa de transmisión los consigue gracias al uso de la modulación CCK (*Complementary Code Keying*) que da una

mayor eficiencia que la antigua modulación utilizada, el código Barker. A esto hay que añadirle el uso de la técnica de espectro ensanchado DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

Los problemas que encuentra esta tecnología es que tampoco soporta mecanismos de calidad de servicio, y se encuentra en una franja de frecuencias muy utilizada, por ejemplo teléfonos inalámbricos o dispositivos Bluetooth. Como principales ventajas cabe destacar el bajo coste de la tecnología que ha impulsado una fuerte implantación, que trabajo de una banda de frecuencias de uso gratuita y que se encuentra disponible mundialmente.

802.11e

Este grupo de trabajo pretende proporcionar mecanismos para el soporte de calidad de servicio sobre 802.11. Para alcanzar este propósito propone adaptaciones en la capa de acceso al medio que permiten priorizar unas estaciones respecto a otras. Este estándar es considerado de vital importancia para el soporte de aplicaciones sensibles al retardo, como puede ser la videoconferencia. Diferentes estudios muestran el aumento de rendimiento que se puede alcanzar con este nuevo estándar [Grilo2002].

802.11g

Intenta aunar el comportamiento de 802.11a y la compatibilidad con 802.11b, alcanzando tasas de hasta 54 Mbps en la banda de frecuencias de 2.4 GHz.

Es necesario destacar ciertos inconvenientes que pueden derivarse de una tecnología inalámbrica. La eficiencia en cuanto al aprovechamiento del espectro para la transmisión de información es mucho más elevada en tecnologías cableadas, lo que provoca que el caudal ofrecido por tecnologías inalámbricas se encuentre a bastante distancia de sus hermanas basadas en cable. Por otro lado es necesario analizar aspectos como la seguridad [Scholz2002], donde el uso de un medio compartido (como el aire) provoca que cualquier usuario malintencionado pueda saltarse los débiles sistemas de seguridad existentes en la actualidad y acceder a nuestra comunicación.

2.2.1.1 IEEE 802.11 MAC - Nivel de Enlace

La capa de acceso al medio en 802.11 se encarga de proporcionar un servicio de datos fiable a los usuarios de esta capa (es decir, a los protocolos de capas superiores) y al mismo tiempo permitir un acceso equitativo al medio inalámbrico compartido. Para la descripción de esta capa consideraremos un servicio básico compuesto por un punto de acceso y diferentes estaciones asociadas al mismo.

Para proporcionar un acceso fiable el estándar 802.11 define un protocolo para el intercambio de tramas de información [Gast2002]. La secuencia mínima en este intercambio consistiría en el envío de una trama de información del origen al destino y un asentimiento (ACK - *Acknowledgment*) enviado por el destino en el caso de que la primera trama haya sido recibida correctamente. Todas las tramas a nivel MAC incorporan un campo de control de errores (FCS - *Frame Check Sequence*, IEEE 32-bit CRC) que es comprobado en cada recepción. Si la fuente no recibe el asentimiento o el campo de control falla, la trama es reenviada. Aunque este mecanismo consume cierto ancho de banda, permite hacer frente a los posibles errores provocados por el medio inalámbrico.

Adicionalmente a este mecanismo básico de intercambio de tramas, existe una alternativa que proporciona una mayor robustez al protocolo y permite afrontar el problema de los ‘nodos ocultos’. Este mecanismo es conocido por las siglas de las tramas que utiliza, RTS/CTS. Una estación que estuviese haciendo uso de este mecanismo debería mandar una trama RTS (*Request To Send*) al destino antes de transmitir cualquier trama de datos (MSDU – *MAC Service Data Unit*). Una vez que el destino recibe esta trama correctamente entonces debe responder con otra trama llamada CTS (*Clear To Send*). A partir de este momento la fuente podría comenzar a mandar las tramas MSDU (ver figura 2-1).

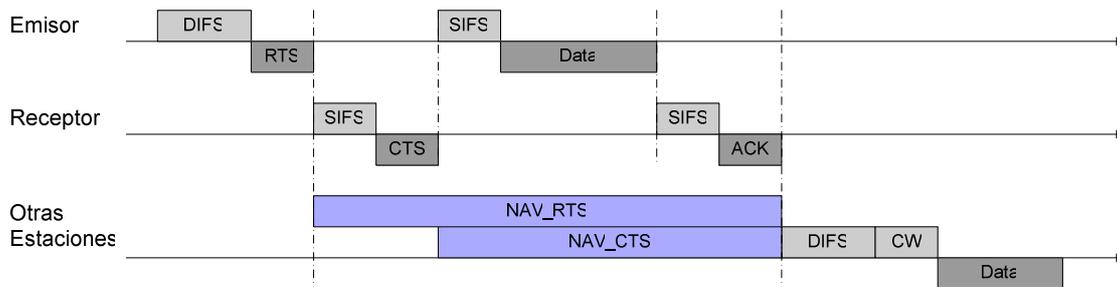


Figura 2-1. Problemática RTS/CTS

Todas las tramas, incluidas las RTS y CTS, contienen información sobre la duración de la transmisión MSDU/ACK. De forma que basándose en esta información todas las estaciones presentes pueden actualizar un contador interno llamado NAV (*Network Allocation Vector*) y retrasar cualquier transmisión hasta que el contador expire. Aunque una estación oculta no pueda escuchar la trama RTS enviada por la fuente, será capaz de recibir la trama CTS con la que responde el destino de forma que pueda actualizar el contador NAV adecuadamente. Este mecanismo protege la transmisión entre estaciones frente a inesperadas transmisiones de estaciones ocultas. También es utilizado por la extensión 802.11g para protegerse frente a transmisiones provenientes de posibles estaciones 802.11.

El estándar 802.11 define dos funciones para el acceso al canal: Función de Coordinación Distribuida (DCF – *Distributed Coordination Function*) y Función de Coordinación Centralizada (PCF – *Point Coordination Function*). Podemos apreciar su posición dentro de la torre TCP/IP en la figura 2-2. A continuación describiremos ambas opciones.

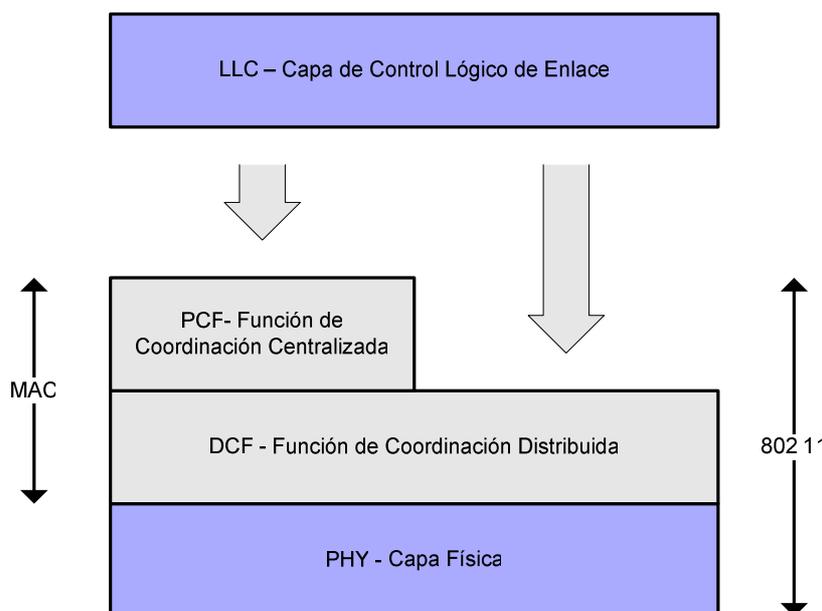


Figura 2-2. Capas de la torre TCP/IP definidas por el estándar 802.11

2.2.1.2 Función de Coordinación Distribuida – DCF

Se trata de la función básica de acceso al canal definida por 802.11. DCF proporciona un acceso compartido al medio entre dispositivos con la misma capa física mediante el uso de un protocolo basado en Acceso Múltiple con Detección de Portadora (CSMA – *Carrier Sense Multiple Access*) con evasión de colisiones (CA – *Collision Avoidance*). Todas las estaciones deben incluir obligatoriamente este mecanismo, a diferencia del mecanismo PCF que es opcional.

La detección de portadora se realiza a través de mecanismos físicos y virtuales. La detección física implica que cualquier estación antes de intentar una transmisión debe realizar una lectura de las condiciones del canal y comprobar que el medio está vacío por un periodo de tiempo (IFS – *Inter Frame Space*). La duración de este periodo varía, pero la utilizada justo antes de una transmisión en condiciones normales es llamada DIFS (IFS de función de coordinación distribuida).

Para evitar una colisión entre dos estaciones que quieran transmitir simultáneamente se utiliza un algoritmo de espera (*Backoff*) así como la espera de un periodo DIFS. Cuando existen peticiones de transmisiones pendientes y el medio se encuentra ocupado la estación esperaría hasta que el medio se encuentre vacío por un periodo DIFS. Entonces la estación escoge un número aleatorio entre un rango determinado y usará ese valor como espera adicional antes de transmitir. El rango para elegir esta espera aleatoria es llamado Ventana de Contienda (CW – *Contention Window*), que varía de acuerdo con el número de retransmisiones previas. Si se detecta que el medio pasa a estar ocupado durante el periodo de espera, el contador se detiene, y se reanuda una vez el medio vuelva a estar vacío después del periodo DIFS. En la figura 2-3 podemos comprobar el modelo de funcionamiento del mecanismo DCF.

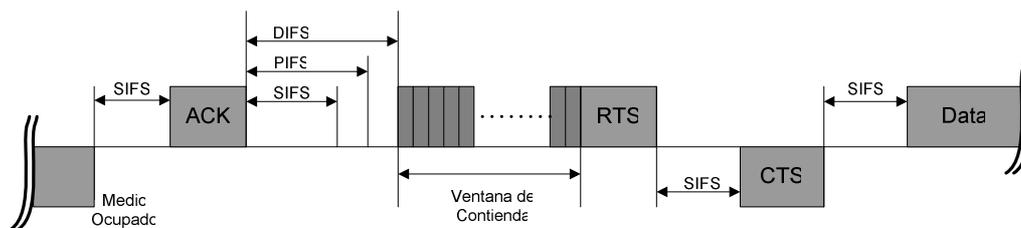


Figura 2-3. Modelo de funcionamiento de DCF

La evasión de colisión se consigue a través del mecanismo de detección de portadora virtual. Cada estación mantiene un contador interno llamado NAV, el cual indica cuando el medio se encuentra ocupado. El valor de la duración se incluye en cada trama transmitida por cada estación, el cual indica cuanto tiempo durará la transmisión, incluyendo los asentimientos y fragmentos. Todas las estaciones que se encuentren próximas reciben esta trama y usan este valor para actualizar su contador NAV. De forma que cuando una estación quiere comenzar una transmisión, en primer lugar comprueba que el contador NAV está a cero.

Una vez que una estación consigue acceso al medio esta puede transmitir la trama de información (MSDU). Entonces espera por un periodo de tiempo llamado SIFS (IFS corto) para transmitir el asentimiento (ACK). La duración del periodo SIFS es más corta que en el caso de DIFS, lo que proporciona a la trama de asentimiento la mayor prioridad para acceder al medio. De esta manera se asegura que ninguna otra estación podrá comenzar una transmisión antes que el asentimiento. Si este no es recibido justo después de un periodo SIFS, se intenta una retransmisión hasta que el número de retransmisión supera determinado umbral o el tiempo de vida de la MSDU expira. En este caso la trama de información MSDU sería descartada.

Las tramas de información pueden ser fragmentadas para aumentar las probabilidades de éxito en la transmisión. Sin embargo, dado que cada fragmento MSDU debe ser asentido individualmente, la fragmentación aumenta considerablemente la sobrecarga para la MSDU. En la figura 2-4 podemos ver un ejemplo del mecanismo de acceso DCF.

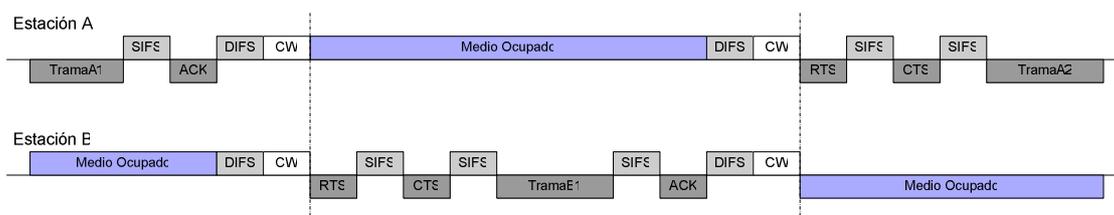


Figura 2-4. Ejemplo de funcionamiento de DCF

2.2.1.3 Función de Coordinación Centralizada – PCF

El estándar 802.11 define un segundo mecanismo de acceso llamado PCF, pero que al contrario que DCF es opcional, y los productos 802.11 no están obligados a implementarlo. El PCF está diseñado para ofrecer soporte de servicios con restricciones temporales (soporte de calidad de servicio). Un nuevo elemento llamado punto de coordinación (PC – *Point Coordinator*) será el responsable de priorizar el acceso al medio de determinadas estaciones, y estará situado en el punto de acceso. A partir de ahora debido a su situación nos referiremos indistintamente al punto de coordinación o al punto de acceso.

El estándar 802.11 define dos periodos de tiempo entre el envío de dos mensajes de señalización de envío de tráfico (DTIM – *Delivery Traffic Indication Message*): el periodo de contienda (CP) y el periodo libre de contienda (CFP). En general, el punto de acceso manda de forma periódica tramas de *beacon*, aunque estas tramas pueden ser retrasadas si el medio está ocupado, y transportan información de red y sincronización. Las tramas de *beacon* (DTIM) son usadas por el PC para indicar el comienzo del CFP. En la figura 2-5 podemos comprobar como se alternan los periodos CFP y CP.

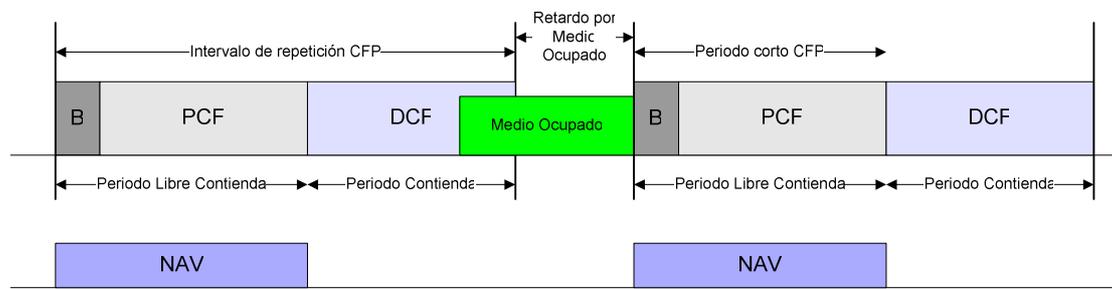


Figura 2-5. Esquema de funcionamiento de periodos de contienda

Durante el CP todas las estaciones compiten por el medio usando el mecanismo DCF. Durante el CFP, el punto de acceso clasifica las transmisiones hacia o desde determinadas estaciones usando un mecanismo de sondeo. No existe contienda entre las estaciones durante el ciclo CFP. Este periodo comienza cuando el punto de acceso consigue acceso al medio mediante el uso de un espacio de tiempo PIFS (IFS de función de coordinación centralizada) a la llegada de una trama de *beacon*. El tiempo PIFS es más corto que DIFS, pero mayor que SIFS, y de esta forma PCF logra mayor prioridad que DCF para el acceso pero no interrumpe ninguna comunicación DCF existente. Una vez que PCF consigue el acceso al medio se utiliza el periodo de tiempo SIFS para el intercambio de tramas durante el ciclo CFP.

El sistema de sondeo comienza cuando el PC envía una trama CF-Poll a una de las posibles estaciones. Si el PC tiene alguna trama pendiente de envío, este podría utilizar una trama de datos incorporando una trama CF-Poll (*piggy-backing*). La estación sondeada puede responder con datos junto a una trama CF-ACK, o simplemente con una trama CF-ACK si no desea enviar más información. Una vez que el intercambio de tramas con una estación termina, el PC envía el CF-Poll a otra estación que estuviese en la lista de estaciones sondeables. Cuando el PC ha terminado con todas las estaciones de la lista, o una vez que la duración del CFP ha expirado, el PC transmite por difusión una trama CF-End anunciando el final del ciclo CFP.

Cuando llega una trama de *beacon* el contador NAV de todas las estaciones se inicializa al valor máximo para proteger el ciclo CFP de transmisiones no deseadas. Entonces el punto de acceso transmite por difusión la duración del ciclo CFP en la trama de *beacon*, y el contador NAV se actualiza adecuadamente. Cuando finaliza el ciclo CFP, todas las estaciones inicializan su contador NAV a cero cuando reciben la trama CF-End, o cuando la duración del CFP termina. Desde entonces hasta la siguiente trama DTIM todas las estaciones compiten por el medio usando DCF.

Este modo de funcionamiento permite que en una misma red coexistan estaciones con soporte PCF y DCF.

2.2.1.4 Limitaciones de PCF para el soporte de QoS

Existen diferentes problemas con el mecanismo de acceso PCF [Choi2002] que han llevado al grupo de trabajo 802.11 a proponer mejoras para el soporte de calidad de servicio. Entre muchas otras cabe destacar retardos impredecibles de las tramas de *beacon* y periodos de transmisión de duración desconocida de las estaciones en el periodo de contienda (CP) [Walke2001].

El punto de coordinación es el responsable del envío de las tramas de *beacon* a intervalos de tiempo regulares – TBTT (Target Beacon Transmission Time). Sin embargo, esta trama solo puede transmitirse cuando el medio ha sido detectado como vacío por un periodo PIFS. Según el estándar 802.11 las estaciones pueden empezar sus transmisiones incluso si la trama MSDU enviada no está acabada antes de la llegada del TBTT. En función de si el medio está vacío u ocupado durante TBTT, se podría producir un retardo de la trama de *beacon*. El retraso provocado de esta forma sobre TBTT fijará el retardo de la transmisión de MSDUs que tienen que ser enviadas en el ciclo CFP. Este hecho podría afectar severamente a la calidad de servicio ya que introduce un retardo impredecible en cada ciclo CFP. En el peor de los casos (mayor MSDU, fragmentación, RTS/CTS activadas) se podrían llegar a alcanzar retardos de algunos milisegundos.

Otro problema adicional con el mecanismo PCF es que el tiempo de transmisión de las estaciones en el periodo CP es desconocido. Una estación que ha sido sondeada por el punto de coordinación tiene la posibilidad de enviar una MSDU que podría ser fragmentada y de una longitud arbitraria, hasta un máximo de 2304 bytes (2312 en caso de usar encriptación). Además, al existir diferentes esquemas de modulación y codificación, la duración del envío de las MSDU después del sondeo no está bajo el control del punto de coordinación, lo cual reduce la calidad de servicio proporcionada a otras estaciones durante el resto del periodo de CFP.

De igual forma dentro del estándar no se ha definido ninguna interfaz de gestión de forma que se pueda controlar las operaciones PCF. En consecuencia es imposible configurar una política PCF según los requisitos de protocolos de capas superiores tales como Diffserv o Intserv. De forma que no existe ningún mecanismo para comunicar los requisitos de calidad de servicio de las estaciones al punto de acceso, lo que sería esencial para optimizar el rendimiento del algoritmo PCF en el punto de coordinación.

2.2.2 Norma IEEE 802.11e

Vistos los problemas que presentaba el estándar IEEE 802.11 para el soporte de calidad de servicio, el IEEE decidió crear un grupo que estudiase en mayor profundidad este tema e indicase posibles modificaciones sobre 802.11 para lograr cierto nivel de calidad de servicio.

El grupo de trabajo 802.11e define un conjunto de novedades especificadas a la edición de 1999 del estándar IEEE 802.11. Para describir estas novedades veamos en primer lugar la nomenclatura. Estas mejoras distinguen entre estaciones con soporte de calidad de servicio (QSTA – *QoS Enhanced Station*) y aquellas que no lo soportan (STA), punto de acceso con soporte de calidad de servicio (QAP) y sin soporte (AP). Dentro de 802.11e podemos distinguir básicamente dos grupos funcionales. Se trataría de las funciones de acceso al canal, y la gestión de especificación de tráfico (TSPEC).

2.2.2.1 IEEE 802.11e MAC - Nivel de Enlace

La extensión 802.11e define una nueva función de coordinación llamada función de coordinación híbrida (HCF – *Hybrid Coordination Function*), la cual se emplea para el conjunto de servicios básicos con soporte de QoS (QBSS). La función HCF define dos modos de operación:

- en primer lugar un ‘Acceso a canal distribuido mejorado’ (**EDCA** – *Enhanced Distributed Channel Access*) que consiste en una función de acceso al canal basada en contienda, la cual funciona de forma concurrente junto al segundo modo de operación llamado,
- ‘Acceso a canal controlado HCF’ (**HCCA** - *HCF Controlled Channel Access*) que se basa en un mecanismo de sondeo controlado por el coordinador híbrido (HC – *Hybrid Coordinator*). Este punto coordinador se encuentra situado junto al QAP.

Ambas funciones de acceso mejoran o extienden la funcionalidad de los métodos de acceso originales (DCF y PCF). La primera función de acceso, EDCA, fue diseñada para soportar la priorización de tráfico, tal como hace Diffserv, mientras que HCCA soporta tráfico parametrizado, de la misma forma que Intserv.

El concepto básico de estas funciones de acceso a canal es la oportunidad de transmisión (TXOP – *Transmisión Opportunity*). Un TXOP es un intervalo de tiempo limitado durante el cual una QSTA puede transmitir una serie de tramas. El periodo TXOP se define a través de un tiempo de inicio y una duración máxima. Si el periodo TXOP se obtiene usando el acceso a canal basado en contienda entonces recibirá el nombre de EDCA-TXOP. Si por el contrario se obtiene a través de HCCA se conocerá como HCCA-TXOP.

La duración del periodo EDCA-TXOP se controla a través del QAP y se transmite al resto de estaciones QSTA en las tramas de *beacon* junto con otros parámetros relacionados con EDCA. La duración del periodo HCCA-TXOP se transmite a las estaciones QSTA directamente por el HC como parte de la trama QoS CF-Poll, la cual garantiza el periodo HCCA-TXOP (ver Figura 2-1).

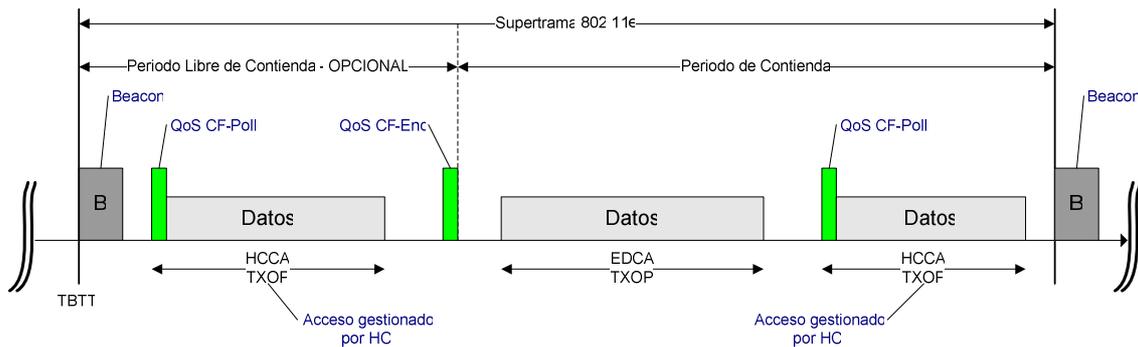


Figura 2-6. Esquema de funcionamiento HCF

Como se comentó anteriormente el estándar original, IEEE 802.11, obligaba el envío de tramas de asentimiento para cada trama recibida correctamente. En 802.11e estas tramas de asentimiento han pasado a ser opcionales. De esta forma cuando se utiliza una política basada en no utilizar asentimientos la capa MAC no deberá enviar mensajes ACK por cada trama recibida correctamente. Esto implica que la fiabilidad de este tráfico se vería reducida, pero mejora el rendimiento general de la capa MAC para tráfico sensible a retardo, tal como sucede con VoIP donde la información tiene valor durante un periodo de tiempo muy corto.

La opción de trabajar sin asentimientos igualmente introduce severos requisitos de tiempo real ya que si no es necesario esperar la trama de asentimiento, entonces la siguiente trama a transmitir debe estar preparada en un tiempo SIFS desde el final de la anterior transmisión.

A continuación analizaremos con mayor detalle la función de acceso distribuido EDCA.

2.2.2.2 Acceso a canal mejorado - EDCA

EDCA es un nuevo mecanismo de acceso que mejora el original DCF para proporcionar soporte de calidad de servicio basado en priorización de tráfico.

Esta priorización se consigue introduciendo cuatro categorías de acceso (AC – *Access Categorie*), las cuales permiten el envío de tráfico asociado a prioridades de usuario, tal como define el estándar IEEE 802.1D [IEEE-802.1D]. En la tabla 2-3 resumimos las prioridades relativas y la tabla de mapeo entre 802.1D y las categorías de acceso 802.11e.

Prioridad	Prioridad 802.1D	Descripción 802.1D	Categoría de Acceso 802.11e	Descripción 802.11e
Menor	1	Background	AC_BK	Best Effort
...	2	-	AC_BK	Best Effort
...	0	Best Effort	AC_BE	Best Effort
...	3	Excellent Effort	AC_BE	Prueba Video
...	4	Carga Controlada	AC_VI	Video
...	5	Video	AC_VI	Video
...	6	Voz, Video	AC_VO	Voz
Mayor	7	Señalización Red	AC_VO	Voz

Tabla 2-3. Mapeo de Prioridad de usuario a Categoría de Acceso

Cada categoría de acceso dispone de su propia cola de transmisión caracterizada por unos determinados parámetros. La priorización entre las diferentes categorías se consigue configurando adecuadamente los parámetros de cada cola de acceso. Podemos ver un esquema

de funcionamiento del sistema de categorías de acceso en la figura 2-7. Los parámetros de mayor interés son los siguientes:

- Número de Espacio Arbitrario entre Tramas (AIFSN - *Arbitrary Inter-Frame Space Number*): se corresponde con el intervalo mínimo desde que el medio físico se detecta como vacío hasta que se comienza la transmisión.
- Ventana de Contienda (CW – *Contention Window*): un número aleatorio se escoge en este rango para lanzar el mecanismo de espera (backoff).
- Límite de Oportunidad de Transmisión (*TXOP limit*): es la duración máxima durante la cual una QSTA puede transmitir tras haber obtenido el TXOP.

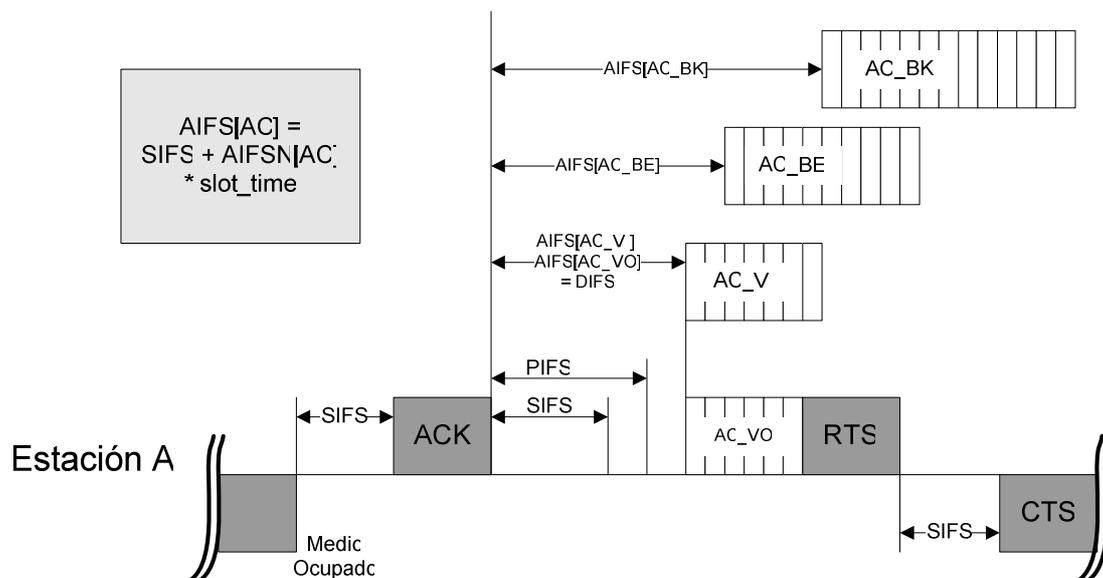


Figura 2-7. Modelo de funcionamiento de capa MAC 802.11e

Cuando los datos llegan al punto de acceso de servicio de información MAC (SAP-MAC), la capa MAC de 802.11e se encarga de clasificar adecuadamente los datos, y envía la MSDU a la cola correspondiente. Entonces los bloques de información (MSDU) de las diferentes colas (AC) compiten internamente por el EDCA-TXOP.

El algoritmo de contienda interno calcula la espera (*backoff*) independientemente para cada cola (AC), según los parámetros descritos: AIFSN, CW, y un número aleatorio. El mecanismo de espera es similar al de DCF, y la cola con el menor *backoff* ganará la competición interna.

La cola (AC) vencedora competiría externamente por el acceso al medio inalámbrico. El algoritmo de contienda externo no se ha modificado significativamente comparado con DCF, excepto que en DCF el *backoff* y tiempos de espera eran fijos para un medio físico concreto, mientras que en 802.11e estos son variables, y se configuran adecuadamente según la cola (AC) correspondiente.

A través de un ajuste adecuado de los parámetros de las colas (AC), el rendimiento del tráfico de diferentes colas puede ser ajustado, y se puede lograr la priorización de tráfico. Esto requiere un punto de coordinación central (QAP) para mantener un conjunto común de parámetros en las colas y garantizar así un acceso justo entre las diferentes estaciones que componen la red (QBSS). De igual forma, para lograr ajustar la asimetría existente entre el tráfico de subida (QSTA a QAP) y de bajada (QAP a QSTA), un conjunto separado de parámetros EDCA se define exclusivamente para el QAP.

En la figura 2-8 comparamos el nuevo mecanismo de acceso al medio descrito por el estándar 802.11e respecto del tradicional utilizado por el estándar 802.11.

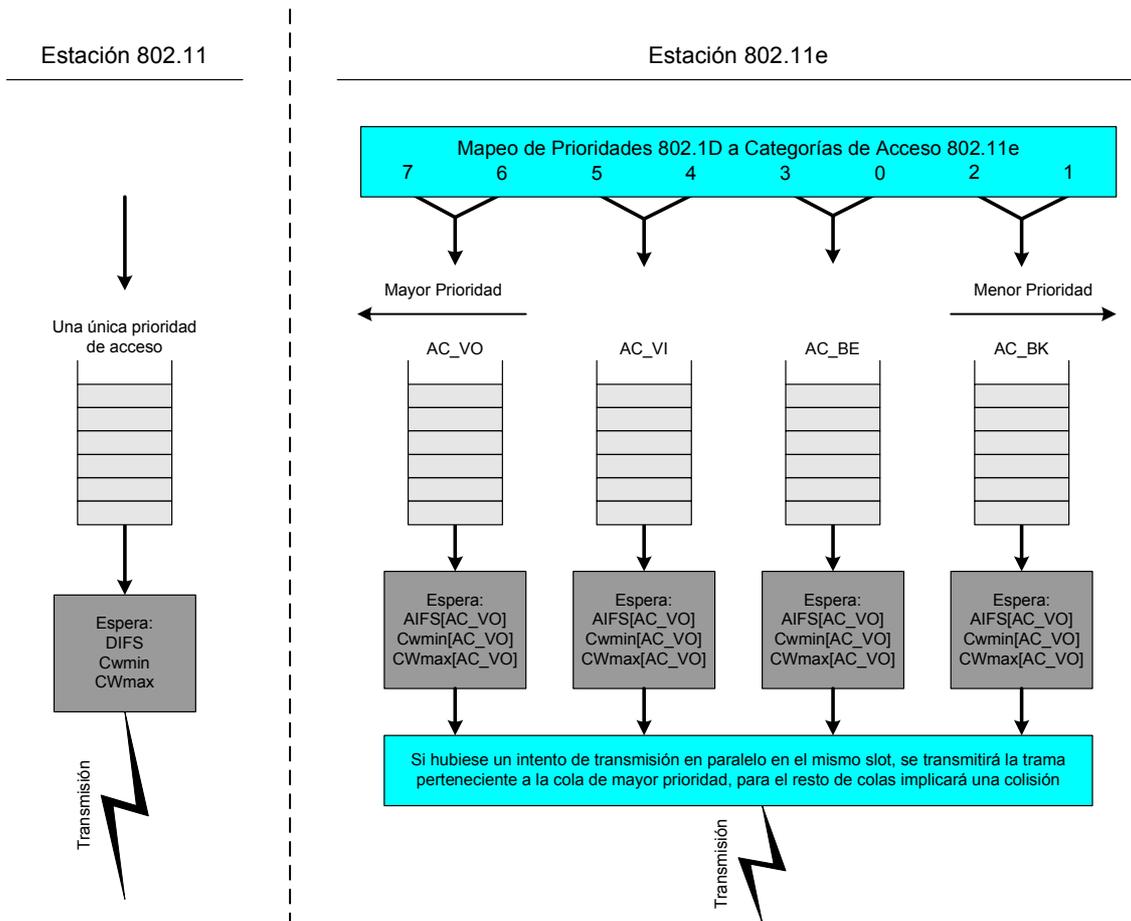


Figura 2-8. Comparación de modelo de funcionamiento en 802.11 y 802.11e

2.2.2.3 Acceso a canal controlado - HCCA

HCCA es un componente de HCF que proporciona soporte de calidad de servicio basado en parametrización. Hereda alguna de las reglas de PCF e introduce algunas extensiones. De igual forma que en PCF, HCCA proporciona acceso basado en sondeo al medio inalámbrico. Pero, a diferencia del primero, el sondeo QoS puede tener lugar en el periodo CP y la planificación de paquetes se basa en los perfiles TSPECs admitidos.

El principal concepto en HCCA es la fase de acceso controlada (CAP – *Controlled Access Phase*), que consiste en un intervalo de tiempo limitado formado por la concatenación de TXOPs-HCCA. En este caso el HC es el responsable de la clasificación y determinación de los CAP.

Tal y como sucedía para el caso de EDCA, el punto de coordinación consigue acceso al medio inalámbrico según la configuración de los parámetros de acceso, los cuales se encuentran almacenados en tres variables (MIB): *dot11HCCWmin*, *dot11HCCWmax* y *dot11HCAIFS* [Gast2002 – Apéndice A]. El valor por defecto de estas variables da lugar al intervalo PIFS, que es menor que AIFS o DIFS. Lo cual proporciona al HC la prioridad más alta sobre todas las estaciones para el acceso al medio.

El estándar IEEE 802.11e introduce una serie de nuevos subtipos de tramas de datos para el soporte de calidad de servicio. Para HCCA-TXOP la trama QoS *CF-Poll* se usa para garantizar el intervalo TXOP, y entonces comienza la transferencia de datos usando tramas de datos QoS. Las tramas *QoS-Null* pueden ser utilizadas para terminar el periodo HCCA-TXOP si la estación no tiene datos que enviar. La gran variedad de tipos de tramas de datos QoS y las reglas de uso asociadas logran aumentar la eficiencia de la capa MAC 802.11e, aunque también aumenta la complejidad del clasificador HCCA.

Según el estándar IEEE 802.11e pueden existir hasta ocho flujos en el enlace de subida y el mismo número para enlaces de bajada para cada estación. Cada flujo de subida dispone de su propia cola de transmisión, lo que significa que cualquier estación diferente del punto de acceso puede proporcionar servicios de QoS parametrizados para hasta ocho flujos.

En un punto de acceso el número de flujos soportados no está limitado por el estándar, aunque si lo estaría por los recursos disponibles.

2.2.2.4 Especificaciones de tráfico - TSPEC

La especificación de tráfico (TSPEC) es el dispositivo de gestión de flujos de tráfico definido por el estándar 802.11e que proporciona un enlace de gestión entre protocolos de QoS de capas superiores, tales como Intserv y Diffserv, con las funciones de acceso al canal de 802.11e. Esta especificación describe las características de los flujos de tráfico, tales como el tamaño de los paquetes, el caudal o el retardo. La negociación TSPEC proporciona un mecanismo para el control de la admisión, establecimiento, ajuste, y eliminación de flujos de tráfico.

El control de admisión es especialmente importante debido al limitado ancho de banda disponible en el medio inalámbrico. Este control permite evitar congestiones de tráfico que podrían llevar a anular enlaces ya establecidos o a una degradación del rendimiento general. El estándar 802.11e especifica el uso de TSPEC para este propósito tanto en EDCA como en HCCA.

2.3 Soporte de Calidad de Servicio

En relación a la provisión de calidad de servicio analizaremos los esfuerzos realizados por diferentes comités de estandarización. Para llevar a cabo este estudio describiremos las propuestas realizadas por el IETF (*Internet Engineering Task Force*) [IETF-WWW] y el grupo 3GPP (*3G Partnership Project*) [3GPP-WWW].

Analizaremos los diferentes resultados alcanzados por el grupo 3GPP, el cual, a través de una serie de recomendaciones sobre los sistemas de telefonía móvil de tercera generación, dio lugar al que se denominaría UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*).

Con respecto al IETF debemos destacar dos grupos de trabajo que han dado lugar a propuestas con diferentes enfoques para la provisión de calidad de servicio en Internet [Wang2001]. Por un lado basándose en la priorización de tráfico tendríamos el grupo de servicios diferenciados (*Diffserv*) [DIFFSERV-WG], y por otro apoyándose en la prereserva de recursos aparecería el grupo de servicios integrados (*Intserv*) [INTSERV-WG]. Pasaremos a analizar ambas propuestas con mayor detalle.

2.3.1 Soporte de QoS en sistemas 3G: 3GPP

En el ámbito de los sistemas de telefonía móvil, el ITU definió un conjunto de recomendaciones que en Europa darían lugar al sistema de tercera generación UMTS. Esta arquitectura fue promovida por el 3GPP, un acuerdo de colaboración entre diferentes entidades de estandarización interesadas en el desarrollo de estos sistemas 3G.

Inicialmente se parte de una arquitectura de acceso basada en GSM y GPRS, la cual se iría encaminando progresivamente hacia una arquitectura completamente IP, también conocida como *All-IP*. La definición de esta arquitectura de red se encuentra especificada en la conocida como *release 99*, la cual posteriormente se ampliaría en las *releases 4, 5 y 6*.

El soporte de calidad de servicio por parte del 3GPP se realiza a través de la definición de 4 posibles tipos de flujos de información, los cuales vienen determinados por una serie de parámetros asociados, si bien la implementación de los mismos depende de cada fabricante. A continuación describimos estos posibles tráfico:

- **Conversational:** básicamente se caracteriza por mantener un bajo retardo en la transmisión de información, de forma que se identifica muy claramente con los tradicionales servicios de telefonía. Dentro de esta clasificación entrarían igualmente aplicaciones de audioconferencia (VoIP) o videoconferencia sobre IP.
- **Streaming:** en este caso el retardo no es un factor tan determinante, pero si lo es el lograr una relación de flujo constante entre origen y destino. Su mayor exponente es el video bajo demanda.
- **Interactive:** para aplicaciones donde se presta especial importancia al retardo de ida y vuelta y a la tasa de error. Se trata de aplicaciones de acceso remoto a sistemas interactivos, donde resulta especialmente importante lograr una transmisión sin errores.
- **Background:** caracterizado por una tasa de error baja pero sin restricciones respecto del retardo extremo a extremo. En este tipo de tráfico podríamos localizar aplicaciones como el correo electrónico, la transmisión de archivos, servicios no interactivos,...

Para la definición de los distintos tipos de tráfico que hemos descrito las recomendaciones enumeran una serie de atributos que determinarán el comportamiento que deben sufrir los diferentes flujos de información. El número de estos atributos es 13, de los cuales podríamos destacar los siguientes: tasa máxima de transferencia, tasa nominal, envío secuencial, tamaño máximo de trama, tasa de error y distribución del retardo.

2.3.2 Servicios Integrados: Intserv

El modelo de servicios integrados [Braden1997] propone una solución para el soporte de calidad de servicio extremo a extremo basado en la prereserva de recursos en los diferentes equipos de conmutación que componen el trayecto que seguirá información en la comunicación. Con este modelo de trabajo se pretende ofrecer soporte para un funcionamiento adecuado de aplicaciones con requisitos de tiempo real.

Este modelo implica una mejora sobre el servicio tradicional de Internet, de forma que permite a las propias aplicaciones especificar los requisitos de calidad de servicio necesarios. Esta lista de requisitos debe difundirse entre los diferentes elementos de conmutación (*routers*) por los que se encaminarán los paquetes de determinada aplicación. Estos equipos deben proporcionar mecanismos para el control de la calidad de servicio ofrecida a estos flujos de información, lo que se consigue mediante la reserva de recursos.

El modelo de servicios integrados se basa en la definición de dos elementos, una arquitectura donde los elementos de red permiten reservar recursos de conmutación, y un protocolo que permita a las aplicaciones transmitir sus requisitos a estos elementos de conmutación, se trata del protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*).

De esta forma cuando una aplicación desea comenzar una comunicación debe realizar una petición de recursos, esta petición atravesará todos los nodos que formen el trayecto para el flujo de información, y en función de los recursos disponibles será aceptada o rechazada. Este procedimiento se ejemplifica en la figura 2-9. De aquí se derivan las dos funciones que debe realizar el modelo de servicios integrados: gestión de recursos, y control de admisión.

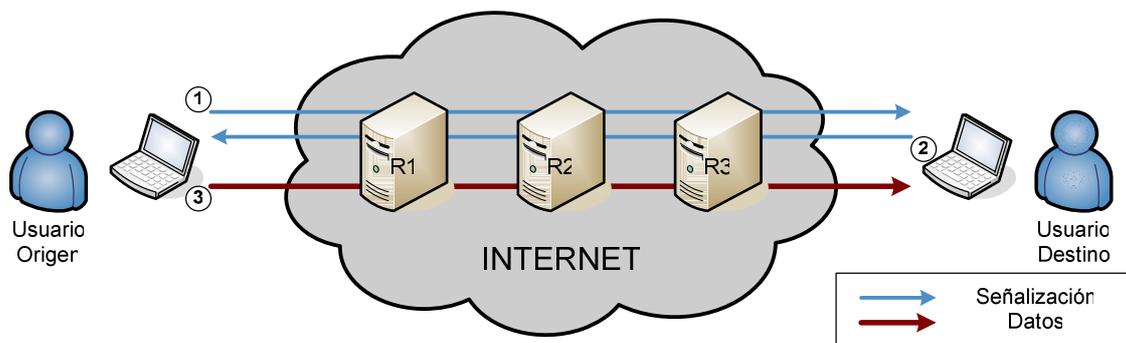


Figura 2-9. Esquema de funcionamiento del modelo Intserv

Modelo de tráfico y modelo de servicios

Para poder determinar los recursos que requiere cierta aplicación resulta necesario clasificar los posibles flujos de tráfico. La clasificación se realizará en función de los requisitos que plantea para su correcto funcionamiento: ancho de banda, retardo, variación de retardo. Con respecto a la dependencia del retardo se distingue entre:

- **Tráfico elástico:** se corresponde con aquellas aplicaciones donde el retardo que sufren las diferentes tramas entre fuente y destino no afecta de forma substancial al servicio ofrecido al usuario. Ejemplos de este tráfico sería el generado por aplicaciones como navegación web, correo electrónico, descarga ftp, ...
- **Tráfico inelástico:** se corresponde con aquellas aplicaciones muy sensibles al retardo sufrido por las tramas. Además requieren un ancho de banda mínimo para poder ofrecer el servicio sin que el usuario perciba deficiencias en el mismo. Algunos ejemplos de este tráfico serían el generado por aplicaciones de audio-conferencia, video bajo demanda, ...

Por otro lado, resulta necesario definir un conjunto de servicios dentro del modelo Intserv con diferentes características en cuanto a calidad de servicio ofrecida, y que permita ofrecer diferentes niveles en función de las necesidades de las aplicaciones.

- **Servicio garantizado** [Braden1997]: permite reservar un caudal mínimo extremo a extremo así como limitar el retardo máximo que sufrirán las tramas en su trayecto. Para lograr este propósito es necesario que los nodos de conmutación intermedios hagan una reserva de los recursos necesarios, de forma que las reservas individuales aseguren los requisitos extremo a extremo. La implementación de este servicio se realiza a través de un protocolo de reserva, como puede ser RSVP, que transmite los requisitos de la aplicación al módulo de Control de Admisión.
- **Servicio de carga controlada** [Wroclawski1997b]: ofrece unas prestaciones similares a las que obtendríamos en una red best-effort tradicional, cuando la misma no está congestionada. Al igual que con el servicio garantizado, la aplicación realiza una petición al Control de Admisión indicando una estimación de los recursos requeridos. El servicio de carga controlada ofrece una transmisión con una probabilidad de error limitada apoyándose en un reparto estadístico de los recursos de red. El uso de este servicio está especialmente aconsejado para aplicaciones adaptativas.
- **Servicio best-effort:** utilizado cuando la petición de recursos ha sido rechazada debido a la falta de recursos disponibles en la red. Ofrece prestaciones similares a una red tradicional, donde no existen nodos Intserv. Si se desea utilizar directamente este servicio, no resulta necesario hacer una petición a diferencia de los servicios anteriores. Este servicio resulta adecuado para aplicaciones con tráfico elástico.

Arquitectura Intserv

Según se ha descrito, la arquitectura de una red Intserv estará formada por nodos que soportan todas las funciones descritas por el modelo de servicios integrados. En la figura 2-10 podemos ver el esquema de un nodo Intserv formado por diferentes módulos.

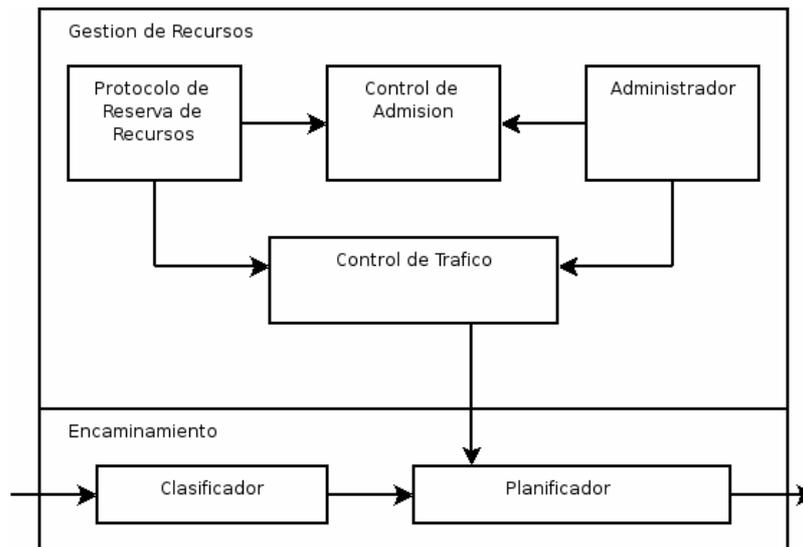


Figura 2-10. Esquema de funciones internas de nodo Intserv

El encaminamiento de las tramas se realiza a través del clasificador y planificador. La gestión de recursos se lleva a cabo en el Control de Admisión, Protocolo de reservas y Administrador. Describamos la funcionalidad que debe soportar cada uno de estos módulos:

- **Control de admisión:** se trata del algoritmo encargado de decidir si una nueva petición puede ser aceptada en función de los recursos disponibles en el nodo y los solicitados por la aplicación.
- **Administrador:** permite establecer diferentes políticas a través de la configuración adecuada del control de admisión, clasificador y planificador.
- **Protocolo de reserva de recursos:** será el módulo encargado de recibir y retransmitir los mensajes de reserva de recursos que generan las aplicaciones. Recordemos que este mensaje atravesará cada nodo en el trayecto de la información, determinando la disponibilidad de los recursos solicitados.
- **Clasificador:** se encarga de asignar la clase apropiada a cada trama recibida en función de las tablas de clasificación que almacena.
- **Planificador:** a través de un conjunto de colas de salida y contadores gestiona el reenvío de tramas. La configuración adecuada de los diferentes parámetros de encolamiento permitirá un reparto de recursos acorde a las reservas realizadas. Los módulos de gestión serán los encargados de proveer una configuración acorde a la política de la red Intserv. Finalmente el planificador estará encargado de conformar el tráfico de salida en función de las reservas realizadas.

Protocolo de reserva. RSVP

El modelo de servicios integrados define un protocolo específico para la gestión de la calidad de servicio en la red, RSVP (*Resource Reservation Protocol* – Protocolo para la Reserva de Recursos) [Wroclawski1997a]. Este protocolo permite a las aplicaciones el envío de peticiones de recursos a los diferentes nodos de conmutación de la red Intserv.

El protocolo RSVP especifica que será el receptor el responsable de efectuar la reserva en lugar del emisor. Este hecho provoca que el receptor necesite conocer previamente las características del tráfico para efectuar la reserva. Por otro lado esto permitirá que en el caso de

las comunicaciones *multicast* los diferentes receptores puedan especificar diferentes parámetros de calidad de servicio, ofreciendo una mayor capacidad de configuración.

Otra característica de gran importancia es el hecho de que las reservas realizadas por el protocolo RSVP son unidireccionales. De forma que si deseamos establecer una comunicación bidireccional será necesario que ambos receptores realicen su propia petición de recursos.

Inconvenientes del modelo Intserv

Para terminar esta descripción del modelo de servicios integrados es necesario resaltar los problemas derivados del modelo de reserva de recursos por flujo [Metz1999][FGee2004]. Como ya hemos descrito el modelo Intserv implica una reserva individual de recursos por cada flujo de información. La gran cantidad de usuarios que componen una red, así como el elevado número de flujos que puede generar cada usuario provoca que existan graves problemas de escalabilidad en el núcleo de la red.

Debemos tener en cuenta que cada nodo de conmutación tendrá que almacenar un listado de todos los flujos activos y los correspondientes recursos asignados. Por otro lado estas reservas son temporales (*soft-state*) de manera que deben ser renovadas cada cierto tiempo. Estos factores provocan que el modelo Intserv sea difícilmente implementable en una red de dimensiones considerables.

Por otro lado las propiedades intrínsecas de las redes inalámbricas, caracterizadas principalmente por la dependencia de un medio especialmente variable, provocan que un modelo como el propuesto por servicios integrados no resulte adecuado. Ese tema se tratará con mayor detalle en el apartado 2.5.

2.3.3 Servicios Diferenciados: Diffserv

El modelo de servicios diferenciados [Blake1998] propone una solución para el soporte de calidad de servicio basado en la priorización de clases de tráfico. Al igual que el modelo de servicios integrados, la provisión de calidad de servicio se realiza a través de una reserva de recursos en los nodos intermedios, pero en este caso las prerreservas se realizan por agregados de tráfico, en lugar de por flujos.

Esta prerreserva de recursos es una labor de la administración de la red, es decir, las aplicaciones no realizan ninguna petición de recursos. Simplemente deberán marcar el tráfico que generen adecuadamente para que reciba un tratamiento específico en función de la clase a la que pertenezca.

Arquitectura del modelo de servicios diferenciados

El modelo de servicios diferenciados define un dominio Diffserv (ver figura 2-11) donde aparecen equipos de conmutación que se pueden dividir en nodos frontera y nodos interiores.

- **Nodos interiores** (CR – *Core Routers*): se trata de los nodos que forman el núcleo de la red. Sus funciones se limitan a proporcionar un sistema de encolamiento que permita ofrecer diferentes tratamientos a los agregados de tráfico en función de sus requisitos preestablecidos.
- **Nodos frontera** (ER – *Egress Routers*): son aquellos que se encuentran en los límites del dominio y presentan algún interfaz con un nodo fuera del dominio Diffserv o con una red de acceso. Deben implementar las funciones descritas para los nodos interiores y adicionalmente deben encargarse de las funciones de clasificación y acondicionamiento de

tráfico, de forma que todo el tráfico que entre en un dominio Diffserv cumpla una serie de requisitos.

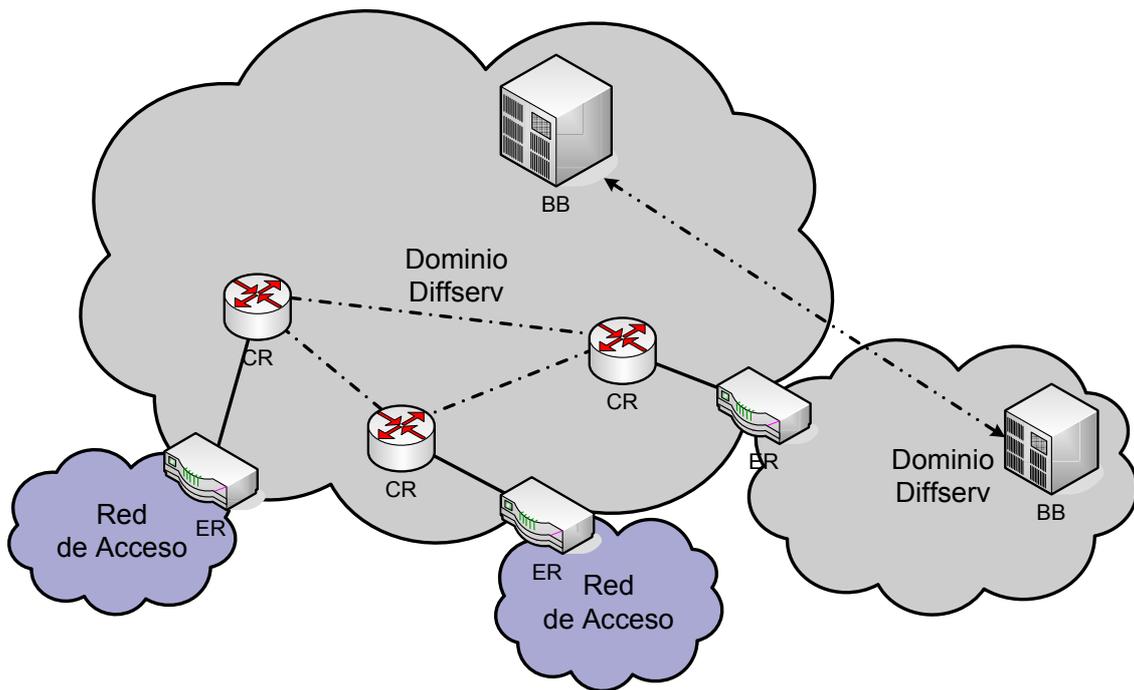


Figura 2-11. Elementos que conforman un dominio Diffserv

Para la identificación de los diferentes agregados de tráfico se define un código llamado DSCP (*Diffserv Code Point*) definido en [Nichols1998]. Esta información se mapeará en el campo TOS (*Type of Service*) en el caso de utilizar IPv4, y en el campo *Traffic Class* cuando usemos IPv6. En la figura 2-12 podemos ver el aspecto de este campo.

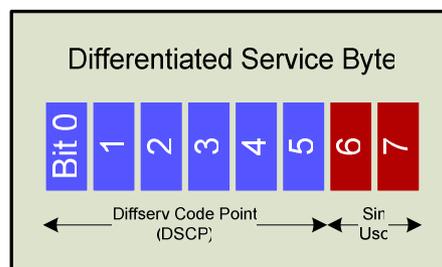


Figura 2-12. Campo de identificación Diffserv

Los dos últimos bits del código DSCP no están en uso actualmente para mantener la compatibilidad con el campo TOS de IPv4. Los 6 bits restantes se utilizan para identificar el agregado al que pertenece cada paquete, de forma que los *routers* que pertenecen al dominio Diffserv pueden aplicar el tratamiento correspondiente, es lo que se conoce como Comportamiento por salto (PHB - *Per Hop Behaviour*).

Los comportamientos por saltos, o PHB, definen un conjunto de condiciones para el tratamiento de tráfico según se describe en [Blake1998]. La aplicación de estos perfiles de comportamiento en todos los nodos del dominio Diffserv permitirá que los diferentes agregados reciban más o menos recursos según como hayan sido etiquetados.

Existen tres perfiles PHB definidos en el modelo Diffserv:

- **Expedited Forwarding (EF)** [Jacobson1999]: se trata de aquellos flujos de tráfico que requieran un caudal mínimo asegurado, así como un retardo limitado y una variación de retardo máxima determinada. Este perfil se ajusta a aplicaciones para tráfico en tiempo real, como puede ser audio/video conferencia, o descarga de video bajo demanda.

El perfil PHB EF aparece descrito por primera vez en [Jacobson1999], aunque en la actualidad ha sido actualizado y reemplazado por [Davie2002]. En este nuevo documento la descripción del perfil se realiza con un mayor formalismo matemático del comportamiento.

El perfil PHB EF está identificado por el código DSCP: 101110.

- **Assured Forwarding (AF)** [Heinanen1999]: indicado para flujos de tráfico con menores requisitos que los indicados para EF, ya que no es posible indicar requisitos temporales para estos flujos (retardo/jitter). Este perfil define cuatro tipos de clases diferentes en función de los recursos reservados a las mismas. De forma que un nodo Diffserv debe reservar ciertos recursos para el encolamiento adecuado de este tráfico.

Dentro de cada clase definida en AF se establecen tres prioridades de descarte. De forma que el perfil AF define un conjunto de 12 posibles servicios. Si identificamos cada servicio con dos subíndices AF_{xy}, la variable *x* representaría la clase, mientras que la variable *y* identificaría la prioridad de descarte.

Este perfil resulta muy adecuado para la implementación de los servicios olímpicos, donde se puede asignar a cada agregado de tráfico la clasificación de oro, plata o bronce, de forma que reciba los recursos correspondientes en cada nodo que atravesase por el dominio Diffserv. El perfil PHB AF correspondiente se identifica mediante los códigos DSCP descritos en la tabla 2-4.

Prioridad de descarte	Clase #1	Clase #2	Clase #3	Clase #4
Baja	001010	010010	011010	100010
Media	001100	010100	011100	100100
Alta	001110	010110	011110	100110

Tabla 2-4. Códigos DSCP para el perfil PHB AF

Un nodo perteneciente a un dominio Diffserv con soporte del perfil PHB AF debe ser capaz de detectar situaciones de congestión, y aplicar descarte de tramas en función de la clase a la que pertenezca el mismo. Típicamente se utiliza una técnica de encolamiento con algoritmo tipo RED (*Random Early Detection*) [Floyd1993] para implementar el mecanismo de descarte.

El comportamiento AF especifica que cada clase debe ser tratada de forma independiente, de forma que no es posible agregar las diferentes colas formando nuevos agregados de tráfico. Un nodo Diffserv debe implementar obligatoriamente las tres prioridades de descarte, pero no resulta necesario que implemente las cuatro clases.

- **Best effort (BE)**: aunque no pertenece exclusivamente al modelo Diffserv, este perfil se utiliza para el tráfico que no tiene requisitos de calidad de servicio (caudal garantizado o consideraciones temporales). Este perfil es adecuado para aplicaciones que trabajan en background o que no requieren trabajo en tiempo real, por ejemplo, descarga de ficheros ftp, navegación web, etc.

Arquitectura de un nodo Diffserv y funciones

En la figura 2-13 aparecen las diferentes funciones que deben implementar los *routers* interiores y frontera que forman el dominio Diffserv.

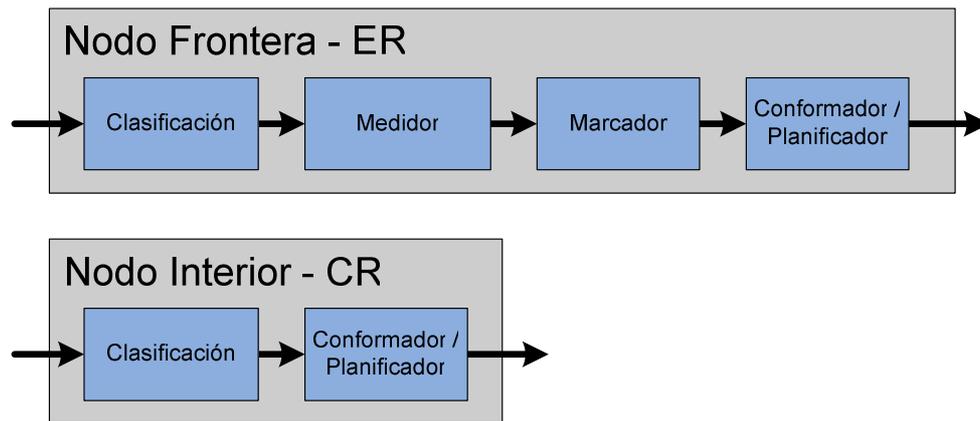


Figura 2-13. Funciones de los nodos en un dominio Diffserv

- **Clasificación:** esta función consiste en identificar el perfil PHB al que corresponde un flujo de tráfico. En función de la información empleada por el clasificador se distinguen distintos tipos de estos. Los clasificadores de agregados son aquellos que utilizan únicamente el código DSCP, mientras que los clasificadores multicampo utilizan más información de diferentes campos disponibles en el paquete (direcciones origen/destino, protocolo,...).
- **Acondicionamiento:** esta función pretende conseguir que el tráfico que ingrese en un dominio Diffserv se ajuste a unas condiciones descritas en el TCA (*Traffic Conditioning Agreement*). Para realizar la función de acondicionamiento se realizan una serie de subfunciones.
 - o **Medidor:** comprueba si el tráfico de entrada se ajusta a un patrón de tráfico determinado, y transmite esta información al resto de módulos implicados para que puedan tomar las medidas necesarias.
 - o **Marcador:** se encarga de asignar un código DSCP a los paquetes de entrada, determinando de esta forma el agregado al que pertenecen. Los paquetes de entrada pueden venir previamente marcados o no, y esta información puede influir en la decisión de marcado.
 - o **Conformador y descarte:** estas dos funciones se encargan de que el tráfico de entrada se ajuste al TCA. Para ello el conformador implementa un buffer que puede retardar la salida de los paquetes, y en caso de que el buffer se desborde, se produce el descarte de los mismos.

La función de clasificación multicampo, así como el acondicionamiento suele implementarse en los nodos frontera, de esta forma aseguramos que el tráfico existente dentro del dominio Diffserv se ajusta a un TCA. De esta forma los nodos interiores no necesitan implementar estas funciones que podrían ser bastante costosas en el núcleo de red debido a la elevada carga.

De igual forma estas funciones podrían realizarse directamente en los nodos orígenes del tráfico, pero para ello tendríamos que tener una total confianza en los mismos, ya que si se saltasen ambas funciones estarían introduciendo tráfico en la red descontrolado, lo que podría provocar un funcionamiento incorrecto del modelo Diffserv.

Podemos comprobar que los problemas de escalabilidad que aparecían en el modelo de servicio integrados desaparecen, ya que la agregación de tráfico provoca que las funciones a implementar por los nodos Diffserv no incrementen de forma desorbitada según el número de usuarios y flujos.

Consideraciones adicionales en el modelo Diffserv

Tras analizar el funcionamiento dentro de un dominio Diffserv podemos extraer ciertos resultados interesantes. El tratamiento del tráfico en los nodos ofrece determinadas características de calidad de servicio siempre que el dimensionamiento realizado en los nodos haya sido adecuado. Debemos tener en cuenta que en los nodos se realiza una reserva de recursos para cada clase de tráfico. Si este tráfico no se comporta estadísticamente como habíamos previsto las reservas realizadas podrían ser incorrectas.

Por ejemplo, imaginemos un escenario donde la mayor parte de los usuarios están realizando audio conferencias usando un perfil PHB EF. Mientras que algunos usuarios minoritarios hacen uso del perfil AF₁₁ (AF) para acceder a su correo electrónico. Si las previsiones de tráfico no se hubiesen realizado adecuadamente y las reservas de recursos fueron incorrectas podría suceder que los usuarios con perfil AF recibiesen un mejor tratamiento que aquellos con EF, debido a que este último podría encontrarse saturado.

Para realizar un dimensionamiento adecuado de la red, los proveedores de acceso a Internet (ISP – *Internet Service Provider*) firman contratos con sus usuarios donde establecen el uso de servicios que realizarán los mismos. De esta forma el usuario se compromete a que su tráfico se ajuste al perfil contratado, y el proveedor se compromete a prestar dicho servicio con una calidad de servicio determinada. Para recoger toda esta información se hace uso de los SLA (*Service Level Agreement*), documento donde se recoge toda la información referente al servicio contratado.

Todos los detalles técnicos referentes al SLA se recogen en otro documento denominado SLS (*Service Level Specification*), donde se indican todos los parámetros y valores que describen el servicio. Para completar el SLA necesitamos cierta información sobre las reglas de clasificación y los perfiles de tráfico, lo cual se especifica en el TCS (*Traffic Conditioning Specification*).

La gestión y operación de toda esta información la lleva a cabo un nuevo elemento de red llamado Gestor de Ancho de Banda (*Bandwidth Broker*) [Escribano2002]. Sus principales funciones serán configurar los nodos que conforman el dominio Diffserv adecuadamente según la información disponible en los SLAs de forma que se aseguren las características de los servicios contratados por los usuarios.

Al mismo tiempo el sistema encargado de la provisión de calidad de servicio debe interactuar con el resto de sistemas que pudieran existir en la arquitectura de red, de forma que se pueda ofrecer una calidad de servicio global. La interacción con los sistemas de movilidad y seguridad es estudiada en diferentes artículos [Cuevas2002][Marques2002][Cuevas2003]

2.4 Funcionamiento conjunto del modelo de Servicios diferenciados sobre IEEE 802.11e

Según hemos visto hasta el momento en la revisión del estado del arte, el modelo de Servicios Diferenciados definido por el IETF representa una seria opción para la provisión de calidad de servicio en la red Internet. El modelo de funcionamiento de Diffserv está basado en la priorización de flujos de tráfico en los nodos de conmutación, de forma que la calidad de servicio que se puede obtener se fundamenta en un estudio estadístico del tráfico presente en la red.

El funcionamiento de este modelo se ajusta adecuadamente a la variabilidad de las condiciones de acceso en una red inalámbrica. Estas redes de acceso han sufrido una gran eclosión durante los últimos años, y se han convertido en un referente para el acceso a servicios multimedia por medios inalámbricos. Sin embargo, estas redes se caracterizan por la variabilidad de sus condiciones de acceso, lo cual se traduce en una velocidad de acceso en constante cambio, así como una elevada probabilidad de error en la recepción de tramas.

Estas condiciones provocan que la reserva de recursos por flujo, propuesta por el modelo de Servicios Integrados, no sea apropiada, y en su lugar la priorización de tráfico resulta una opción más acertada, que se adapta más fácilmente a las condiciones que en cada momento sufra la red.

El grupo de trabajo 802.11e, formado por el organismo de estandarización IEEE, ha proporcionado un estándar para la provisión de calidad de servicio sobre redes inalámbricas basadas en tecnología 802.11. En dicho estándar [IEEE-802.11E], según hemos descrito en el apartado 2.3, se plantea la diferenciación en el tratamiento de los diferentes flujos de tráfico en base a la definición de diferentes colas de acceso dentro de cada cliente y el propio punto de acceso.

Al mismo tiempo se amplía la antigua función de acceso basada en punto de coordinación (PCF) de forma que se plantea la posibilidad de ofrecer calidad de servicio parametrizada (HCCA). Esta última opción estaría más en la línea del grupo de trabajo de servicio integrados basados en reserva por flujo.

Por otro lado, el estándar 802.11e indica que la implementación, por parte de los fabricantes, de la función de acceso **HCCA es opcional**, tal y como sucedía con el modo PCF en 802.11. En consecuencia la mayor parte de los fabricantes, en la actualidad, no implementan este sistema de acceso, y en su lugar proporcionan EDCA. Dado el carácter eminentemente práctico que tiene esta tesis, trabajaremos sobre la función de acceso **EDCA**.

Cada una de las colas de acceso definidas en el estándar 802.11e se caracteriza por una serie de parámetros que determinan las condiciones del acceso al medio. Estos parámetros se describen en el estándar junto con los valores que toman por defecto (Tabla 2-5).

Parámetro	Definición
AIFS	Tiempo variable de espera entre tramas
CWmin	Tamaño de ventana de contienda mínimo
CWmax	Tamaño de ventana de contienda máximo
TXOP	Oportunidad de transmisión

Tabla 2-5. Parámetros configurables en las categorías de acceso 802.11e

Según el estándar 802.11e estos parámetros tienen unos valores prefijados por defecto de forma que se crean prioridades en el acceso entre unas colas y otras. Se definen cuatro categorías de acceso que ordenadas por orden de prioridad aparecen en la tabla 2-6.

Prioridad	Categoría de Acceso	Descripción
Menor	AC_BK	Background
...	AC_BE	Best Effort
...	AC_VI	Video
Mayor	AC_VO	Voz

Tabla 2-6. Prioridad de las Categorías de Acceso 802.11e

Las diferentes condiciones de acceso a la red impuesta por cada cola provocan que la tasa de transmisión máxima sea diferente en función de la cola empleada. A modo ilustrativo en la figura 2-14 podemos comprobar el máximo caudal de salida que se puede conseguir utilizando individualmente las diferentes colas con distintos tamaños de paquete.

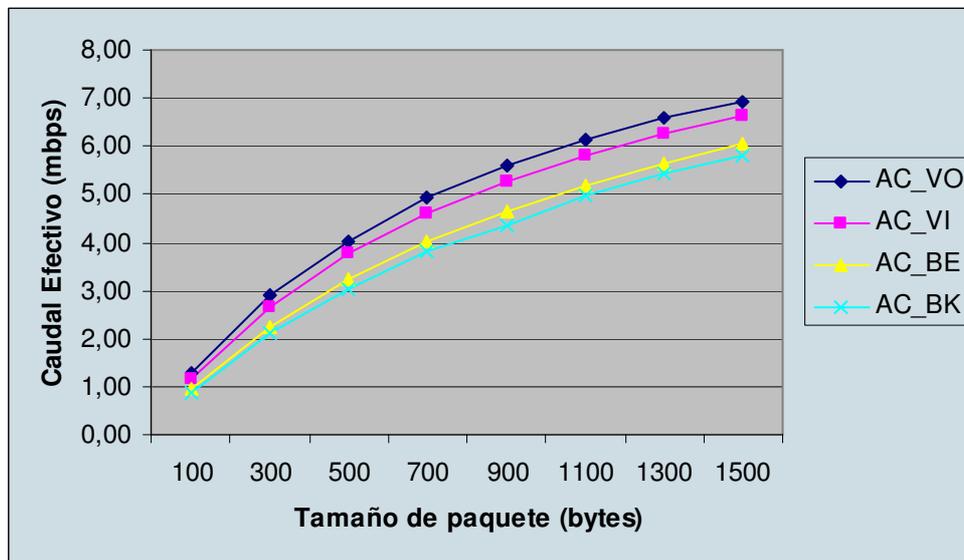


Figura 2-14. Variación de la tasa de transmisión para las diferentes categorías de acceso

Entre los resultados mostrados podemos apreciar como usando un tamaño de paquete de 1500 bytes, el caudal máximo alcanzado varía entre las colas AC_VO y AC_BK en más de 1 mbps para una configuración de enlace a 11mbps, lo que representa una degradación del 16%. En el extremo opuesto, usando un tamaño de paquete de 100 bytes la diferencia de caudal es de unos 400 kbps, lo que representa una degradación del 40%.

Estos resultados muestran como el uso de colas con diferentes parámetros de acceso puede ser empleado para priorizar diferentes flujos de tráfico entre si. Lo cual se ajusta perfectamente al modelo de servicio diferenciados definido por el IETF. Las mismas conclusiones se obtienen en diferentes trabajos [Xiao2004a].

Existen gran cantidad de propuestas para el soporte de servicios diferenciados sobre redes 802.11 [Banchs2002] [Ge2003] [Gu2003] [Xiao2003], y en la actualidad el uso combinado de servicios diferenciados sobre redes con soporte 802.11e se encuentra en un estado bastante avanzado de investigación [Mangold2002][Pandey2004][Pattara2003]. La clave para la combinación de ambas tecnologías es la definición de un mapeo entre las clases descritas en el modelo de servicios diferenciados y las cuatro colas que soporta una entidad compatible con 802.11e.

A modo de ejemplo podemos ver la tabla 2-7 donde se representa la propuesta de mapeo descrita en [Park2003]. La tabla identifica el mapeo entre los diferentes códigos DSCP y la correspondiente prioridad de usuario (TCID) (descrita en 802.1D [IEEE-802.1D]). El mapeo entre las prioridades de usuario 802.1D y las colas de acceso aparece descrito en el estándar IEEE 802.11e [IEEE-802.11E].

En este artículo se plantea una solución de arquitectura con calidad de servicio extremo a extremo basada en el uso combinado de Diffserv y 802.11e en la red de acceso. La principal aportación consiste en la coordinación entre los diferentes parámetros de calidad de servicio como son los identificadores DSCP de Diffserv, la prioridad de usuario de 802.1D, y la cola de acceso de 802.11e. Sin embargo, dejan abierta la configuración de los parámetros que rigen las diferentes colas de acceso y no abordan la identificación de los elementos de red.

Clase de Tráfico	Ejemplo	DSCP	TCID
1	VoIP	(101)xxx - EF	7
2	Video	(100)xxx - AF4x	5
3	Señalización	(010)xxx - AF2x	3
4	Datos (ej. www, email)	(000)000 - BE	1

Tabla 2-7. Tabla de mapeo DSCP - TCID

Una vez la arquitectura se encuentra definida, resulta necesario realizar un análisis adecuado para calcular los parámetros de configuración de las colas de acceso. En base a la estimación de tráfico que podamos tener y a los requisitos de diferenciación de tráfico que tengamos, podremos usar modelos como el descrito en [Xiao2004b] que determinan parámetros de acceso óptimos para maximizar el rendimiento de la red.

En este trabajo se presenta un nuevo modelo analítico que amplía el descrito por Bianchi en [Bianchi2000], de forma que permite el uso de la ventana de contienda (CW), el factor de incremento, y el valor máximo para la diferenciación de flujos de tráfico.

Por otro lado, en [Banchs2005] se analiza otro factor de considerable importancia como es el número de clientes conectados a la red de acceso. Se describe un algoritmo para el cálculo del parámetro Tamaño de Ventana de Contienda mínimo (CW_{min}) que permita un reparto equitativo de los recursos de red entre los diferentes clientes y el propio punto de acceso.

Independientemente de la configuración elegida para los parámetros de acceso, debemos tener en cuenta que la carga de trabajo de una red inalámbrica está sometida a constantes variaciones derivadas de la movilidad de los diferentes dispositivos. Este hecho provoca que los parámetros de configuración de las colas de acceso que calculamos en un determinado instante, con la intención de optimizar el rendimiento de la red, probablemente no consiga los mismos resultados en un instante posterior y con una carga de red diferente.

Existen algunos esfuerzos en este sentido proponiendo la modificación de la capa de acceso al medio (MAC) [Nafaa2005], de forma que el tamaño de la ventana de contienda (CW) se adapte permitiendo seguir ofreciendo diferenciación de servicios aún con carga de red variable.

Sin embargo, una propuesta de modificación de la capa de enlace implica la necesidad de fabricar nuevas tarjetas inalámbricas. La propuesta realizada por esta tesis describe una arquitectura de red donde cualquier tarjeta compatible con el actual estándar 802.11e podrá

verse beneficiada del soporte de calidad de servicio, sin necesidad de modificaciones del nivel de enlace.

Esta tesis contribuye a la definición de una arquitectura de calidad de servicio en un entorno de red de acceso inalámbrica basada en 802.11e sobre la que se soportan servicios diferenciados, proporcionando mecanismos para maximizar el rendimiento global de la red en base a la carga dinámica de tráfico.

2.5 Conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado una revisión del estado del arte correspondiente a esta tesis, analizando las tecnologías de redes locales inalámbricas de mayor difusión en la actualidad y las iniciativas más importantes con respecto al soporte de calidad de servicio.

Hemos analizado con especial interés los resultados del grupo de trabajo 802.11e dentro del organismo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), encargado de la provisión de calidad de servicio sobre redes inalámbricas 802.11. Este grupo estuvo trabajando sobre el borrador de dicho documento hasta finales de 2005, fecha en la que se generó el documento final del estándar 802.11E [IEEE-802.11E].

En este estándar se describe un mecanismo que permite el soporte de calidad de servicio a través de determinadas modificaciones de la capa de enlace. De igual forma se realizan unas *vagas* sugerencias sobre la configuración que deberíamos elegir para algunos tipos de tráfico (video, voz, *background* y *best effort*).

Siguiendo el análisis de sistemas de provisión de calidad de servicio, se describen las iniciativas de mayor peso en cuanto a nivel de red se refiere, revisando los grupos de trabajo Diffserv e Intserv pertenecientes al IETF (*Internet Engineering Task Force*).

Las características intrínsecas de las redes inalámbricas provocan que sea más adecuado un soporte de calidad de servicio basado en priorización en lugar de reserva, de manera que revisamos los diferentes trabajos de investigación existentes en cuanto al soporte de servicios diferenciados sobre redes inalámbricas 802.11e.

En este sentido mostramos diversas propuestas de modificación de la capa de enlace orientadas a optimizar los recursos de red, pero que obligan a la consideración de nuevas tarjetas de red. Y se describen ciertos trabajos que proponen una arquitectura de red que establece una tabla de mapeo entre las prioridades Diffserv y 802.11e, pero que no abarcan como lograr la configuración óptima de parámetros.

En esta tesis se realizará una propuesta completa de arquitectura de acceso con soporte de calidad de servicio sobre redes inalámbricas 802.11e. En este sentido y según hemos descrito en el apartado 2.5 existen algunas propuestas que ofrecen soluciones parciales al problema, pero que en ningún caso abordan la definición de una arquitectura completa y no afrontan el cálculo de los parámetros óptimos de acceso para un aprovechamiento adecuado de los recursos de la red, de acuerdo a los perfiles requeridos por el modelo de servicios diferenciados.

Capítulo 3

Propuesta de Arquitectura

3.1 Introducción

La propuesta de esta tesis afronta la provisión de calidad de servicio en redes inalámbricas que funcionan en modo infraestructura desde un punto de vista pragmático, describiendo una arquitectura donde apoyándose en las herramientas proporcionadas por 802.11e se maximiza el rendimiento de la red de acceso ajustando de forma dinámica los parámetros de acceso de cada cliente en base a la carga de red.

Esta propuesta se basa en la utilización de tarjetas de red inalámbricas compatibles con el estándar desarrollado por el IEEE, denominado 802.11e. Este estándar fue aprobado en Septiembre del año 2005, de manera que durante la realización de esta tesis se siguió la evolución del borrador que daría lugar al mismo centrándonos principalmente en la última versión [IEEE-802.11E-D13].

Debido a la reciente aprobación de este estándar uno de los objetivos planteados en esta tesis será el soporte de escenarios mixtos donde convivan ambas tecnologías, es decir redes de acceso donde clientes que se ajusten al original estándar 802.11, y aquellos con soporte para el

nuevo 802.11e, formen parte de la misma red de acceso. De esta forma la arquitectura de red que se propone en el presente capítulo permite la gestión de ambos tipos de nodos y logra mejorar el rendimiento de la red aún ante la presencia de nodos no compatibles con el estándar 802.11e.

La arquitectura que describiremos en el presente capítulo constituye la aportación principal de la tesis, y realiza una serie de funciones que llevan a la *optimización de la carga de la red de acceso*. En este sentido resulta adecuado describir con mayor detalle en que consiste esta *optimización*, ya que determinará por completo el funcionamiento de la misma.

El **objetivo** de la arquitectura propuesta en esta tesis consiste en mejorar el aprovechamiento de los recursos de la red de acceso al objeto de aumentar la calidad de servicio percibida por el usuario en un entorno de Servicios Diferenciados.

En este sentido se orientará este aprovechamiento de los recursos hacia una **maximización del caudal cursado por la red**, lo cual al mismo tiempo conllevará una disminución del retardo, ajustándose a los requisitos derivados del uso de tráfico de servicios diferenciados.

Con la intención de dotar a la arquitectura de la mayor flexibilidad posible se definirán los interfaces necesarios para que el administrador pueda especificar las reglas que mejor se ajusten a las necesidades específicas de calidad de sus usuarios. En este sentido se definirán diferentes perfiles de trabajo de manera que el administrador pueda optar por el que más le interese en cada situación.

Los estudios realizados en los siguientes apartados, los cuales serán validados en el siguiente capítulo, irán encaminados a lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos de red al mismo tiempo que cumplimos los requisitos de trabajo especificados por el administrador.

Para alcanzar el propósito descrito, en el apartado 3.2, se llevará a cabo la descripción de los dispositivos que conforman la arquitectura. En el apartado 3.2.1 se especificarán una serie de funciones básicas que acometerá la arquitectura, cuyo funcionamiento conjunto permitirá alcanzar el objetivo anteriormente descrito. La descripción de los módulos necesarios en cada dispositivo así como las interfaces de comunicación se realizará en los apartados 3.2.2 y 3.2.3. Para completar la descripción de la arquitectura, en el apartado 3.2.4, se describirán en detalle los *casos de uso* donde se identifican diferentes tareas que realiza la arquitectura para cumplir las funciones básicas. Finalmente, en el apartado 3.2.5 se analizan algunos escenarios que llevan a consideraciones especiales en el diseño de la arquitectura como puede ser la presencia de nodos no compatibles con el estándar 802.11e.

3.2 Propuesta de Arquitectura con soporte de calidad de servicio en entorno 802.11e

En el presente apartado describiremos la principal aportación de esta tesis, la cual consistirá en la propuesta de una arquitectura de red de acceso para el de soporte de calidad de servicio (QoS) en entornos inalámbricos 802.11e basada en *Diffserv*. En esta propuesta se identifican y describen los módulos necesarios dentro de los diferentes elementos que componen la red de acceso: terminales móviles y punto de acceso. Estos módulos serán los encargados de recoger la información necesaria sobre el estado de la red para proceder al cálculo de los parámetros óptimos de configuración de las tarjetas de acceso.

En la figura 3-1 mostramos los diferentes componentes que conforman una red de acceso inalámbrica en modo infraestructura.

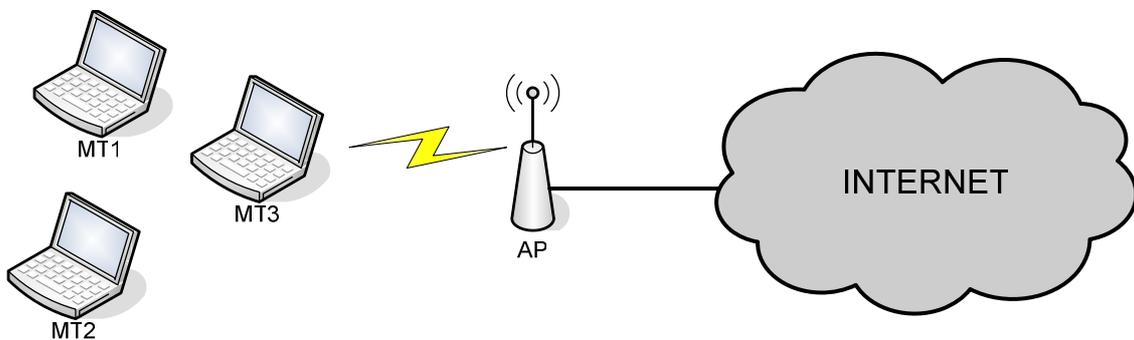


Figura 3-1. Esquema de red inalámbrica

La red de acceso estará compuesta por un punto de acceso y un número indeterminado de terminales móviles. El punto de acceso típicamente estará conectado a Internet a través de una interfaz cableada (p.e. módem ADSL, cable módem). La velocidad de acceso a Internet podría ser inferior a la velocidad de la red inalámbrica, suponiendo en este caso un cuello de botella para el acceso de los terminales a Internet.

La provisión de calidad de servicio más allá del punto de acceso no se encuentra dentro del ámbito de esta tesis, si bien este tema ha sido ampliamente estudiado en diferentes publicaciones [Garcia2003] [Garcia2006] [Gozdecki2003] [Marques2003].

En la figura 3-2 podemos ver un diagrama con los módulos que integran cada elemento de red, así como la definición de los interfaces de control.

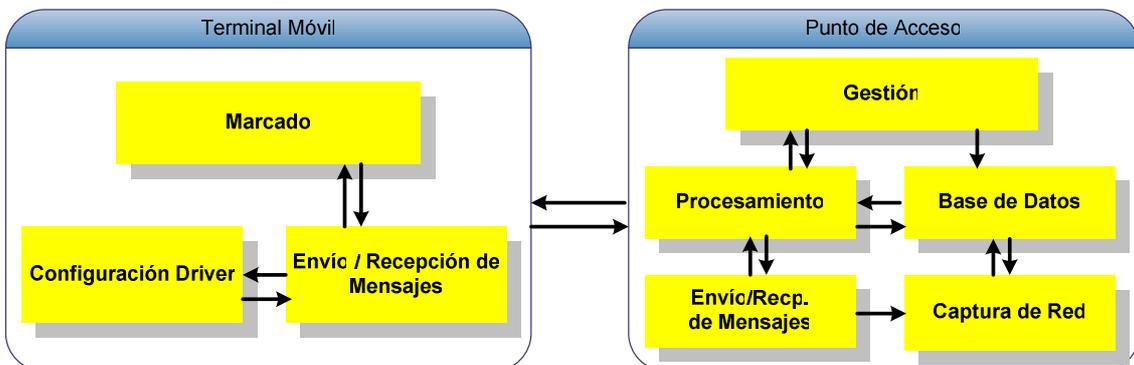


Figura 3-2. Diagrama de módulos de los elementos de red

3.2.1 Funciones de la Arquitectura

La arquitectura de red de acceso tendrá que realizar una serie de funciones básicas que lleven a la consecución del objetivo descrito anteriormente. A continuación pasamos a describir estas funciones:

- **Recopilación de información:** la arquitectura tendrá que ser capaz de reunir cierta información relativa a la carga de la red en base a la cual se proceda a la optimización de la misma. La información que deberá recopilarse se seleccionará en base al objetivo de la arquitectura y se describirá más adelante.
- **Procesamiento de la información:** atendiendo a la información estadística recogida por la función anterior, la arquitectura deberá procesarla para generar la configuración óptima de los diferentes clientes que conforman la red, así como del punto de acceso con la intención de lograr el objetivo descrito de la arquitectura.
- **Configuración de elementos de red:** en base a los resultados generados por la función de Procesamiento, la arquitectura deberá encargarse de configurar adecuadamente todos los clientes de la red. Para ello hará uso de las herramientas que proporciona el estándar IEEE 802.11e para la difusión de los parámetros de configuración entre los clientes.

En los siguientes apartados analizaremos con mayor detalle cada una de estas funciones.

3.2.1.1 Recopilación de información

Las prestaciones globales de la red de acceso se pueden mejorar mediante la elección de los parámetros óptimos de acceso basándonos en las condiciones globales de carga de la red. Con la intención de definir una arquitectura lo más flexible posible tendremos que tener en cuenta todos los parámetros que puedan afectar en alguna medida a la calidad de las diferentes comunicaciones cursadas sobre la red de acceso. De esta forma la arquitectura de red será fácilmente ampliable permitiendo la incorporación de nuevas funcionalidades.

En la tabla 3-1 sintetizamos la información que recopilará el punto de acceso y almacenará en su base de datos. Una parte considerable de esta información es recogida automáticamente en el propio punto de acceso, y únicamente el número de descartes tendrá que ser transmitido individualmente desde cada nodo.

Parámetros globales	
Número de clientes	Número de nodos asociados al punto de acceso presente en nuestra arquitectura
Conexión AP <-> Internet	Tipo de conexión (velocidad) que el punto de acceso tiene para acceder a Internet. Estas velocidades típicamente serán asimétricas (upstream / downstream)
Parámetros para cada cliente	
Tasa de tx. por cliente	Tasa de transmisión que está empleando cada cliente en su conexión con el punto de acceso
Caudal (kbps) usado por cliente (upstream / downstream)	Ancho de banda que cada cliente está generando tanto en el sentido ascendente (upstream) como descendente (downstream)

% Caudal usado por EF	Porcentaje de tráfico generado por el cliente que se encuentra etiquetado como Expedited Forwarding según la nomenclatura Diffserv
% Caudal usado por AFxy	Porcentaje de tráfico generado por el cliente que se encuentra etiquetado como Assured Forwarding según la nomenclatura Diffserv
% Caudal usado por BE	Porcentaje de tráfico generado por el cliente que se encuentra etiquetado como Best Effort según la nomenclatura Diffserv
% Descartes tráfico EF	Porcentaje de descartes de tráfico Expedited Forwarding respecto del total provocados por colisiones con otros clientes.
% Descartes tráfico AFxy	Porcentaje de descartes de tráfico Assured Forwarding respecto del total provocados por colisiones con otros clientes.
% Descartes tráfico BE	Porcentaje de descartes de tráfico Best Effort respecto del total provocados por colisiones con otros clientes.

Tabla 3-1. Parámetros de interés de la red

La mayor parte de estos parámetros serán medidos desde el punto de acceso a través del módulo de *Captura de Red* (ver Figura 3-3). Debido al uso de la red de acceso en modo infraestructura, todo el tráfico atravesará obligatoriamente el punto de acceso, y así el módulo de *Captura de Red* utilizando técnicas de captura (*sniffing*) podrá recopilar toda esta información y mantenerla actualizada.

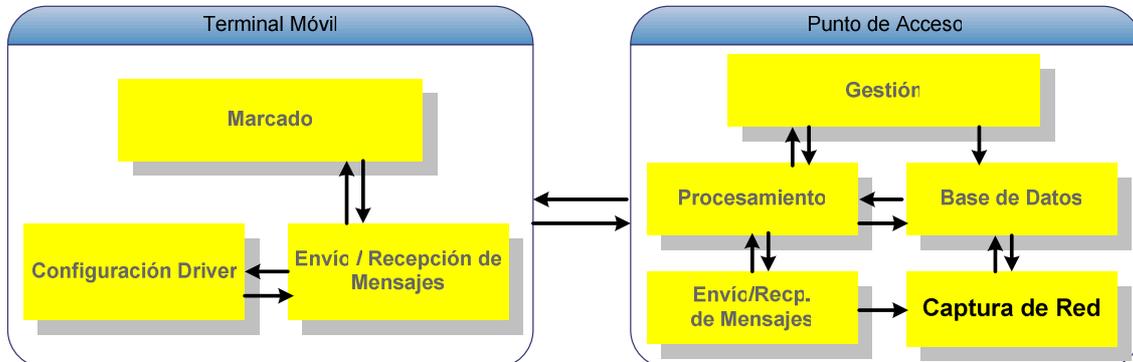


Figura 3-3. Visión modular de la Arquitectura - Captura de Red

Respecto al porcentaje de descartes de cada tipo de tráfico provocado por colisiones, este es un parámetro que no puede cuantificar el punto de acceso, ya que ante una colisión el punto de acceso no conoce la procedencia de los paquetes implicados en la misma. Esta información sólo está disponible individualmente en cada cliente, resultando de gran importancia para el cálculo de los parámetros óptimos de acceso. En consecuencia habilitaremos una interfaz que permita la transmisión de dicha información periódicamente desde cada cliente al punto de acceso.

Veamos a continuación las especiales consideraciones que debemos tener en cuenta a la hora de obtener la información indicada en la tabla 3-1.

- **Número de clientes:** el número de clientes registrados con el punto de acceso es un valor del que podemos disponer a través de información almacenada en el punto de

acceso, sin embargo la información que realmente nos interesa, es el número de clientes activos.

Resulta necesario definir con mayor precisión el concepto de cliente activo para continuar la descripción de la arquitectura. Siguiendo un modelo similar al utilizado para el mantenimiento de una tabla ARP, consideraremos como clientes activos aquellos que hayan generado tráfico recientemente (sugerimos el uso de 60 segundos como medida de inactividad de un cliente).

- **Conexión AP \leftrightarrow Internet:** como indicábamos anteriormente este parámetro mide la velocidad de la conexión al exterior (típicamente Internet) a la que está conectado el punto de acceso. Este valor es una información que deberá configurar adecuadamente el administrador de la red para lograr un funcionamiento óptimo de la misma.
- **Tasa de transmisión por cliente:** este valor representa la velocidad de transmisión a la que cada cliente está configurado en su conexión con el punto de acceso, la cual depende de las características físicas del enlace (nivel de señal vs. nivel de ruido). Esta información permitirá que la *función de procesamiento* que analizaremos posteriormente pueda decidir si la red se encuentra en un estado de saturación.
- **Caudal usado por cliente:** esta información unida a la tasa de transmisión del cliente permite determinar el nivel de saturación de la red. Al igual que el parámetro *Conexión AP \leftrightarrow Internet*, el caudal usado por cliente viene determinado por dos valores que indican el caudal saliente y entrante. Esta información permitirá ajustar los parámetros de configuración en función de la asimetría de uso de la red para lograr un funcionamiento óptimo.
- **Porcentaje de caudal usado para EF, AF y BE:** finalmente la relación que indica el porcentaje de uso relativo de cada clase Diffserv para cada cliente permitirá realizar un ajuste más fino de la configuración en función del tráfico presente en la red en cada instante.

3.2.1.2 *Procesamiento de la información*

En base a la información recopilada por el módulo de captura que ofrece la arquitectura, será necesario procesar la misma y calcular la configuración óptima que logre maximizar el caudal cursado por la red de acceso ciñéndonos a las restricciones derivadas del uso de tráfico Diffserv.

En este sentido analizaremos brevemente los requisitos impuestos por la presencia de tráfico de servicios diferenciados, a los cuales deberá ceñirse, en la medida de lo posible, la arquitectura de red de acceso.

- **Tráfico Expedited Forwarding – EF:** esta clase está definida como un tratamiento que asegure un ancho de banda mínimo configurable por el administrador, y que en ningún momento se vea afectado por la intensidad del resto de tráfico no-EF. Esta definición permite ofrecer servicios con unos requisitos de bajo retardo y bajas pérdidas.

A efecto prácticos la arquitectura debería permitir cursar este tráfico por delante de cualquier otro, de manera que no se debería descartar ningún paquete etiquetado como EF debido a la presencia de otros flujos no EF.

- **Tráfico Assured Forwarding – AF:** este tráfico tiene una prioridad intermedia, situada entre el tráfico EF y BE. Cualquier paquete etiquetado como EF debería ser procesado antes que el tráfico AF, y de igual forma cualquier paquete AF tendrá prioridad sobre el tráfico BE.

Por otro lado el tráfico AF define diferentes *clases y prioridades de descarte* para crear nuevas prioridades dentro del propio grupo AF. Tal y como vimos en el estado del arte AF define cuatro clases y tres prioridades de descarte por cada clase.

Las diferentes clases definidas en el grupo AF se diferencian en la cantidad de recursos que el administrador de red ha decidido destinar a cada una de ellas, mientras que las prioridades de descarte indican el orden a seguir en el descarte de paquetes en el caso de congestión de la red.

- **Tráfico Best Effort – BE:** finalmente el tráfico BE es el de menor prioridad de los tres descritos. Este tipo de tráfico sólo debería ser cursado si existiesen recursos disponibles una vez cursado todo el tráfico etiquetado como EF y AF.

Este tratamiento provoca que en el caso de trabajar en una red no saturada, las prestaciones obtenidas para tráfico BE, AF y EF sean muy similares. Pero cuando la red entra en una fase de congestión se comienza descartando cualquier paquete etiquetado como BE, a medida que aumenta la congestión las diferentes clases AF, en función de los recursos asociados, empiezan a descartar los paquetes con una *prioridad de descarte* más alta, y finalmente, si la congestión sigue aumentando, inevitablemente, se procede al descarte de paquetes pertenecientes al grupo EF.

Analicemos a continuación el tratamiento que otorgará la arquitectura de red propuesta a cada grupo de tráfico Diffserv. Veremos como el comportamiento ideal definido por el grupo de servicios diferenciados no siempre será realizable, y como la arquitectura intentará acercarse en la medida de lo posible a este objetivo.

En primer lugar aparece claramente una división del tráfico en tres grupos de prioridades (EF, AF y BE), de forma que, nunca debería transmitirse ninguna trama de un determinado grupo mientras existan otras pendientes de grupos de mayor prioridad. Al mismo tiempo debemos respetar las cuotas definidas internamente para los subgrupos *Assured Forwarding*.

Respecto de la priorización, se trata de un comportamiento que se puede implementar fácilmente de forma aislada dentro una estación móvil o en el propio punto de acceso, ya que cada elemento de red es consciente de las tramas que tiene almacenadas en las diferentes colas que gestiona; y de esta forma puede priorizar el acceso de unos sobre otros al canal.

Sin embargo en el caso de diferentes estaciones intentando acceder al medio lo único que podemos pretender hacer es priorizar el acceso de un tráfico respecto a otro. En este sentido el estándar 802.11e nos ofrece diferentes herramientas para priorizar las diferentes colas de acceso de que dispone cada estación que accede al canal.

Los dos parámetros descritos en el estándar 802.11e que mayor versatilidad ofrecen para gestionar la priorización de flujos son el tamaño de la ventana de contienda mínimo (CWmin) y el tiempo configurable entre tramas (AIFS), ambos configurables en cada cola de acceso. Según se indica en [Banchs2005] el parámetro CWmin permite configurar una relación de flujos directamente proporcional a la relación de los parámetros CWmin configurados en las diferentes colas de acceso. Por otro lado el parámetro AIFS ofrece la posibilidad de configurar relaciones de flujo más ‘abruptas’, es decir, permite unas relaciones entre flujos mayores para relaciones de parámetro AIFS más pequeñas. Este efecto podemos apreciarlo en la figura 3-4.

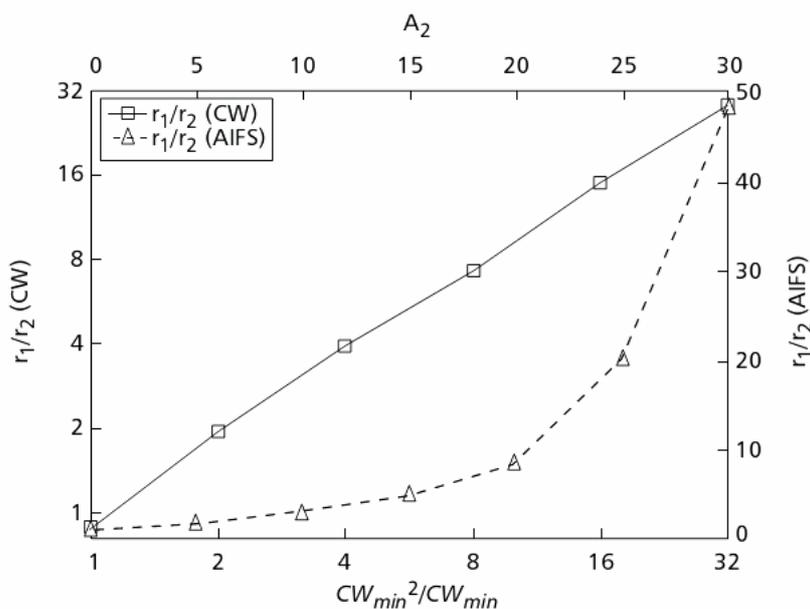


Figura 3-4. Relación de flujos en función de CWmin y AIFS

En el caso de tráfico de servicios diferenciados deseamos que la relación de flujos entre las diferentes clases EF, AF y BE sea lo más abrupta posible de forma que se ajuste lo más posible al ideal teórico. En consecuencia **usaremos el parámetro AIFS para lograr la priorización de tráfico entre clases Diffserv.**

Debemos tener en cuenta que es necesario llegar a un compromiso. Por un lado cuanto mayor sea la relación entre los parámetros AIFS mayor será la relación entre los flujos y en consecuencia más nos aproximaremos al comportamiento deseado en Diffserv. Sin embargo a medida que aumentamos el parámetro AIFS estamos aumentando el retardo que sufren los paquetes para acceder al canal, y en la misma medida reduciendo el caudal efectivo que alcanzaremos.

Una vez fijado el parámetro AIFS según la clase de tráfico que estemos utilizando tenemos otro parámetro pendiente de configurar, CWmin, el cual nos permitirá maximizar el caudal efectivo máximo cursado por la red en función del número de nodos activos. Debemos tener en cuenta que el parámetro CWmin fue creado para regular el acceso al canal entre las diferentes estaciones, de forma que resulta necesario ajustarlo en función de la carga dinámica de la red si queremos obtener las mejores prestaciones. En el capítulo de simulaciones podremos comprobar cuantitativamente los beneficios derivados del ajuste de este parámetro.

Finalmente nos queda por resolver un pequeño apartado para ajustarnos al modelo de servicios diferenciados. Como comentamos anteriormente, la clase *Assured Forwarding* permite la diferenciación entre hasta cuatro clases dentro del propio grupo AF. Esta diferenciación se definía a través de los recursos destinados a cada clase, lo cual definía una relación de flujos entre clases. Así, por ejemplo, si el administrador deseara crear cuatro clases con los siguientes anchos de banda mínimos 1, 2, 4 y 8 Mbps; las relaciones de flujos entre la primera y el resto serían de 1:2, 1:4 y 1:8, entre la segunda y el resto 2:1, 1:2 y 1:4, entre la tercera y el resto de 4:1, 2:1, 1:2, y finalmente entre la última y el resto serían 8:1, 4:1 y 2:1.

Nuevamente tenemos la posibilidad de optar por los parámetros AIFS o CWmin para lograr este reparto equitativo de tráfico. En diferentes estudios se propone el uso del parámetro CWmin para lograr esta relación de flujos. Según hemos comentado anteriormente este

parámetro ofrece una configuración más sencilla, ya que el valor del mismo debe ser proporcional a la relación de flujos que se desea fijar.

Sin embargo, analizando el modelo de funcionamiento de redes 802.11, y según veremos en el capítulo 4, existe un valor óptimo del parámetro CWmin que depende del número de nodos activos en la red y que maximiza el caudal cursado por la red. Si nos desviamos de este valor óptimo estaremos incurriendo en un desaprovechamiento de los recursos de la misma.

En su lugar, podemos emplear el parámetro AIFS para forzar una priorización entre tráfico que ofrezca la relación de flujos configurada por el administrador de red. Debemos tener en cuenta que la configuración del parámetro AIFS para lograr este objetivo es bastante más compleja, y en consecuencia será necesaria la ejecución de un algoritmo con realimentación que modifique el parámetro AIFS en función del estado de carga de la red.

Una última consideración a tener en cuenta a la hora de calcular los parámetros óptimos de acceso es atender al caso de una red que no se encuentre en estado de saturación. En esta situación, donde las colisiones que pudieran producirse serían esporádicas, conviene reducir estos parámetros de acceso al valor mínimo configurable de forma que aumentamos el caudal efectivo máximo cursado por la red, y en la misma medida disminuimos el retardo en la red.

En el capítulo 4, dedicado a la validación de la arquitectura propuesta en esta tesis, podremos comprobar el comportamiento descrito aplicado sobre diferentes escenarios. A continuación analizaremos los tratamientos que debe ofrecer la red en diferentes escenarios, avanzando de forma progresiva hacia el escenario más complejo donde aparecería tráfico de los tres grupos Diffserv: EF, AF y BE.

A continuación proporcionamos una guía rápida de trabajo que describe a alto nivel como debe ser configurado cada parámetro en función del tráfico presente en la red. Posteriormente, en el capítulo 4, se procederá a calcular adecuadamente los diferentes parámetros de acceso.

3.2.1.2.1 Guías Básicas de Configuración

Presencia de cualquier clase de tráfico en modo de no saturación

Este sería el caso más sencillo posible, donde la red de acceso se encuentra en modo no-saturación, es decir, los descartes de paquetes debidos a colisiones son esporádicos fruto del azar en el acceso al medio.

Ante este caso, la prioridad no será maximizar el caudal cursado, ya que no nos encontramos en un estado de congestión y en consecuencia los nodos están cursando todo el tráfico deseado. Sin embargo si resultaría interesante disminuir el retardo en la medida de lo posible. La mejor opción consistiría en trabajar con valores mínimos de los parámetros de configuración *Ventana de Contienda mínima* (CWmin) y *Tiempo de espera entre-tramas* (AIFS). De esta forma al reducir el tiempo de acceso al medio, estaremos reduciendo igualmente el retardo que puedan sufrir los paquetes.

En este primer caso la mayor complicación consistirá en decidir si la red se encuentra en modo de saturación o no-saturación. Debemos tener en cuenta que siempre que una estación reciba una trama correctamente está obligado a asentirla a través del envío de un paquete ACK. Si se produjese una colisión esta trama no sería enviada.

En realidad el estándar 802.11e define un modo de operación que permite no enviar tramas de asentimiento de forma que se mejoran las prestaciones de la red a costa de anular el

control de tramas. Este modo de funcionamiento se estudia en [Prado2004]. En cualquier caso para el estudio de esta tesis seguiremos el modelo tradicional basado en el asentimiento de cada trama enviada.

Cada estación origen debe comprobar si ha recibido la trama de asentimiento, de forma que es consciente del número de tramas perdidas, ya sea debido a colisiones, ruido o interferencias. La estación móvil deberá reenviar esta información periódicamente al punto de acceso para que este sea consciente del estado de saturación de la red (ver Tabla 3-2).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_VO	Indiferente	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Minimizar CWmin
AC_VI	Indiferente	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Minimizar CWmin
AC_BK	Indiferente	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Minimizar CWmin
AC_BE	Indiferente	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Minimizar CWmin

Tabla 3-2. Tabla de mapeo y comportamiento (no saturación)

Presencia exclusiva de tráfico EF en saturación

Ante la presencia únicamente de tráfico EF en la red, la arquitectura debería maximizar el caudal máximo cursado, y de igual forma reducir el retardo que sufren los paquetes al atravesar la red. Para lograr este objetivo reduciremos el valor de AIFS al mínimo y usaremos el parámetro CWmin para optimizar el acceso en función del número de nodos conectados al punto de acceso (ver Tabla 3-3).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_VO	EF	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones

Tabla 3-3. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo EF)

Presencia exclusiva de tráfico BE en saturación

Este caso resulta muy similar al previo en el que sólo aparecía tráfico EF. En la medida en que conocemos que en la red sólo aparecerá tráfico etiquetado como Best Effort, podremos eliminar las restricciones derivadas de la necesidad de priorización de unos flujos sobre otros, en este sentido podremos minimizar el parámetro de acceso AIFS logrando tiempos de acceso al canal menores, y en consecuencia aumentando el caudal cursado, a la vez que disminuimos el retardo (ver Tabla 3-4).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_BK	BE	⇒ Minimizar AIFS ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones

Tabla 3-4. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo BE)

Presencia exclusiva de tráfico AF en saturación

Al igual que sucedía anteriormente debido a la presencia exclusiva de tráfico Assured Forwarding, las restricciones de priorización desaparecerán parcialmente. En este nuevo caso debemos ser conscientes de que el tráfico AF se divide en varias subclases en función de la configuración del administrador, y de igual forma se asignan diferentes prioridades de descarte. Dando lugar de esta forma a las subclases: AF1x, AF2x, AF3x y AF4x.

Teniendo en cuenta que el mecanismo de acceso al canal definido por el estándar 802.11e nos proporciona cuatro canales de acceso, cada uno con sus propios parámetros de configuración y etiquetados como AC_VO, AC_VI, AC_BE y AC_BK (en orden de mayor a menor prioridad), usaremos estas cuatro colas de acceso para cada uno de las subclases AF.

Tal y como comentamos anteriormente, emplearemos el parámetro AIFS para lograr la relación de flujos deseada en base a un algoritmo realimentado, y seguiremos optimizando el parámetro CWmin en función del número de nodos presentes en la red (ver Tabla 3-5).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_VO	AF1x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones
AC_VI	AF2x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones
AC_BE	AF3x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones
AC_BK	AF4x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones

Tabla 3-5. Tabla de mapeo y comportamiento (sólo AF)

Presencia de tráfico EF y BE en saturación

Este apartado representa el primer caso donde flujos de diferentes clases aparecen conjuntamente en la red. Estamos considerando dos clases completamente opuestas, en cuanto al comportamiento que deberían sufrir, Best Effort y Expedited Forwarding.

Según describe el modelo de servicios diferenciados, el tráfico EF siempre debería ser cursado por delante de cualquier paquete BE, y únicamente en el caso de que existiesen recursos sobrantes, se cursaría el tráfico BE.

El mecanismo de acceso al medio descrito en 802.11e no permite ajustarnos exactamente a este modelo y el comportamiento más parecido que podremos simular será una priorización del tráfico EF respecto del BE lo más ‘radical’ posible.

En este sentido, y según vimos en el apartado anterior, el parámetro de acceso que nos permite lograr una priorización más abrupta entre flujos es el AIFS. Usaremos entonces este parámetro para lograr la priorización del tráfico EF respecto del BE, y se empleará CWmin para

maximizar el caudal cursado según el número de estaciones móviles activas presentes en la red (ver Tabla 3-6).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_VO	EF	⇒ Fijar AIFS bajo ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones
AC_BK	BE	⇒ Fijar AIFS alto ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones

Tabla 3-6. Tabla de mapeo y comportamiento (EF y BE)

Presencia de tráfico EF, AF y BE en saturación

Finalmente abordamos el caso más general posible, en el cual la red está cursando simultáneamente clases de tráfico pertenecientes a los tres modelos descritos por Diffserv (EF, AF y BE).

En primer lugar la primera consideración a tener en cuenta es la necesidad de priorizar los diferentes tráficos de acuerdo a los requisitos indicados por el modelo de servicios diferenciados. En este sentido resultaría necesario cursar en primer lugar todo el tráfico *Expedited Forwarding*, si después de esto existiesen recursos disponibles, se cursaría el tráfico *Assured Forwarding*, y si finalmente siguiesen existiendo recursos se podría cursar el tráfico *Best Effort*.

De acuerdo al mecanismo de acceso proporcionado por 802.11e no podremos recrear exactamente este modelo y lo más que nos podremos acercar a él será a través de una priorización lo más abrupta posible de estos tráficos. Teniendo en cuenta estas consideraciones y según lo descrito en anteriores apartados usaremos el parámetro AIFS para forzar esta priorización entre los diferentes flujos.

Por otro lado, y en la medida en que aparece tráfico *Assured Forwarding* en la red resultará necesario lograr una relación de flujos adecuada entre los mismos según la configuración descrita por el administrador. En este caso y a diferencia de lo que ocurría en el apartado 3.2.2.5, tan sólo dispondríamos de dos colas de acceso (AC_VI y AC_BE) para recrear esa priorización, ya que las otras dos son empleadas por el tráfico EF y BE.

En consecuencia, sólo podremos distinguir entre dos subclases de tráfico *Assured Forwarding*, por lo que crearemos dos ‘grupos’ que consistirán en el tráfico AF1x + AF2x y AF3x y AF4x. En este sentido AF1x y AF2x recibirán el mismo tratamiento y no será posible recrear ninguna relación de flujos entre ambos, y de igual forma sucederá lo mismo entre AF3x y AF4x.

El tratamiento que recibirán estos dos ‘grupos’ será aquel que lleve a lograr la relación de flujos impuesta por la configuración más restrictiva configurada por el administrador de la red. En este sentido, lo más natural sería que la condición más restrictiva sea la impuesta por la relación de flujos que debe existir entre AF1x y AF4x.

Al igual que sucedía en el resto de casos contemplados, se configurará el parámetro CWmin apropiadamente de forma que se maximice el aprovechamiento de los recursos de red según el número de estaciones móviles activas conectadas al punto de acceso (ver Tabla 3-7).

Cola de Acceso	Tráfico Diffserv	Tratamiento
AC_VO	EF	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones
AC_VI	AF1x + AF2x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Fijar CWmin según relación de flujos
AC_BE	AF3x + AF4x	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Fijar CWmin según relación de flujos
AC_BK	BE	⇒ Calcular AIFS de forma dinámica ⇒ Optimizar CWmin según #estaciones

Tabla 3-7. Tabla de mapeo y comportamiento (EF, AF y BE)

3.2.1.3 Configuración de elementos de red

Una vez se han calculado los parámetros óptimos es necesario transmitir los mismos hasta los clientes para que estos configuren las colas de acceso con los nuevos parámetros, y que de esta forma los cambios sean efectivos.

El nuevo estándar 802.11e proporciona mecanismos para transmitir esta información desde el punto de acceso a las diferentes estaciones móviles conectadas al mismo. Y en este sentido reserva algunos campos dentro del protocolo que describe para almacenar dicha información.

El envío de esta información puede realizarse en las tramas de *beacon*, tal y como se describe en el estándar [IEEE80211e] en la sección 7.2.3.1. En este apartado se describe un nuevo campo denominado ‘EDCA Parameter Set’ que podrá ser utilizado por el Punto de Acceso para el envío de información de configuración de las diferentes ACs en los terminales móviles.

Esta misma información está presente en los mensajes de asociación y reasociación. De esta forma el punto de acceso tiene la posibilidad de establecer una configuración inicial en el terminal móvil cada vez que este se conecta a la red.

En el apartado 7.3.2.14 se define la información que se podrá intercambiar en el elemento ‘EDCA Parameter Set’ y que reproducimos en la figura 3-5.

Element ID (1 byte)	Length (1 byte)	QoS Info (1 byte)	Reserved (1 byte)	AC_BE Parameter Record (4 bytes)	AC_BK Parameter Record (4 bytes)	AC_VI Parameter Record (4 bytes)	AC_VO Parameter Record (4 bytes)

Figura 3-5. Elemento ‘EDCA Parameter Set’

Como podemos apreciar la información relativa a los parámetros de configuración se incluye en los campos ‘Parameter Record’ que consisten en un registro de parámetros de tamaño 4 bytes para cada una de las categorías de acceso configuradas en los terminales móviles.

La información almacenada en estos registros se descompone de la siguiente manera, según indica la figura 3-6.

ACI/AIFSN (1 byte)	ECWmin/ECWmax (1 byte)	TXOP Limit (2 bytes)
-----------------------	---------------------------	-------------------------

Figura 3-6. Parámetros EDCA

Los parámetros de interés para nuestra arquitectura se encuentran almacenados en los campos ACI/AIFSN y ECWmin/ECWmax. Los primeros 4 bits del campo ACI/AIFSN se corresponden con el campo AIFSN e indican el número de slots, después de un periodo SIFS, tras los cuales cualquier estación diferente del AP tendrá que esperar antes de comenzar el proceso de *backoff* o comenzar la transmisión.

La información relativa a los tamaños de ventana de contienda mínimo y máximo están codificados en el campo ECWmin/ECWmax, de forma que los primeros 4 bits indican el campo ECWmin y los 4 últimos bits se corresponden con el campo ECWmax. La equivalencia entre estos valores y los parámetros de acceso CWmin y CWmax viene determinada por las siguientes ecuaciones.

$$CWmin = 2^{ECWmin} - 1$$

$$CWmax = 2^{ECWmax} - 1$$

A modo de ejemplo podemos apreciar la configuración por defecto correspondiente a cada una de las colas de acceso (ver Figura 3-7).

AC_VO:	AIFSn = 2,	CWmin = 3,	CWmax = 7
AC_VI:	AIFSn = 2,	CWmin = 7,	CWmax = 15
AC_BE:	AIFSn = 3,	CWmin = 15,	CWmax = 1023
AC_BK:	AIFSn = 7,	CWmin = 15,	CWmax = 1023

Figura 3-7. Parámetros de acceso por defecto

El uso del elemento '*EDCA Parameter Set*' disponible en las tramas de *beacon* permitirá no sobrecargar la red con nuevos mensajes creados ex profeso para el envío de la configuración. En su lugar, simplemente ampliaremos las tramas de *beacon* con 20 bytes que contendrán la configuración de todos los elementos de red.

El tamaño de una trama de *beacon* es variable y depende de la información básica transportada y de las extensiones específicas del fabricante. A modo de ejemplo en las tramas de *beacon* empleados en la red de acceso wireless de la Universidad Carlos III de Madrid, el nuevo elemento '*EDCA Parameter Set*' implicaría un 10% de peso respecto de la trama de *beacon* original.

3.2.2 Descripción de módulos

En este apartado se realiza una descripción detallada de los diferentes módulos que se integran en los elementos de la arquitectura de red de acceso. Se realiza un análisis de la información que tendrá que gestionar cada uno de estos elementos, así como las principales funciones que realiza.

La descripción se realiza a través de los dos elementos de red presentes en la arquitectura: Terminales móviles y Punto de acceso.

3.2.2.1 Terminal Móvil

Un terminal móvil es una estación definida en el estándar 802.11e – STA – capaz de enviar y recibir información hacia el punto de acceso.

Módulo de configuración de tarjeta

Este módulo será responsable de configurar los parámetros de la tarjeta de red de acuerdo a la configuración recibida desde el módulo de recepción de mensajes. El módulo de configuración de tarjeta permite configurar los siguientes parámetros 802.11e:

AIFS – Intervalo de tiempo entre-tramas ajustable
CWmin – Tamaño de Ventana de Contienda mínimo
CWmax – Tamaño de Ventana de Contienda máximo
TXOP – Oportunidad de transmisión

De igual forma, este modulo esta encargado de recoger periódicamente información relativa a número de descartes de tramas provocados por colisiones con otras estaciones. Esta información será transmitida al punto de acceso y almacenada en la base de datos, de forma que el módulo de procesamiento pueda hacer uso de la misma cuando lo considere necesario.

Los mensajes de configuración que se esperan recibir del módulo de recepción de mensajes se encuentran definidos en el apartado de interfaces.

Módulo de envío/recepción de mensajes

Este módulo será el encargado de recibir los mensajes de configuración que el punto de acceso pudiese decidir enviar en cualquier momento. Estos mensajes serán transferidos al módulo de configuración de tarjeta y quedaremos a la espera de un mensaje de asentimiento.

Utilizaremos el primer mensaje de datos que desee transmitir la estación para mandar información sobre el resultado de la solicitud de configuración de parámetros. El uso de un paquete de datos para el envío de esta información mejora notablemente el aprovechamiento de los recursos.

Los mensajes que este módulo envía y los que espera recibir se encuentran definidos en el apartado de interfaces.

Módulo de marcado (opcional)

Este módulo será el responsable de marcar adecuadamente los diferentes flujos de tráfico generados por el terminal móvil a través del código DSCP. Este valor será el que identifique el tratamiento que dicho flujo debe recibir en los diferentes componentes de conmutación de la red.

Este componente se considera opcional, ya que si las aplicaciones utilizadas son conscientes de la presencia de una red Diffserv (*Diffserv-aware*), ellas mismas serán responsables de identificar adecuadamente el tráfico. Si por el contrario las aplicaciones no fuesen capaces de realizar esta labor, sería necesaria la instalación y configuración del módulo de marcado, para que este identifique los flujos según los criterios del usuario.

El funcionamiento de este módulo se basará en la definición de reglas de marcado. La sintaxis de estas reglas permitirá identificar un flujo de tráfico a través de la información contenida en los paquetes de información:

1. Dirección IP origen
2. Dirección IP destino
3. Puerto TCP/UDP origen
4. Puerto TCP/UDP destino
5. Campo de protocolo Ethernet
6. Campo de protocolo IP

Este módulo puede ampliarse para el uso de cualquier tipo de información contenida en los paquetes transmitidos para el diseño de las reglas de marcado.

Una vez un flujo ha sido identificado según una determinada regla de marcado entonces se procederá a su marcado con el código DSCP indicado.

Las reglas de marcado serán configuradas por el administrador de la red a través del punto de acceso. Si bien el administrador podría permitir a los usuarios individualmente definir sus propias reglas de marcado.

Los mensajes que este módulo intercambia con el módulo de envío/recepción de mensajes están definidos en el apartado de interfaces.

3.2.2.2 Punto de acceso

Nodo central definido en el estándar 802.11e – AP – capaz de recibir y enviar tráfico hacia los terminales móviles.

Módulo de captura de red

Este módulo será el encargado de realizar un procesamiento no intrusivo de todos los mensajes que lleguen al punto de acceso para la obtención de medidas estadísticas que serán almacenadas en la base de datos.

Para la obtención de estas medidas será necesario analizar el código DSCP que identifique cada paquete así como la dirección MAC de la estación origen. Esta información será enviada de forma periódica a la base de datos.

Módulo de base de datos

Este módulo almacenará la información proporcionada por el módulo de captura de red, de forma que esta información sea accesible por el módulo de cálculo cuando sea requerida.

Esta información será almacenada de forma dinámica solicitando la memoria necesaria cada vez que sea preciso crear un nuevo registro. El número de usuarios en una red inalámbrica

no suele ser muy elevado ya que las prestaciones disminuyen drásticamente con una carga demasiado elevada, por lo que la memoria requerida para almacenar esta base de datos será muy pequeña. Más adelante cuantificaremos este valor por su posible interés para una implementación del punto de acceso.

La información que se almacenaría en la base de datos sería la siguiente:

Para cada estación móvil
Dirección MAC
Tasa de transmisión configurada
Caudal generado (kbps)
% uso y descartes de tráfico EF
% uso y descartes de tráfico AF _{1x}
% uso y descartes de tráfico AF _{2x}
% uso y descartes de tráfico AF _{3x}
% uso y descartes de tráfico AF _{4x}
% uso y descartes de tráfico BE
Marca de tiempo con último registro de actividad

La dirección de nivel de enlace (MAC) se emplea como identificador del dispositivo móvil, y permite mantener una asociación entre las estadísticas recogidas y el nodo generador. Esto podría resultar especialmente interesante en el caso de la coexistencia con clientes no compatibles con 802.11e, ya que el tráfico generado por estos clientes no estará usando los parámetros de acceso que debería indicar el código Diffserv (DSCP).

Estadísticas globales
Clientes
BW empleado
% uso y descartes de tráfico EF
% uso y descartes de tráfico AF _{1x}
% uso y descartes de tráfico AF _{2x}
% uso y descartes de tráfico AF _{3x}
% uso y descartes de tráfico AF _{4x}
% uso y descartes de tráfico BE

La marca de tiempo con último registro de actividad sobre cada estación conectada a la red permite tener una estimación de los clientes potencialmente activos, dato que resulta de gran interés para el cálculo de la configuración óptima.

Módulo de Procesamiento de Información

Este módulo será responsable de acceder a la información estadística de tráfico en red disponible en la base de datos, y en base al perfil de red actual definido por el administrador calcular los parámetros de configuración óptimos para las estaciones móviles de la red.

El objetivo del cálculo de estos parámetros de acceso (AIFS, CWmin, CWmax) será el identificado por el perfil de red seleccionado por el administrador. De forma que este objetivo podría consistir, por ejemplo, en maximizar la tasa de transmisión al punto de acceso, priorizar el tráfico EF respecto a cualquier otro, o mejorar el rendimiento global de la red; por citar algunos ejemplos.

Una vez que este módulo ha obtenido los parámetros adecuados, estos se comunicarán al módulo de envío para proceder a su difusión en la red.

Módulo de envío

Este módulo será el responsable de transmitir los parámetros de configuración a los clientes, y asegurarse de que estos están siendo empleados por todas las estaciones. Será necesario implementar algún medio de asentimiento, de forma que podamos asegurar que todas las estaciones han recibido correctamente estos parámetros y reponerse frente a problemas como estaciones en modo ahorro de energía, o estaciones fuera del área de cobertura, etc.

El envío de esta información se realizará de acuerdo a lo establecido por el estándar 802.11e. De forma que esta información viajará como elementos de información de las tramas de *beacon* que manda periódicamente el punto de acceso.

Los mensajes que este módulo genera se encuentran definidos en el apartado de interfaces.

Módulo de gestión

Este módulo permitirá al administrador de la red configurar la gestión de la misma seleccionando para ello alguno de los perfiles de trabajo disponibles. Este módulo representa el interfaz entre el administrador y la red. La gestión del mismo se deja abierta y podría realizarse localmente a través de ficheros de configuración o remotamente proporcionando acceso a estos perfiles a través de un interfaz web o SMTP.

La estructura modular empleada en la definición de la arquitectura permite la futura inclusión de nuevos perfiles de trabajo con un esfuerzo mínimo. Los perfiles de trabajo predefinidos en la presente tesis, los cuales serán posteriormente validados mediante simulación, son aquellos que se ajustan al modelo de servicios diferenciados. En este sentido se ofrece la posibilidad de priorizar los diferentes grupos, EF, AF y BE, entre sí, y la gestión de cuotas propia del grupo Assured Forwarding.

Por otro lado, el administrador tiene la posibilidad de configurar el módulo de Marcado disponible en cada estación móvil. El módulo de Gestión ofrecerá un interfaz adecuado que permita activar/desactivar las funciones previstas en el módulo de Marcado. En caso de que esta opción se desactive, el usuario será responsable de marcar el tráfico con el código DSCP adecuado al tratamiento que se desea recibir. Si esta opción estuviese activada, será el administrador quien tenga la potestad de definir las reglas de marcado de todos los clientes que forman parte de la red. Estas reglas de marcado podrían estar definidas implícitamente en el perfil de acceso seleccionado previamente por el administrador, o se podrían definir explícitamente a través de otro mecanismo de gestión.

3.2.3 Descripción de interfaces

A continuación describiremos con mayor detalle los interfaces existentes entre los diferentes módulos que conforman la arquitectura de red propuesta en esta tesis. Estos interfaces se encuentran identificados en la figura 3-7, de forma que resulte más sencillo su seguimiento a lo largo de la descripción.

Interfaz TM: ‘Envío/recepción de Mensajes’ – ‘Configuración Driver’

- Mensaje DRV_CONF_REQ - Driver Configuration Request
(byte EDCA_Parameter_Set[4])
- ← Mensaje DRV_CONF_ACK - Driver Configuration Acknowledgement
(Boolean ACK, byte Reason[1])
- ← Mensaje DRV_STAT_REP - Driver Statistical Information Report
(stats Stat_Info[4])

Descripción DRV_CONF_REQ: Este mensaje solicita una reconfiguración de los parámetros de la tarjeta de red al módulo encargado de la configuración de la tarjeta de red. Si la configuración solicitada es diferente a la existente actualmente se procederá a la reconfiguración de los mismos.

Descripción DRV_CONF_ACK: Este mensaje permite indicar si el proceso de reconfiguración concluyó con éxito o si por el contrario no pudo realizarse. Nota: Podría suceder que se tratase de un nodo no compatible con 802.11e, en cuyo caso este módulo así lo indicaría para que el algoritmo lo tuviese en cuenta.

Descripción DRV_STAT_REP: Este mensaje es utilizado para el envío de las estadísticas relativas al número de descartes de tramas provocados por colisión. Esta información debe ser almacenada en la base de datos del punto de acceso para su posterior tratamiento.

Interfaz TM: ‘Envío/recepción de Mensajes’ – ‘Marcado’

- Mensaje MARK_CONF_REQ - Marking Configuration Request
(text mark_req[])
- ← Mensaje MARK_CONF_ACK - Marking Configuration Acknowledgement
(Boolean ACK, byte Reason[1])

Descripción MARK_CONF_REQ: Este mensaje solicita una reconfiguración del módulo de marcado, indicando la nueva política a través de una lista con las nuevas reglas de marcado.

Descripción MARK_CONF_ACK: Este mensaje permite indicar si el proceso de reconfiguración de las reglas de marcado concluyó con éxito, o si por el contrario hubo algún tipo de problema.

Interfaz AP: ‘Captura de Red’ – ‘Base de Datos’

- Mensaje DATA_REP - Data Report
(byte Stat_Report[])
- ← Mensaje DATA_REP_CONF - Data Report Configuration
(byte Freq[1])

Descripción DATA_REP: Este mensaje lo emplea el módulo de captura de red para mandar un resumen de las estadísticas de red que se han observado durante el último intervalo de tiempo.

Descripción DATA_REP_CONF: Este mensaje es utilizado por el módulo Base de Datos para configurar la frecuencia de envío de estadísticas por parte del módulo Captura de Red’.

Interfaz AP: ‘Envío/recepción de Mensajes’ – ‘Captura de Red’

→ Mensaje DATA_REP - Data Report
(byte Stat_info[4])

Descripción DATA_REP: Este mensaje transporta información enviado por el terminal móvil relativa al número de descartes de tramas por colisión provocados en cada dispositivo móvil. De esta forma el módulo de ‘Captura de Red’ reagrupará toda la información estadística antes de suministrársela a la Base de Datos.

Interfaz AP: ‘Gestión’ – ‘Base de Datos’

→ Mensaje DB_CONF - Data Base Configuration
(byte Freq[1])

Descripción DB_CONF: Este mensaje permite al módulo de gestión identificar el modo de funcionamiento de la base de datos, configurando parámetros como la frecuencia de extracción de estadísticas.

Interfaz AP: ‘Procesamiento’ – ‘Base de Datos’

→ Mensaje REQ_STATS - Request Statistics
(void)
← Mensaje STATS_REP - Stats Report
(byte Stat_info[])
← Mensaje DATA_REP - Data Report
(void)

Descripción REQ_STATS: Este mensaje es utilizado por el módulo de procesamiento para solicitar las estadísticas más actuales almacenadas en el módulo Base de Datos.

Descripción STATS_REP: Este mensaje se utiliza como respuesta al mensaje REQ_STATS para enviar el resumen de estadísticas desde la base de datos al módulo de Procesamiento.

Descripción DATA_REP: Este mensaje lo utiliza el módulo Base de Datos para informar al módulo de Procesamiento sobre un cambio relevante en las condiciones de carga de la red. Ante la llegada de este mensaje el módulo de Procesamiento tiene la posibilidad de solicitar las nuevas condiciones mediante el mensaje de solicitud REQ_STATS.

Interfaz AP: ‘Procesamiento’ – ‘Gestión’

← Mensaje PROFILE_CONF - Profile Configuration
(byte Policy[2])
← Mensaje MARK_CONF_REQ - Marking Configuration Request
(text Text[])
→ Mensaje MARK_CONF_ACK - Marking Configuration Acknowledgment
(Boolean ACK, byte Reason[2])
→ Mensaje STATUS_REP - Status Report
(byte Report[2])

Descripción PROFILE_CONF: Este mensaje permite al módulo de Gestión configurar el modo de funcionamiento del módulo de Procesamiento de acuerdo con la política seleccionada por el administrador de la red a través del módulo de gestión.

Descripción MARK_CONF_REQ: Este mensaje solicita una reconfiguración del módulo de marcado, indicando la nueva política a través de una lista con las nuevas reglas de marcado.

Descripción MARK_CONF_ACK: Este mensaje permite indicar si el proceso de reconfiguración de las reglas de marcado concluyó con éxito, o si por el contrario hubo algún tipo de problema.

Descripción STATUS_REP: Este mensaje permite al módulo de Procesamiento informar al administrador a través del módulo de gestión sobre cualquier incidencia que pueda ocurrir en la red.

Interfaz AP: ‘Procesamiento’ – ‘Envío/recepción de Mensajes’

- Mensaje DRV_CONF_REQ - Driver Configuration Request
(byte StationID[6][#nodos],
byte EDCA_Element_Set [4][#nodos])
- ← Mensaje DRV_CONF_ACK - Driver Configuration Acknowledgement
(byte StationID[6][#nodos], text Reason[])
- ← Mensaje MT_CONF_REQ - Mobile Terminal Configuration Request
(byte StationID[6])
- ← Mensaje MARK_CONF_REQ - Marking Configuration Request
(byte StationID[6], text Conf_Req[])
- Mensaje MARK_CONF_ACK - Marking Configuration Acknowledgement
(Boolean ACK, text Reason[])

Descripción DRV_CONF_REQ: Este mensaje es utilizado por el módulo de procesamiento para solicitar la reconfiguración de los parámetros de acceso de los clientes conectados a la red de acuerdo al perfil seleccionado por el administrador y a los niveles de carga de la red disponibles en el módulo Base de Datos.

Descripción DRV_CONF_ACK: Este mensaje permite conocer el resultado de la solicitud de reconfiguración por parte de los clientes.

Descripción MT_CONF_REQ: Este mensaje indica que un determinado cliente ha solicitado los parámetros con los que debe configurar su tarjeta de red. Este mensaje puede deberse a que un nuevo nodo ha entrado en la red, o a que se ha reactivado tras un periodo en el estado ‘ahorro de energía’.

Descripción MARK_CONF_REQ: Este mensaje solicita una reconfiguración del módulo de marcado, indicando la nueva política a través de una lista con las nuevas reglas de marcado.

Descripción MARK_CONF_ACK: Este mensaje permite indicar si el proceso de reconfiguración de las reglas de marcado concluyó con éxito, o si por el contrario hubo algún tipo de problema.

Interfaz AP-MT: ‘Envío/recepción de Mensajes AP’ – ‘Envío/recepción de Mensajes MT’

- Mensaje DRV_CONF_REQ - Driver Configuration Request
(byte StationID[6][#nodos],
byte EDCA_Element_Set [4][#nodos])
- ← Mensaje DRV_CONF_ACK - Driver Configuration Acknowledgement
(byte StationID[6][#nodos], text Reason[])
- ← Mensaje MT_CONF_REQ - Mobile Terminal Configuration Request
(byte StationID[6])
- Mensaje MARK_CONF_REQ - Marking Configuration Request
(byte StationID[6], text Conf_Req[])

- ← Mensaje MARK_CONF_ACK - Marking Configuration Acknowledgment
(Boolean ACK, text Reason[])
- ← Mensaje DRV_STAT_REP - Driver Statistical Information Report
(byte Stat_Info[4])

Este interfaz es el que permite el envío de información entre el punto de acceso y los diferentes terminales móviles registrados en la red de acceso.

De cara a la implementación de esta interfaz se ha realizado un estudio de los mensajes definidos en el estándar 802.11e [IEEE80211e] de forma que la arquitectura propuesta pueda hacer uso del protocolo descrito en el estándar.

3.2.4 Casos de Uso

En este capítulo se describirán las principales tareas de gestión/operación que pueden aplicarse sobre la red. Se describirán las mismas y se incluirá un diagrama de secuencia de mensajes donde se refleja la información intercambiada entre los diferentes módulos que componen la arquitectura para lograr el objetivo indicado en el caso de uso.

A) Nuevo nodo ingresa en la red y solicita reconfiguración

Descripción: Un nuevo terminal móvil se registra en la red, y en consecuencia, conserva los parámetros de acceso que empleo durante su último registro. Para actualizar estos parámetros y asegurarse de que trabaja en unas condiciones óptimas solicita una actualización de los mismos. Este mensaje que origina el módulo Configuración de Tarjeta (*driver*) alcanzará el módulo de Procesamiento del punto de acceso, resultando en un nuevo mensaje de configuración con los parámetros de acceso actualizados (ver figura 3-8).

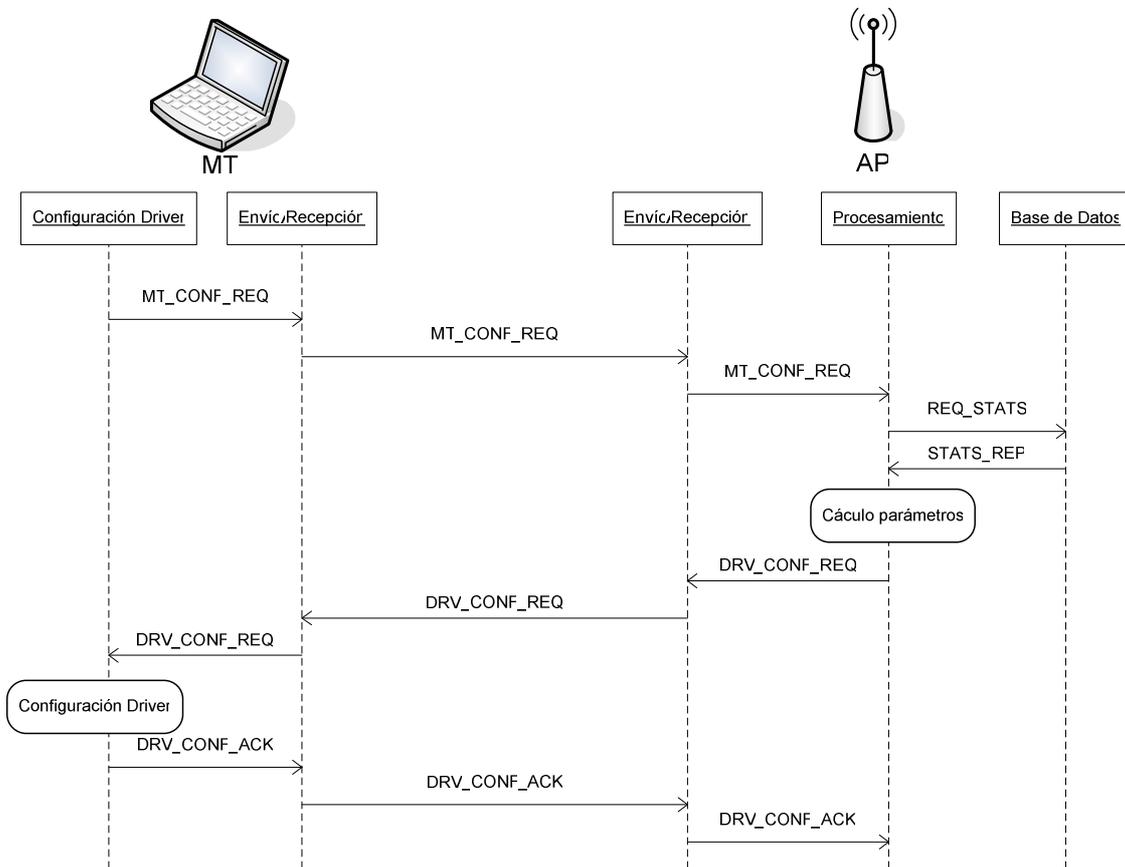


Figura 3-8. Caso de uso A) Nuevo nodo ingresa en la red

Notas:

- El nodo podría decidir solicitar la actualización de los parámetros tras volver del modo ‘Ahorro de Energía’, durante el cual no recibía los mensajes de reconfiguración.
- Si los parámetros recibidos coincidiesen con los que actualmente tiene configurados no procedería a reconfigurarlos, evitando el reseteo de las colas de transmisión.

B) Administrador modifica perfil de la red

Descripción: El administrador de la red decide modificar el perfil de la misma por otro más adecuado a las necesidades actuales de los clientes. Esta solicitud provoca una petición de estado de la red al módulo Base de Datos, y en función de los resultados obtenidos genera una nueva configuración. Finalmente solicita una reconfiguración de los parámetros de acceso de los clientes de la red de acceso (ver figura 3-9).

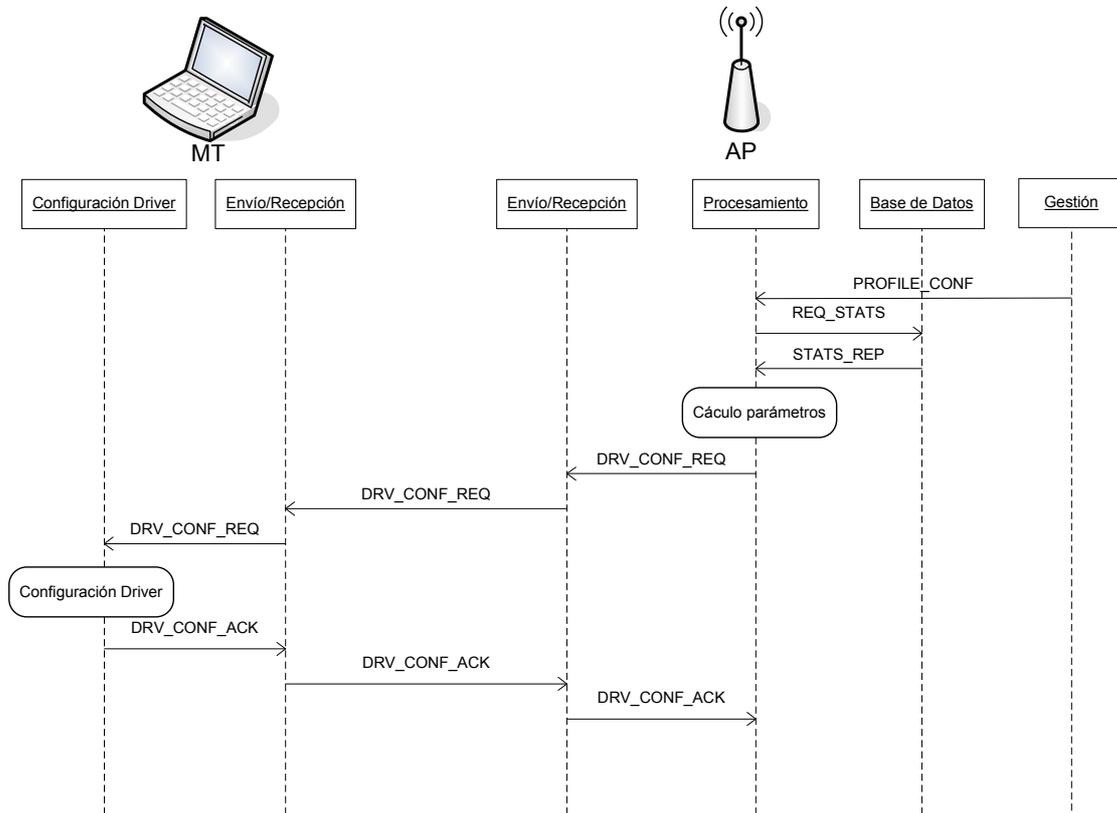


Figura 3-9. Caso de uso B) Administrador modifica perfil de la red

Notas:

- La solicitud de estadísticas de la base de datos es opcional y dependerá de cuando se hubiese realizado la última actualización de estado de la red. Si se considera que la información disponible no ha caducado, se procederá directamente al cálculo de parámetros.

C) Administrador modifica sistema de marcado

Descripción: El administrador de la red decide realizar una modificación en las reglas de marcado de tráfico de los clientes. Desde el módulo de gestión está información se transmite hasta alcanzar el módulo de marcado de los clientes conectados a la red, los cuales procederán a realizar los cambios oportunos e informar al punto de acceso sobre los resultados de la operación (ver figura 3-10).

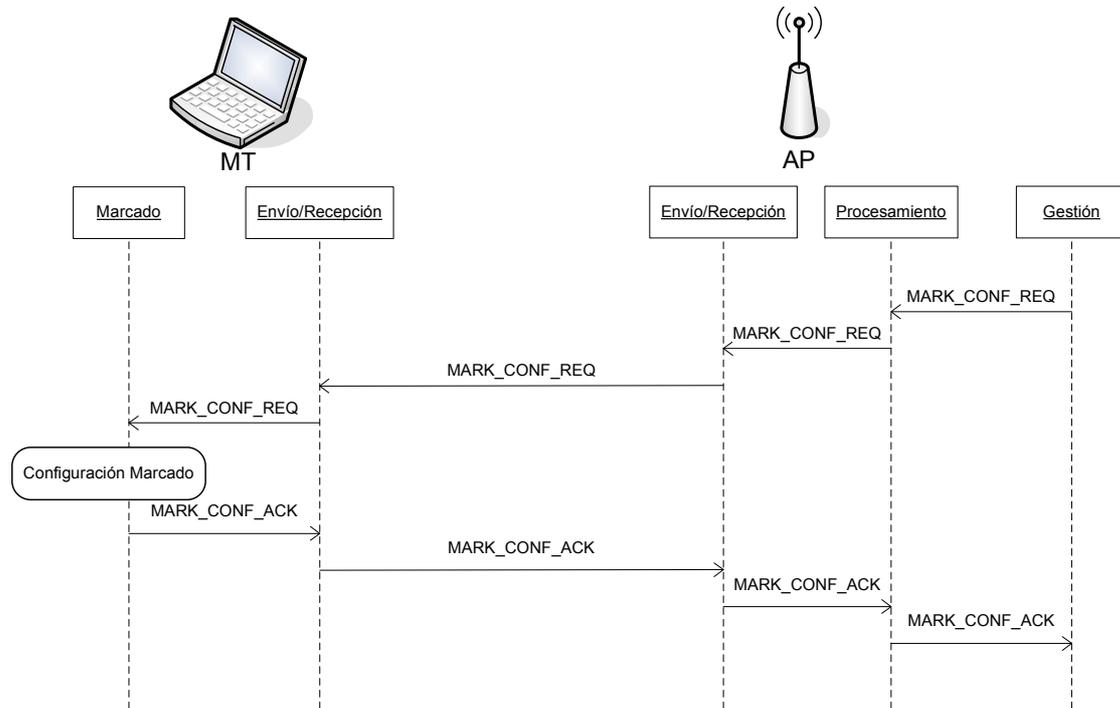


Figura 3-10. Caso de uso C) Administrador modifica sistema de marcado

Notas:

- Proceder a un cambio en las reglas de marcado previsiblemente provocará un cambio en la condiciones de carga de la red. Lo cual podría llevar posteriormente a que el módulo de procesamiento decida realizar una reconfiguración de los parámetros de acceso de los clientes. Esta posibilidad no ha sido recogida en este diagrama de mensajes, si bien se correspondería con el Caso de Uso “D) Modificación de la carga de la red y reconfiguración de los clientes”.

D) Modificación de la carga de la red y reconfiguración de los clientes

Descripción: Las condiciones de carga de la red, o reparto de tráfico entre las diferentes clases Diffserv, se modifican debido a una variación en el tráfico generado por los clientes de la red. Esta variación es registrada por el módulo de Captura, el cual almacena dicha información en el módulo Base de Datos. Este último considera que los cambios acontecidos son suficientemente relevantes y decide informar al módulo de Procesamiento. A partir de este momento se solicitarán las nuevas estadísticas a la base de datos, se calcularán los parámetros óptimos de acceso y se difundirán entre los clientes de la red (ver figura 3-11).

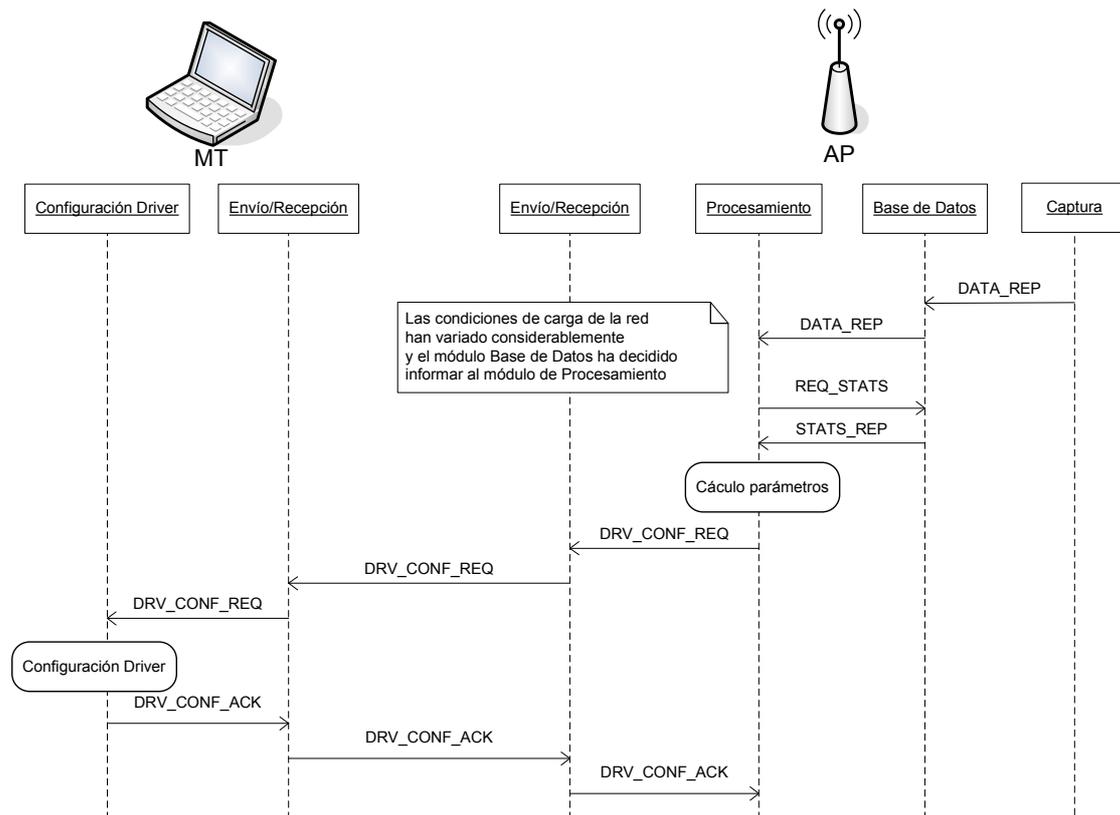


Figura 3-11. Caso de uso D) Modificación de la carga de la red y reconfiguración de los clientes

Notas:

- Si el módulo Base de Datos no hubiese considerado el cambio de las condiciones de red como suficientemente relevantes entonces no habría informado al módulo de Procesamiento. En consecuencia este último no sería consciente de los nuevos cambios hasta que decidiese realizar una consulta por su propia voluntad.

3.2.5 Modo de operación: Perfiles de trabajo

Según indicábamos en la descripción de la arquitectura, el administrador de la red de acceso tiene la posibilidad de elegir el perfil de trabajo deseado para la red de acceso, en función de las necesidades concretas de la misma. Esta funcionalidad dota de una gran versatilidad a la red de acceso permitiendo su utilización en múltiples y diversos escenarios con características completamente diferentes.

La arquitectura en su globalidad ha sido definida de forma que permita realizar cualquier extensión de la misma de una forma cómoda y sencilla. Siguiendo esta filosofía describimos los perfiles básicos de trabajo, dejando las puertas abiertas para la definición e implementación de cualquier nuevo perfil de trabajo que fuese requerido en un futuro.

Los perfiles de trabajo a continuación descritos serán los que usaremos en la etapa de validación descrita en el capítulo 4.

- **Perfil A) Priorización de tráfico:** en este caso la configuración buscada será aquella que conduzca a una priorización entre flujos de acuerdo al modelo de servicios diferenciados. En este sentido cualquier tráfico perteneciente a un grupo de prioridad superior se intentará cursar antes que otro de prioridad inferior siguiendo el orden de prioridades (EF > AF > BE).
- **Perfil B) Reparto proporcional de tráfico:** en este segundo perfil se propone un modelo de funcionamiento ampliamente empleado por los operadores de red y consistente en el esquema empleado por el tráfico *Assured Forwarding*.

Este perfil permite lograr un reparto proporcional de tráfico de acuerdo a una configuración descrita por el administrador de red. De esta forma se destina un número de recursos determinado para cada grupo de tráfico (EF, AF y BE) evitando que un grupo de prioridad superior pueda monopolizar todos los recursos y bloquear el resto de tráficos.

- **Perfil C) Modo mixto:** priorización y reparto proporcional: el perfil mixto permite combinar las funcionalidad de los dos modos descritos anteriormente.

Por un lado se priorizará el tráfico de acuerdo a su pertenencia a cada grupo *Diffserv*, y al mismo tiempo, dentro del grupo *Assured Forwarding* se permitirá realizar un reparto proporcional del tráfico definiendo subgrupos e identificando los recursos destinados a cada uno de ellos.

3.3 Consideraciones especiales

En el presente apartado se analizarán situaciones que requieren un estudio más detallado para su consideración dentro de la arquitectura de red de calidad de servicio propuesta en esta tesis. Continuando el propósito de dotar a la arquitectura de la mayor flexibilidad posible se comentarán los requisitos impuestos por cada situación y como puede ser afrontado dentro de esta arquitectura.

3.3.1 Presencia de nodos no compatibles con 802.11e

La arquitectura propuesta en la presente tesis está orientada a una red donde los clientes tienen la posibilidad de modificar los parámetros de acceso al medio del nivel de enlace, es decir, clientes compatibles con el estándar 802.11e. Sin embargo, se contempla la posibilidad de que clientes compatibles y no compatibles con este estándar coexistan en la misma red, ampliando de esta forma el ámbito de uso de la arquitectura propuesta.

En la fase de especificación de la arquitectura se afrontó la tarea de permitir la coexistencia de ambos tipos de dispositivos móviles, de forma que entre la información registrada se almacena un identificador (MAC) que permita asociar la información estadística registrada con la estación que la generó. A continuación analizamos los efectos provocados por la coexistencia de ambos tipos de nodos en la red de acceso.

Debemos tener en cuenta que nodos no compatibles con 802.11e no serán capaces de priorizar ciertos flujos de tráfico respecto a otros, de forma que todos los flujos generados por uno de estos clientes competirán con el resto de tráfico en las mismas condiciones, independientemente de que se trate de tráfico de mayor o menor prioridad.

El problema es incluso mayor, ya que el nodo podría elegir el código de marcado que considerase más adecuado (DSCP), aunque esto no se correspondería con los parámetros de acceso sugeridos por esta arquitectura. En consecuencia, el módulo de captura presente en el punto de acceso, tendrá que ser capaz de identificar el nodo que genera el tráfico, de forma que pudiese alterar estas estadísticas si dicho nodo no fuese compatible con 802.11e. Hemos utilizado el verbo *alterar*, ya que el módulo de captura deberá indicar que dicho nodo usó los parámetros de acceso de *Best Effort* independientemente del código de marcado que utilizase.

En la figura 3-12 podemos ver un ejemplo de funcionamiento de la arquitectura con nodos compatibles y no compatibles 802.11e coexistiendo. Considerando que MT1 es un nodo compatible con 802.11e y MT2 no, aunque ambos terminales generasen un tráfico similar con diferentes tasas de envío para las diferentes clases de servicios diferenciados, en la base de datos disponible en el punto de acceso, el registro del nodo MT2 siempre indicará que se empleó la clase *Best Effort*.

En realidad, este parámetro es configurable por el administrador de la red, de forma que sería posible que el tráfico generado por un nodo no compatible con 802.11e fuese etiquetado como otro grupo más adecuado, como por ejemplo *Assured Forwarding*,

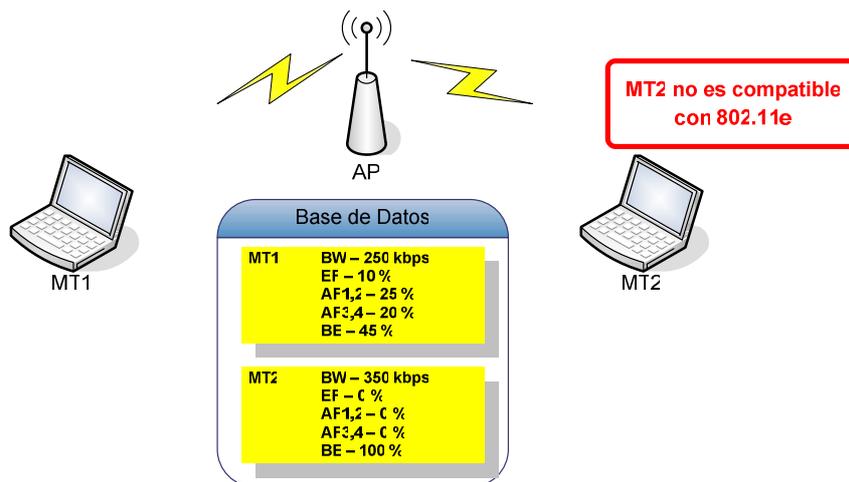


Figura 3-12. Presencia de nodos no compatibles 802.11e

Un nodo no compatible con el estándar 802.11e usará los parámetros de acceso al medio definidos en el estándar 802.11 y que mostramos a continuación.

AIFS = DIFS
 CWmin = 31
 CWmax = 1023

El uso de estos parámetros por defecto implicará que en determinadas ocasiones la red no pueda ajustarse a los requisitos derivados del modelo de servicios diferenciados. De hecho las medidas de uso de la red de acceso se verían alteradas por este tráfico y el algoritmo de cálculo de parámetros de acceso no alcanzaría valores óptimos al estar basado en información errónea.

En consecuencia será necesario que el módulo de recogida de información indique adecuadamente que este tráfico pertenece a un nodo no compatible con el estándar 802.11e, de manera que el algoritmo sea capaz de identificar esta información y procesarla adecuadamente.

3.3.2. Nodos configurados con diferentes tasas de transmisión

La tasa de transmisión que emplea cada dispositivo móvil para comunicarse con el punto de acceso se puede seleccionar dentro de unos valores predeterminados por el estándar. De forma que en base a la relación señal a ruido medida por el cliente se elige la tasa de transmisión más adecuada.

En este sentido conviene resaltar que los clientes que emplean una tasa de transmisión más baja realizan un uso más ineficiente de los recursos disponibles, disminuyendo de esta forma las prestaciones globales de la red.

Se puede optar por diferentes políticas de trabajo en este sentido, por ejemplo priorizando las estaciones con peor tasa de transmisión para equiparar los resultados obtenidos por todos los usuarios, o, al contrario, penalizar a estas estaciones para que perjudiquen lo menos posible al resto de estaciones.

A través de la arquitectura propuesta en esta tesis, el administrador de la red tiene la posibilidad de configurar la política más adecuada para sus necesidades. En el capítulo 4 se llevarán a cabo una serie de simulaciones que muestren las diferencias de rendimiento global en escenarios con clientes configurados a diferentes tasas de transmisión.

3.4 Conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado una descripción detallada de la arquitectura de red propuesta para lograr el objetivo de optimizar los recursos de red proporcionando servicios diferenciados sobre redes de acceso inalámbricas basadas en 802.11e, lo cual constituye la principal aportación de esta tesis doctoral.

En este sentido se han descrito las funciones básicas que debe realizar la arquitectura (Recopilación de Información, Procesamiento de la misma, y Configuración de elementos de red), los módulos que integran cada elemento de la red, y las interfaces necesarias entre los diferentes módulos para el intercambio de información entre los mismos.

- Dentro de la función para la **Recopilación de Información** se han descrito las unidades de información requeridas por la arquitectura para lograr la optimización de recursos y se han identificado los elementos de red encargados de la generación de dicha información.
- Con respecto a la función de **Procesamiento de Información** ofrecemos unas guías básicas de configuración que indican cualitativamente como deberían ser configurados los parámetros de acceso, de forma que en el capítulo 4 se lleva a cabo una cuantificación de los mismos y se procede a validar la arquitectura.
- Finalmente, la función de **Configuración de Elementos de Red** muestra como emplear el protocolo descrito por el estándar IEEE 802.11e para la distribución de esta información de configuración entre los dispositivos que conforman la red. Esta información es transmitida aprovechando las tramas de *beacon*, de forma que el impacto sobre la carga de red es mínimo.

Continuando la especificación de la arquitectura, describimos los diferentes **módulos** que aparecerán en las estaciones móviles y en el punto de acceso, cuyo funcionamiento conjunto permite la provisión de calidad de servicio basada en servicios diferenciados logrando un aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles. De igual forma identificamos los **interfaces** que permiten la comunicación entre los diferentes módulos dentro de cada dispositivo y entre dispositivos y punto de acceso.

La descripción de la arquitectura se completa mediante el análisis de los **casos de uso** que identifican las operaciones de red que mayor impacto tendrán en el funcionamiento de la misma. De esta forma se analizan situaciones como la respuesta de la arquitectura ante variaciones en la carga de red, o ante la solicitud de un nuevo modo de operación por parte del administrador de red.

Finalmente se han considerado algunas situaciones concretas que afectan de manera específica a la red y que deben ser tenidas en cuenta en el diseño de la arquitectura.

Capítulo 4

Validación de la Arquitectura mediante Simulación

4.1 Introducción

En el capítulo anterior de esta tesis se ha descrito la propuesta de arquitectura de red de acceso inalámbrica con soporte de calidad de servicio. Esta arquitectura hace uso de las capacidades que el estándar 802.11e proporciona para ajustar los parámetros de acceso al medio, de forma que mejora el soporte de calidad de servicio para tráfico *Diffserv* respecto al que ofrecen las tarjetas de acceso 802.11.

Para alcanzar este propósito se proporcionan unas guías de configuración de red, que indican como deben ser configuradas las tarjetas de acceso que conformen la red inalámbrica, de manera que se maximicen algunos parámetros como es el caudal efectivo cursado, o se disminuya el retardo entre estaciones.

La descripción de la arquitectura unida al conocimiento del modelo de funcionamiento

de las redes inalámbricas 802.11e, permiten verificar conceptualmente el correcto funcionamiento de la propuesta. De esta forma han sido claramente descritos los beneficios a lo largo del mismo capítulo tres. Sin embargo, resulta de gran interés reproducir la arquitectura inalámbrica en un entorno donde puedan medirse tanto cualitativa como cuantitativamente los beneficios derivados del ajuste automático de los parámetros de acceso.

Debido a la reciente aparición del estándar IEEE 802.11e (Noviembre de 2005), y a que durante la mayor parte del tiempo de desarrollo de la presente tesis, dicho estándar se encontraba en su fase de borrador, resultaba complejo conseguir tarjetas inalámbricas que nos ofrecieran la funcionalidad que buscábamos. En consecuencia, tras una fase de búsqueda de plataformas, se decidió que la vía de la simulación sería la más adecuada para validar el correcto funcionamiento de la arquitectura y de igual forma cuantificar los beneficios derivados de su utilización.

En el presente capítulo se llevará a cabo la validación de la arquitectura propuesta en esta tesis mediante la simulación de escenarios de interés. En un primer apartado se indicará cual fue el simulador elegido para llevar a cabo estas pruebas, y en los sucesivos apartados se analizarán progresivamente por orden de complejidad las recomendaciones propuestas en el anterior capítulo de forma que podamos comprobar de manera cualitativa el correcto comportamiento del sistema, y de forma cuantitativa podamos valorar los beneficios alcanzados.

4.2 Entorno de simulación

El primer paso para proceder a la simulación de los escenarios es elegir un entorno de simulación adecuado que se adapte a nuestras necesidades. En este sentido necesitamos un entorno que cumpla con los siguientes requisitos:

- **Soporte**, al menos parcial, **del estándar 802.11e**: en concreto, a partir de la propuesta de arquitectura, podemos apreciar que necesitamos poder ajustar los parámetros de acceso (tamaño de ventana de contienda y espacio variable entre tramas). Para ello necesitaremos que el simulador tenga algún tipo de soporte del esquema de acceso EDCA definido por el estándar.
- Debe permitir **calcular el rendimiento de la red**: para ello tendremos que medir el caudal efectivo cursado por la red, así como el retardo que sufren las tramas al atravesar la misma.
- **Validación del entorno de simulación**: resultará imprescindible lograr validar los resultados obtenidos con este simulador, de forma que podamos tener una certeza absoluta de que los resultados obtenidos serían los mismos que obtendríamos en un entorno real con tarjetas inalámbricas 802.11e.

Para explicar el porqué de la búsqueda parcial de soporte 802.11e, tenemos que aclarar que durante el desarrollo de la presente tesis, el estándar 802.11e se encontraba en una fase de borrador, donde el documento se encuentra expuesto a constantes cambios. En consecuencia, lo máximo a lo que se podía aspirar es a encontrar un simulador con un soporte adecuado del borrador que en su momento tuviese vigencia.

En este sentido, los principales desarrolladores suelen encontrarse en el ámbito del software libre, que tienen la capacidad de ir modificando sus contribuciones de acuerdo con las constantes revisiones del estándar. Resultaría mucho más complejo encontrar un simulador con

una licencia propietaria que hubiese decidido trabajar sobre el borrador del estándar.

Dentro del mundo del software libre y de los simuladores de redes destaca uno claramente sobre el resto, estamos hablando de NS2 – *Network Simulator* [NS2]. El modelo de trabajo de este simulador permite que la comunidad de desarrolladores puedan realizar sus aportaciones, ya sean grandes o pequeñas, sobre el código fuente que proporcionan. Y en las nuevas revisiones que van surgiendo del simulador se incluyen aquellas contribuciones que más impacto hayan podido tener. Este simulador es de uso común entre la comunidad científica, de forma que gran cantidad de artículos que tratan el tema de redes inalámbricas 802.11e usan este simulador para validar sus resultados.

Una vez escogido el entorno de simulación resultaba necesario buscar una extensión que permitiese la simulación de redes inalámbricas 802.11e. La búsqueda finalizó con pocos resultados, lo que provocó que la elección fuese una tarea sencilla.

La extensión elegida para el soporte de 802.11e se corresponde con un trabajo desarrollado en la Universidad Técnica de Berlín, por el grupo de trabajo TKN – *Telecommunication Networks Group*, cuyos principales contribuidores fueron Sven Wiethölter y Christian Hoene. Esta extensión ofrece soporte para el esquema de acceso EDCF con posibilidad de usar el modo CFB (*Contention Free Bursting*). Si se desea obtener más información sobre este software se puede consultar [NS2-EDCF] o descargar directamente desde [NS2-EDCF-DOWNLOAD].

En el apéndice A titulado “Validación del simulador” encontraremos una guía práctica de instalación, que permitirá a cualquier neófito en el tema disponer de un entorno de simulación adecuado para redes 802.11e. De igual forma en este apéndice se procede a la validación del mismo, de forma que se verifica el correcto funcionamiento del entorno.

4.2.1 Metodología y Consideraciones previas

Resulta necesario describir la metodología de trabajo que seguiremos con el fin de que las simulaciones realizadas tengan una completa validez y representen de la manera más fiel posible los resultados que obtendríamos en escenarios reales.

El simulador de redes que emplearemos, *Network Simulator 2*, permite inicializar la semilla de números aleatorios que se usará para generar secuencias pseudos-aleatorias. De esta forma todas las simulaciones que se realicen obtendrán resultados diferentes en base a la secuencia de números que surja para controlar los procesos aleatorios (p.e. proceso de *backoff*, generación de tráfico aleatoria, etc.).

En base a esta aleatoriedad que presenta cada simulación tendremos que repetir las mismas un número apropiado de ocasiones para obtener unos intervalos de confianza adecuados. El número de repeticiones depende de la desviación típica que tenga la muestra, dato desconocido a priori.

Tras sucesivas pruebas convenimos manejar las siguientes características a fin de lograr unos resultados adecuados a nuestras necesidades:

Número de repeticiones:	30
Intervalo de confianza basado en:	distribución <i>t-student</i>
Margen de error:	97,5%

En base a estos valores y una vez calculados la media y la desviación típica sobre las muestras, los intervalos de confianza vendrán determinados por la ecuación 4-1.

$$\bar{x} \pm \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) t_{1-\alpha/2} = \bar{x} \pm \left(\frac{\sigma}{\sqrt{30}} \right) \cdot 2,045, \text{ donde}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_1^N x_n$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (x_n - \bar{x})^2}$$

Ecuación 4-1. Intervalo de confianza

En aquellos casos en los que el intervalo de confianza dificulte la lectura de la gráfica, y se encuentre acotado en una franja de $\pm 5\%$ respecto de la media, dicho intervalo no será representado en la figura de forma que esta sea lo más clara posible. De esta forma, considerando \bar{x} la media de la muestra, se representarán los intervalos de confianza únicamente si se cumple la ecuación 4-2, o la inclusión del mismo no entorpece el análisis de la gráfica.

$$|IC_S - IC_I| > 0,05 \cdot \bar{x}$$

Ecuación 4-2. Condición de representación de intervalos de confianza

Una vez establecida la metodología de trabajo tenemos que definir los escenarios de trabajo sobre los que se desea trabajar. Una decisión de especial relevancia es la consideración de estudiar la red de acceso en modo de saturación, es decir, vamos a considerar que en todo momento los clientes que acceden a la red tienen una trama dispuesta a ser transmitida al destino. Esta consideración tiene grandes implicaciones a la hora de estudiar como afectan los parámetros de acceso a la red sobre el rendimiento global.

Si analizamos el estado del arte en el análisis de los parámetros de acceso en redes 802.11e veremos como se han estudiado ampliamente en condiciones de saturación. Esta decisión viene principalmente motivada por tratarse de la condición más restrictiva. Estamos analizando el soporte de calidad de servicio sobre una red inalámbrica, y no cabe duda de que el peor caso lo encontraríamos en el momento de congestión/saturación, que será cuando la red se vea obligada a descartar ciertas tramas debido a la imposibilidad de tramitar todo el tráfico inyectado.

En el caso de trabajar con la red en modo de no-saturación, el estudio relativo a la gestión eficiente de recursos perdería parte del interés, ya que resulta menos problemático mantener un cierto nivel de calidad de servicio en el caso de no congestión en la red. Sin embargo, completaremos el estudio realizando ciertas consideraciones para el modelo de no-saturación en los momentos precisos y más interesantes.

Con respecto a los parámetros de configuración del nivel de enlace, provistos por el estándar 802.11e, según adelantábamos en el capítulo anterior, nos centraremos en la utilización de la **Ventana de Contienda Mínima** (CWmin) y el **Tiempo Arbitrario EntreTramas** (AIFS). Estos dos parámetros nos ofrecen suficiente versatilidad para implementar las funciones de priorización y reparto proporcional de caudal, según ha quedado demostrado en diferentes artículos [banchs2005a][Kong2004].

En los diferentes análisis que se desarrollarán en los siguientes apartados no se detallará el valor finalmente empleado para la configuración de dichos parámetros, en su lugar se describirá el método de cálculo empleado, de forma que cualquiera podría repetir el proceso para obtener los valores utilizados en cada simulación.

En las sucesivas simulaciones que realizaremos en el presente capítulo no se procederá a utilizar las técnicas de encolamiento propias del modelo de servicios diferenciados. Existen múltiples estudios que describen las mejores implementaciones para adaptarse a un entorno *Diffserv*. Sin embargo, en esta tesis queremos estudiar detalladamente como influye un sistema de acceso basado en contienda para la consecución de las diferentes características propias del modelo *Diffserv*. En este sentido nos centraremos en el estudio del comportamiento del nivel de enlace obviando los efectos derivados de los niveles de red y transporte.

Finalmente describiremos las características que usaremos por defecto en todos los escenarios considerados en este capítulo para realizar las correspondientes simulaciones.

```
Dispositivos móviles configurados en modo infraestructura (BSS).  
Tasa de transmisión: 11 Mbps  
Mecanismo RTS/CTS: desactivado  
Tamaño de trama: 1500 bytes  
Preámbulo MAC largo: 192 bits  
Tiempo de slot: 10 us  
Retardo de propagación: 2 us  
Intervalo corto entre-tramas (SIFS): 10 us
```

Todos los nodos móviles se encuentran situados virtualmente en el mismo punto junto con el punto de acceso. De esta forma nos centramos en la problemática de envío a nivel de enlace y eliminamos los problemas derivados del medio físico.

De igual forma, se considera un medio libre de ruidos para la transmisión, de manera que el análisis se centra en el comportamiento del nivel de enlace. En este sentido es importante destacar que nunca sufriremos descartes de tramas debido a interferencias (ruido), y los descartes de tramas que se producirán vendrán determinados por las colisiones entre estaciones que eligen el mismo instante de tiempo para comenzar la transmisión.

En la figura 4-1 se refleja la configuración de la red inalámbrica en modo infraestructura.

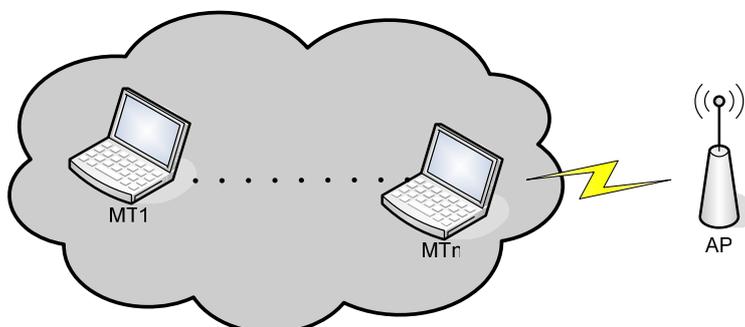


Figura 4-1. Red de acceso inalámbrica en modo infraestructura

4.3 Simulación de la Arquitectura

A continuación analizaremos los resultados derivados del uso de la arquitectura propuesta sobre diferentes escenarios. Estos serán adecuadamente escogidos de forma que se analicen todas las posibles configuraciones que pueden darse en una red de acceso.

Comenzaremos analizando los casos más sencillos, donde sólo exista tráfico perteneciente a un único grupo de los descritos en el modelo de servicios diferenciados, y posteriormente se presentarán escenarios donde interactúen conjuntamente flujos de diferentes grupos.

Siguiendo esta filosofía de análisis se estudiarán los siguientes escenarios:

- **Presencia de tráfico exclusivo de un grupo Diffserv**, ya sea este *Expedited Forwarding*, *Assured Forwarding* o *Best Effort*. En estos casos no aparece involucrada la función de priorización y nos centramos en mejorar el aprovechamiento de los recursos de red.

De momento no se considerarán los subgrupos AF que implicarían una configuración acorde con la distribución de ancho de banda configurada por el administrador.

- **Presencia de tráfico de diferentes grupos Diffserv** al mismo tiempo, que obligue a la red a realizar una priorización adecuada de los flujos de acuerdo a sus prioridades relativas.

Estudiaremos como se realiza el proceso de priorización cuando existen dos grupos Diffserv, y posteriormente lo ampliaremos a los tres grupos definidos en servicios diferenciados.

Al igual que sucedía en el primer escenario no consideraremos los repartos proporcionales de tráfico entre los subgrupos *Assured Forwarding*.

- **Reparto proporcional entre subgrupos *Assured Forwarding***, de forma que la arquitectura deba buscar una configuración que permita obtener unas relaciones de flujos entre los distintos subgrupos *Assured Forwarding* de acuerdo a la configuración indicada por el administrador.

Al no existir otro tipo de grupo *Diffserv* coexistiendo en la red, podremos emplear las cuatro colas de acceso ofrecidas por 802.11e para lograr el reparto proporcional de tráfico. De esta forma otorgaremos una cola de acceso a cada uno de los subgrupos *Assured Forwarding*: AF1x, AF2x, AF3x y AF4x.

- **Reparto proporcional entre subgrupos *Assured Forwarding* junto con priorización** entre diferentes grupos *Diffserv*. Este es el escenario más completo y que abarca todos los anteriores. En este sentido la arquitectura deberá proporcionar al mismo tiempo priorización y reparto proporcional de caudal efectivo.

Ante la presencia de tráfico perteneciente a los tres grupos definidos en el modelo de servicios diferenciados, emplearemos dos de las colas de acceso proporcionadas por 802.11e para permitir un reparto proporcional de tráfico entre subgrupos *Assured Forwarding* (AF12x y AF34x), y las otras dos colas permitirán cursar los flujos *Expedited Forwarding* y *Best Effort*, permitiendo de esta forma implementar la priorización.

4.3.1 Análisis de tráfico perteneciente a un único grupo Diffserv

Para comenzar el análisis partiremos del escenario más sencillo posible, en el cual sólo aparecen flujos pertenecientes a un único grupo Diffserv. En este sentido se analizarán los tres casos posibles donde sólo existe tráfico Expedited Forwarding (EF), Assured Forwarding (AF) o Best Effort (BE).

Tal y como vimos en el capítulo anterior el mapeo propuesto para estos tipos de tráfico, indica que el tráfico EF se cursará a través de la cola más prioritaria definida en 802.11e, AC_VO, el tráfico AF usará las colas de prioridad intermedia, AC_VI y AC_BE, y finalmente, el tráfico BE utilizará la cola de menor prioridad AC_BK. Para dividir el tráfico AF entre las dos posibles colas se sigue la siguiente propuesta [Park2003]: AF1x / AF2x se cursa a través de AC_VI, y AF3x / AF4x utiliza la cola AC_BE.

La configuración que emplearemos para los parámetros de acceso de las diferentes colas de acceso será el descrito por defecto en el estándar IEEE 802.11e, de forma que podamos comprender los efectos derivados de los mismos. Según indicamos en el anterior apartado los parámetros de estudio serán el tamaño de la ventana de contienda mínima y el tiempo variable entre tramas. De forma que reduciremos a cero el valor de oportunidad de transmisión TXOP, para que no interfiera en la interpretación de los resultados y de igual forma fijaremos el tamaño de la ventana de contienda máxima en su valor por defecto. En la tabla 4-1 resumimos los parámetros empleados.

Cola de Acceso	CWmin	CWmax	AIFSn	TXOP
AC_VI	7	15	2	0
AC_VO	15	31	2	0
AC_BE	31	1023	3	0
AC_BK	31	1023	7	0

Tabla 4-1. Configuración de las colas de acceso EDCA

Representaremos el caudal efectivo total en función del número de terminales móviles conectados al punto de acceso, entendiendo como caudal efectivo total la suma de todos los flujos que aparecen en la red de acceso entre los terminales móviles y el punto de acceso.

En este primer caso los clientes tienen configurada una aplicación UDP que genera tráfico a una tasa constante (CBR) y lo suficientemente elevada como para que sature el enlace. En consecuencia en los diferentes nodos tendremos constantemente pérdidas de paquetes, si bien este hecho no nos interesa de momento ya que nos estamos centrando en la medida del caudal efectivo total. El tamaño de paquete utilizado en este caso es de 1500 Bytes, lo que asegura cierta compatibilidad con redes *Ethernet* / 802.3.

También es conveniente que destaquemos que el punto de acceso no está generando ningún tipo de flujo hacia los diferentes nodos asociados (*downlink*). Todo el tráfico presente en la red de acceso es el generado desde los terminales móviles hacia el punto de acceso (*uplink*). En la figura 4-2 se muestra el máximo caudal que se puede cursar en función del número de nodos presentes en la red de acceso.

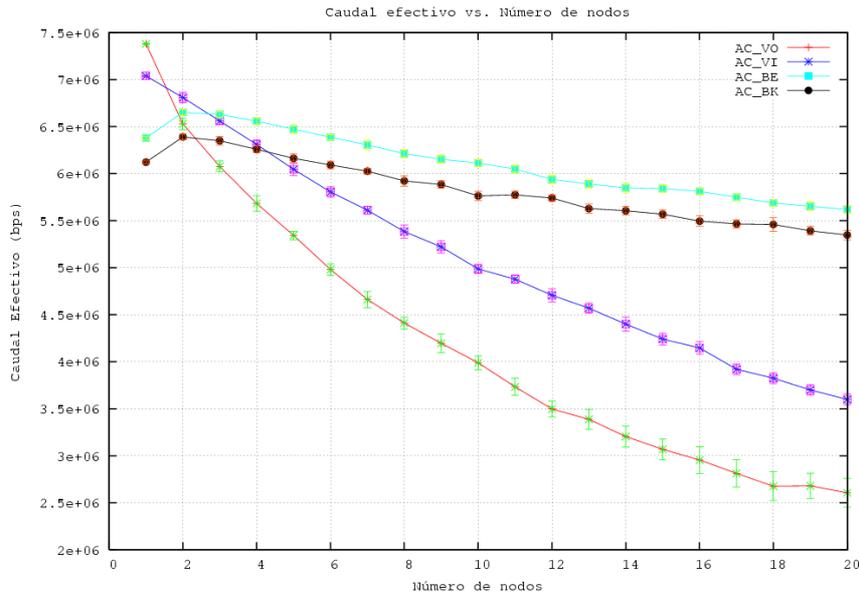


Figura 4-2. Caudal efectivo para cada grupo Diffserv

En primer lugar conviene aclarar que esta figura agrupa los resultados obtenidos a través de la simulación de diferentes escenarios. Durante cada una de las simulaciones individuales se usaban individualmente cada una de las colas de acceso, de forma que no competían entre si.

A través de esta gráfica se puede apreciar el caudal efectivo máximo que puede cursar la red inalámbrica de los nodos móviles al punto de acceso, en función del número de estos. Se pueden extraer interesantes conclusiones que pasamos a comentar a continuación:

- En primer lugar observemos el comportamiento general que siguen todas las colas de acceso. A medida que aumenta el número de nodos existe un mayor número de colisiones y en consecuencia disminuye el caudal efectivo cursado, ya que durante el tiempo empleado en una colisión no se envían datos de interés.

Esta regla se cumple en todos los casos excepto por una pequeña particularidad de las colas de acceso AC_BE y AC_BK. Si apreciamos el caudal cursado por estas colas para un número bajo de nodos, comprobaremos como el caudal efectivo es creciente hasta alcanzar los dos nodos, y posteriormente empieza a decrecer.

Este efecto aparece debido al elevado valor que ambas colas emplean para el tamaño de ventana de contienda mínima. Un valor tan grande provoca que aunque aumente el número de nodos que compiten por el acceso al medio, la probabilidad de colisión siga siendo relativamente baja, y en consecuencia un mayor número de nodos implicará un mejor aprovechamiento del enlace al disminuir el tiempo medio de acceso al canal, y así aumentar la utilización del mismo.

- Una vez analizado el comportamiento general podemos pasar a estudiar el comportamiento relativo entre las diferentes colas de acceso. Las diferencias que observaremos vendrán derivadas principalmente del parámetro ventana de contienda mínimo (CWmin). Recordemos brevemente el valor por defecto de este parámetro para las colas: AC_VO (7), AC_VI (15), AC_BE y AC_BK (31).

Cuando el número de nodos es bajo el número de colisiones será escaso, y en consecuencia el uso de un menor valor de CWmin provocará un mejor aprovechamiento de la red, es decir, mayor caudal efectivo cursado. Sin embargo,

cuando el número de nodos móviles es elevado, se requiere de un valor de CWmin acorde al número de nodos para que las colisiones no aumenten de forma drástica.

Precisamente esto es lo que sucede con AC_VO, y en menor medida con AC_VI. En cuanto el número de nodos aumenta ligeramente, el pequeño valor de configuración de CWmin provoca que aumente considerablemente el número de colisiones disminuyendo el caudal cursado.

Por el contrario, AC_BE y AC_BK, que usan un valor de CWmin relativamente alto, permitirá que el número de colisiones no aumente excesivamente, y en consecuencia un mejor aprovechamiento de la red cuando el número de nodos es elevado.

- Finalmente podemos observar el comportamiento similar que tienen las colas de acceso AC_BE y AC_BK. Recordemos que ambas colas sólo se diferencian en el parámetro de tiempo entre-tramas (AIFS), de manera que AC_BE tiene configurado un valor de AIFSn = 3, mientras AC_BK utiliza AIFSn = 7.

Este valor que indica el tiempo que una estación debe esperar desde que detecta el medio libre hasta que comienza el proceso de *backoff* provoca la ligera diferencia de comportamiento entre ambas colas. De manera que la cola con un menor valor del parámetro AIFS logrará cursar un caudal efectivo mayor gracias al menor tiempo que necesita para acceder al medio.

A través del análisis realizado podemos extraer valiosas conclusiones que nos lleven a lograr una configuración óptima de las colas de acceso en función del número de nodos. Tal y como sugeríamos en el anterior capítulo, en el presente caso, donde sólo aparece un tipo de tráfico Diffserv en la red, el parámetros AIFS puede ser minimizado, ya que se utiliza para priorizar los diferentes flujos entre si. Mientras el parámetro CWmin se puede ajustar en función del número de nodos para lograr maximizar el caudal efectivo cursado.

En la figura 4-3 podemos ver los resultados derivados del uso de esta configuración. En la línea etiquetada como ALG_OPT se representa el caudal efectivo cursado siguiendo las reglas de configuración descritas.

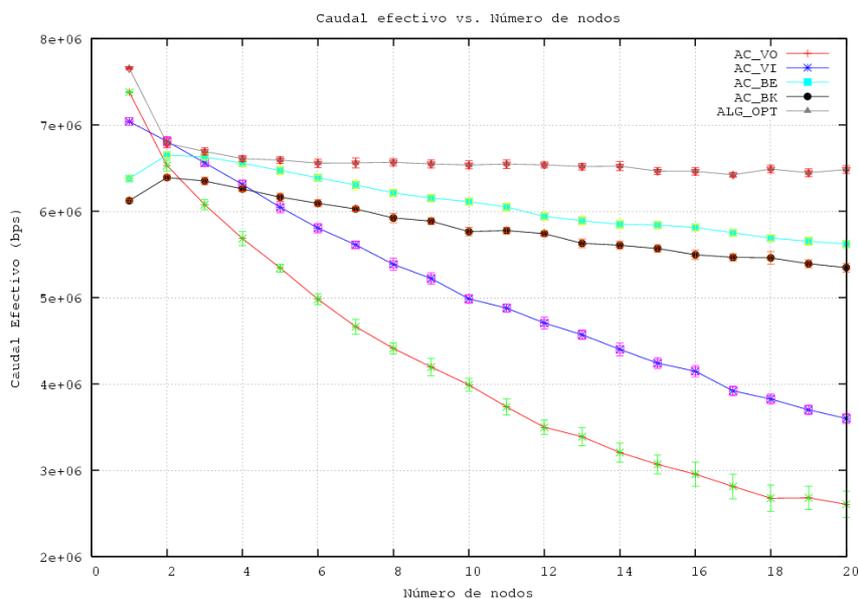


Figura 4-3. Caudal efectivo usando optimización de CWmin y AIFS

Como podemos observar el caudal efectivo cursado es siempre superior o igual al que obtendríamos usando los parámetros por defecto de cualquiera de las colas de acceso. Este aumento es especialmente significativo a medida que aumenta el número de terminales móviles conectados al punto de acceso, llegando a alcanzar una mejora superior al 100% para el caso de 20 terminales móviles respecto a la cola de acceso AC_VO, que sería la utilizada para cursar el tráfico de mayor prioridad (*Expedited Forwarding*).

En la figura 4-4 aparecen los valores de configuración del parámetro Ventana de Contienda mínima utilizados para lograr maximizar el flujo de acuerdo a la situación descrita anteriormente. Como podemos observar este parámetro sólo puede tomar valores discretos dentro de un rango determinado por las potencias de 2 menos 1 (1, 3, 7, 15, 31, 63,...) derivado del esquema de funcionamiento de la capa de acceso al medio de 802.11e.

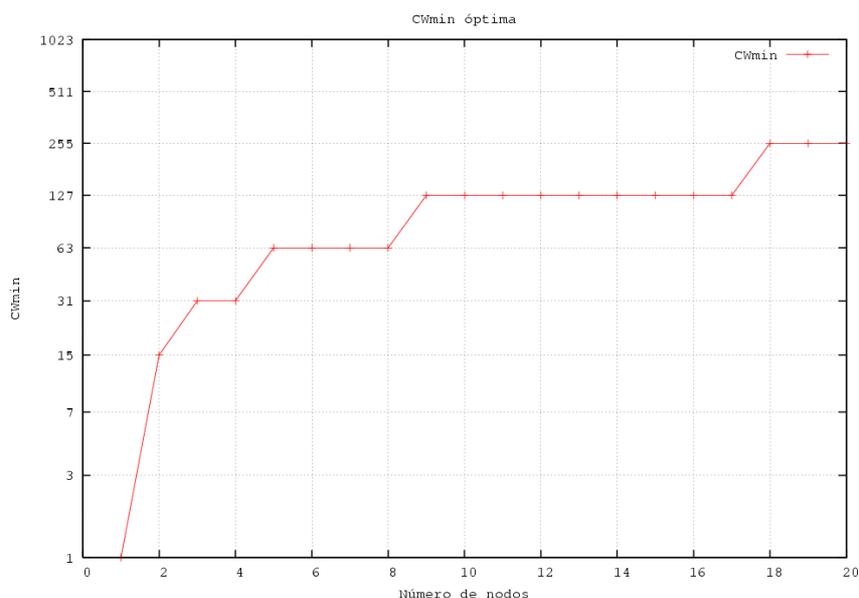


Figura 4-4. Valor de CWmin empleado para la optimización

Estos valores fueron calculados a partir del modelo matemático descrito por Giuseppe Bianchi [Bianchi2000], y que rige el comportamiento de cualquier red inalámbrica 802.11. Se desarrolló una aplicación software que resuelve el modelo matemático a través de sucesivas iteraciones y proporciona el caudal efectivo máximo que puede cursar una red en función de los diferentes parámetros configurables. Se puede encontrar más información sobre esta aplicación en el Apéndice A.

Como cabía esperar, con la intención de maximizar el caudal efectivo cursado, el parámetro CWmin debe incrementarse a medida que aumenta en número de nodos que transmiten contra el punto de acceso. La situación más elemental es aquella en la que sólo hay un nodo, en cuyo caso, y derivado de la inexistencia de colisiones, el valor óptimo de la ventana de contienda será 1.

El caudal efectivo está directamente relacionado con el retardo que sufren las tramas desde que son enviadas hasta que alcanzan al nodo receptor. En este sentido, en la misma medida en que se aumenta el caudal efectivo cursado, estaremos mejorando el retardo, en este caso disminuyéndolo.

Análisis de retardo en condiciones de saturación

Para poder verificar este efecto, en la figura 4-5, representaremos el retardo que sufren las tramas usando las diferentes colas de acceso. Estas simulaciones se realizarán sobre los

mismos escenarios que se utilizaron para medir el caudal efectivo. Y de igual forma se representará el retardo que obtendríamos usando las reglas propuestas para la configuración de CWmin y AIFS.

Debemos tener en cuenta que este retardo está medido a nivel de aplicación, de forma que incorpora un buffer de 50 posiciones a la entrada al nivel de enlace. Como nos encontramos en modo de saturación este buffer siempre se encontrará lleno y la trama deberá esperar a que se vacíe para ser procesada.

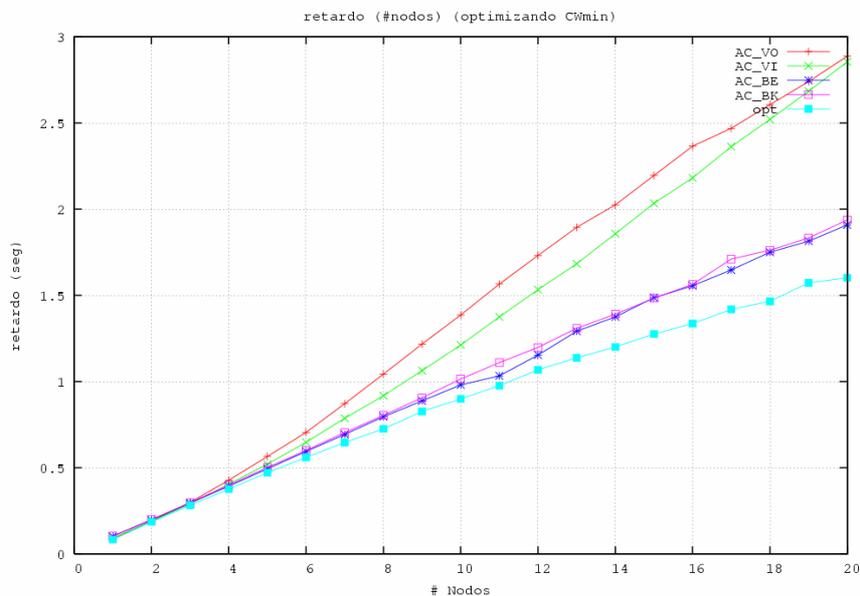


Figura 4-5. Retardo a nivel de aplicación

En base a los resultados obtenidos resulta apropiado realizar algunos comentarios.

- En primer lugar, según cabía esperar, se aprecia como el retardo aumenta de acuerdo con el número de nodos. Evidentemente cuanto mayor es el número de nodos más tiempo tendremos que esperar para acceder al canal, y además aumentará el número de colisiones, factores que llevan a un aumento del retardo medio.
- Volvemos a apreciar el mismo efecto que teníamos al considerar el caudal efectivo, y es que excepto cuando el número de nodos es muy reducido, las colas de acceso menos prioritarias, AC_BE y AC_BK consiguen los mejores valores de retardo. Nuevamente vuelve a deberse al efecto provocado por el aumento de colisiones, que llevan a un desaprovechamiento de los recursos disponibles.

Entre las colas AC_BE y AC_BK la primera tiene un mejor comportamiento derivado del uso de un menor valor de AIFSn, lo que provoca que el retardo para acceder al medio sea menor.

Siguiendo la misma representación que para el caudal efectivo, tenemos una línea etiquetada como ALG_OPT que representa el valor de retardo medio que obtendríamos siguiendo las reglas de configuración descritas anteriormente. Como podemos apreciar esta nueva configuración nos lleva a lograr los mejores resultados en cuanto a retardo se refiere, encontrándonos siempre por debajo de los valores obtenidos usando la configuración por defecto.

- Resulta muy interesante aprovechar los resultados mostrados en esta figura para

indicar que el retardo obtenido en cualquiera de las configuraciones propuestas para un número ‘elevado’ de nodos se encuentra muy por encima de lo que típicamente requeriría la mayoría de aplicaciones multimedia.

Es necesario ser consciente de que estamos simulando un escenario en modo de saturación, donde por defecto todo cliente tiene tráfico que enviar en todo momento. De manera que los resultados mostrados no deben intentar aplicarse fuera del entorno descrito. Más adelante analizaremos otros escenarios donde compiten tráfico de diferentes grupos Diffserv, de forma que el análisis del retardo resulta más interesante.

Análisis de retardo en condiciones de no-saturación

Según comentábamos en la introducción de este capítulo, la situación de no-saturación en la red no es de gran interés para esta tesis ya que representa un caso donde la provisión de calidad de servicio no afronta grandes retos.

En una red en modo no saturación todo el tráfico inyectado por los diferentes clientes será cursado, con lo que el caudal efectivo cursado no aporta ninguna información. Si que será de mayor interés el retardo al que se ven expuestas las tramas para alcanzar el punto de acceso.

A continuación analizaremos el retardo que provoca la red de acceso en función de la cola utilizada para los distintos flujos *Diffserv* en modo no-saturación. En esta situación el buffer de nivel de aplicación se encontrará típicamente vacío, y en consecuencia las tramas accederán automáticamente al canal, a no ser que en ese mismo instante alguna otra estación este transmitiendo alguna trama, en cuyo caso la estación se mantendrá monitorizando el canal.

Simularemos flujos de tráfico EF, AF12x, AF34x y BE con diferente número de clientes, pero ajustando el caudal a un tamaño que no llegue a saturar el enlace (11Mbps). De igual forma se mostrará el retardo que obtendríamos (TEST1) al configurar una cola con los siguientes valores: $CW_{min} = 1$, $AIFS_n = 1$. Los resultados se muestran en las figuras 4-6 y 4-7.

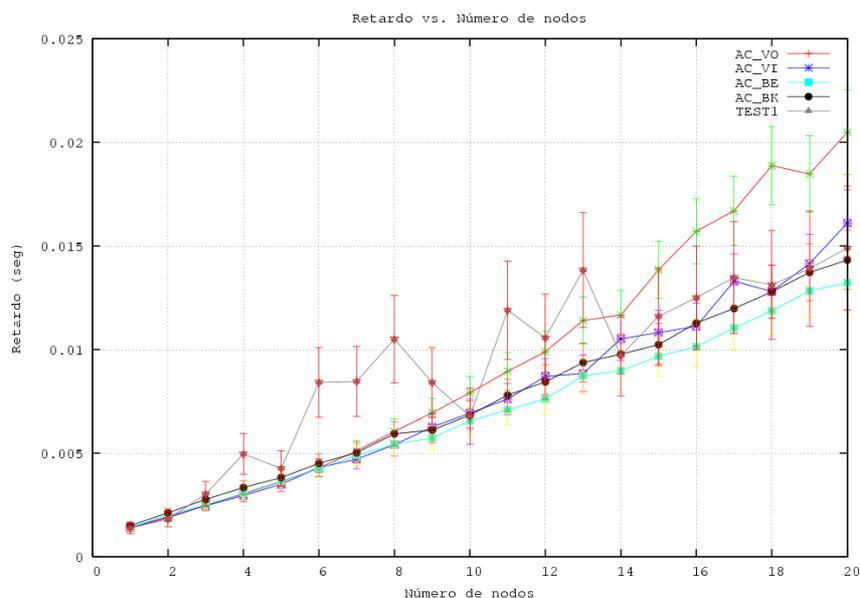


Figura 4-6. Retardo en modo no saturación (con barras de error)

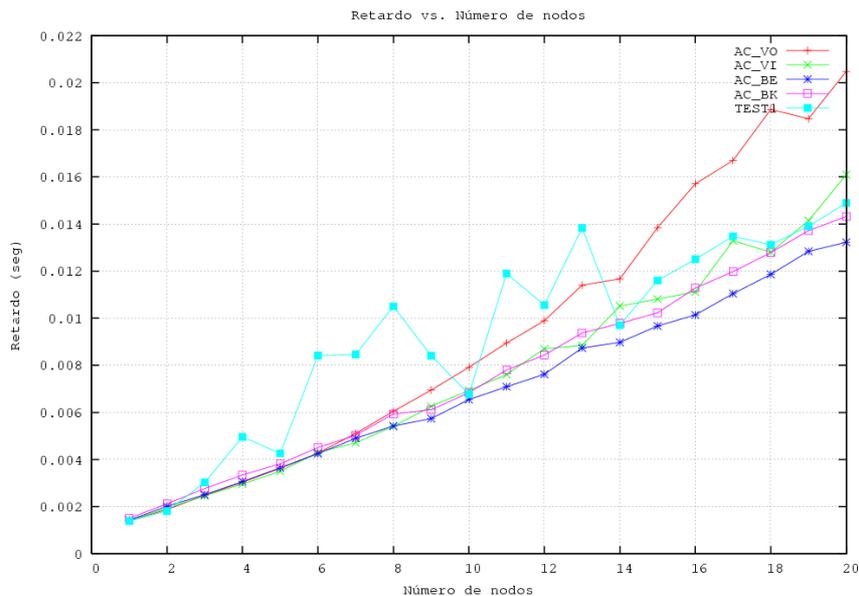


Figura 4-7. Retardo en modo no-saturación (sin barras de error)

A raíz de los resultados obtenidos podemos extraer interesantes conclusiones:

- En primer lugar apreciamos como al tratarse de una red en modo no saturación el retardo es considerablemente inferior al que obteníamos con la red saturada. El retardo se encuentra acotado entre 1 mseg y 21 mseg para las diferentes colas de acceso.

Esta disminución del retardo se debe a que en este caso el buffer proporcionado a nivel de aplicación está vacío y la trama accede directamente al nivel de enlace.

- Nuevamente volvemos a observar un mejor comportamiento de las colas menos prioritarias cuando el número de nodos aumenta. Aún encontrándonos en una situación de no saturación resulta interesante que el tamaño de la ventana de contienda mínimo sea adecuado, de forma que cuando las estaciones tratan de acceder al canal no sufran una colisión.

Podríamos considerar que no debería haber colisiones al no encontrarnos en modo de saturación, sin embargo, cuando el número de nodos crece la probabilidad de que dos estaciones intenten acceder al medio cuando existe otra transmitiendo es elevada. En este caso, el esquema de acceso EDCA indica que la estación debe seguir sondeando el medio hasta que este se libere, momento en el cual se retoma el proceso de *backoff*. Si se ha elegido una ventana de contienda muy pequeña aumentará considerablemente la probabilidad de que dos estaciones colisionen al liberarse el medio.

- Debido a los enormes retardos introducidos por las colisiones el margen de error ha aumentado considerablemente, si bien los resultados mostrados nos permiten analizar perfectamente la situación.
- A tenor de este análisis resulta lógica la situación que observamos donde aquellas colas de acceso con mayor tamaño de ventana de contienda consiguen los retardos más bajos.
- Decidimos incluir los resultados que obtendríamos con una cola con la siguiente configuración ($CW_{min} = 1$, $AIFS_n = 1$), y se muestran los resultados con la etiqueta TEST1. Esta cola de acceso es la más propensa a colisiones cuando se finaliza el envío de una trama, y dos o más estaciones se encuentran a la espera. En consecuencia apreciamos que el margen de error es mayor en este caso, y en cualquier caso el retardo

aumenta notoriamente tal y como podíamos esperar.

A raíz de estos resultados podemos concluir que la mejor configuración cuando la red se encuentra en modo de no saturación no se corresponde con unos parámetros de acceso que garanticen un acceso inmediato al canal. En su lugar, un valor adecuado al número de nodos activos en la red permitirá lograr un mejor rendimiento de la misma.

4.3.1.1. Escenarios de Aplicación

El primer escenario descrito contempla la presencia exclusiva de un único grupo *Diffserv* en la red de acceso. Este modelo, aún prescindiendo de las características de soporte de QoS ofrecidas por el modelo de servicios diferenciados, podría resultar de interés en determinadas situaciones.

Aún disponiendo de la posibilidad de ofrecer priorización entre diferentes grupos de tráfico, algunos administradores podrían considerar adecuado ofrecer un acceso donde todos los usuarios tuviesen la misma prioridad de acceso, y de igual forma las aplicaciones usadas por estos usuarios.

Ante esta situación, las simulaciones llevadas a cabo en este apartado, demuestran que es posible **mejorar el rendimiento** que se lograría con una **red tradicional 802.11**. El ajuste adecuado de los parámetros de acceso en función del número de dispositivos activos en la red, y el nivel de saturación de la misma permiten maximizar el uso de los recursos disponibles.

De esta forma, aún disponiendo de características avanzadas en el soporte de calidad de servicio, un administrador de red podría optar por el tradicional modelo de acceso democrático, y beneficiarse del funcionamiento de la arquitectura propuesta para lograr un mejor rendimiento de la red.

4.3.2 Análisis de tráfico perteneciente a diferentes grupos Diffserv: priorización

El análisis basado en la presencia de un único tipo de tráfico *Diffserv* en la red inalámbrica ha aportado interesantes resultados que podremos utilizar en escenarios futuros. Nuestro siguiente paso será ampliar la complejidad del escenario de simulación permitiendo la coexistencia de tráfico perteneciente a dos grupos *Diffserv*.

En este apartado analizaremos la función de **priorización** necesaria ante la presencia de tráfico perteneciente a diferentes grupos del modelo de servicios diferenciados en la red de acceso.

Comenzaremos el estudio con el caso más sencillo posible, donde aparecen dos grupos *Diffserv*, *Best Effort* y *Expedited Forwarding*, de forma que posteriormente ampliaremos el estudio incluyendo la presencia de tráfico *Assured Forwarding*.

Según se comentó anteriormente en este capítulo no analizaremos la función de reparto proporcional de tráfico entre grupos, limitándonos a la función de priorización.

4.3.2.1 Priorización entre dos grupos Diffserv

Comenzaremos este análisis estudiando la interacción entre dos grupos cualesquiera descritos por el modelo de servicios diferenciados. Tal y como se comentó en el capítulo destinado al estudio del arte, nunca debería ser transmitida una trama perteneciente a un grupo *Diffserv* cuando exista otra trama de un grupo de prioridad superior esperando a ser transmitida.

En consecuencia, resulta indiferente la elección de grupos Diffserv para la realización de este estudio de priorización entre dos grupos *Diffserv*. Y a lo largo de este apartado se considerarán los grupos *Expedited Forwarding* y *Best Effort* para el estudio, si bien los resultados serían aplicables a cualquier otra combinación: EF y AF, AF y BE.

Según se indicó en el capítulo relativo al estado del arte, estos grupos son los que presentan una mayor y menor prioridad respectivamente. A efectos prácticos ninguna trama Best Effort debería ser cursada si existe pendiente otra perteneciente a cualquier otro grupo, incluido Expedited Forwarding.

Sin embargo, el modelo de acceso al medio EDCA descrito por 802.11e no permite la comprobación de la existencia de tramas en otros clientes diferentes del propio nodo, de manera que no es factible implementar exactamente el comportamiento descrito por el modelo de servicios diferenciados.

EDCA nos proporciona la posibilidad de priorizar unas colas de acceso frente a otras, de manera que podemos usar esta funcionalidad para simular el comportamiento requerido por los tráficos EF y BE. Será necesario configurar adecuadamente las colas de acceso de forma que se priorice el tráfico EF respecto del BE.

Esta priorización podrá ser más o menos abrupta en función del ajuste que realicemos. Por un lado, si deseamos ajustarnos lo más posible al modelo Diffserv esta priorización deberá ser lo más marcada posible, pero debemos tener en cuenta que cuanto mayor sea esta diferencia peores prestaciones obtendrá el tráfico BE, aún cuando exista ancho de banda suficiente para cursar el tráfico global.

A continuación describiremos el escenario que vamos a simular exhaustivamente de forma que podamos realizar un correcto análisis de los resultados.

El escenario está formado por un número variable de nodos móviles conectados al punto de acceso donde cada uno de estos nodos se encuentra transmitiendo dos tipos de tráfico:

- A) Tráfico Expedited Forwarding: para el caso del tráfico más prioritario consideraremos una aplicación multimedia enviando tráfico a una tasa constante y utilizando el protocolo UDP debido a la no necesidad de asentimientos. La tasa de tráfico será la que se ajusta a la transmisión de video MPEG4 (2h de video en 1CD – 600Mb) con audio MPEG – Layer 3 a 128kbps, lo que en total supone una tasa de transmisión de 500kbps. El tamaño de la trama será de 1500 bytes.
- B) Tráfico Best Effort: este tipo de tráfico no lo caracterizaremos debido a sus múltiples posibles fuentes y a la falta de interés en el estudio en modo de saturación. En consecuencia la simulación se realizará a través de una función exponencial. Elegiremos una tasa lo suficientemente alta como para asegurarnos de que el canal se encuentra en todo momento saturado. El tamaño de la trama será de 1500 bytes.

Mediremos el caudal efectivo de tráfico cursado por la red para cada uno de los tipos de flujos

BE y EF, pudiendo comprobar de esta forma la relación existente entre ambos. Destacar que representaremos los caudales EF y BE globales cursados por la red. Es decir, si deseamos calcular el caudal transmitido por cada nodo EF deberíamos dividir el tráfico específico entre el número de nodos de este tipo.

Respecto a la configuración de las colas de acceso iremos realizando diferentes modificaciones para analizar el comportamiento del tráfico ante las diferentes opciones de configuración de los parámetros de acceso.

Comenzaremos el estudio realizando una simulación con la configuración por defecto propuesta por IEEE 802.11e para las diferentes colas de acceso. Debemos tener en cuenta que el tráfico *Expedited Forwarding* será cursado a través de la cola más prioritaria, AC_VO, mientras el tráfico *Best Effort* usará la cola menos prioritaria, AC_BK.

En la figura 4-8 representamos el tráfico cursado en la red de acceso y la suma total (etiquetada como TOTAL).

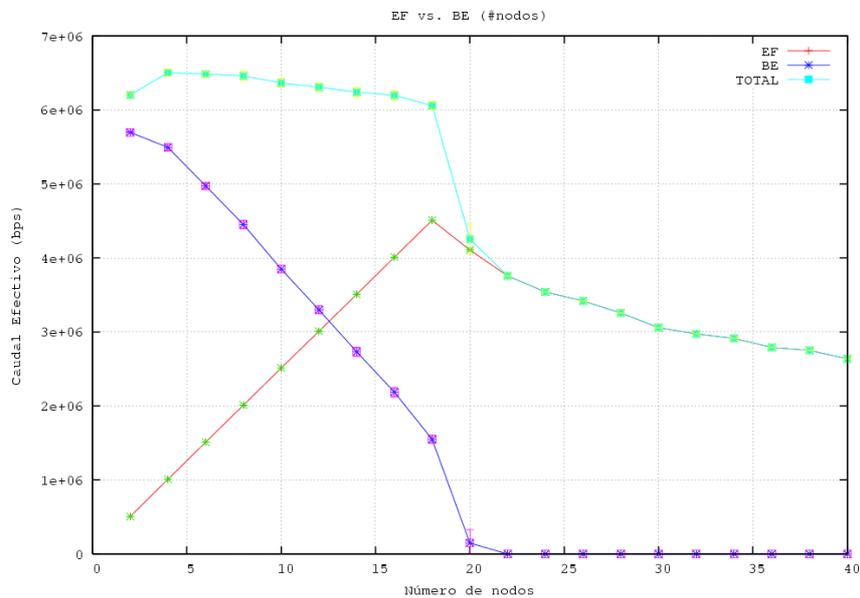


Figura 4-8. Tráfico EF y BE: configuración por defecto 802.11e

El comportamiento que observamos se corresponde con el que cabía esperar, mientras existen suficientes recursos la red cursa perfectamente el tráfico EF, y utiliza los recursos restantes para transmitir tráfico BE, el cual disminuye a medida que aumentan el número de nodos conectados.

Cuando la cola de acceso para el tráfico EF se satura y se empiezan a descartar tramas, lo cual se produce al alcanzar los veinte nodos móviles, el tráfico EF cursado por cliente comienza a disminuir y el tráfico BE cursado es nulo a partir de los 22 clientes. Este comportamiento coincide con el definido por el modelo de servicios diferenciados, si exceptuamos el tráfico BE cursado con diez nodos móviles.

En resumen, este comportamiento se aproxima bastante al definido por el modelo de servicios diferenciados. Sin embargo el rendimiento global se encuentra por debajo del que alcanzábamos cuando sólo existía un tipo de tráfico. En un principio puede resultar justificable ya que hemos cumplido el requisito de priorización, pero como veremos a continuación, un ajuste más fino de los parámetros permitirá aumentar el rendimiento global.

Como primer paso hacía la mejora del rendimiento ajustaremos el tamaño de la ventana de contienda mínimo tal y como hacíamos ante la presencia de un único tipo de tráfico Diffserv, lo cual aumentaba considerablemente el caudal efectivo cursado. En este sentido repetiremos las simulaciones realizadas anteriormente usando el tamaño de ventana de contienda mínimo descrito en la figura 4-4 para las diferentes colas de acceso. Los resultados se muestran en la figura 4-9.

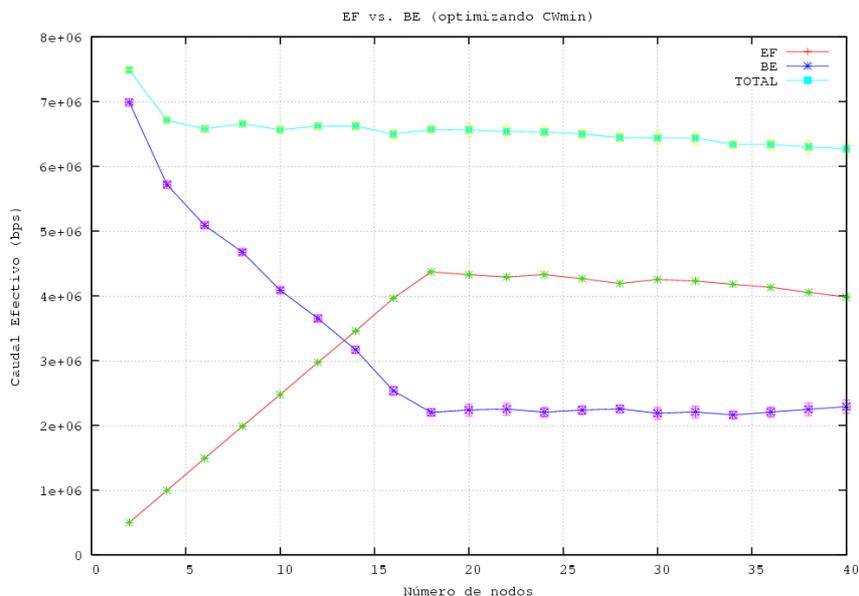


Figura 4-9. Tráfico EF y BE: optimizando CWmin

Ante esta nueva configuración podemos apreciar como el rendimiento general de la red ha aumentado considerablemente. Analicemos los diferentes efectos que han aparecido a raíz de una configuración más acertada de la ventana de contienda:

- En primer lugar observamos como el rendimiento de la red una vez que se entra en modo saturación es estable. Es decir, la red mantiene el caudal efectivo cursado estable en un valor muy cercano al máximo posible para un único tráfico.
- El tráfico Expedited Forwarding cursado se corresponde por el inyectado por cada cliente antes de entrar en modo saturación, y una vez que el tráfico rebasa el límite de saturación el tráfico se reparte equitativamente entre los flujos BE y EF.
- En este sentido una vez alcanzado el límite de saturación se continúa cursando tráfico BE, a la vez que se comienzan a descartar tramas EF. Esta situación no se acomoda a los requisitos establecidos por el modelo de servicios diferenciados, perdiendo de esta forma la función de priorización.

Este efecto viene derivado del hecho de haber prefijado el valor del parámetro AIFS, que es el encargado de forzar la priorización entre los diferentes grupos de tráfico. En este sentido, el valor AIFS es adecuado para los valores indicados por defecto para el parámetro CWmin, pero en cuanto este es algo más elevado, se pierde la priorización entre flujos.

A pesar de haber logrado mejorar el rendimiento de la red, comprobamos que la configuración podría mejorarse de forma que los recursos empleados para cursar tráfico Best Effort, se destinarán a flujos más prioritarios, Expedited Forwarding.

Según hemos propuesto, la nueva configuración que solventará este problema fijará un valor para el parámetro AIFS proporcional al valor de la ventana de contienda. De esta forma seguiremos logrando la priorización requerida por el modelo de servicios diferenciados, a la vez que optimizamos los recursos de red.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4-10.

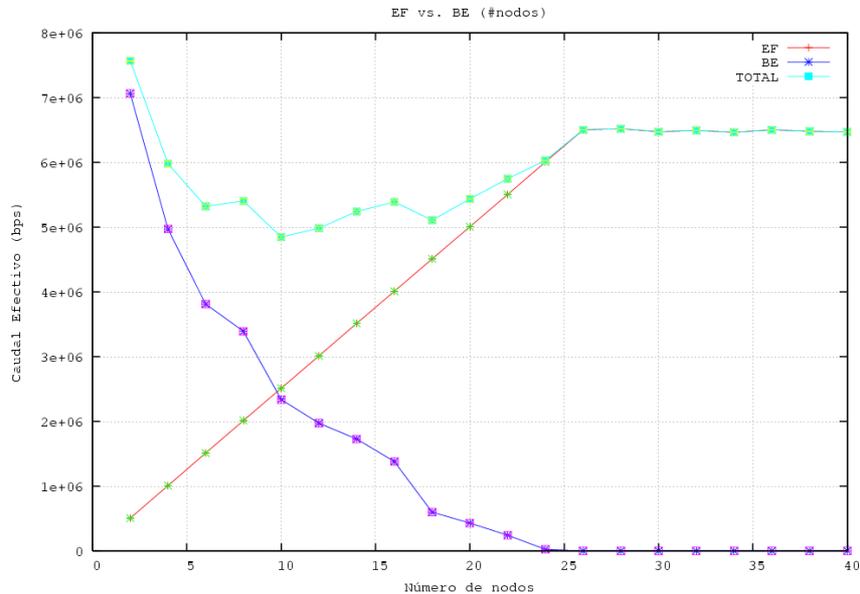


Figura 4-10. Tráfico EF y BE: optimizando CWmin y AIFS

Tras los ajustes propuestos observamos claras diferencias en el rendimiento alcanzado. Analicemos los cambios más relevantes:

- En primer lugar apreciamos que ahora es posible cursar todo el tráfico *Expedited Forwarding* hasta con 26 nodos en la red (frente a los 18 anteriores). Este comportamiento se ha conseguido *bloqueando* el tráfico *Best Effort*, de forma que existen más recursos disponibles para el tráfico más prioritario.
- De hecho una vez alcanzado el nivel de saturación, donde el caudal máximo cursado alcanza aproximadamente los 6,5 mbps, este valor se mantiene y se distribuye entre todos los clientes que generan tráfico *Expedited Forwarding*.
- Por otro lado podemos observar como el tráfico *Best Effort* cursado para un número intermedio de nodos (4 a 26 nodos) ha disminuido respecto de la anterior simulación. Este hecho viene derivado del aumento del parámetro AIFS que hemos tenido que realizar para poder lograr una priorización adecuada entre ambos grupos *Diffserv*.

En resumen, el factor más importante a destacar para esta simulación es que por fin hemos logrado implementar la función de priorización ajustándonos de esta forma a uno de los requisitos descritos por el modelo de servicios diferenciados.

Sin embargo, el hecho de que las prestaciones globales (caudal efectivo TOTAL cursado) hayan disminuido en un rango determinado (5 a 20 nodos), nos hace plantearnos si una configuración más adecuada mejoraría el rendimiento de la red manteniendo la función de priorización.

Cuando el número de nodos cursando tráfico *Expedited Forwarding* es inferior a 13, apreciamos como el tráfico *Best Effort* que utiliza el caudal restante está desaprovechando los recursos disponibles, ya que el parámetro AIFS configurado resulta demasiado elevado. Si tenemos en cuenta el caudal EF cursado y su cercanía al valor máximo de saturación de dicho tráfico de acuerdo a la figura 4-3, podremos realizar un mejor ajuste del parámetro AIFS configurado para la cola de acceso del tráfico BE y mejorar el rendimiento global de la red.

A continuación proponemos una nueva simulación en la que se configurará el parámetro AIFS de acuerdo al nivel de saturación del tráfico más prioritario, *Expedited Forwarding*. De esta forma se logrará un mejor aprovechamiento de los recursos maximizando el caudal efectivo cursado.

Utilizando esta nueva propuesta de configuración los resultados obtenidos mejoran aún más el rendimiento global. En la figura 4-11 se observan los resultados.

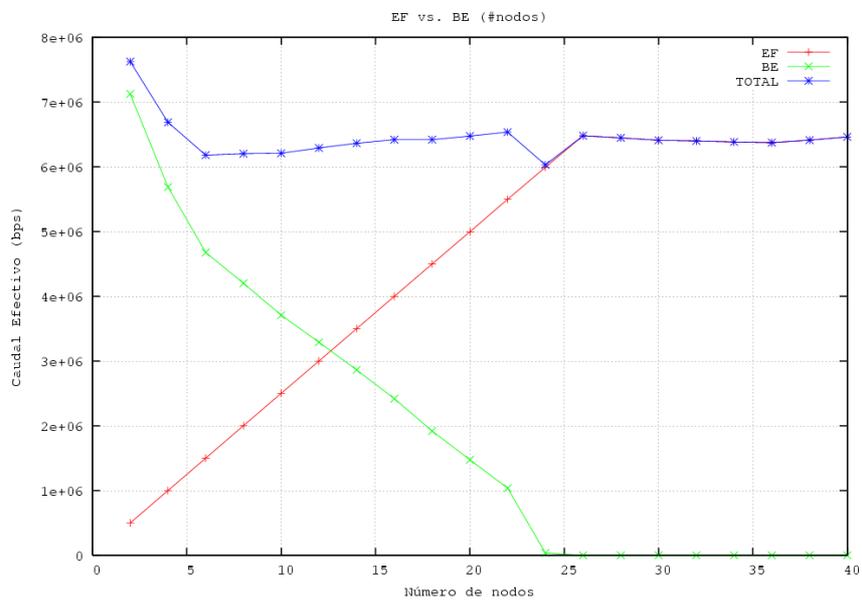


Figura 4-11. Tráfico EF y BE: optimizado

Observamos como en este caso el caudal cursado se aproxima al máximo ideal identificado en la figura 4-3, de forma que podemos concluir que hemos alcanzado una configuración que sigue fielmente el modelo de servicios diferenciados, y al mismo tiempo, maximiza el rendimiento global de la red.

Remarcamos el efecto sufrido ante la presencia de 24 nodos, momento en el cual el tráfico TOTAL cursado se aleja del valor ideal. Este efecto viene provocado por la cercanía del tráfico EF a su valor de saturación. En este caso se opta por elegir una configuración del parámetro AIFS para el tráfico BE que asegure una correcta priorización respecto del tráfico más prioritario. De otra forma provocaría que se continuando cursando tráfico BE aún cuando se han comenzado a descartar tramas *Expedited Forwarding*.

Análisis de escenario asimétrico respecto al número de nodos por grupo Diffserv

Hasta el momento se han realizado simulaciones en las que existe el mismo número de nodos generando ambos tipos de tráfico *Diffserv*, *Expedited Forwarding* y *Best Effort*. En estos escenarios existe cierto *balance* en la competencia por los recursos para el envío de dicho tráfico. Resultará interesante analizar escenarios en los que el número de nodos emitiendo

tráfico BE y/o EF no coincida, y donde la competencia por los recursos sea desigual.

En este sentido simularemos un par de escenarios que analicen los casos extremos en los que sólo existe un nodo transmitiendo tráfico EF o BE, el cual compite con un número variable de nodos transmitiendo el tráfico opuesto.

Escenario A) Un nodo BE vs. Múltiples nodos EF

En este escenario se analizará las implicaciones derivadas de la existencia de un único nodo transmitiendo tráfico BE, y que compite contra un número variable de nodos transmitiendo tráfico EF.

Las características de los flujos transmitidos serán las mismas que las consideradas en los escenarios anteriores. De esta forma representaremos el tráfico que cada cliente 'EF' ha cursado (500kbps en el caso de no saturación), y el tráfico global 'BE' transmitido por el único nodo que genera este tipo de tráfico.

En este caso representaremos el tráfico EF cursado por cada cliente, de forma que podamos apreciar si existe alguna desviación respecto de los 500kbps transmitidos por cada nodo.

El número de nodos identificado en el eje de ordenadas se corresponderá con el número total de nodos, es decir, un nodo 'BE' más el resto de nodos 'EF'. Los resultados se muestran en la figura 4-12.

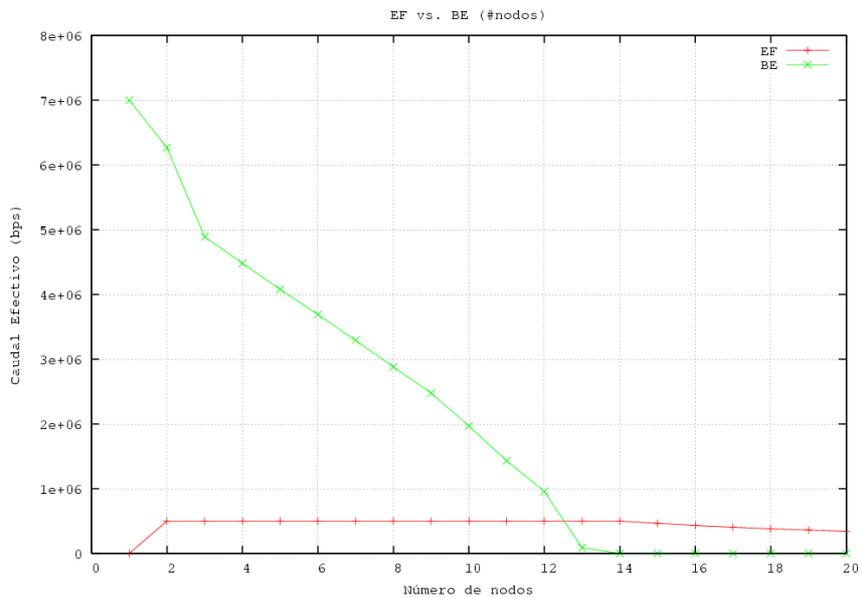


Figura 4-12. Un nodo BE frente a múltiples nodos EF

Podemos observar como el tráfico *Best Effort* cursado parte de su máximo cuando no tiene competencia, es decir, para un único nodo. Y a medida que se incorporan nodos generadores de tráfico EF el caudal cursado va disminuyendo. Finalmente, el tráfico BE es completamente anulado cuando el tráfico EF alcanza su punto de saturación.

Los resultados obtenidos cumplen por completo los requisitos impuestos por el modelo de servicios diferenciados, y al mismo tiempo se optimizan las prestaciones obtenidas.

Escenario B) Un nodo EF vs. Nodos BE

Este nuevo escenario es muy similar al descrito anteriormente, y simplemente se invertirá la presencia de nodos BE y EF. En este caso únicamente existirá un nodo generando tráfico EF, mientras el número de nodos BE será variable.

Veamos los resultados obtenidos en la figura 4-13.

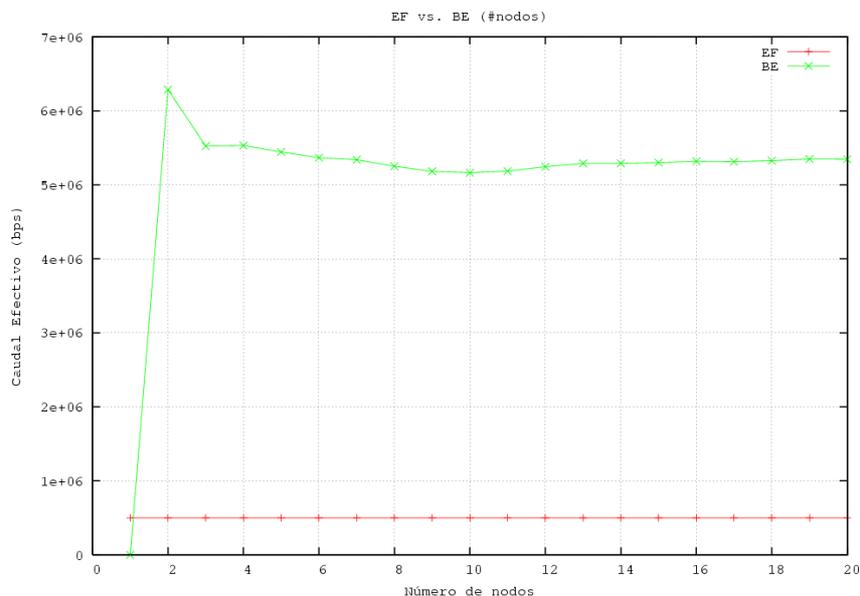


Figura 4-13. Un nodo EF frente a múltiples nodos BE

Podemos observar como todo el tráfico generado por el nodo ‘EF’ siempre es cursado en el rango utilizado para esta simulación, lo cual era esperable, ya que la tasa de envío se encuentra por debajo del margen de saturación para el tráfico EF. Por su parte, el tráfico BE se amolda al caudal sobrante para cursar el tráfico generado.

Nuevamente nos ajustamos a los requisitos impuestos por el modelo de servicios diferenciados, y al mismo tiempo maximizamos el rendimiento global de la red de acceso.

Análisis de retardo del tráfico etiquetado como Expedited Forwarding

Finalmente vamos a mostrar el retardo que sufren las tramas pertenecientes al tráfico *Expedited Forwarding* desde que son generadas por el nivel de aplicación hasta que llegan al punto de acceso. Debemos ser conscientes de que en este proceso existe un sistema de encolamiento a nivel de aplicación que provoca un elevado retardo cuando la red entra en modo saturación.

En la figura 4.14 se ofrece una comparación entre el retardo sufrido por las tramas *Expedited Forwarding* con la configuración por defecto ofrecida por el estándar 802.11e y la optimización propuesta en este apartado.

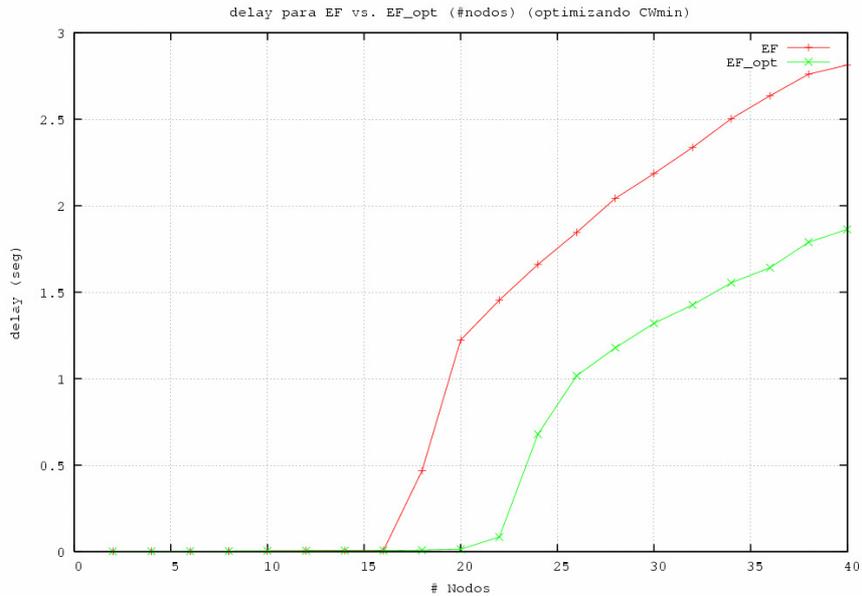


Figura 4-14. Retardo medido en el tráfico Expedited Forwarding

Podemos comprobar como mientras el enlace no se encuentra saturado el retardo de las tramas EF se mantiene prácticamente nulo. Una vez que el enlace se satura, lo cual sucede a partir de 8 estaciones para el modelo tradicional, este retardo aumenta. Este hecho comienza cuando se alcanzan 11 estaciones para el caso de usar el algoritmo modificado, y en cualquier caso, el retardo siempre es inferior al obtenido anteriormente.

Aunque los valores de retardo obtenidos, algunos segundos, pueden parecer algo elevados, debemos tener en cuenta que la red se encuentra saturada, y que en consecuencia, el retardo medido representa el tiempo desde que el paquete se encola a nivel de aplicación en un buffer con tamaño de 50 tramas, que debido a la saturación de la red se encontrará siempre lleno, hasta que la trama alcanza el punto de acceso a nivel de aplicación.

Finalmente para completar el estudio para el caso de priorización entre tráficos EF y BE en la red de acceso, en la figura 4-11 mostramos el índice de descartes comparando el uso de las optimizaciones indicadas.

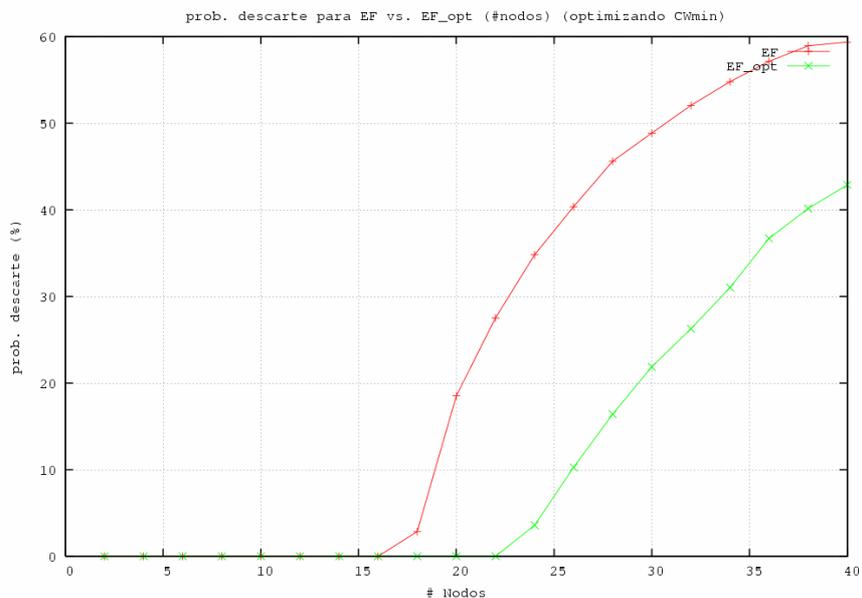


Figura 4-15. Porcentaje de descartes de tráfico Expedited Forwarding

En la gráfica podemos apreciar como el índice de paquetes descartados se mantiene a cero mientras la red no se encuentra saturada, y posteriormente, a medida que aumenta el número de nodos, las tasas de descarte aumentan considerablemente. En cualquier caso las tasas de descarte siempre son inferiores cuando se utilizan las optimizaciones propuestas.

4.3.2.2 Priorización entre tres grupos Diffserv

El estudio de priorización entre los grupos *Expedited Forwarding* y *Best Effort* nos ha permitido asentar unas bases para proceder a la configuración de los parámetros de acceso cumpliendo con los requisitos de priorización derivados del modelo de servicios diferenciados. Como hemos visto la configuración propuesta permite un aprovechamiento óptimo del enlace, en términos de caudal efectivo global cursado.

La presencia de tráfico *Assured Forwarding* nos obligará a extender el modelo de configuración ante la presencia de más de dos tipos de tráfico *Diffserv* diferentes. Podremos apreciar como una simple extrapolación de las técnicas de configuración empleadas anteriormente resultarán adecuadas para lograr una configuración óptima.

De esta forma, considerando la presencia de los tres posibles grupos *Diffserv* al mismo tiempo en la red de acceso, completaremos el estudio de la función de priorización descrita por el modelo de servicios diferenciados.

El nuevo escenario de simulación será una extensión del empleado anteriormente, donde aparte de existir nodos transmitiendo tráfico EF y nodos generando tráfico BE, ahora añadiremos un tercer conjunto de nodos que enviarán tráfico AF hacia el punto de acceso.

Este nuevo conjunto de nodos tendrá un generador de tráfico UDP con una tasa constante de envío a 250 kbps desde cada nodo hacia el punto de acceso, con un tamaño de trama de 1500 bytes.

Las características de los nodos EF y BE son las mismas que anteriormente. Flujos UDP con una tasa de 500 kbps para EF, y tráfico saturando el enlace para BE, ambos con un tamaño de trama de 1500 bytes.

El número de nodos de cada conjunto será exactamente el mismo, de manera que cuando se representa el tráfico para 9 nodos, consideramos que existen 3 nodos de cada conjunto (3 x EF, 3 x AF y 3 x BE).

Respecto a la configuración de las colas de acceso se seguirán las reglas propuestas en el apartado anterior para optimizar el aprovechamiento de los recursos de la red. En este sentido el valor de la ventana de contienda mínimo se optimizará de acuerdo a la figura 4-X, y el parámetro AIFS se fijará de forma proporcional al tamaño de la ventana de contienda.

En este nuevo escenario emplearemos tres de las colas de acceso contempladas por el estándar IEEE 802.11e, de forma que será necesario lograr una adecuada priorización de los tráficos individualmente entre cada una de ellas (AC_VO \leftrightarrow AC_VI \leftrightarrow AC_BE). El tráfico EF se cursará a través de la cola más prioritario, AC_VO, para el tráfico AF se empleará la cola AC_VI, y finalmente, el tráfico BE será cursado a través de la cola de acceso AC_BE.

El nivel de priorización entre las colas AC_VO y AC_BE será mayor que el que empleábamos en el apartado 4.3.2.1, y es previsible que el rendimiento global de la red

disminuya ligeramente respecto del alcanzado anteriormente.

En la figura 4-16 representamos el caudal agregado para cada uno de los diferentes grupos *Diffserv*, en función del número de nodos móviles presentes en la red de acceso, y de igual forma se representa el caudal TOTAL cursado por la red de acceso, es decir, la suma de los tres caudales mencionados.

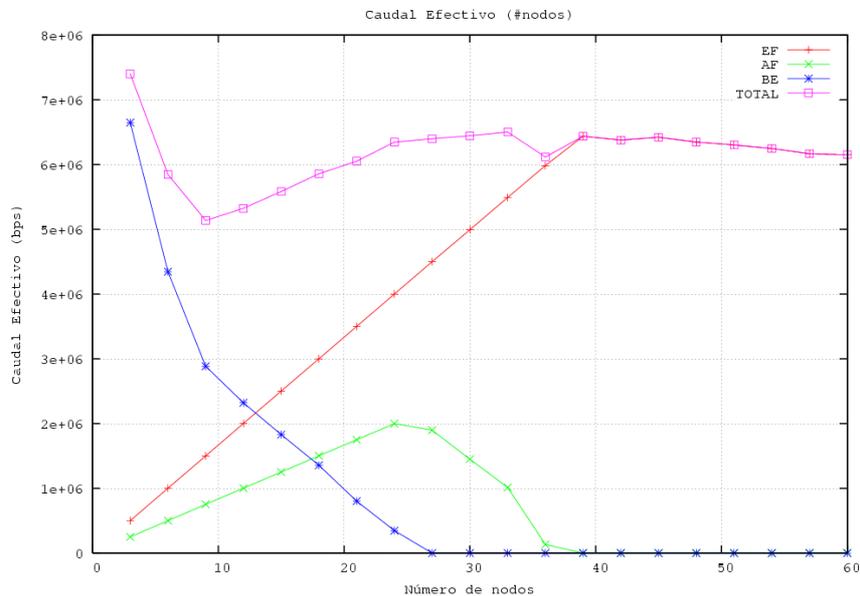


Figura 4-16. Trafico EF, AF y BE - Priorización

Los resultados obtenidos representan claramente nuestras expectativas. En primer lugar observamos como ningún tráfico entorpece la transmisión de tramas pertenecientes a un flujo de mayor prioridad. En este sentido, las tramas BE son cursadas únicamente cuando existen recursos disponibles después de cursar todo el tráfico EF y AF, y de igual forma las tramas AF sólo se cursan cuando aún existen recursos disponibles tras cursar el tráfico EF.

Estos resultados se aprecian al alcanzar los 27 nodos en la red, momento en el cual el tráfico BE se anula, ya que se comienzan a descartar tramas AF, y al llegar a 39 nodos, donde el tráfico AF deja de enviarse debido a que comienzan los descartes de tramas EF.

Por otro lado podemos apreciar como el caudal global cursado se aproxima en gran medida al caudal máximo que podríamos cursar si existiese únicamente un tipo de tráfico Diffserv, caso analizado en el apartado 4.3.1. La disminución de rendimiento respecto de este caso se debe a la necesidad de priorizar unos tráficos respecto a otros, lo que obliga a imponer condiciones más restrictivas de acceso al canal para los tráficos menos prioritarios. De hecho, al considerar tres colas de acceso el rendimiento logrado es ligeramente inferior al que obteníamos al considerar únicamente tráficos EF y BE.

A continuación repetiremos estas mismas simulaciones modificando las tasas de envío configuradas en los nodos generadores de tráfico EF y AF, de forma que podamos comprobar como la priorización funciona adecuadamente independientemente de los flujos presentes en la red.

Tráfico EF: UDP con tasa CBR de 300kbps
 Tráfico AF: UDP con tasa CBR de 200kbps
 Tráfico BE: UDP con tasa superior a la tasa de saturación del enlace
 Tamaño de trama de 1500 bytes para todos los tráficos

Observamos los resultados en la figura 4-17.

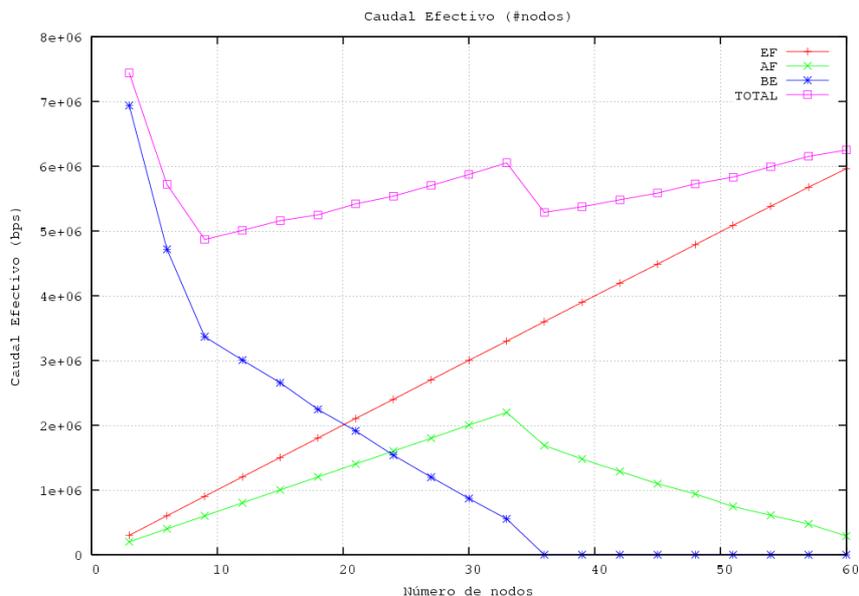


Figura 4-17. Tráfico EF, AF y BE - Priorización II

En este caso los resultados son muy similares a los del anterior escenario. Las menores tasas de tráfico empleadas para los flujos EF y AF han provocado que aún con 60 nodos activos en la red de acceso sea posible cursar todo el tráfico EF generado por las fuentes. Por su parte el tráfico BE se fue reduciendo ha medida que aumentaban los tráfico más prioritarios hasta quedar completamente anulado al alcanzar los 36 nodos activos en la red.

A continuación realizaremos ligeras modificaciones en las tasas de envío de cada cliente. En concreto, aumentaremos la tasa de envío de tráfico AF por cliente, de forma que supere a la del tráfico más prioritario, Expedited Forwarding.

La configuración exacta de las tasas de envío se describe a continuación.

Tráfico EF: UDP con tasa CBR de 250kbps
 Tráfico AF: UDP con tasa CBR de 500kbps
 Tráfico BE: UDP con tasa superior a la tasa de saturación del enlace
 Tamaño de trama de 1500 bytes para todos los tráficos

La figura 4-18 muestra los resultados derivados de la simulación de este escenario.

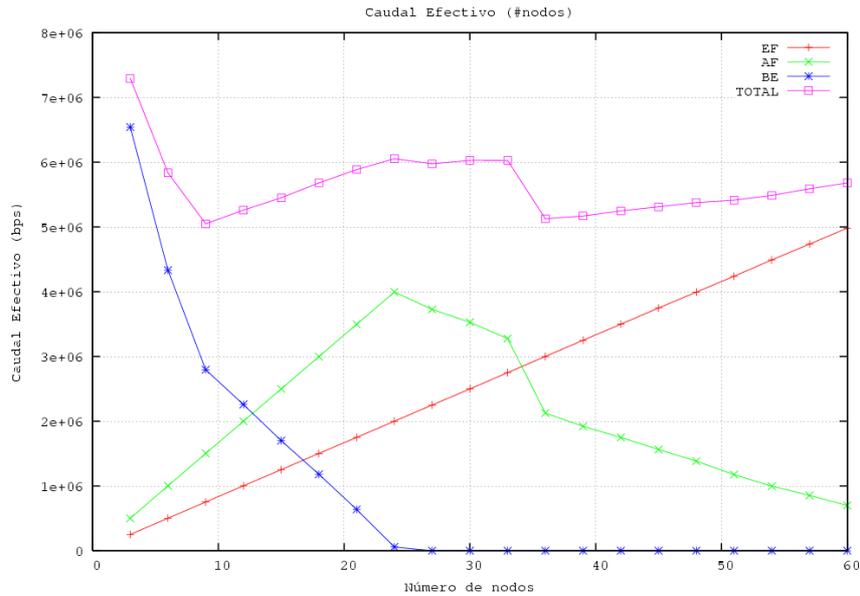


Figura 4-18. Tráfico EF, AF y BE - Priorización III

En este caso optamos por una configuración donde la tasa de tráfico EF por cliente era inferior a la de tráfico AF. Este se cursa perfectamente hasta los 24 nodos y a partir de ese instante, se anula el tráfico BE.

Resulta interesante apreciar el efecto existente al pasar de 33 a 36 nodos donde hay una considerable disminución del caudal AF cursado. Este hecho viene derivado de un cambio en la configuración de la cola de acceso donde se ha modificado el tamaño de la ventana de contienda mínimo. Recordemos que los posibles valores para configurar el parámetro CWmin se corresponden con las potencias de 2 menos 1, de forma que cuando se modifica el mismo existen unas variaciones considerables en el comportamiento de la red.

4.3.2.3 Escenarios de Aplicación

En este apartado se ha analizado la función de priorización descrita en el modelo de servicios diferenciados. A través de la misma se ofrece la posibilidad de que el tráfico de prioridades superiores nunca sea retenido debido a la presencia de cualquier otro tipo de tráfico de prioridad inferior.

Esta función da lugar a escenarios de aplicación de gran interés, los cuales podríamos englobar dentro de diferentes grupos:

- **Priorización por aplicación:** en este caso se plantea la posibilidad de que la Calidad de Servicio que recibirá el flujo correspondiente venga determinada por la aplicación que genera dicho tráfico.

De esta forma podríamos ofrecer prioridad a las aplicaciones más sensibles al retardo, como podrían ser audio o video conferencia, frente a otras aplicaciones que no presentan estos requisitos, como la navegación web, o el acceso a redes P2P.

Esta priorización podría estar basada en los deseos del administrador, aunque no estén directamente relacionados con la sensibilidad de la aplicación, de forma que en alguna organización se podría considerar interesante priorizar el tráfico web, ya que éste constituye el núcleo del negocio, frente a aplicaciones de audio-conferencia que son empleadas para uso personal.

Finalmente, dentro del grupo de ‘Priorización por aplicación’, incluimos otro escenario de gran interés, que sería el consistente en priorizar el tráfico de control/gestión, que circula por la red, frente al de datos. En determinados entornos puede resultar muy beneficioso de cara a la interfaz con el usuario la priorización de tramas de control, como puedan ser el protocolo ARP, o las tramas de control de TCP, frente a las tramas propias de datos. Gracias a esta gestión de la calidad de servicio, en entornos altamente saturados, se podría mejorar notablemente la experiencia del usuario.

- **Priorización por origen:** dentro de este grupo se incluyen nuevas funcionalidades de cara a la provisión de calidad de servicio. Todos ellos se basan en ofrecer una mayor prioridad a determinados usuarios en detrimento de otros. La elección de los usuarios que recibirán un mejor acceso determinará diferentes modelos de gestión. A continuación mostramos algunos que resultan de gran interés en diferentes entornos.

- Grupos de usuarios: este metodo permite identificar diferentes grupos de usuarios y ofrecer un acceso diferenciado para cada uno de ellos. De esta forma, dentro de una organización, podemos ofrecer diferentes niveles de acceso en función de perfil: directores, jefes de sección, jefes de departamento, empleados en general.
- Priorización en función de tarificación: una de las posibilidades más interesantes para los operadores de red consistiría en la posibilidad de cobrar en función de la cuota pagada por el abonado. De esta forma se podrían ofrecer accesos diferenciados en función del tipo de acceso que solicitamos al contratar el producto.
- Acceso en base a perfil de usuario: en determinados escenarios podría resultar interesante un modelo de acceso que penalizase o premiase al usuario en función de su comportamiento previo. Por ejemplo, podría considerarse un escenario en el que a los usuarios que generasen una mayor cantidad de tráfico P2P se les penalizase, rebajándoles la prioridad de acceso.

De esta forma este sistema se realimentaría automáticamente proporcionando un mejor acceso a aquellos usuarios que hacen un uso *más adecuado* de los recursos disponibles. Nótese que la interpretación de ‘*uso más adecuado*’ vendrá definida por la política de acceso de la entidad gestora de la red.

- **Priorización por destino:** la arquitectura de red propuesta nos ofrece otro nuevo modelo de gestión de la calidad de servicio. En este nuevo caso consideramos el destino de las tramas para gestionar la QoS. De esta forma, en función del destino del tráfico, ya sea a nivel de enlace o más interesante aún, a nivel de red, se pueden establecer diferentes políticas de acceso. A modo de ejemplo a continuación describimos algunas opciones.

- Máxima prioridad en acceso a tu dominio: en determinadas empresas podría considerarse interesante la posibilidad de priorizar todo el tráfico dirigido al propio dominio de la empresa. De esta forma se podría mejorar el acceso a recursos de la propia organización: impresoras, repositorios, bases de datos, o servidores de cuentas.

- Penalización en el acceso a determinados servidores: la política contraria consistiría en penalizar el acceso a servidores cuyo contenido se presupone no aporta ninguna información de interés para el desarrollo del trabajo de la empresa.
- **Basado en preferencias de usuario:** un modelo más personalizado permitiría al propio usuario decidir el nivel de calidad deseado para cada tráfico en particular. Este modelo podría dar lugar a una gestión más adecuada de los recursos basada en un apropiado criterio de los usuarios de la red.
- **Otras posibilidades:** la versatilidad de la arquitectura de red propuesta nos lleva a considerar otras posibilidades de gestión de calidad de servicio muy interesante.
 - Franjas horarias: algunas organizaciones pueden tener diferentes perfiles de acceso en función de la hora del día. De forma que podrían decidir modificar dinámicamente estos el modo de trabajo amoldándose a estos perfiles y consiguiendo de esta forma un mayor rendimiento.
 - Basado en el nivel de señal del dispositivo móvil: atendiendo a este criterio se podría optar por penalizar a aquellos dispositivos que tenga un peor nivel de señal, de forma que su restringido acceso no perjudique al resto de clientes que tienen unas mejores condiciones de acceso al medio.

Esta misma política podría ser interpretado justo en el sentido contrario, de forma que a los usuario con un peor nivel de señal se les otorgase un mejor acceso y de esta forma equiparase su conexión a la del resto de usuarios.
- **Priorización mixta:** todos los modelos anteriormente descritos podrían combinarse para lograr un modelo más complejo y que se adaptase más adecuadamente a la situación concreta de la red correspondiente.

4.3.3 Análisis de tráfico perteneciente a diferentes grupos Diffserv: reparto proporcional

Una vez establecidas las bases para lograr la priorización adecuada entre los diferentes grupos Diffserv, el siguiente paso para completar el modelo de servicios diferenciados consiste en lograr configurar una relación entre flujos prefijada por el administrador de red entre las diferentes categorías de tráfico.

El reparto proporcional de tráfico entre subgrupos de tráfico se encuentra definido dentro del modelo de servicios diferenciados en el grupo *Assured Forwarding*. En el estudio que se realiza a continuación se seguirá esta nomenclatura, y se pretenderá lograr un reparto proporcional entre los diferentes grupos definidos para *Assured Forwarding*.

Configurar unos parámetros de acceso adecuados para lograr una determinada relación de flujos es una tarea compleja. Esta labor ha sido estudiada por diferentes científicos que muestran en numerosos artículos la problemática intrínseca de este proceso. A continuación

resaltaremos las principales dificultades que aparecen cuando afrontamos esta tarea.

- Dificultad para calcular los parámetros adecuados
- Inestabilidad del sistema
- Condiciones de carrera
- Alto grado de variabilidad del entorno

A raíz de estas dificultades mostraremos las pautas que debemos seguir para lograr una configuración acertada en el caso de encontrarnos en una situación de saturación por parte de todos los tráficos presentes en la red. Es decir todos y cada uno de los flujos generan una cantidad de tráfico que no puede ser absorbida por el medio, de manera que existen pérdidas de tramas en las propias fuentes.

En este caso comenzaremos el estudio trabajando con el parámetro Tamaño de Ventana de Contienda Mínimo (CWmin), el cual permite lograr unas relaciones de flujos apropiadas cuando se configura como si de una variable continua se tratase. Sin embargo tenemos que tener en cuenta que este parámetro, en la práctica, sólo puede tomar valores que se correspondan con las potencias de dos. De forma que este estudio teórico resulta de interés para lograr un mejor conocimiento del comportamiento de las redes 802.11e pero carece de validez práctica, y en consecuencia resultará necesario trabajar con el parámetro AIFS para alcanzar los objetivos buscados.

Adicionalmente veremos como esta configuración no obtiene los resultados deseados cuando alguno de los flujos de tráfico abandona la situación de saturación. Normalmente este flujo se encuentra en desventaja, ya que, al hacer un uso menos intensivo de los recursos de red que el resto, obtiene un peor acceso al medio. En estos casos se provocan situaciones injustas entre los diferentes flujos, provocando que aquellas aplicaciones/usuarios que hagan un uso más intensivo de la red obtengan un mejor rendimiento en comparación con aquellas que hacen un uso más racional de los recursos.

En consecuencia será necesario establecer unas nuevas pautas de configuración que corrijan estos problemas derivados de la condición de no saturación de determinados flujos, basadas en la configuración del parámetro AIFS. Este nuevo mecanismo será descrito y verificado a través de las oportunas simulaciones.

4.3.3.1 Reparto proporcional de tráfico basado en parámetro CWmin

Comenzaremos analizando el caso en el que tráfico perteneciente a diferentes subgrupos de *Assured Forwarding* compiten entre si. Este escenario presenta algunas particularidades que lo hacen diferentes del caso anterior (EF + BE).

Según veíamos en el análisis del estado del arte, el tráfico *Assured Forwarding* tiene una prioridad intermedia entre EF y BE. Este tráfico debe ser cursado por delante de cualquier trama BE, pero nunca debe entorpecer el paso de una trama EF. Este escenario en el que aparecerían todos los grupos de tráfico *Diffserv* será analizado más adelante. Antes debemos tener en cuenta las especiales características del tráfico AF y como deben ser implementadas.

El tráfico AF se subdivide en cuatro subgrupos en función de los recursos destinados al procesamiento de estos flujos. A su vez, cada subgrupo está dividido en cuatro categorías según la prioridad de descarte en la cola.

El modelo de acceso al medio EDCA definido por el IEEE 802.11e permite la creación de cuatro colas en cada nodo móvil, lo que nos permitirá situar cada grupo de tráfico AF1x,

AF2x, AF3x, AF4x en estas colas, pero no será posible implementar la prioridad de descarte entre colas. Este efecto se podría implementar individualmente en cada nodo, esto ya lo hace Diffserv, pero no se podría recrear considerando todos los flujos que intentan acceder al medio pertenecientes a los diferentes nodos.

En consecuencia emplearemos cada una de las colas de acceso definidas en el estándar 802.11e (AC_VO, AC_VI, AC_BE y AC_BK) para cursar los diferentes subgrupos AF. Es necesario tener en cuenta que estos subgrupos se caracterizan por tener destinados una serie de recursos fijos a través de una relación entre los caudales que cursan cada cola de acceso. Para implementar esta relación de flujos comenzaremos usando el parámetro CWmin, según indicamos anteriormente.

Volveremos a representar la figura donde mostramos la relación de flujos en función de la relación del tamaño de ventana de contienda mínimo, pudiendo apreciar que dicha relación es lineal (ver figura 4-12).

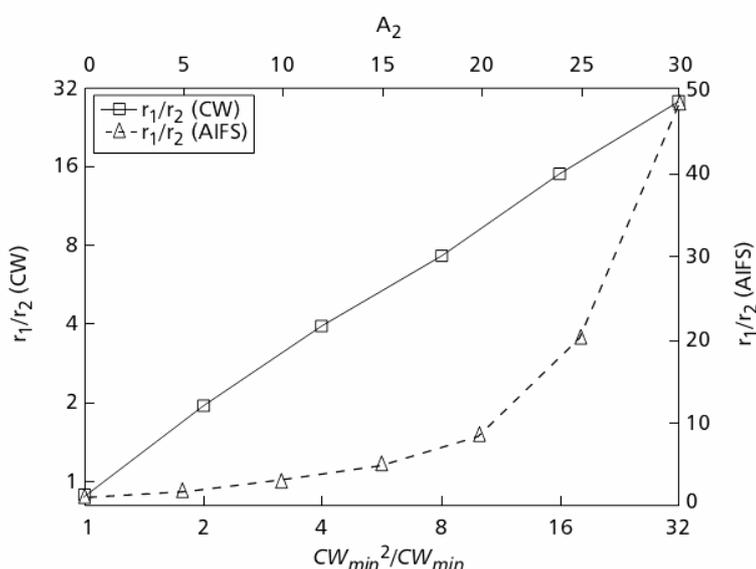


Figura 4-19. Relación de flujo en función de parámetros de acceso

En primer lugar tendremos que definir una tabla de correspondencias que identifique en que cola de acceso debe ser procesado cada subgrupo Assured Forwarding. Si bien la correspondencia no tiene ninguna relación con la prioridad que a priori asumen las colas de acceso 802.11e, usaremos la asignación más intuitiva que consistirá en usar la cola de acceso más prioritaria para el subgrupo AF que mayor caudal deba cursar.

Cola de Acceso 802.11e	Subgrupo Assured Forwarding
AC_VO	AF1x
AC_VI	AF2x
AC_BE	AF3x
AC_BK	AF4x

El siguiente paso es la configuración de los parámetros que rigen cada cola de acceso (CW y AIFS). Como hemos comentado y se verá corroborado a continuación, el parámetro AIFS no puede estar prefijado ya que depende del número de nodos para ofrecer la relación de caudales deseada.

En la figura 4-20 se muestran los resultados obtenidos utilizando AIFS para lograr la relación de flujos deseada. En este caso el escenario estaba formado por nodos móviles transmitiendo tráfico AF1x y AF2x donde el administrador había configurado una relación de flujos de 1:2.

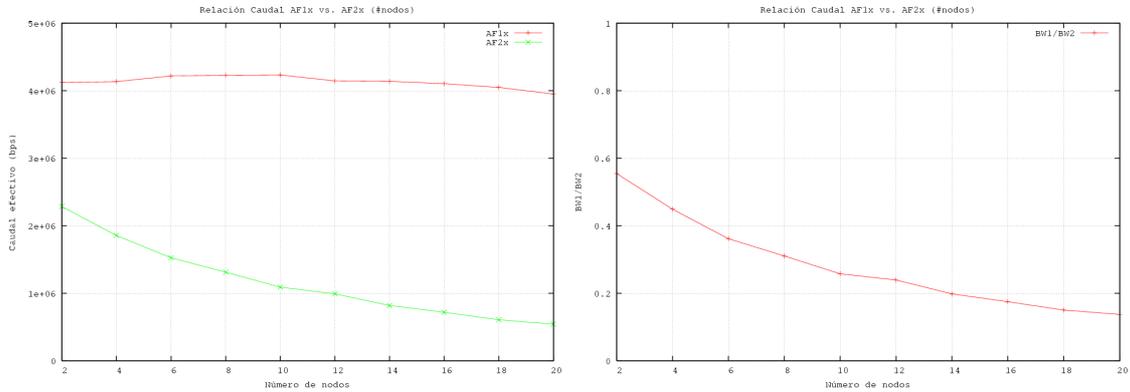


Figura 4-20. Relación de flujos entre AF1x y AF2x usando parámetro AIFS

Apreciamos como cuando el número de nodos es reducido podemos alcanzar la relación de flujos deseada, sin embargo, en cuanto aumenta el número de nodos, la cola más prioritaria consume todo el caudal disponible, anulando de esta forma la relación de flujos configurada.

Este hecho viene derivado de que el parámetro AIFS calculado para lograr una determinada relación de flujos es dependiente del número de nodos, lo cual aumenta excesivamente la complejidad a la hora de calcular el valor adecuado, lo que nos lleva a elegir **CWmin** como parámetro más adecuado para esta labor.

Una vez seleccionado el parámetro CWmin para llevar a cabo la configuración ante la presencia exclusiva de tráfico *Assured Forwarding*, podemos destacar como en la medida en que la relación de flujos respecto de la relación de tamaño de ventana de contienda es lineal resultará relativamente sencillo el cálculo de la relación de CWmin que debemos usar en función de la relación de flujos deseada.

Repetiremos la simulación que realizamos anteriormente usando esta vez el parámetro CWmin para lograr la relación de flujos deseada. Veamos los resultados obtenidos cursando tráfico AF1x y AF2x, con una configuración tal que CWmin (AF1x) = 15 y CWmin (AF2x) = 31.

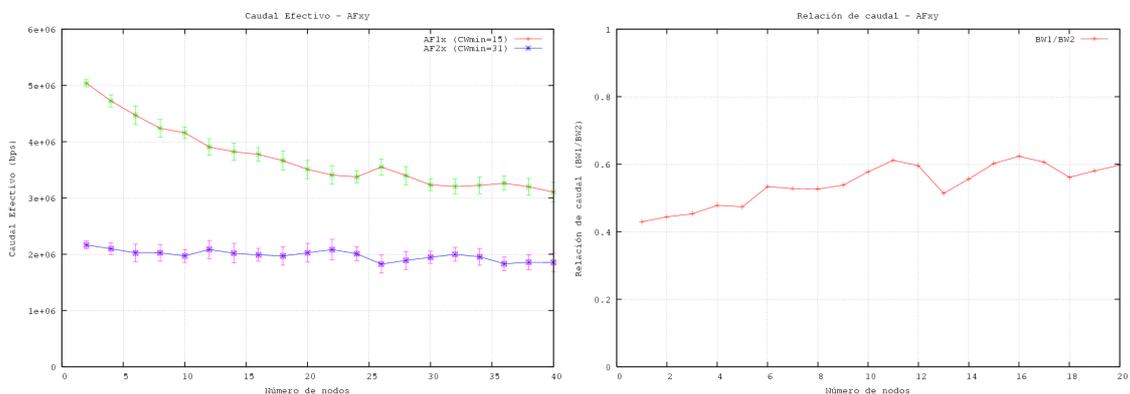


Figura 4-21. Relación de tráfico entre AF1x y AF2x usando parámetro CWmin

En la figura 4-21, que representa el caudal efectivo cursado por ambos tráficos, podemos apreciar como el caudal disminuye a medida que aumenta el número de nodos y

consecuentemente el número de colisiones.

Resulta más interesante la lectura que podemos realizar de la figura que representa la relación de flujos. Comprobamos como se ha logrado una relación de flujos cercana a la deseada 2:1, que varía dentro de una franja entre el 40 y el 60% aproximadamente.

Una configuración óptima del parámetro tamaño de ventana de contienda mínimo nos aportará un mayor caudal efectivo global cursado, a la par que estabilizará la relación de flujos conseguida. Veamos los resultados obtenidos al ajustar apropiadamente CWmin en función del número de nodos. Mostramos los resultados en la figura 4-22.

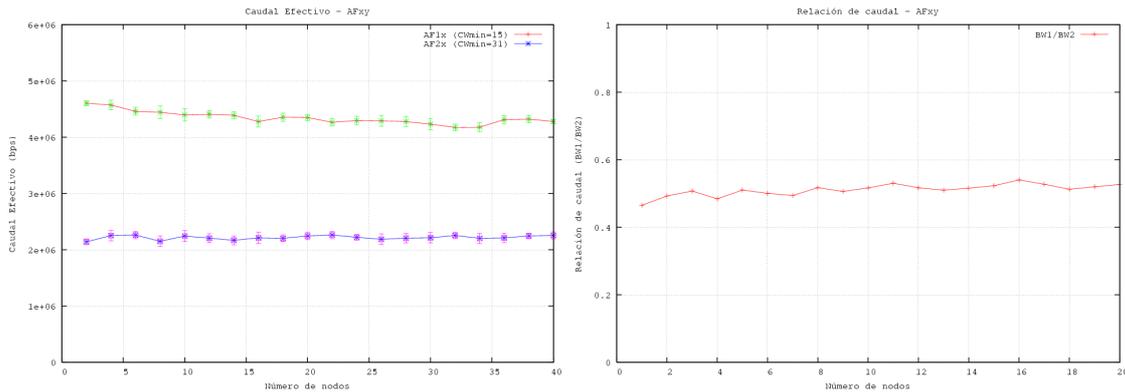


Figura 4-22. Relación de tráfico entre AF1x y AF2x optimizando parámetro CWmin

En este caso el ajuste óptimo de la ventana de contienda permite aumentar drásticamente el caudal efectivo cursado por ambos flujos, además de ser más estable ante el incremento del número de nodos. Estos efectos vienen derivados del menor número de colisiones sufrido gracias al aumento de CWmin. Al mismo tiempo, se ha logrado reducir el margen de fluctuación de la relación conseguida entre ambos flujos, acercándose en mayor medida al ideal 50%.

Una vez analizadas las implicaciones de uso de tráfico Assured Forwarding junto con las colas de acceso de nivel de enlace para 802.11e, podemos proceder a analizar escenarios más complejos donde exista tráfico perteneciente a los cuatro subgrupos definidos por AF.

Ilustremos un caso en el que el administrador de la red desea obtener una relación de flujos entre los diferentes subgrupos AF definida por 8:1, 4:1 y 2:1. Es decir si se dispusiese de un caudal efectivo de 1500 kbps el subgrupo AF1x dispondría de 800kbps, el subgrupo AF2x de 400kbps, el subgrupo AF3x 200kbps, y finalmente el subgrupo AF4x dispondría de 100kbps.

En este caso una configuración valida para el parámetro ventana de contienda mínima sería el mostrado en la tabla 4-2.

Subgrupo Assured Forwarding	Relación deseada respecto a AF1x	Parámetro CWmin	Cola de Acceso 802.11e
AF1x	1 : 1	W	AC_VO
AF2x	1 : 2	W * 2	AC_VI
AF3x	1 : 4	W * 4	AC_BE
AF4x	1 : 8	W * 8	AC_BK

Tabla 4-2. Configuración de las colas de acceso

Veamos los resultados que obtendríamos con dicha configuración en un escenario donde todos los nodos móviles transmiten tráfico perteneciente a los cuatro subgrupos AF con un caudal suficiente como para trabajar en modo de saturación. Comenzaremos estudiando el caso en el que no ajustamos el parámetro CWmin en función del número de nodos para poder

observar a posteriori el aumento de rendimiento (usaremos CWmin = 15).

Mostramos los resultados obtenidos en la figura 4-23 (Nota¹).

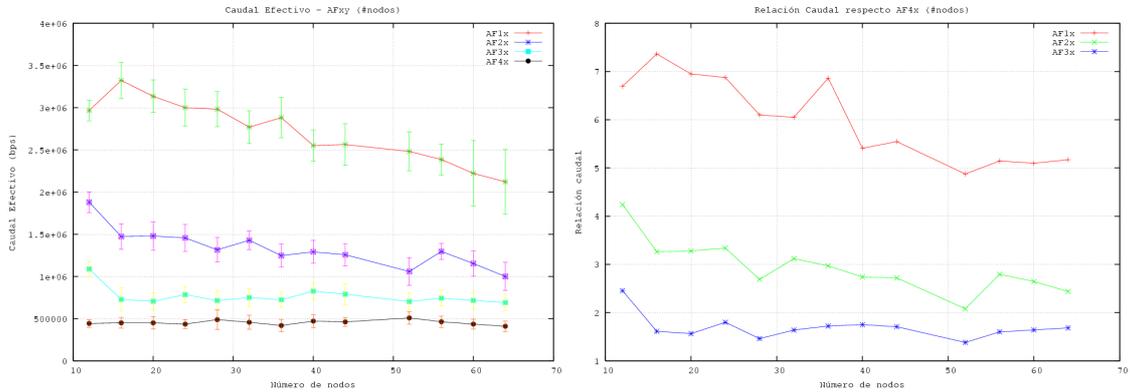


Figura 4-23. Relación entre tráfico AF

En primer lugar podemos apreciar como la relación de flujos conseguida entre los diferentes tráfico AF no se ajusta adecuadamente a los valores buscados. Al mismo tiempo apreciamos como el rendimiento de la red disminuye drásticamente en cuanto aumenta ligeramente el número de nodos. Este hecho viene derivado de la configuración del parámetro CWmin, que para el caso del subgrupo AF1x es muy baja y provoca un elevado número de colisiones.

Para mejorar las prestaciones tendremos que configurar el parámetro CWmin de acuerdo al número de nodos móviles conectados al punto de acceso, tal y como hacíamos anteriormente al analizar el caso con tráfico exclusivo EF o BE.

Repetiendo la simulación previa con una nueva configuración para el tamaño de la ventana de contienda mínimo acorde a la figura 4-4 obtenemos los siguientes resultados mostrados en la figura 4-24.

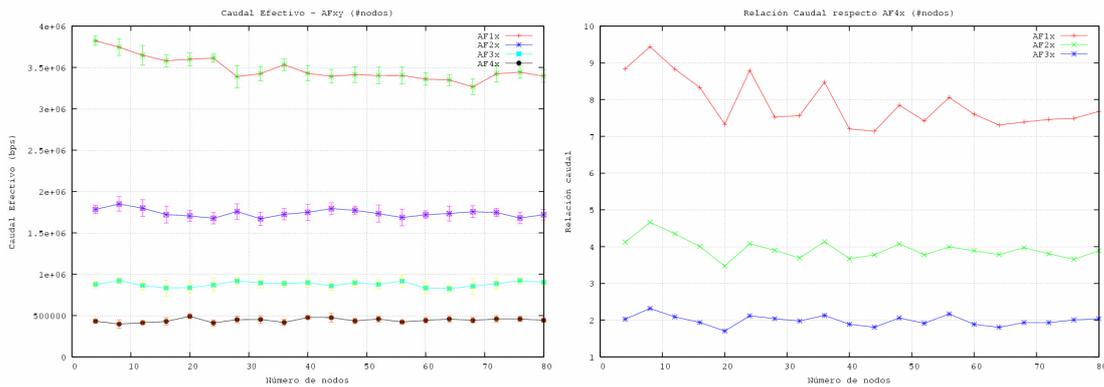


Figura 4-24. Relación entre tráfico AF optimizando CWmin

Podemos apreciar como el rendimiento global de la red ha aumentado considerablemente. Se logra cursar un mayor porcentaje de tráfico para todas las categorías de tráfico AF, mejorando el caudal efectivo global cursado. Además, el reparto de caudal se vuelve más estable y no tan dependiente del número de nodos.

A través de las oportunas simulaciones, hemos podido comprobar como se puede fijar

¹ Nota: Debido a continuados problemas con el simulador ns2, esta figura no representa los valores resultantes de la simulación para 4, 8, 48, 72, 76 y 80 nodos móviles

según las necesidades el reparto de caudal entre los diferentes flujos para el caso de saturación de los mismos. Cumpliendo de esta forma uno de los requisitos derivados del modelo de servicios diferenciados.

Sin embargo, serán muchas las ocasiones en las que no todos los flujos presentes en la red de acceso se encuentren saturando el enlace, y en consecuencia, aquellos flujos de tráfico que si lo estén haciendo obtendrán estadísticamente más recursos que los anteriores. Esta situación no es para nada deseable y debemos proporcionar un mecanismo que permita la corrección de esta desviación sobre el funcionamiento deseado.

Análisis de escenario asimétrico respecto al número de nodos por grupo Diffserv

Veamos algunos ejemplos de escenarios donde no es posible lograr el reparto deseado a través de la configuración previamente descrita.

Escenario A) Un nodo AF4x vs. N nodos AF1x/AF2x/AF3x

En este caso consideraremos una red de acceso con un único nodo móvil transmitiendo tráfico AF4x, y múltiples nodos transmitiendo el resto de tráfico. Incrementaremos paulatinamente el número de nodos transmitiendo tráficos AF1x, AF2x y AF3x, de forma que podamos apreciar su efecto sobre el nodo menos prioritario.

El tráfico generado por cada cliente se encuentra descrito a continuación.

Tráfico AF1x:	UDP con tasa CBR de 4 mbps	- N nodos
Tráfico AF2x:	UDP con tasa CBR de 2 mbps	- N nodos
Tráfico AF3x:	UDP con tasa CBR de 1 mbps	- N nodos
Tráfico AF4x:	UDP con tasa CBR de 500 kbps	- 1 nodo

La figura 4-25 representa los caudales agregados para los cuatro grupos de tráfico. Es decir, el tráfico total cursado en la red de acceso para cada subgrupo Diffserv.

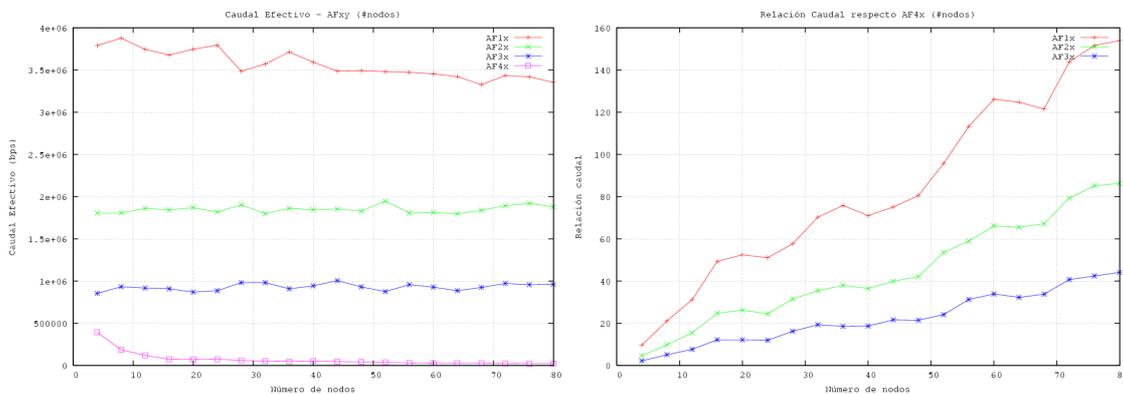


Figura 4-25. Relación entre tráficos AF en situación asimétrica I

Podemos observar como el comportamiento inicial, cuando existen recursos para todos, es el esperado y no hay pérdidas de paquetes. Sin embargo, en cuanto crece el número de nodos, observamos como el tráfico AF4x es el más penalizado, lo cual podría resultar lógico, ya que es el de menor prioridad.

Sin embargo, debemos tener en cuenta que la configuración escogida para las colas de acceso debería ofrecer unas relaciones de flujos tales que el tráfico AF4x representase una octava parte del tráfico global cursado, y en la segunda gráfica podemos observar como las relaciones del resto de flujos respecto de AF4x se disparan. Es decir, el tráfico menos prioritario ha sido prácticamente anulado debido a la saturación existente en la red.

A continuación simularemos el mismo escenario, pero esta vez será el tráfico AF1x el que sea cursado por un único nodo y compita con el resto de flujos.

Escenario B) Un nodo AF1x vs. N nodos AF2x/AF3x/AF4x

Para este escenario consideraremos la presencia de un único nodo transmitiendo tráfico AF1x, y un número incremental de nodos que transmitirá tráfico menos prioritarios: AF2x, AF3x y AF4x. De esta forma podremos comprobar como afecta al tráfico más prioritario un desequilibrio de nodos.

A continuación indicamos la configuración de tráfico para cada cliente.

Tráfico AF1x:	UDP con tasa CBR de 500 kbps	- 1 nodo
Tráfico AF2x:	UDP con tasa CBR de 4 mbps	- N nodos
Tráfico AF3x:	UDP con tasa CBR de 2 mbps	- N nodos
Tráfico AF4x:	UDP con tasa CBR de 1 mbps	- N nodos

En la figura 4-26 representamos los caudales agregados para cada subgrupo Diffserv.

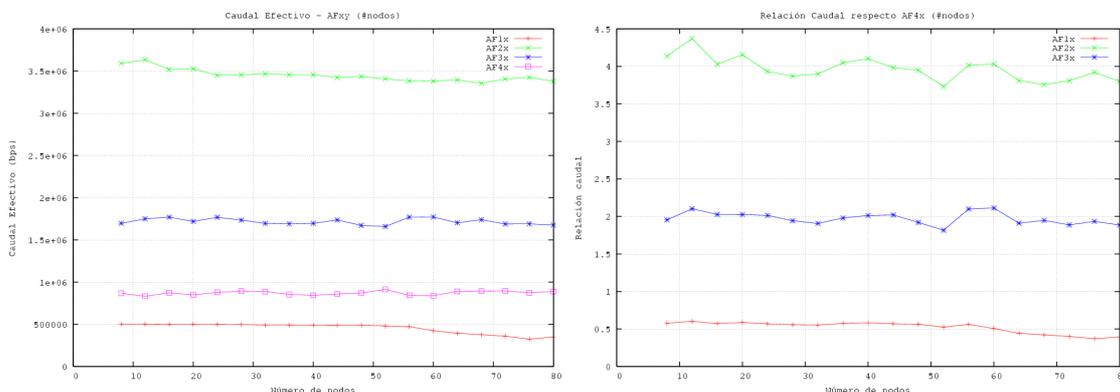


Figura 4-26. Relación entre tráfico AF en situación asimétrica II

Observamos como el tráfico perteneciente al nodo AF1x se cursa sin ninguna pérdida mientras el número de nodos es inferior a 56, pero una vez alcanzado este valor, este tráfico comienza a sufrir pérdidas. Debemos recordar que la configuración elegida debería permitir cursar tráfico AF1x con unas relaciones de 8:1, 8:2 y 8:4 respecto de AF4x, AF3x y AF2x. Sin embargo, y a pesar de encontrarse muy por debajo de este límite, la situación de desventaja producida por la presencia de 15 nodos transmitiendo otro tipo de flujos provoca que se descarten tramas EF.

4.3.3.2 Reparto proporcional de tráfico basado en parámetro AIFS

Estos efectos que hemos observado no son deseables y deberíamos proporcionar un método que permita mantener las relaciones de flujo independientemente de la situación de desventaja derivada de la presencia de un alto número de estaciones.

En este sentido proponemos una solución basada en la presencia de un elemento de red encargado de la continua supervisión del correcto funcionamiento. Dicho elemento de red estará incorporado en el punto de acceso, lugar que debe atravesar todo tráfico de información

perteneciente a la red de acceso, y que en consecuencia, se muestra como el punto de mayor interés para la recolección de información estadística.

Según comentábamos en el capítulo tres, este elemento de red estará compuesto por una serie de módulos encargados de diferentes tareas: recolección de información, procesamiento de la información, gestión de la configuración apropiada de la red (ver figura X).

De esta forma los parámetros de configuración de los diferentes terminales móviles asociados con el punto de acceso, serán configurados de forma que la información estadística elaborada por el mismo punto de acceso se ajuste a la configuración seleccionada por el administrador de la red.

Una de las posibles configuraciones a las que puede acceder el administrador se corresponde con el reparto de caudal según una relación de tráfico prefijada. En este sentido el administrador tiene la opción de indicar cuales son las relaciones entre los diferentes grupos *Diffserv* (EF, AF12x, AF34x y BE), de manera que la red permita cursar los diferentes flujos de tráfico en función de esta configuración.

A continuación podemos analizar una descripción en pseudocódigo del algoritmo encargado de lograr la configuración óptima de parámetros de acceso.

```
PSEUDO-CÓDIGO - Algoritmo dinámico para el ajuste de parámetros

-- Función priorización --

Para cada tráfico Diffserv:
IF ( (BW_deseado - BW_real) > umbral1 && descartes > umbral2 )
    Disminuir prioridad de tráfico menos prioritarios

IF ( (BW_deseado - BW_real) > umbral1* && descartes < umbral2* )
    Aumentar prioridad de tráfico menos prioritarios

-- Función reparto proporcional --

IF ( (BW_deseado - BW_real) > umbral1 && descartes > umbral2 )
    IF (estoy_penalizado) Aumentar prioridad por despenalización
    ELSE Aumentar prioridad penalizando el resto
```

Según comentábamos al comienzo de este apartado, un problema de considerable envergadura que se afronta cuando se trabaja en la configuración de los parámetros de nivel de enlace en redes inalámbricas es la inestabilidad del sistema y la variación de los parámetros observados, como puede ser el caudal efectivo cursado.

Debido a estos factores resultará adecuado definir unos umbrales de funcionamiento dentro de los cuales consideraremos que nos encontramos en un adecuado punto de trabajo. De esta forma el algoritmo detendrá su funcionamiento cuando alcance los objetivos marcados, y se volverá a activar cuando los parámetros objetivo rebasen los umbrales de funcionamiento.

En este sentido y en base a la experiencia alcanzada a través de las diferentes simulaciones que hemos venido desarrollando, consideramos un valor adecuado trabajar con unos umbrales relativos correspondientes al 10% del parámetro objetivo. De esta forma, si el parámetro objetivo fuese reservar un caudal efectivo de 500kbps para el tráfico Best Effort, consideraríamos que nos encontramos en el margen de trabajo cuando el tráfico cursado se situase entre 450 y 550 kbps.

De igual forma se definen unos umbrales secundarios identificados con el signo ‘*’, los cuales nos permitirán delimitar un ciclo de histéresis, y evitar de esta forma que el algoritmo entre en bucles indefinidos.

Condiciones de activación del algoritmo

A continuación indicaremos las condiciones que determinarán la activación del algoritmo y en consecuencia la modificación de los parámetros de nivel de enlace. El algoritmo se encontrará por defecto en un estado de latencia, y únicamente se activará cuando se cumplan las siguientes condiciones con la intención de alcanzar los objetivos determinados por el administrador de red. Una vez hayan sido alcanzados estos objetivos, considerando los umbrales de funcionamiento el algoritmo volverá a un estado de reposo.

Las condiciones por las que el algoritmo entrará en funcionamiento son:

- El caudal efectivo cursado por un determinado grupo Diffserv se encuentra por debajo del caudal objetivo (considerando los umbrales de funcionamiento), y ...
- ... dicho tráfico está sufriendo unas pérdidas debidas a colisiones con otros clientes superiores a un determinado umbral.

Con estas condiciones nos aseguraremos de que el algoritmo entra en funcionamiento únicamente cuando un determinado grupo Diffserv no alcanza el caudal efectivo objetivo debido a colisiones y no a que este cursando un tráfico inferior al solicitado simplemente debido a que los diferentes usuarios no están generando más tráfico.

Esquema de funcionamiento del algoritmo

Una vez que el algoritmo ha entrado en funcionamiento debido a las condiciones de trabajo de la red, este tendrá que llevar a cabo una serie de acciones que lleven a alcanzar los objetivos propuestos por el administrador de red.

Las acciones que llevará a cabo el algoritmo pueden ser de dos tipos, despenalización o penalización a determinados grupos Diffserv. Siempre que sea posible se llevarán a cabo las acciones de despenalización antes de proceder a la penalización. Analicemos ambas acciones:

- *Acciones de despenalización:* el algoritmo entra en funcionamiento cuando un grupo Diffserv se encuentra por debajo de los parámetros objetivo. Si dicho grupo hubiese sido penalizado previamente debido a una anterior acción del algoritmo, la primera acción que se llevará a cabo será la de despenalizar dicho grupo con la intención de acercarse a los parámetros objetivos.
- *Acciones de penalización:* si habiendo concluido las acciones de despenalización, aún no se hubiesen alcanzado los parámetros objetivo se procedería a penalizar al resto de grupos Diffserv con la intención de alcanzar la configuración deseado por el administrador. Esta labor de penalización se realizará de forma proporcional, de acuerdo al porcentaje de desviación de cada grupo respecto de los parámetros objetivo.

Condiciones de parada del algoritmo

A través de la realización de las pertinentes acciones de penalización y despenalización el algoritmo nos llevará a una configuración tal que los parámetros objetivo se encuentren

dentro de los umbrales de trabajo descritos anteriormente.

En este momento el algoritmo pasará a un nuevo estado de reposo que se prolongará mientras no se den de nuevo las condiciones de activación.

Ajuste dinámico de parámetro AIFS en función de los niveles de saturación

A continuación mostraremos los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo descrito sobre los escenarios donde previamente apreciábamos un comportamiento inadecuado derivado de los diferentes niveles de saturación para cada flujo Diffserv.

Comenzaremos simulando dos escenarios que muestran situaciones extremas, donde la existencia de un único nodo transmitiendo tráfico EF o BE, según cada caso, se encuentran en clara desventaja al acceder al medio debido a la enorme competencia del resto de flujos.

Como vimos anteriormente esta situación provocaba que a pesar de tener una supuesta reserva que debería permitir cursar todo el tráfico inyectado, en realidad, este tráfico no lograba alcanzar el punto de acceso debido a las múltiples y sucesivas colisiones.

La relación de flujos vendrá determinada por el tráfico AF4x, de forma que elegiremos las relaciones 1:2, 1:4 y 1:8 respecto de AF3x, AF2x y AF1x. Esta relación se corresponde con el reparto del caudal total indicado a continuación.

El primero de los escenarios se encontraba definido por las siguientes características.

Tráfico AF1x:	UDP con tasa CBR de 4 mbps	- N nodos
Tráfico AF2x:	UDP con tasa CBR de 2 mbps	- N nodos
Tráfico AF3x:	UDP con tasa CBR de 1 mbps	- N nodos
Tráfico AF4x:	UDP con tasa CBR de 500 kbps	- 1 nodo

Reparto del caudal efectivo total:	
AF1x	- 53,30 %
AF2x	- 26,60 %
AF3x	- 13,30 %
AF4x	- 6,60 %

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4-27.

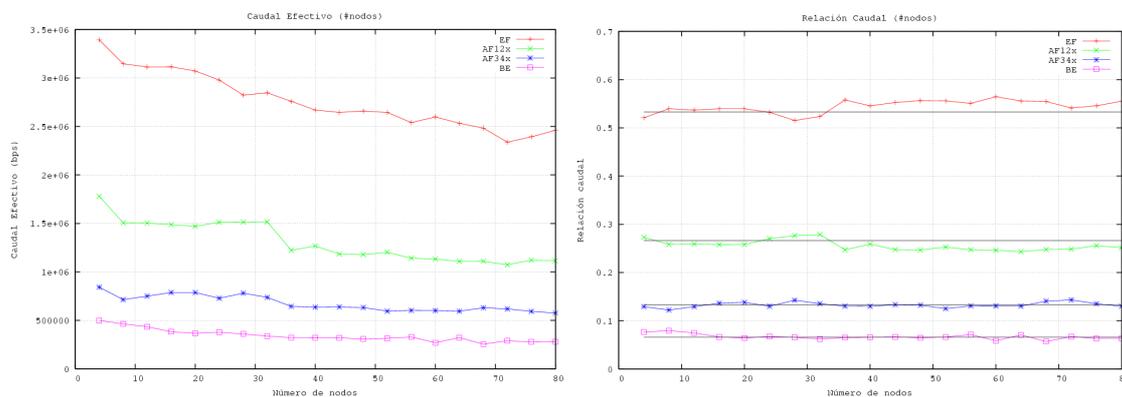


Figura 4-27. Relación de tráfico AF usando algoritmo para cálculo de AIFS (I)

Según muestran ambas figuras podemos observar como en este caso el tráfico AF4x, a pesar de encontrarse en una clara situación de desventaja, consigue cursar gran parte del tráfico que inyecta en la red.

El reparto propuesto por el administrador concedía al tráfico AF4x una octava parte del

tráfico total, y según podemos apreciar en la segunda gráfica el tráfico cursado por AF4x se encuentra entre los márgenes de seguridad del nivel de la octava parte del tráfico global.

Comparando las figuras 4-25 y 4-27 comprobamos como el uso del algoritmo de configuración sobre la arquitectura propuesta logra una **configuración óptima** para el reparto proporcional de tráfico de acuerdo al modelo de servicios diferenciados, aún encontrándonos en escenarios claramente desfavorables para este reparto. Sin embargo el caudal total cursado por la red ha disminuido notablemente. Este efecto se comentará posteriormente.

Pasaremos a simular el segundo escenario donde encontrábamos problemas para lograr la configuración requerida por el administrador. En este escenario la configuración de los diferentes clientes era la descrita a continuación.

Tráfico AF1x:	UDP con tasa CBR de 500 kbps	- 1 nodo
Tráfico AF2x:	UDP con tasa CBR de 4 mbps	- N nodos
Tráfico AF3x:	UDP con tasa CBR de 2 mbps	- N nodos
Tráfico AF4x:	UDP con tasa CBR de 1 mbps	- N nodos

Reparto del caudal efectivo total:

AF1x	- 53,30 %
AF2x	- 26,60 %
AF3x	- 13,30 %
AF4x	- 6,60 %

En la figura 4-28 podemos comprobar los resultados obtenidos.

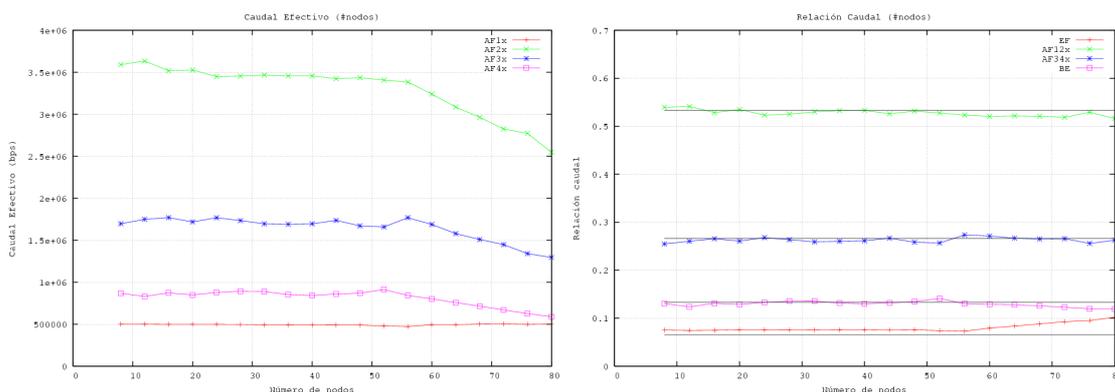


Figura 4-28. Relación de tráfico AF usando algoritmo para cálculo de AIFS (II)

Los resultados mostrados en estas figuras requieren un detallado análisis para determinar todos los efectos que están teniendo lugar:

- El tráfico más prioritario, AF1x, fue configurado para lograr un 53,30% del caudal total de la red de acceso. Sin embargo este subgrupo tan sólo está generando 500kbps, de manera que permite que el resto de flujos absorban el caudal sobrante.
- Cuando el número de nodos es bajo el tráfico AF1x no sufre pérdidas significativas debidas a colisiones y en consecuencia no es necesario aumentar la priorización del mismo. Sin embargo, a partir de 56 nodos, el algoritmo detecta un nivel considerable de pérdidas que supera los umbrales de trabajo.

En este momento el algoritmo aumenta la priorización del tráfico AF1x, ya que está sufriendo perdidas considerables aún encontrándose muy por debajo de su caudal objetivo marcado.

Esta nueva configuración provoca que el resto de subgrupos AF pierdan prioridad

en el acceso al medio, y en consecuencia disminuya su rendimiento, lo que se traduce en un menor caudal efectivo cursado.

- Para un número de nodos superior a 56 el tráfico AF1x sigue cursándose sin ningún problema ya que se encuentra por debajo del caudal objetivo. En este caso la figura que muestra el porcentaje relativo de tráfico cursado no aporta mucha información, y simplemente podemos apreciar como efectivamente a partir de 60 nodos el caudal relativo cursado por AF1x aumenta.

A partir de los dos escenarios simulados podemos concluir que el reparto proporcional de tráfico entre subgrupos AF en situaciones de asimetría de carga conlleva una **considerable disminución del rendimiento** de la red. En consecuencia esta configuración deberá ser elegida únicamente cuando las características del escenario lo requieran específicamente.

En aquellas situaciones donde sea posible será preferible optar por la priorización entre subgrupos, ya que esta opción ofrece un mejor rendimiento de la red.

4.3.3.3 Escenarios de Aplicación

A partir del desarrollo del modelo de calidad de servicio descrito por el modelo de servicios diferenciados para el grupo Assured Forwarding, basado en reparto proporcional de caudal, aparecen múltiples escenarios de aplicación de gran interés.

En general podríamos volver a aplicar esta nueva política sobre todos los escenarios descritos anteriormente en el apartado 4.3.2.3. En este caso en lugar establecer una preferencia total de unos grupos respecto a otros, lo que se establece son una serie de cuotas que determinan el porcentaje de tráfico destinado a cada uno de estos grupos.

De esta forma el resultado evitaría un bloqueo total de los tráficos menos prioritarios, y en su lugar, gracias al reparto proporcional de tráfico, se lograría un mejor comportamiento de los tráficos con mayor caudal asignado, sin llegar a bloquear otros tráficos de menor prioridad.

Esta solución resulta más interesante en aquellos casos donde no queremos que los servicios del tráfico menos prioritario se bloqueen, pero si que sean los que menos recursos consuman, permitiendo que los tráficos con mayor prioridad continúen con su funcionamiento normal.

Este modelo resulta muy apropiado para los modelos de **priorización basada en tarificación de usuarios**. En este caso, queremos que los usuarios que han solicitado un mejor servicio tengan destinados más recursos, de forma que perciban una mejor calidad de servicio en su acceso, pero sin llegar a bloquear el acceso de los usuarios con servicios más baratos.

Resulta igualmente especialmente interesante para el modelo de priorización por destino, de forma que podamos asignar cuotas de caudal para el acceso a determinados servidores. De esta forma disponemos de un mecanismo para limitar el acceso a determinados servicios / contenidos, sin llegar a bloquear por completo su acceso. Las cuotas de acceso pueden venir determinados por las políticas de acceso de la empresa / organización.

En resumen, emplearemos el modelo de reparto proporcional de caudal para los casos en que no sea deseable llegar al bloqueo de los servicios de baja prioridad cuando nos encontramos en una situación de saturación de la red de acceso.

4.3.4 Reparto proporcional entre subgrupos Assured Forwarding junto con priorización

Una vez analizados los escenarios previos donde se estudian las funciones de priorización y reparto proporcional de caudal independientemente, pasaremos a estudiar un escenario donde convivan ambas funciones.

En este apartado trabajaremos sobre un escenario donde coexiste tráfico EF, BE y AF, y donde el administrador de red ha establecido las funciones de priorización entre los diferentes grupos *Diffserv*, y un reparto proporcional de caudal entre los subgrupos *Assured Forwarding*.

En este caso las colas de acceso disponibles, AC_VO, AC_VI, AC_BE y AC_BK, deberán emplearse adecuadamente para cursar todos los posibles tráficos. El reparto más adecuado, y que ya ha sido comentado en el estado del arte, sería el que reserva la cola más prioritaria para EF, la cola menos prioritaria para BE, y las dos colas intermedias serían utilizadas para cursar el tráfico AF, el cual podríamos subdividir en dos subclases.

Resumimos esta asignación en la tabla de mapeo 4-3.

Cola de Acceso	Tráfico
AC_VO	EF
AC_VI	AF1x y AF2x
AC_BE	AF3x y AF4x
AC_BK	BE

Tabla 4-3. Configuración de las colas de acceso EDCA

En base al reparto descrito tendremos que tener en cuenta las siguientes consideraciones para proceder a configurar los parámetros de acceso adecuados para estas colas.

- La cola de acceso AC_VO será la más prioritaria y se empleará para cursar el tráfico *Expedited Forwarding*. En este sentido debería procesar cualquier trama disponible antes que cualquier otra cola perteneciente a cualquier nodo conectado al punto de acceso. En este sentido utilizará el menor tiempo de acceso al medio (AIFS) y ventana de contienda (CWmin).

Este último parámetro se ajustará apropiadamente en función del número de nodos para lograr maximizar las prestaciones de la red.

- Las colas de acceso AC_VI y AC_BE se utilizarán para cursar los diferentes subgrupos *Assured Forwarding*, de manera que tendrán que permitir mantener una relación de flujos de acuerdo a la configuración indicada por el administrador de la red. Para ello emplearemos las técnicas descritas en el apartado anterior, usando el parámetro AIFS para lograr este objetivo.

Al mismo tiempo se empleará el parámetro AIFS para lograr la priorización adecuada respecto de la cola AC_VI, de forma que esta obtenga un mejor acceso al canal, permitiendo cursar el tráfico EF siempre que esté presente.

- Finalmente, la cola de acceso AC_BK, que se encargará de cursar el tráfico *Best Effort* tendrá la menor prioridad y para ello se empleará tanto el parámetro AIFS como CWmin. Optimizando este último en función del número de nodos para optimizar el rendimiento de la red.

Comenzaremos describiendo el escenario sobre el que vamos a trabajar en el cual coexisten todos los posibles tráficos definidos por el modelo de servicios diferenciados.

El escenario está formado por un número variable de nodos móviles conectados al punto de acceso donde cada uno de estos nodos se encuentra transmitiendo los siguientes tipos de tráfico:

- A) *Tráfico Expedited Forwarding*: para el caso del tráfico más prioritario consideraremos una aplicación multimedia enviando tráfico a una tasa constante y utilizando el protocolo UDP debido a la no necesidad de asentimientos. La tasa de tráfico será la que se ajusta a la transmisión de video MPEG4 (2h de video en 1CD – 600Mb) con audio MPEG – Layer 3 a 128kbps, lo que en total supone una tasa de transmisión de 500kbps. El tamaño de la trama será de 1500 bytes.
- B) *Tráfico Assured Forwarding*: teniendo en cuenta que sólo disponemos de dos colas de acceso para cursar este tráfico, agruparemos los diferentes flujos en dos grupos a los que a partir de ahora identificaremos con las etiquetas AF12x (tráfico AF1x y AF2x) y AF34x (tráfico AF3x y AF4x).

En la medida en que deseamos apreciar la priorización del tráfico AF sobre BE, no podremos comenzar considerando tráfico AF que satura el enlace, ya que eso provocaría que el tráfico BE nunca fuese cursado. En su lugar utilizaremos un modelo similar al empleado para EF, modificando la tasa de envío. En este sentido se utilizarán dos fuentes, dentro de cada nodo, que generen una tasa de 250 kbps hacia el punto de acceso.

Para poder apreciar la capacidad de forzar una relación de flujos entre los diferentes subgrupos Assured Forwarding, consideraremos que el administrador de la red desea lograr una relación de 2:1, es decir que el tráfico cursado por el subgrupo AF12x sea el doble que para AF34x.

- C) *Tráfico Best Effort*: este tipo de tráfico no lo caracterizaremos debido a sus múltiples posibles fuentes y a la falta de interés en el estudio en modo de saturación. En consecuencia la simulación se realizará a través de una función exponencial. Elegiremos una tasa lo suficientemente alta como para asegurarnos de que el canal se encuentra en todo momento saturado.

Mediremos el caudal efectivo de tráfico cursado por la red para cada uno de los tipos de flujos EF, AF y BE, pudiendo comprobar de esta forma la relación existente entre ellos. Destacar que representaremos el caudal EF y AF cursado por cliente, y el caudal BE global cursado por la red. Esta representación es la más interesante, ya que los tráficos EF y AF tienen una tasa fija, mientras el BE tiene una tasa lo suficientemente elevada como para saturar la red.

En primer lugar utilizaremos la configuración por defecto proporcionada por el estándar IEEE 802.11e (ver tabla 4-1) para las colas de acceso sobre el escenario descrito, de forma que posteriormente podamos apreciar las ventajas derivadas del ajuste apropiado de los diferentes parámetros de acceso.

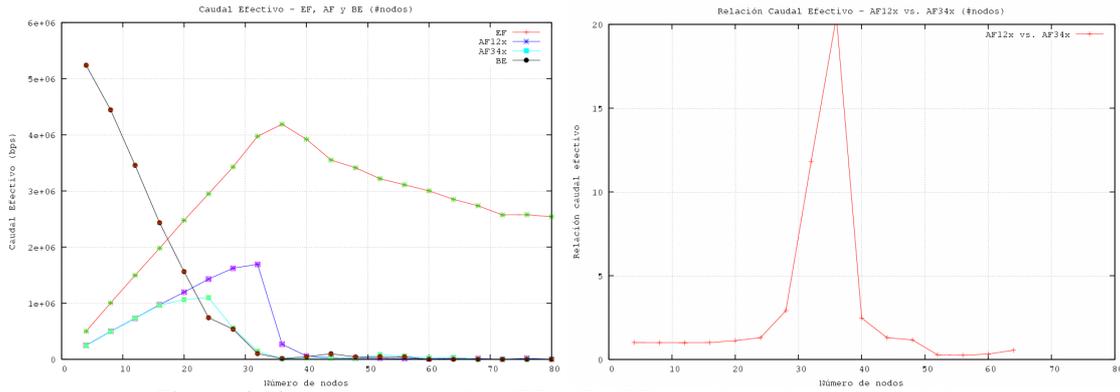


Figura 4-29. Análisis de tráfico EF, AF y BE usando parámetros por defecto

Observamos en la figura 4-29 como el tráfico BE está logrando acceso aún cuando se están descartando tramas EF. Sucede lo mismo aunque en menor medida con el tráfico AF, justo con 36 nodos aún se sigue cursando parte del tráfico AF, cuando comienza el descarte de tramas EF. Por otro lado la relación de flujos entre los tráfico AF12x y AF34x se eleva hasta 20:1.

En general apreciamos como los resultados obtenidos distan bastante de los requisitos impuestos por el modelo de servicios diferenciados.

A continuación haremos uso del algoritmo de configuración descrito en el apartado anterior para proceder al cálculo de los parámetros óptimos de acceso. Esta nueva configuración debería permitir cumplir las funciones de priorización y de reparto proporcional de carga.

La figura 4-30 muestra los resultados obtenidos con esta configuración.

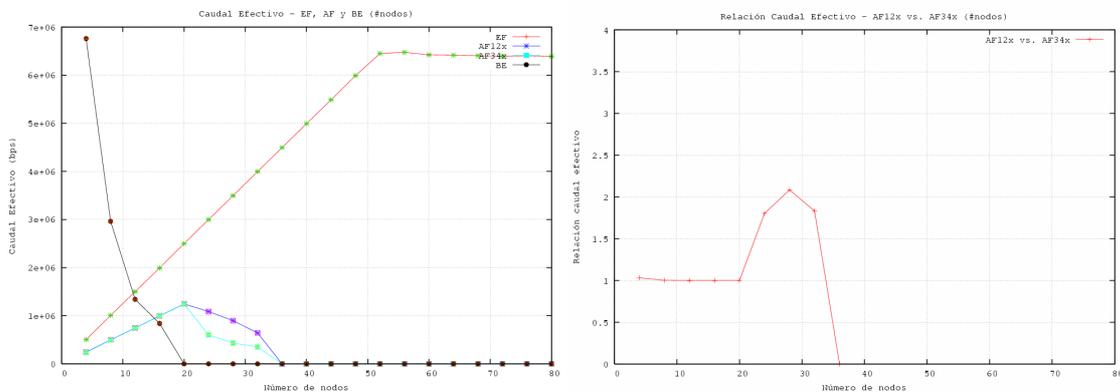


Figura 4-30. Análisis de tráfico EF, AF y BE usando algoritmo de configuración

En este caso podemos comprobar como en ningún momento un tráfico de prioridad inferior obstaculiza el envío de cualquier otro tráfico de mayor prioridad, lo cual se ha logrado realizando el ajuste apropiado de los parámetros AIFS y CWmin.

En segundo lugar apreciamos como el caudal efectivo que estamos logrando transmitir para la cola más prioritaria, *Expedited Forwarding*, ha aumentado considerablemente. De igual forma el tráfico BE aprovecha el enlace cuando se encuentra libre para transmitir el mayor caudal posible, y cuando este se encuentra ocupado por otro tipo de tráfico más prioritario el tráfico BE se anula.

En resumen, hemos conseguido maximizar el rendimiento de la red, y al mismo tiempo, cumplir los requisitos establecidos por el modelo de servicios diferenciados.

4.3.4.1 Escenarios de Aplicación

Según hemos visto, este último modelo de acceso basado en la descripción del modelo de servicios diferenciados, permite al mismo tiempo lograr las funciones de priorización y de reparto proporcional de caudal entre grupos.

La combinación de ambas funcionalidades da lugar a nuevos escenarios de trabajo de gran interés. A modo de ejemplo ilustraremos un escenario de aplicación para un proveedor de acceso a Internet.

En la actualidad los proveedores de acceso a la red están diversificando su negocio con la intención de aumentar los beneficios. De esta forma, al mismo tiempo que siguen ofreciendo acceso de banda ancha a Internet a los usuarios, completan sus ofertas con televisión a la carta, y tarifa plana en el acceso telefónico.

Dentro los servicios ofertados los operadores tienen muy clara la prioridad de los mismos, y a modo de ejemplo, no sería deseable que el tráfico web de un usuario interfiriera la llamada telefónica que se estuviese cursando. En este sentido, la función de priorización entre aplicaciones será de gran utilidad y permitirá evitar este tipo de problemas.

Por otro lado los operadores podrían desear ofrecer servicios de acceso a Internet con diferente calidad de acceso, y establecer diferentes cuotas mensuales en función de la calidad seleccionada (p.e. Oro, Plata, Bronce). Este modelo se ajusta a la función de reparto proporcional de caudal entre usuarios.

El servicio global ofrecido por el operador que engloba las dos funcionalidades que acabamos de describir podría ofrecerse a través del servicio que acabamos de estudiar en el apartado 4.3.4, el cual permitiría ofrecer diferentes prioridades para tres tipos distintos de tráfico (EF; AF y BE), y al mismo tiempo podría crear dos subgrupos (AF_{1X} / AF_{2X}) con un reparto de caudal determinado entre los mismos.

4.3.5 Consideraciones especiales: Escenarios multi-rate

A través del trabajo realizado hasta el presente apartado se ha validado el correcto funcionamiento de la arquitectura propuesta, y se ha demostrado la viabilidad de implementar las funciones de priorización y reparto proporcional de tráfico definidas por el modelo de servicios diferenciados. En el presente apartado analizaremos un escenario donde abordaremos una característica común en los escenarios reales.

La tasa de transmisión que cada nodo emplea para comunicarse con el punto de acceso depende del nivel de señal a ruido disponible. De esta forma, si el nivel de señal es adecuado, se configurará el nodo para transmitir a la máxima velocidad posible, la cual varía en función del estándar empleado. Sin embargo, si el nivel de señal disminuye, ya sea por la distancia al punto de acceso, ruido existente o interferencias, se elegirá una tasa de transmisión más baja que aumente la fiabilidad del enlace.

Hasta el momento sólo hemos considerado nodos móviles con una tasa de transmisión fijada a 11 mbps. Esta configuración nos ha permitido centrarnos en otros aspectos de mayor interés para el análisis del comportamiento del caudal en función de los parámetros de acceso utilizados.

A continuación, demostraremos que todas las conclusiones anteriormente extraídas son igualmente aplicables, aún cuando existan nodos con diferentes configuraciones en la tasa de transmisión.

Según hemos podido analizar en los anteriores apartados, la configuración de los parámetros venía determinada por el nivel de saturación de la red, medido a través de los descartes por colisión indicados por los propios nodos móviles. En este sentido, la tasa de transmisión de cada cliente no afecta a los resultados obtenidos, si bien si que determinará por completo el rendimiento de la red.

Debemos tener en cuenta que cuanto menor es la tasa de transmisión, mayor es el consumo de recursos por parte del cliente. En cualquier caso, la arquitectura propuesta es capaz de mantener las funciones requeridas por el modelo de servicios diferenciados: priorización y reparto proporcional de caudal.

A modo de ejemplo, repetiremos el escenario estudiado en el apartado 4.3.2.1, donde estudiábamos la función de priorización entre dos grupos *Diffserv*. Se definía un escenario donde la mitad de los nodos transmitían tráfico *Expedited Forwarding*, y la otra mitad *Best Effort*. Y se comprobaba como una vez que se alcanzaba el nivel de saturación en la red, el tráfico BE dejaba de cursarse.

El nuevo escenario propuesto considerará la presencia de nodos configurados a dos tasas diferentes de transmisión: 5,5mbps y 11mbps. En concreto, la mitad de los nodos de cada grupo *Diffserv*, estará configurado para trabajar a 5,5mbps y la otra mitad a 11mbps.

Los resultados se muestran en la figura 4-31, y al mismo tiempo se comparan con los resultados que obteníamos cuando solo existían nodos configurados a 11mbps. En este caso los nuevos resultados están etiquetados como EF* y BE*, frente a los antiguos EF y BE.

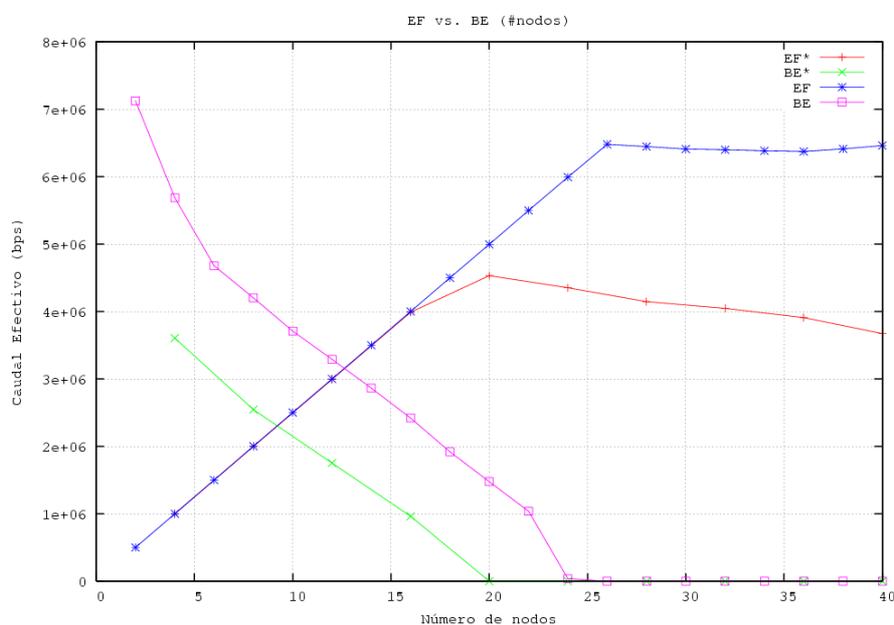


Figura 4-31. Priorización en escenarios multi-rate

Tal y como podemos apreciar, el rendimiento de la red disminuye cuando aparecen nodos con una tasa de transmisión de 5,5mbps, lo cual ya habíamos anunciado anteriormente. De esta forma, en el nuevo escenario, el tráfico BE cursado es considerablemente inferior al antiguo. Mientras, el tráfico EF se mantiene estable hasta que se alcanzan los 20 nodos, momento a partir del cual se comienza a descartar tráfico debido a la situación de saturación.

Con respecto a la función de priorización requerida por el modelo de servicios diferenciados, podemos apreciar como se sigue cumpliendo estrictamente, y justo cuando el tráfico EF alcanza el nivel de saturación de la red, comprobamos como el tráfico BE cursado se ha anulado.

De esta forma se da por demostrado el correcto funcionamiento de la arquitectura de red propuesta en escenario con nodos configurados a diferentes tasas de transmisión (*multi-rate*). Siendo el único efecto detectado una notable disminución del rendimiento de la red, provocado por una mayor consumo de recursos ante la nueva configuración.

4.4 Conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado la validación de la arquitectura de red de acceso propuesta en el anterior capítulo tres. El proceso de validación se ha llevado a cabo por el método de la simulación, el cual ha permitido analizar el funcionamiento y comportamiento exhaustivo de la arquitectura.

De cara a la realización de estas pruebas se seleccionó un entorno de simulación adecuado, que permitiese representar nodos móviles compatibles con el estándar IEEE 802.11e, y obtener información estadística relativa al rendimiento de la red para su posterior evaluación. El entorno *Network Simulator*, conocido como NS2, cumplía estas condiciones y ofrecía un adecuado soporte a través de las listas de correo de usuarios y desarrolladores.

Se realizó una preselección de escenarios de interés, que permitiesen un análisis de complejidad incremental, de forma que resultase factible estudiar las diferentes funcionalidades proporcionadas por la arquitectura de red de acceso y evaluar sus prestaciones.

Recordemos que el objetivo marcado por la arquitectura de red descrita en esta tesis pretendía maximizar el rendimiento de la misma cumpliendo al mismo tiempo las funciones descritas por el modelo de servicios diferenciados.

Describiremos a continuación las conclusiones más relevantes obtenidas a través de las diferentes simulaciones realizadas sobre cada escenario de interés:

- En el apartado 4.3.1 demostramos como un apropiado ajuste de los parámetros de acceso permite mejorar notablemente el rendimiento de la red ante la presencia de tráfico perteneciente a un único grupo *Diffserv*.

Una correcta configuración del parámetro ventana de contienda mínimo en función del número de nodos activos en la red aumenta considerablemente el caudal efectivo máximo cursado por la red, independientemente de los diferentes factores estudiados. Alcanzando **mejoras superiores al 100%** en variados casos.

Al mismo tiempo el retardo sufrido por las tramas para alcanzar el punto de acceso se ve **reducido hasta en un 40%** para los escenarios con mayor número de nodos activos.

Se pudo comprobar como en escenarios donde la red no se encuentra saturada el ajuste adecuado del parámetro *CWmin* seguirá siendo de gran importancia, y permitirá aumentar considerablemente las prestaciones de la red.

- A través de las simulaciones llevadas a cabo en el apartado 4.3.2 comprobamos como es posible ofrecer **prioridad absoluta** entre los diferentes flujos *Diffserv* eligiendo una configuración adecuada según los parámetros de la red en cada momento.

Al mismo tiempo la arquitectura propuesta en el capítulo tres permite maximizar el caudal efectivo total cursado por la red, y en la misma medida reduce el retardo sufrido por las tramas pertenecientes a los grupos más prioritarios del modelo de servicios diferenciados.

En los escenarios descritos en este apartado la nueva configuración permitía

aumentar el **número de nodos en un 30%** obteniendo las mismas prestaciones para los flujos más prioritarios.

Se han estudiado igualmente escenarios especialmente críticos donde existían situaciones de asimetría en la presencia de nodos de los diferentes grupos *Diffserv*. Y se ha demostrado como la configuración escogida por la arquitectura de red permite abarcar estas situaciones manteniendo la prioridad entre los diferentes grupos.

- El reparto proporcional de tráfico entre los diferentes subgrupos Assured Forwarding, estudiado en el apartado 4.3.3, se ha mostrado como una de las tareas más complejas. En consecuencia se ha optado por estudiar diferentes soluciones y evaluar su impacto en el modelo de servicios diferenciados.

Se comenzó su estudio mediante el **ajuste del parámetro CWmin**, y se pudo comprobar que ofrecía buenas prestaciones, logrando fijar las proporciones entre flujos a los valores prefijados por el administrador de red.

Sin embargo, en **escenarios asimétricos** con respecto al número de nodos presentes de cada grupo *Diffserv*, esta solución no ofrecía resultados adecuados. La proporción lograda entre flujos se alejaba de la deseada siendo imposible ajustarse al modelo *Diffserv*.

En consecuencia se consideró la opción de trabajar con el **parámetro AIFS**, para lo cual se describió un algoritmo que mediante realimentación ajustaba el valor de dicho parámetro para alcanzar la configuración buscada.

En las figuras 4.27 y 4.28 se muestra como este algoritmo ofrece una configuración óptima, si bien este tipo de escenarios provocan una sensible disminución del caudal cursado por la red.

En consecuencia, en aquellos escenarios donde sea factible su uso, **aconsejamos** emplear el modelo de priorización con preferencia al de reparto proporcional.

- Finalmente, en el apartado 4.3.4 se realizaron diferentes simulaciones sobre escenarios que conjugaban ambas funcionalidades, prioridad y reparto proporcional, al mismo tiempo.

Siguiendo la filosofía descrita en los anteriores apartados, la configuración ofrecida por la arquitectura de red **permite ajustarnos a ambos requisitos** optimizando al mismo tiempo el rendimiento de la red.

A raíz de las diferentes simulaciones llevadas a cabo en este capítulo, se ha demostrado el óptimo funcionamiento de la arquitectura de red descrita en el capítulo previo, la cual permite conjugar las funciones de prioridad y reparto proporcional de tráfico del modelo de servicios diferenciados, y al mismo tiempo optimizar el rendimiento de la red de acceso.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1 Introducción

A través de los diferentes capítulos de esta tesis se ha descrito la propuesta de una arquitectura de red de acceso inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11e, que soporta el modelo de servicios diferenciados descrito por el IETF, y al mismo tiempo optimiza el rendimiento de la misma.

El comportamiento de esta arquitectura ha sido validado mediante un simulador de redes, lo cual ha permitido extraer valiosos resultados relativos al funcionamiento conjunto del modelo de servicios diferenciados sobre una red inalámbrica con soporte de calidad de servicio como lo es IEEE 802.11e.

A continuación comentaremos las principales conclusiones extraídas y, al mismo tiempo, destacaremos las principales contribuciones realizadas en el marco de esta tesis al análisis de arquitecturas de redes de acceso con soporte de calidad de servicio.

5.2 Conclusiones

La primera contribución que se ha realizado en esta tesis ha sido una **revisión de las diferentes tecnologías de redes de acceso inalámbricas**, realizando una valoración cualitativa en función de su estado de despliegue en la sociedad actual y sus perspectivas de evolución. Se han examinado con especial relevancia las redes de mayor difusión correspondientes al estándar IEEE 802.11, revisando los diferentes grupos de trabajo actualmente activos y que proponen mejoras en diferentes aspectos del estándar.

En este sentido, se ha realizado un exhaustivo análisis del reciente **estándar IEEE 802.11E**, el cual ofrece la posibilidad de soportar cierto nivel de calidad de servicio sobre redes inalámbricas. Este estándar propone ligeras variaciones sobre la capa de enlace de las actuales redes 802.11, de forma que esta podría ser la puerta a la calidad de servicio a nivel de enlace en redes de área local inalámbrica, retomando de esta forma la filosofía de las extintas tecnologías Token Ring o Token Bus.

De igual forma, esta tesis revisa las principales **propuestas de calidad de servicio a nivel de red**, centrándonos en el modelo de **servicios diferenciados** por su idoneidad para las especiales características de las redes inalámbricas, las cuales son especialmente sensibles a las condiciones del entorno y altamente ineficientes en determinados escenarios. Siendo este un tema de gran auge entre la comunidad investigadora, se ha realizado un intenso estudio de las diferentes propuestas existentes para el soporte del modelo de servicios diferenciados sobre redes basadas en el estándar IEEE 802.11e.

En el entorno de **arquitecturas de redes de acceso** con soporte de calidad de servicio se ha realizado la principal aportación de esta tesis. Lograr un uso eficiente del medio físico es especialmente importante en entornos inalámbricos, y en este sentido se ha realizado el diseño de una arquitectura de red de acceso sobre tecnología inalámbrica 802.11e que permite el soporte del modelo de servicios diferenciados especificado por el IETF, al mismo tiempo que optimiza el uso de los recursos de la red.

El diseño de esta arquitectura de red comenzó definiendo el objetivo de la misma, a partir del cual se definieron una serie de funciones básicas que debería realizar la red de acceso, y cuya combinación daría lugar a la consecución del objetivo marcado. De esta forma se **identificaron las funciones** de Recopilación de Información, fase en la cual la arquitectura recoge información estadística de uso de la misma, Procesamiento, de forma que a partir de esta información se calculan la configuración óptima de acceso, y Configuración de elementos de red, la cual culmina distribuyendo esta configuración entre los diferentes dispositivos asociados a la red.

La realización de estas funciones se lleva a cabo a través del funcionamiento conjunto de diferentes módulos, ubicados tanto en las estaciones móviles como en el propio punto de acceso. La comunicación entre estos módulos se realiza a través de diferentes interfaces que son descritos detalladamente junto con la información que intercambian.

El diseño de la arquitectura de red de acceso se completa con la definición de los más importantes **casos de uso**. Estos describen la secuencia de operaciones que tiene lugar entre los diferentes módulos que conforman la arquitectura ante determinados eventos: registro de un nuevo dispositivo en la red, cambio del modo de operación de red por parte del administrador, y cambio sustancial de las condiciones de carga de la red.

Una vez descrita la propuesta de arquitectura de red de acceso se procedió a su **validación** a través del método de simulación. Este proceso permitió analizar el funcionamiento y comportamiento de la arquitectura a través de la simulación de diferentes escenarios de

interés.

Para la realización del proceso de validación fue necesario elegir un entorno de simulación adecuado que nos ofreciese la posibilidad de modelar estaciones inalámbricas 802.11e. En este sentido se eligió el simulador de redes NS2 y una extensión desarrollada por la Universidad Politecnica de Berlín. Como complemento a esta tesis, a través del apéndice A, se ofrece un completo manual de **instalación y ejecución del entorno de simulación** empleado en esta tesis, al mismo tiempo que realizamos la validación del propio entorno de simulación.

Posteriormente se preseleccionaron diferentes **escenarios de interés** que representaban las principales funciones de soporte de calidad de servicio ofrecidas por el modelo de servicios diferenciados. En este sentido se definieron escenarios que hacían uso del soporte de prioridad entre los diferentes grupos *Diffserv*, y por otro lado, escenarios que empleaban el reparto proporcional de caudal entre los subgrupos *Assured Forwarding*.

Los resultados del proceso de validación han demostrado como la arquitectura propuesta permite lograr un soporte adecuado de las funciones establecidas por el modelo de servicios diferenciados y, al mismo tiempo, realizar un uso óptimo de los recursos disponibles.

Con respecto al mejor aprovechamiento de los recursos de red, podríamos destacar diferentes validaciones llevadas a cabo sobre los escenarios de interés. En los escenarios donde sólo existía un único grupo *Diffserv*, se lograba un incremento de hasta un 100% en el caudal cursado para las colas más prioritarias. Sobre aquellos escenarios que abordaban la provisión de prioridad entre los diferentes subgrupos *Diffserv*, veíamos como era posible aumentar el número de nodos en un 30% logrando las mismas prestaciones.

Los diferentes procesos de validación se realizaron igualmente sobre escenarios marcados por una clara asimetría en la generación de tráfico, es decir, diferente número de fuentes para cada grupo descrito por el modelo de servicios diferenciados. Y se pudo comprobar como la arquitectura propuesta se amoldaba perfectamente a estos escenarios cumpliendo con las funciones de prioridad y reparto proporcional de caudal aún en condiciones especialmente desfavorables.

5.3 Reflexiones Personales

Más allá del análisis de soporte de calidad de servicio a nivel tecnológico deberíamos plantearnos si nos encontramos en una sociedad dispuesta a disfrutar de este no tan nuevo servicio, y si los operadores de redes pueden tener algún interés en ofrecerlo.

Durante el año 2005, el sector de las telecomunicaciones fue el segundo en recibir mayor número de reclamaciones por parte de las diferentes organizaciones de consumidores y usuarios en España, tan solo por detrás de la polémica vivienda. Este hecho representa la especial sensibilidad de los usuarios respecto a la calidad del servicio contratado.

Una gran parte de estas reclamaciones son relativas a los procesos de contratación del servicio o a la atención al cliente, mientras que los parámetros de acceso, como el caudal o el retardo, provocan muy pocas quejas, probablemente derivado de la falta de una adecuada información al usuario.

Por su parte, los operadores de red encuentran pocas motivaciones para ofrecer un mejor acceso, a través de algún mecanismo de soporte de calidad de servicio. Debemos recordar que nuestro contrato de acceso ADSL tan solo exige que las prestaciones alcancen el 10% del valor contratado para usuarios particulares y el 50% en el caso de empresas.

De momento las operadoras han utilizado el caudal ofrecido como diferencia competitiva, lo que ha dado lugar a las conocidas duplicaciones de la velocidad de acceso que registramos en los últimos años. Recientemente comenzaron a ofrecer accesos basados en ADSL2, los cuales proporcionaban hasta 20Mbps. Pero, ¿qué sucederá una vez que alcancen el límite físico tal y como sucedió en el mercado de accesos vía módem?

Esta podría ser una buena oportunidad para ofrecer calidad de servicio como elemento diferenciador entre las diferentes ofertas. De cara a los proveedores se abren nuevos modelos de explotación, pudiendo diversificar sus productos en función de la calidad deseada. Estamos hablando del conocido servicio olímpico, el cual permitiría crear nuevas líneas de productos modificando las prioridades relativas entre las diferentes ofertas

A través de este modelo se verían beneficiados tanto los proveedores, que alcanzarían un mayor número de usuarios gracias a la diversificación de productos, como los propios usuarios, los cuales podrían elegir el producto que mejor se ajustase a sus necesidades. E incluso contratar diferentes productos que cubriesen las necesidades individuales de cada aplicación. A modo de ejemplo, un usuario residencial podría tener contratado un servicio de acceso bronce para el tráfico web o P2P, y otro servicio oro, para las audio-conferencias.

Por otro lado, la convergencia de las redes de acceso hacia un modelo *all-IP*, unido al desarrollo de arquitecturas heterogéneas con soporte de múltiples tecnologías de acceso, implica la necesidad de un mayor control sobre la calidad ofrecida al usuario. Los operadores de red deben asegurarse de que los tradicionales servicios de telefonía siguen ofreciendo una calidad adecuada independientemente de las tecnologías implicadas. En este sentido, un modelo como *Diffserv* que permita separar tráfico sensible a retardo del resto de forma cómoda y sencilla representa una clara opción para los proveedores.

5.4 Trabajos Futuros

El desarrollo de la presente tesis ha abierto el camino hacia diferentes líneas de investigación que puedan ampliar o continuar la propuesta de arquitectura de acceso aquí descrita. A continuación ofrecemos una descripción de las líneas de trabajo de mayor interés.

5.4.1 Gestión de redes multi-AP: Comunicación entre puntos de acceso

El despliegue de redes inalámbricas en entornos corporativos suele incluir la instalación y gestión de múltiples puntos de acceso. Estos permiten ampliar la cobertura ofreciendo acceso a la red desde cualquier edificio o localización dentro del entorno corporativo.

Todos los puntos de acceso que componen la red suelen tener un mismo nombre identificativo (SSID), de forma que los usuarios pueden moverse con total libertad entre los diferentes puntos de acceso. Diferentes trabajos de investigación estudian la movilidad de usuarios en este tipo de entornos ofreciendo una misma sesión de cara al usuario.

Con respecto a la arquitectura descrita en esta tesis, sería una interesante extensión el desarrollo de una interfaz para el administrador que facilitase el establecimiento de un modo de operación común para todos los puntos de acceso.

En este sentido, el grupo de trabajo CAPWAP formado por el IETF afronta la definición de un protocolo de comunicación que proporcione interoperabilidad entre arquitecturas de red de acceso inalámbricas. De esta forma se facilitarían las labores de gestión y control entre redes de diferentes fabricantes. La integración de la arquitectura propuesta en esta tesis de acuerdo con las especificaciones desarrolladas por el grupo CAPWAP permitiría una mayor difusión de la misma.

5.4.2 Integración de la Arquitectura en sistemas de traspaso eficientes

Uno de los puntos más conflictivos en la gestión de la movilidad dentro de una red inalámbrica es el proceso de traspaso entre puntos de acceso. Determinadas aplicaciones multimedia son especialmente sensibles al retardo, y si deseamos que el usuario no sea consciente de dicho traspaso es necesario que el mismo sea lo más eficiente posible, minimizando el retardo en la medida de lo posible.

La organización IEEE creó un grupo de trabajo, 802.11r, para el estudio de los traspasos rápidos entre puntos de acceso. Este grupo se encuentra actualmente desarrollando un borrador que propone una comunicación previa entre los puntos de acceso implicados de forma que se pueda anticipar el traspaso, y de esta forma minimizar el retardo introducido.

Entre la información que maneja este borrador, se contempla la necesidad de determinar los recursos disponibles en el punto de acceso destino, de forma que podamos asegurar al usuario una calidad de servicio similar a la que tenía en la red de partida.

La arquitectura de acceso propuesta en esta tesis exige una reconfiguración de los parámetros de acceso cuando un nuevo dispositivo se asocia a la red. La integración de esta arquitectura dentro de las especificaciones del grupo 802.11r permitiría anticiparse a la llegada del nuevo nodo, de forma que la nueva configuración tuviese efecto inmediatamente, minimizando el retardo asociado al traspaso.

5.4.3 Configuración de parámetros de acceso por nodo

Debido a las limitaciones impuestas por el entorno de simulación, no era factible definir una configuración de los parámetros de acceso individuales para cada dispositivo móvil presente en la red. En su lugar se optó por una configuración común que satisfacía las necesidades globales de la red.

En la actualidad, y a raíz de la publicación de estándar IEEE 802.11e se han desarrollado las oportunas extensiones para diferentes simuladores comerciales que ofrecerían la posibilidad de configurar individualmente la información de acceso para cada estación móvil.

Esta nueva vía nos abre un nuevo entorno de trabajo, donde los parámetros de acceso podrían depender de la configuración individual de cada nodo, por ejemplo tasa de transmisión configurada, nivel de señal o distancia al punto de acceso.

Glosario

AC	Access Category
AC_BE	Access Category - Best Effort
AC_BK	Access Category - Background
AC_VI	Access Category - Video
AC_VO	Access Category - Voice
ACK	Acknowledgment
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AF	Assured Forwarding
AIFS	Arbitrary Inter-frame Space
AIFSN	Arbitrary Inter-frame Space Number
AP	Access Point
BE	Best Effort
BSS	Basic Service Set
CCK	Complementary Code Keying
CFP	Contention Free Period
CP	Contention Free
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance

CTS	Clear to Send
CW	Contention Window
CWmin	Minimum Contention Window
CWmax	Maximum Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DiffServ	Differentiated Services
DIFS	DCF Inter-Frame Spacing
DRS	Dynamic Rate Shifting
DSCP	DiffServ Code Point
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTIM	Delivery Traffic Indication Message
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EF	Expedited Forwarding
FCS	Frame Check Sequence
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HR-DSSS	High Rate - Direct Sequence Spread Spectrum
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
IR	InfraRed
ISM	Industrial Scientific Medical
ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
MSDU	MAC Service Data Unit
MT	Mobile Terminal
NAV	Network Allocation Vector
NS	Network Simulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAN	Personal Area Network
PBCC	Packet Binary Convolution Coding
PCF	Point Coordination Function
PHB	Per-Hop Behaviour
PIFS	PCF Inter-Frame Spacing
QAP	QoS Access Point
QBSS	QoS Basic Service Set
QoS	Quality of Service
QSTA	QoS Station
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
RED	Random Early Detection
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTS	Request to Send
SIFS	Short Inter-Frame Spacing
SLA	Service Level Agreement
SLS	Service Level Specification
TBTT	Target Beacon Transmission Time
TCA	Traffic Conditioning Agreement
TCID	Traffic Class Identification
TCP	Transmission Control Protocol
TCS	Traffic Conditioning Specification
TOS	Type of Service
TSPEC	Traffic Specification
TXOP	Transmission Opportunity
UDP	User Datagram Protocol
WIFI	Wireless Fidelity
UMTS	Universal Mobile Telephony System
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web

Referencias

- [Altman2002] E. Altman, T. Jimenez, "NS Simulator Course for Beginners", Lecture Notes, Sept 2002, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela - <http://www-sop.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/ns.htm>
- [Banchs2002] A. Banchs, M. Radimirsch, X. Perez, "Assured and expedited forwarding extensions for IEEE 802.11 Wireless LAN", IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, Pages 245-249, 2001

- [Banchs2005] A. Banchs, A. Azcorra, **C. García**, R. Cuevas, "Applications and Challenges of the 802.11e EDCA Mechanism: An Experimental Study", IEEE Network Magazine. Date: July/Aug. 2005. Volume: 19. Issue: 4. Pages: 52-58. ISSN: 0890-8044
- [Beaujean2003] C. Beaujean, N. Chaher, V. Marques, R. Aguiar, **C. García**, J. Moreno, M. Wetterwald, T. Ziegler, "Implementation and Evaluation of an End-to-End IP QoS Architecture for Networks Beyond 3rd Generation", IST Mobile and Wireless Communications Summit, Aveiro, Portugal, 15-18 June, 2003. ISBN: 972-98368-1-7
- [Berger1997] L. Berger, T. O'Malley, "RSVP Extensions for IPSEC Data Flows", Internet proposed standard RFC 2207, September 1997.
- [Bettstetter2005] C. Bettstetter, C. Prehofer, and A. Wolisz, "A Performance Comparison of QoS Approaches for Ad Hoc Networks: 802.11e versus Distributed Resource Allocation", In Proc. of European Wireless 2005, Nicosia, Cyprus, April 2005.
- [Bianchi2000] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. 18, N. 3, March 2000
- [Blake1998] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Service", Internet proposed standard RFC 2475, December 1998.
- [Braden1997] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP)" -- Version 1 Functional Specification, Internet proposed standard RFC 2205, September 1997.
- [Calafate2005] Carlos Calafate, Pietro Manzoni, Manuel Malumbres, "Supporting soft real-time services in MANETs using distributed admission control and IEEE 802.11e technology", 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005), June 27-30, 2005, La Manga del Mar Menor, Cartagena, Spain.
- [Carneiro2005] G. Carneiro, **C. García**, P. Neves, Z. Chen, M. Wetterwald, M. Ricardo, P. Serrano, S. Sargento, A. Banchs, "The DAIDALOS Architecture for QoS over Heterogeneous Wireless Networks", 14th IST Mobile & Wireless Communication Summit. Dresden, Germany. 19-23 June 2005
- [Chung] J. Chung, M. Claypool, "NS by Example", Worcester Polytechnic Institute - <http://nile.wpi.edu/NS/>
- [Cuevas2002] A. Cuevas, **C. García**, J.I. Moreno, I. Soto, "Los pilares de las redes 4G: QoS, AAA y Movilidad", Jornadas Telecom I+D 2002, Madrid, Nov 2002

- [Cuevas2003] A. Cuevas, J. Moreno, R. Aguiar, V. Marques, **C. García**, I. Soto, "Mechanisms for AAA and QoS Interaction", IEEE Communication Society, ASWN (Applications and Services in Wireless Networks), Bern, Switzerland, July 2003 (ISBN 3-9522719-0-X)
- [Choi2002] S. Choi, "Emerging IEEE 802.11e WLAN for Quality of Service(QoS) Provisioning", SK Telecom Telecommun. Rev., vol. 12, no. 6, Dec 2002. pp. 894-906
- [Choi2003] S. Choi, J. Prado, S. Shankar, S. Mangold, "IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation", IEEE International Conference on Communications, 2003, Vol 2, pages 1151-1156
- [Danielyan2002] E. Danielyan, "The Internet Protocol Journal: IEEE 802.11", Volume 5, Number 1, March 2002. Published by Cisco Systems
- [Davie2002] B. Davie, A. Charny, J.C.R. Bennet, K. Benson, J.Y. Le Boudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu, D. Stiliadis, An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior), Internet proposed standard RFC 3246, March 2002.
- [DIFFSERV-WG] IETF Diffserv Working Group - <http://www.ietf.org/html.charters/OLD/diffserv-charter.html>
- [Escribano2002] J. Escribano, **C. García**, J.I. Moreno, C. Seldas, "Diffserv como solución a la provisión de QoS en Internet", II Congreso Iberoamericano de Telemática, CITA'2002. ISBN 980-237-217-X
- [Fall2006] K. Fall, K. Varadhan, "The ns Manual" - A Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC - 25 de Mayo de 2006 - http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf
- [FGee2004] E. Fgee, J. Kenney, W.I. Phillips, W. Robertson, S. Sivakumar, "Implementing an IPv6 QoS management scheme using flow label & class of service fields", IEEE CCECE 2004, Canadian Conference, vol. 2, May 4-7, 2004, pp.851 - 854.
- [Floyd1993] S. Floyd and V. Jacobson, "Random early detection for congestion avoidance". IEEE/ACM Transactions on Networking, Pgs: 397-413, July 1993.
- [Garcia2002] **C. García**, "Bluetooth - El cableado del siglo XXI", Curso de Doctorado - Protocolos de Comunicaciones para Sistemas Móviles. Departamento de ingeniería Telemática. Universidad Carlos III de Madrid. Junio, 2002
- [Garcia2003] **C. García**, P. Vico, A. Cuevas, I. Soto, J.I. Moreno, "Provisión de QoS en redes móviles de cuarta generación", Jornadas Ingeniería Telemática JITEL, Gran Canaria, Sept 2003. ISBN: 84-96131-38-6

- [Garcia2006] **C. García**, A. Cuevas, J. I. Moreno, I. Soto, C. J. Bernardos, P. Serrano, "QoS support on fourth generation networks", IEEE Latin America Transactions. Date: March 2006. Volume: 4, Issue: 1. ISSN: 1548-0992
- [Gast2002] Matthew S. Gast, "802.11 Wireless Networks: The definitive guide", First Edition. April 2002, Published by O'Really Media. ISBN: 0-596-00183-5
- [Ge2003] Y. Ge, J. Hou, "An analytical model for service differentiation in IEEE 802.11", IEEE International Conference on Communications, 2003, Vol 2, pages 1157-1162
- [Ghosh2005] A. Ghosh, D.R. Wolter, J.G. Andrews, R. Chen, "Broadband wireless access with WiMax/802.16: current performance benchmarks and future potential", IEEE Communications Magazine, February 2005, Volume 43, Issue 2, Pgs. 129-136, ISSN: 0163-6804
- [Gozdecki2003] J. Gozdecki, P. Pacyna, V. Marques, R. L. Aguiar, **C. García**, J. I. Moreno, C. Beaujean, E. Melin, M. Liebsch, "An IP QoS architecture for 4G networks", Architectures for QoS in the Internet, Art-QoS 2003 (Aquila IST seminar) Warsaw, Poland. March 2003. Lectures Notes in Computer Science. Publisher: Springer-Verlag Heidelberg (ISSN: 0302-9743, Volume: Volume 2698 / 2003, Pages: 18 - 28)
- [Greis] M. Greis, "Tutorial for the network simulator ns" - <http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/index.html>
- [Grilo2002] A. Grilo, M. Nunes, "Performance evaluation of IEEE 802.11E", The 13th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, September 2002, Volume 1, Pages 511-517 ISBN: 0-7803-7589-0
- [Grilo2003] A. Grilo, M. Macedo, M. Nunes, "A scheduling algorithm for QoS support in IEEE802.11E networks", IEEE Wireless Communications, June 2003
- [Gu2003] D. Gu, J. Zhang, "QoS Enhancement in IEEE 802.11 Wireless Local Area networks", IEEE Communications Magazine, 2003, Vol 41; Part 6, pages 120-125
- [Heinananen1999] J. Heinananen, F. Baker, W. Weiss, J. Wroclawski, "Assured Forwarding PHB Group", Internet proposed standard RFC 2597, June 1999.
- [Huston2000] G. Huston, "The Internet Protocol Journal: QoS Fact or Fiction", Volume 3, Number 1, March 2000. Published by Cisco Systems
- [IEEE-802.11ED13] IEEE 802.11e/D13.0, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements, Draft Supplement to IEEE 802.11 Standard, January 2005

- [IEEE-802.11E] IEEE 802.11e-2005, IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment: Medium Access Method (MAC) Quality of Service Enhancements, November 2005
- [IEEE-802.11ST] IEEE 802.11-1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999), IEEE Standards for Information Technology -- Telecommunications and Information Exchange between Systems -- Local and Metropolitan Area Network -- Specific Requirements -- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications
- [IEEE-802.11WG] Grupo de trabajo IEEE 802.11.
<http://www.ieee802.org/11/>
- [IEEE-802.15.1] IEEE 802.15.1-2005 IEEE Standard for Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- Local and metropolitan area networks -- Specific requirements -- Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs(tm))
- [IEEE-802.16] IEEE 802.16-2004 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems
- [IEEE-802.1D] IEEE 802.1D-1998 Edition (ISO/IEC 15802-3:1998), IEEE Standard for Information technology, Media access control (MAC) Bridges
- [IEEE-802.3] IEEE 802.3-2002, IEEE Standard for Information technology, Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications
- [IEEE-802.4] IEEE 802.4-1990 Edition (ISO/IEC 8802-4-1990), IEEE Standard for Information technology, Part 4: Token-Passing Bus Access Method and Physical Layer Specifications
- [IEEE-802.5] IEEE 802.5-1998 Edition (ISO/IEC 8802-5:1998), IEEE Standard for Information technology, Part 5: Token Ring Access Method and Physical Layer Specification
- [IEEE-WWW] Institute of Electrical and Electronics Engineers - The Official Site - <http://www.ieee.org/portal/site>
- [Iera2003] A. Iera, A. Molinaro, K. Nahrstedt, "QoS in Next-generation Wireless Multimedia Communications Systems", Guest Editorial, IEEE Wireless Communications, June 2003
- [IETF-WWW] The Internet Engineering Task Force - The Official Site - <http://www.ietf.org/>

- [INTSERV-WG] IETF Intserv Working Group -
<http://www.ietf.org/html.charters/OLD/intserv-charter.html>
- [Jacobson1999] V. Jacobson, K. Nichols, K. Poduri, "An Expedited Forwarding PHB", Internet proposed standard RFC 2598, June 1999.
- [Kong2004] Z. Kong, D. Tsang, B. Bensaou, D. Gao, "Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, December 2004, Vol 22, Issue 10
- [Lan2005] Yi-Wen Lan, Jui-Hung Yeh, Jyh-Cheng Chen, and Zi-Tsan Chou, "Performance Enhancement of IEEE 802.11e EDCA by Contention Adaption", VTC 2005-Spring, Stockholm, Sweden.
- [Mangold2002] S. Mangold, S. Choi, P. May, G. Hiertz, "IEEE 802.11e - Fair resource sharing between overlapping basic service sets", IEEE PIMRC 2002
- [Mangold2003] S. Mangold, S. Choi, G. Hiertz, O. Klein, B. Walke, "Analysis of IEEE 802.11e for QoS Support in Wireless LANs", IEEE Wireless Communications, December 2003
- [Marques2002] V. Marques, R. Aguiar, P. Pacyna, J. Gozdecki, C. Beaujean, N. Chaher, **C. García**, J. Moreno, H. Einsiedler, "An architecture supporting end-to-end QoS with user mobility for systems beyond 3rd generation", IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit 2002. Thessaloniki, Greece, June 2002. pp 858-862
- [Marques2003] V. Marques, R. Aguiar, **C. García**, J.I. Moreno, C. Beaujean, E. Melin, M. Liebsch, "An IP-based QoS architecture for 4G operator scenarios", IEEE Wireless Communication Magazine, June 2003. Pg. 54-62. ISSN 1536-1284. ISBN 972-98368-1-7
- [McDermott2005] P. McDermott-Wells, "What is Bluetooth?", IEEE Potentials, Vol 23, Issue 5, Pgs, 33-35. December 2004 - January 2005. ISSN: 0278-6648
- [Metz1999] C. Metz, "IP QoS: Traveling in First Class on the Internet", IEEE Internet Computing, vol. 3, no. 2, March-April, 1999, pp 84-88.
- [Moon2003] B. Moon, H. Aghvami, "DiffServ Extensions for QoS Provisioning in IP Mobility Environments", IEEE Wireless Communications, October 2003
- [Nafaa2005] A. Nafaa, A. Ksentini, A. Mehaoua, B. Ishibashi, Y. Iraqi, R. Boutaba, "Sliding Contention Window (SCW): Towards Backoff Renge-Based Service Differentiation over IEEE 802.11 Wireless LAN Networks", IEEE Network, July/August 2005

- [Nichols1998] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, D. Black, "Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers", Internet proposed standard RFC 2474, December 1998.
- [NS2] "The Network Simulator - NS-2", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [NS2-EDCF] S. Wiethölter, C. Hoene, "An IEEE 802.11e EDCF and CFB Simulation Model for ns-2" - http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/
- [NS2-EDCF-DOWNLOAD] EDCF extension for ns2. Project UNIX name: ieee80211e-ns2. <http://sourceforge.net/projects/ieee80211e-ns2/>
- [NS2-TRACES] NS-2 Trace Formats - <http://www.klug.org/~griswold/NS2/ns2-trace-formats.html>
- [Pandey2004] V. Pandey, D. Ghosal, B. Mukherjee, "Exploiting user profiles to support differentiated services in next-generation wireless networks", IEEE Network, Vol 18; Numb 5, pages 40-48, October 2004
- [Park2003] S. Park, K. Kim, D. Kim, S. Choi, S. Hong, "Collaborative QoS Architecture between Diffserv and 802.11e Wireless LAN", IEEE Vehicular Technology Conference, 2003, Conf 57; Vol 2, pages 945-949
- [Pattara2003] W. Pattara, P. Krishnamurthy, S. Banerjee, "Distributed Mechanisms for Quality of Service in Wireless LANs", IEEE Wireless Communications, June 2003
- [Prado2004] J. Prado, S. Shankar, "Impact of frame size, impact of stations and mobility on the throughput performance of IEEE802.11e", IEEE Communications Society, 2004
- [Scholz2002] G.R. Scholz, "An Architecture for Securing Wireless Networks", September 2002, The Internet Protocol Journal, CISCO, Volume 5, Number 3, Pages 17-22
- [Shenker1997a] S. Shenker, C. Partridge, R. Guerin, "Specification of Guaranteed Quality of Service", Internet proposed standard RFC 2212, September 1997.
- [Shenker1997b] S. Shenker, J. Wroclawski, "General Characterization Parameters for Integrated Service Network Elements", Internet proposed standard RFC 2215, September 1997.
- [Simoens2003] S. Simoens, P. Pellati, J. Gosteau, K. Gosse, C. Ware, "The Evolution of 5 GHZ WLAN toward higher throughputs", IEEE Wireless Communications, December 2003
- [Stallings2001] W. Stallings, "The Internet Protocol Journal: LAN QoS", Volume 4, Number 1, March 2001. Published by Cisco Systems

- [Vidal2003] I. Vidal, **C. García**, A. Cuevas, I. Soto, J.I. Moreno, "Servicios de valor añadido en redes móviles ad-hoc", Jornadas Telecom I+D 2003, Madrid, 18-20 Nov 2003. ISBN: 84-89315-28-0
- [Walke2001] B. Walke, "Mobile Radio Networks: Networking, Protocols and Traffic Performance", 2ª edición, Editorial Wiley, ISBN: 0-471-49902-1, Octubre 2001
- [Wang2001] Z. Wang, "Internet QoS: Architectures and mechanisms for Quality of Service", Morgan Kaufmann Publishers 2001, ISBN: 1-55860-608-4
- [Wietholter2003] S. Wietholter, C. Hoene, "Design and Verification of an IEEE 802.11e EDCF Simulation Model in ns-2.26", Berlin, November 2003, TKN Technical Report TKN-03-19, http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/
- [Wietholter2004] S. Wietholter, C. Hoene, A. Wolisz, "Perceptual Quality of Internet Telephony over 802.11e Supporting Enhanced DCF and Contention Free Bursting", Berlin, September 2004, TKN Technical Report, TKN-04-11, http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/techreport2.pdf
- [WIKIPEDIA] Wikipedia - La Enciclopedia Libre - <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>
- [Wroclawski1997a] J. Wroclawski, "The Use of RSVP with IETF Integrated Services", Internet proposed standard RFC 2210, September 1997.
- [Wroclawski1997b] J. Wroclawski, "Specification of the Controlled-Load Network Element Service", Internet proposed standard RFC 2211, September 1997.
- [Xiao2003] Y. Xiao, "Backoff-based priority schemes for IEEE 802.11", IEEE International Conference on Communications, 2003, Vol 3, pages 1568-1572
- [Xiao2004a] Y. Xiao, "IEEE 802.11e: QoS Provisioning at the MAC Layer," IEEE Wireless Communications Magazine, vol. 11, no. 3, pp. 72-79, June 2004
- [Xiao2004b] Y. Xiao, "An Analysis for Differentiated Services in IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs", Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'04), pp: 32-39, 2004. ISBN:0-7695-2086-3
- [Zhu2004a] H. Zhu, G. Cao, "On improving service differentiation under bursty data traffic in wireless networks", IEEE INFOCOM 2004, Vol 2, pages 871-881
- [Zhu2004b] H. Zhu, M. Li, I. Chlamtac, B. Prabhakaran, "A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks", IEEE Wireless Communications Magazine, pp. 6-14, August 2004
- [3GPP-WWW] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP - The Official Site - <http://www.3gpp.org/>

Apéndice A

Entorno de Simulación

A.1 Introducción

Una de las fases de mayor importancia de cara a la verificación de los resultados obtenidos por la arquitectura de red propuesta es la validación de la herramienta de medida que se emplea. En este sentido el contenido del presente apéndice representa la validación del simulador de redes NS2 – ‘*Network Simulator*’ para un entorno de red inalámbrica con soporte del estándar 802.11e.

La validación del entorno de simulación se llevará a cabo a través de la comparación de los resultados obtenidos con la herramienta y los valores esperados teóricamente. Para la obtención de estos valores teóricos se implementará un software que describa el modelo matemático que rige una red inalámbrica 802.11e.

Con la intención de que el proceso de validación cubra todos los escenarios que serán objeto de simulación en esta tesis, se han elegido tests específicos para cada uno de los diferentes parámetros configurables que son empleados por la arquitectura. De igual forma se

procede al análisis de variables de interés para el desarrollo de la tesis como son el ancho de banda y el retardo.

A.2 Herramienta de simulación: ‘NS2 – Network Simulator’

Según hemos comentado en diferentes capítulos de esta tesis, durante el desarrollo de la misma, el que a posteriori sería estándar 802.11e, pasó por diferentes fases de desarrollo a través de los borradores proporcionados por el grupo de trabajo 802.11e del IEEE. Este hecho provocó que resultase relativamente compleja la búsqueda de un simulador que permitiese la definición de una red inalámbrica 802.11e.

En este sentido, el entorno de simulación *NS2 – Network Simulator* disponía de diferentes parches que algunos investigadores habían desarrollado para el soporte de este tipo de redes. En la fase de selección de simulador se escogió el parche que mayor versatilidad ofrecía de cara a modificar los diferentes parámetros con que cuenta el estándar 802.11e, y que venía corroborado por diferentes publicaciones del propio autor del parche.

El parche seleccionado para realizar las simulaciones de diferentes escenarios en esta tesis es el desarrollado por el Grupo de Redes de Telecomunicación (TKN) de la Universidad Politécnica de Berlín [TKN-WWW], y ha sido desarrollado por Sven Wiethölter y Christian Hoene. Los autores tienen diferentes publicaciones donde presentan esta herramienta a la comunidad científica y validan el correcto funcionamiento del mismo [Wiethölter2003] [Wiethölter2004].

A raíz de su publicación y difusión este parche ha sido utilizado por toda la comunidad científica para la elaboración de múltiples artículos como herramienta de simulación de entornos inalámbricos 802.11e [Lan2005] [Bettstetter2005] [Calafate2005].

Este añadido al simulador NS2 se encuentra disponible para toda la comunidad científica [NS2-EDCF] [NS2-EDCF-DOWNLOAD]. En concreto, el software que encontraremos en las referencias indicadas, es un modelo de simulación para el modo EDCF descrito en el estándar 802.11e, y que funciona con la versión 2.26 del simulador NS2. Esta antigua versión del simulador, junto con las más recientes, se encuentra disponible en su web oficial [NS2].

Por otro lado, este simulador es ampliamente empleado por parte de la comunidad científica en el desarrollo de nuevos protocolos de comunicación de redes, y nos permite obtener estadísticas relativas al uso de estos protocolos sin necesidad de esperar a la llegada de productos que implementen los nuevos estándares.

En nuestro caso concreto, el simulador NS2 nos permitió obtener la información necesaria para proceder a la cuantificación de los beneficios derivados de la arquitectura propuesta en la tesis.

Limitaciones del simulador NS2 para redes inalámbricas 802.11e

Si bien el soporte del borrador de 802.11e en NS2 es completo y funcional, el modelo de funcionamiento no es del todo adecuado, probablemente debido al estado de borrador del mismo en el momento de desarrollo del parche.

El principal inconveniente que presenta este simulador es el no poder modificar de forma dinámica los parámetros de acceso de la capa de enlace de 802.11e. Los parámetros que han sido estudiados en el capítulo 2 (CWmin, CWmax, AIFS y TXOP) pueden modificarse antes de comenzar la simulación, pero no durante la misma.

Esta limitación provocará que la realización de las pruebas resulte mucho más laboriosa y requiera de un mayor esfuerzo. En consecuencia en el capítulo 4: “Validación de la Arquitectura” se optará por realizar simulaciones según el número de terminales móviles, en lugar de hacerlo en función del tiempo, debido a la imposibilidad de modificar estos parámetros en tiempo real.

Esta desventaja no desvirtuará de ninguna forma los resultados obtenidos en esta tesis, ya que se mostrarán tanto la situación inicial como final, aunque no sea posible mostrar los pasos intermedios.

A.2.1 Instalación de NS2 y extensiones

El desarrollo de trabajos en el entorno de simulación NS2 es relativamente complejo, y resulta aconsejable consultar los diferentes manuales desarrollados por los propios usuarios de esta aplicación [Altman2002] [Chung] [Fall2006] [Greis].

La instalación de NS2 es relativamente sencilla gracias al trabajo realizado por el equipo de desarrollo que pone a disposición de los usuarios un único archivo que aglutina tanto la aplicación ns2 como todas las bibliotecas que necesita esta para su instalación y ejecución. A modo de ejemplo podríamos descargar la última versión de este software, la 2.29, disponible desde el 22 de Octubre de 2005 a través del servidor [http](http://www.isi.edu/nsnam/dist/ns-allinone-2.29.tar.gz).

`http://www.isi.edu/nsnam/dist/ns-allinone-2.29.tar.gz`

Atendiendo a nuestras necesidades el módulo para la simulación de redes inalámbricas 802.11e requiere la presencia de una versión anterior del simulador NS, en concreto la 2.26, a la cual podríamos acceder a través del enlace:

`http://www.isi.edu/nsnam/dist/ns-allinone-2.26.tar.gz`

Una vez instalado este paquete podemos proceder a la descarga y configuración del parche que permitirá la simulación de redes 802.11e. Este parche se encuentra disponible en el siguiente enlace:

`http://sourceforge.net/project/showfiles.php?group_id=136544`

Para la instalación del mismo debemos seguir las instrucciones proporcionadas por los autores y que pasamos a reproducir a continuación en la figura A-1 para facilitar la labor de instalación del mismo.

```

Installation of MAC 802.11e EDCF-Code:
*****

1. please change into the directory ns-whatever/ns-x.y/mac/

2. copy the file 80211e_EDCF_CFB.tgz into this directory and extract it with:
   tar -xvzf 80211e_EDCF_CFB.tgz

3. changes to your Makefile.in in ns-whatever/ns-x.y/:
   - add to INCLUDES:
       -I./mac/802_11e
   - add to OBJ_CC:
       mac/802_11e/mac-802_11e.o mac/802_11e/priq.o
       mac/802_11e/d-tail.o mac/802_11e/mac-timers_802_11e.o
   - exclude in NS_TCL_LIB:
       tcl/lib/ns-mobilenode.tcl \
   - add to NS_TCL_LIB:
       mac/802_11e/ns-mobilenode_802_11e.tcl \
       mac/802_11e/priority.tcl \

4. changes to your ns-whatever/ns-x.y/tcl/lib/ns-lib.tcl:
   - exclude from the source list:
       source ns-mobilenode.tcl
   - add to the source list:
       source ../../mac/802_11e/ns-mobilenode_802_11e.tcl
       source ../../mac/802_11e/priority.tcl

5. changes to your ns-whatever/ns-x.y/tcl/lib/ns-default.tcl:
   - add:
       Queue/DTail set drop_front_ false
       Queue/DTail set summarystats_ false
       Queue/DTail set queue_in_bytes_ false
       Queue/DTail set mean_pktsize_ 500
       Queue/DTail/PriQ set Prefer_Routing_Protocols 1
       Queue/DTail/PriQ set Max_Levels 4
       Queue/DTail/PriQ set Levels 4

6. add to tcl/lan/ns-mac.tcl:
       if [TclObject is-class Mac/802_11e] {
       ...
       copy settings of MAC/802.11
       (which are contained in this file) into this section
       ...
       Mac/802_11e set cfb_ 0 ;# disables CFB
       }

7. run ./configure; make clean; make depend; make in your ns directory

```

Figura A-1. Instalación del parche 802.11e para NS2

Una vez que tenemos instalado este parche podremos hacer uso de las diferentes colas de acceso proporcionadas por el estándar 802.11e para el acceso al medio. La configuración de los parámetros que rigen el comportamiento de estas colas viene descrita en el siguiente fichero:

```
~/ns/ns-allinone-2.26/ns-2.26/mac/802_11e/priority.tcl
```

Este fichero puede ser modificado según nuestras necesidades para adaptar los parámetros de configuración de las colas. Sin embargo las modificaciones serán estáticas, es decir, cada vez que deseemos modificar el mismo, tendremos que volver a compilar el software y generar un nuevo ejecutable de NS, el cual realizará las simulaciones de acuerdo a la configuración descrita en `priority.tcl`. A modo de ejemplo, podemos comprobar la configuración por defecto del mismo en la figura A-2.

```

# proc priority is called in ns-mobilenode_802_11e.tcl if interface-queue
# (in the run-script) is set to Queue/DTail/PriQ.
#
# here the different backoff-priority parameters may be set for each PriQ
# syntax: $queue Prio(rity) [0..3] PF/AIFS/CW_MIN [...]
#
# TXOPLimit values (in seconds) for 802.11b are taken from the 802.11e version
5 draft,
# activation of CFB in ns-2.x/tcl/lan/ns-mac.tcl by setting cfb_ to 1.

# ATTENTION: after editing, run make once again!

proc priority { ifq_name } {
    upvar $ifq_name ifq

    # parameters for Queue 0
    $ifq Prio 0 PF 2
    $ifq Prio 0 AIFS 2
    $ifq Prio 0 CW_MIN 7
    $ifq Prio 0 CW_MAX 15
    $ifq Prio 0 TXOPLimit 0.003008

    #parameters for Queue 1
    $ifq Prio 1 PF 2
    $ifq Prio 1 AIFS 2
    $ifq Prio 1 CW_MIN 15
    $ifq Prio 1 CW_MAX 31
    $ifq Prio 1 TXOPLimit 0.006016

    #parameters for Queue 2
    $ifq Prio 2 PF 2
    $ifq Prio 2 AIFS 3
    $ifq Prio 2 CW_MIN 31
    $ifq Prio 2 CW_MAX 1023
    $ifq Prio 2 TXOPLimit 0

    #parameters for Queue 3
    $ifq Prio 3 PF 2
    $ifq Prio 3 AIFS 7
    $ifq Prio 3 CW_MIN 31
    $ifq Prio 3 CW_MAX 1023
    $ifq Prio 3 TXOPLimit 0
}

```

Figura A-2. Configuración de las colas de acceso 802.11e

Finalmente, para indicar a un determinado agente NS la cola de acceso que deseamos que use utilizaremos la siguiente orden dentro de la definición del agente.

```

set src_udp0 [new Agent/UDP]
$src_udp0 set prio_ 2
$src_udp0 set packetSize_ 1500
...

```

Las simulaciones realizadas con la herramienta NS ofrecen como resultado un archivo de trazas que representa de forma cronológica la generación de tramas en los nodos y su recorrido a través de la red hasta alcanzar el nodo destino. En el momento de realizar la simulación se puede indicar el nivel de detalle que queremos que muestre este archivo de trazas.

En nuestro caso resultaba necesario conocer el momento en que la trama es enviada y recibida a nivel de enlace (MAC), así como a nivel de aplicación (Agente – AGT). A continuación mostramos a modo de ejemplo el resultado obtenido durante una simulación.

s	0.022500000	_1_	AGT	---	16	cbr	1500	[0 0 0 0]	-----	[1:0 0:0 32 0]	[15]	0	0
s	0.025807110	_1_	MAC	---	16	cbr	1572	[d4 0 1 800]	-----	[1:0 0:0 32 0]	[15]	0	0
r	0.027124928	_0_	MAC	---	16	cbr	1520	[d4 0 1 800]	-----	[1:0 0:0 32 0]	[15]	1	0
r	0.027149928	_0_	AGT	---	16	cbr	1520	[d4 0 1 800]	-----	[1:0 0:0 32 0]	[15]	1	0
s	0.028814928	_0_	MAC	---	0	ACK	38	[0 1 0 0]					
r	0.029017110	_1_	MAC	---	0	ACK	38	[0 1 0 0]					

Según se indica en [NS2-TRACES], la primera columna indica el tipo de evento ocurrido, que se corresponde con alguna de las siguientes siglas: trama enviada (s), recibida (r) o descartada (D). A continuación podemos observar el instante de tiempo en el que tiene lugar el evento, el nodo implicado, y el nivel al que se produce el evento: nivel de enlace – MAC, o aplicación – AGT. La columna sexta identifica el número de trama, luego podemos encontrar el tipo de tráfico, y a continuación la longitud de la trama enviada.

Finalmente en la columnas 14 y 15 se indica el nodo emisor y el nodo receptor usando una notación que nos permitirá al mismo tiempo identificar la cola de acceso 802.11e que se utilizó para enviar el mensaje. Así, en el ejemplo, el contenido ‘1:0 0:0’ indica que la trama se envió desde el nodo 1 al nodo 0 usando para ello la cola de acceso 0, la cual se correspondería con AC_VO, es decir, la cola más prioritaria definida por 802.11e.

Hemos podido comprobar como la información disponible en los archivos de trazas tras la simulación de un determinado escenario, es adecuada para obtener las estadísticas necesarias para esta tesis.

A.2.2 Validación de NS2 y la extensión 802.11e

Para proceder a la validación de la extensión 802.11e proporcionada para NS2 necesitamos comparar los resultados obtenidos con una fuente de información fiable. En este sentido, para la validación de escenarios donde aparece un único nodo podremos usar de forma muy sencilla el modelo de funcionamiento de las redes 802.11 para validar determinados parámetros.

En el caso de escenarios donde aparezcan varios nodos, y donde en consecuencia existan colisiones utilizaremos el modelo matemático descrito por Bianchi [Bianchi2000] que analiza el comportamiento de las redes inalámbricas IEEE 802.11, contemplando la posible existencia de colisiones para el cálculo tanto del ancho de banda como del retardo.

Este modelo requiere la evaluación de una fórmula de forma recursiva hasta que se alcanza el nivel de precisión deseado. En este sentido se desarrolló una aplicación que nos permitía obtener el caudal efectivo cursado por la red en función de una serie de parámetros de entrada: número de nodos, tamaño de trama, tamaño de ventana de contienda mínimo (CWmin) y tiempo entre tramas (AIFS).

A través de esta tesis ponemos a disposición de la comunidad científica esta aplicación para que pueda ser utilizada en el desarrollo de otros trabajos de investigación (figura A-3). Si se desea obtener más información respecto del mismo el autor se ofrece para resolver cualquier posible duda derivada de su utilización.

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define PREC      0.000001
#define MAX_ITER 100
#define val_m     1.0      //CWmax = CWmin*2^m

#define SIGMA     20e-6
#define SIFS      10e-6
#define RATE      11e6
#define RATE_ACK  11e6
#define PLCP      192     //bits

#define VERBOSE   1

int longitud;
int val_n, num_nodos; // # of stations
long double val_W, CWmin; // CWmin
long double DIFS, AIFS, AIFSn;

long double funcion(long double param);
long double func_tau(long double param);
long double func_s(long double tau);

int main(int argc, char *argv[])
{
    long double a, b, c;
    long double result, result_old;
    long double prec;
    int iteraciones=1;
    long double tau, throughput;

    if (argc!=5) {
        printf("\nUso: %s
<longitud_trama(bytes)> <#nodos> <CWmin>
<AIFSn>\n\n
", argv[0]);
        exit(1);
    }
    else {
        longitud = atoi (argv[1]) * 8;
        num_nodos = atoi (argv[2]);
        CWmin = atof (argv[3]);
        AIFSn = atof (argv[4]);
        if (VERBOSE) printf("\nUsando PAYLOAD
(%i Bytes), #nodos (%i), CWmin (
%.2Lf), AIFSn (%.2Lf)\n\n", longitud/8,
num_nodos, CWmin, AIFSn);
    }

    AIFS = SIFS + SIGMA * AIFSn;

    val_n = num_nodos;
    val_W = CWmin;
    DIFS = AIFS;

    a=0.0;
    b=1.0;
    result_old=1000.0;

    do {
        c = (a+b)/2.0;
        result = funcion(c);
        prec = fabs(result);

        if (prec >= PREC)
            if (result>0) a=c; else b=c;
        }

        result_old = result;
        iteraciones++;
    } while (prec>PREC && iteraciones<MAX_ITER);

    if (iteraciones>=MAX_ITER && VERBOSE)
        printf("Superado el limite máximo de ite
raciones\n");

    if (VERBOSE) printf("FIN\n");

    tau = func_tau(c);
    throughput = func_s(tau);

    if (VERBOSE) printf(" #stations=(%d),
payload=(%d bytes), throughput_station=(
%.2Lf bps) throughput_total=(%.2Lf)\n", (int)
val_n, longitud/8, throughput, thr
oughput * val_n);
        else printf("%.0Lf", throughput *
val_n);
        return 1;
    }

    long double funcion(long double param)
    {
        long double resultado;
        long double a, b, sum;
        int bucle;

        for (sum=0.0, bucle=0; bucle<=(val_m-1);
bucle++)
            {
                sum += pow(2.0*param, bucle);
            }

        a = 2.0 / (1 + val_W + param*val_W*sum);
        b = 1 - pow(1.0-param, 1.0/(val_n-1.0));
        resultado = a-b;

        return resultado;
    }

    long double func_tau(long double param)
    {
        long double a, sum;
        int bucle;

        for (sum=0.0, bucle=0; bucle<=(val_m-1);
bucle++)
            {
                sum += pow(2.0*param, bucle);
            }

        a = 2.0 / (1 + val_W + param*val_W*sum);

        return a;
    }

    long double func_s(long double tau)
    {
        long double resultado;
        long double psi, ps, pc, pe;
        long double ts,tc;

        psi = tau * pow(1-tau, val_n-1);
        ps = val_n*tau* pow(1-tau, val_n-1);
        pe = pow(1-tau, val_n);
        pc = 1 - ps - pe;

        ts = (PLCP/1e6 + (longitud+28*8)/RATE) + SIFS
+ (PLCP/1e6 + (14.0*8/RATE_ACK))
+ DIFS;
        tc = (PLCP/1e6 + (longitud+28*8)/RATE) +
SIFS;

        resultado = (psi * longitud) / (ps*ts + pc*tc
+ pe*SIGMA);

        return resultado;
    }
}

```

Figura A-3 Cálculo del caudal efectivo cursado por una red inalámbrica 802.11

Para proceder a la validación de la extensión para 802.11e realizaremos una serie de simulaciones donde se modifiquen progresivamente los parámetros de interés para esta tesis. Acompañaremos los resultados teóricos esperados y calcularemos la diferencia entre ambos resultados.

Debido a la ingente cantidad de simulaciones realizadas, y de información obtenida, se ha intentado compactar la información con la intención de mostrarla al lector de la forma más concisa y sencilla posible. Todas las simulaciones son realizadas modificando la cola de acceso entre las cuatro posibilidades que nos ofrece el estándar 802.11e: AC_VO, AC_VI, AC_BE y AC_BK. En consecuencia, este parámetro no aparecerá en el título de las simulaciones, y a partir de ahora queda implícito en el mismo.

Una misma gráfica suele mostrar el resultado de muchas simulaciones, cubriendo incluso diferentes escenarios. En este sentido y para clarificar el análisis de cada gráfica, antes de las mismas se incluye una descripción detallada de los parámetros con los que se ha trabajado.

En la figura A-4 ilustramos el esquema de acceso al medio EDCA descrito en el estándar IEEE 802.11e, de manera que podemos identificar los diferentes parámetros a validar.

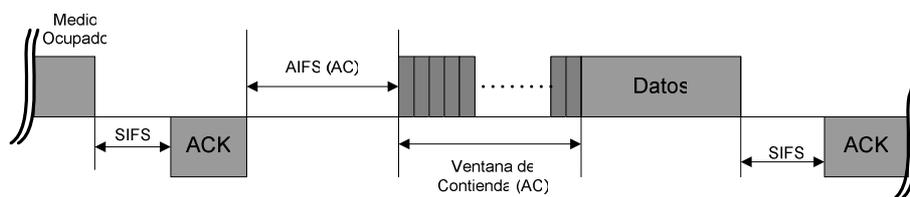


Figura A-4. Esquema de funcionamiento de mecanismo EDCA

El esquema descrito determina las diferentes etapas que atraviesa el envío de una trama para ser enviada desde su emisor al receptor. Para verificar el correcto funcionamiento del simulador deberemos verificar que el tiempo empleado para cada una de estas etapas se corresponde con el esperado teóricamente.

Algunas de estas etapas tienen un tiempo fijo independiente de los parámetros especificados por el estándar 802.11e. Vamos a identificar estas etapas, e indicaremos los diferentes parámetros que afectan a la duración de cada una de ellas:

- **AIFS (AC) – Tiempo entre-tramas:** se trata de un valor de tiempo estático prefijado para cada cola de acceso del estándar 802.11e.
- **Tiempo de *backoff*:** este tiempo se determina a través de una variable uniforme con valor mínimo 0 y máximo el tamaño de la ventana de contienda. El valor de la ventana de contienda se corresponde inicialmente con el parámetros CWmin y se dobla cada vez que se descarta una trama hasta alcanzar CWmax. Ambos parámetros son dependientes de la cola de acceso según 802.11e.
- **Tiempo de transmisión de datos a nivel físico:** el tiempo de envío vendrá determinado por la velocidad del canal y la cantidad de datos a enviar.
- **SIFS – Tiempo corto entre-tramas:** es un valor prefijado en el estándar a 10 microsegundos.
- **Tiempo de transmisión de trama de asentimiento a nivel físico:** al igual que el envío de la trama de datos, este tiempo vendrá determinado por la velocidad del canal y la cantidad de datos a enviar.

Todos los parámetros excepto el tiempo de *backoff* son independientes de las colisiones, con lo que su validación es relativamente más sencilla. Con respecto al tiempo de *backoff* tendremos que utilizar el modelo descrito por Bianchi [Bianchi2000] para calcular el valor esperado teóricamente y contrastarlo con el valor experimental.

La metodología empleada para la realización de las sucesivas medidas que mostraremos a continuación se encuentra descrita en el capítulo 4, concretamente en el apartado ‘4.2.1 Metodología y Consideraciones previas’.

El orden que seguiremos para llevar a cabo la validación de las diferentes etapas de envío de una trama será aquel que nos lleve a unas pruebas incrementales en esfuerzo, de forma que empezaremos con las pruebas más sencillas para ir asentando las bases y poder continuar con pruebas más complejas. En este sentido el orden será el siguiente: Tiempo corto entre-tramas, Tiempo de transmisión de trama de datos y trama de asentimiento, para finalizar con Tiempo entre-tramas (AIFS) y Tiempo de *backoff*.

A.2.2.1 Tiempo corto entre-tramas SIFS

Según comentábamos este espacio de tiempo debería ser invariable a lo largo de todas las simulaciones y ajustarse al valor teórico especificado en el estándar que se corresponde con 10 microsegundos.

La validación de este parámetro será muy sencilla. Accediendo a uno de los archivos de trazas conseguido en cualquiera de las simulaciones que hemos venido realizando para esta tesis podemos comprobar el tiempo transcurrido desde la recepción a nivel de enlace de una trama en el equipo receptor hasta el posterior envío de la trama de asentimiento. Veámoslo en el siguiente extracto de un archivo de trazas. A continuación resaltaremos las tramas relativas al envío de esta información.

```
s 1.422500000 _1_ AGT --- 5692 cbr 500 [0 0 0 0] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
s 1.525241927 _1_ MAC --- 5692 cbr 572 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
r 1.525832472 _0_ MAC --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
s 1.525842472 _0_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
r 1.525857472 _0_ AGT --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
r 1.526044654 _1_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
```

Podemos comprobar como el retardo desde que se recibe la trama de datos a nivel MAC y se envía la trama de asentimiento es exactamente de 10 microsegundos, lo que se corresponde exactamente con el valor esperado del parámetro SIFS. Esta diferencia de tiempo es constante en todo el archivo de trazas quedando de esta forma validado el tiempo corto entre-tramas SIFS = 10us.

A.2.2.2 Tiempo de transmisión de trama de datos

El segundo parámetro de interés para la presente tesis es el retardo que sufren los paquetes desde que los envía el emisor hasta que alcanzan al nodo destino. Este tiempo se puede descomponer en varias partes que iremos analizando paso por paso.

En primer lugar realizaremos un estudio del retardo de transmisión a nivel físico, es decir, el tiempo desde que la estación comienza a introducir el paquete en el medio, hasta que este alcanza el nodo destino.

Como indicamos anteriormente el simulador NS ofrece un archivo de trazas como resultado de una simulación. En este archivo se reflejan los diferentes eventos que han tenido lugar durante la misma, así como el momento exacto en el que ocurrieron. Esta información nos permitirá cuantificar el retardo a estudiar en este apartado.

Veamos con más detalle un archivo de trazas.

```
s 1.422500000 _1_ AGT --- 5692 cbr 500 [0 0 0 0] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
s 1.525241927 _1_ MAC --- 5692 cbr 572 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
r 1.525832472 _0_ MAC --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
s 1.525842472 _0_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
r 1.525857472 _0_ AGT --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
r 1.526044654 _1_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
```

Hemos resaltado las tramas de interés para el cálculo propuesto donde se indica cuando se introdujo la trama en el medio, y cuando alcanzó el nodo destino. La diferencia representa el tiempo de transmisión de la trama a nivel físico y analizando por completo el fichero de trazas podemos comprobar que este valor es invariable para todas las transmisiones.

Con el fin de demostrar esta afirmación realizaremos una serie de simulaciones donde utilizaremos todas las colas de acceso y modificaremos el tamaño del archivo de datos desde 100 bytes hasta 1500 bytes. Para esta simulación usaremos un nodo transmitiendo tráfico CBR hacia el punto de acceso con una tasa tal que la red se encuentre en modo de saturación. El punto de acceso se encontrará en modo de recepción. La configuración del resto del escenario se resume a continuación:

- Tasa de transmisión: 11 Mbps
- Nodo inmóvil situado virtualmente en el mismo punto que el AP
- Tamaño de paquete variable: 100 – 1500 bytes
- RTS/CTS desactivado

Representaremos en la figura A-5 el retardo sufrido por el paquete en función del tamaño del mismo.

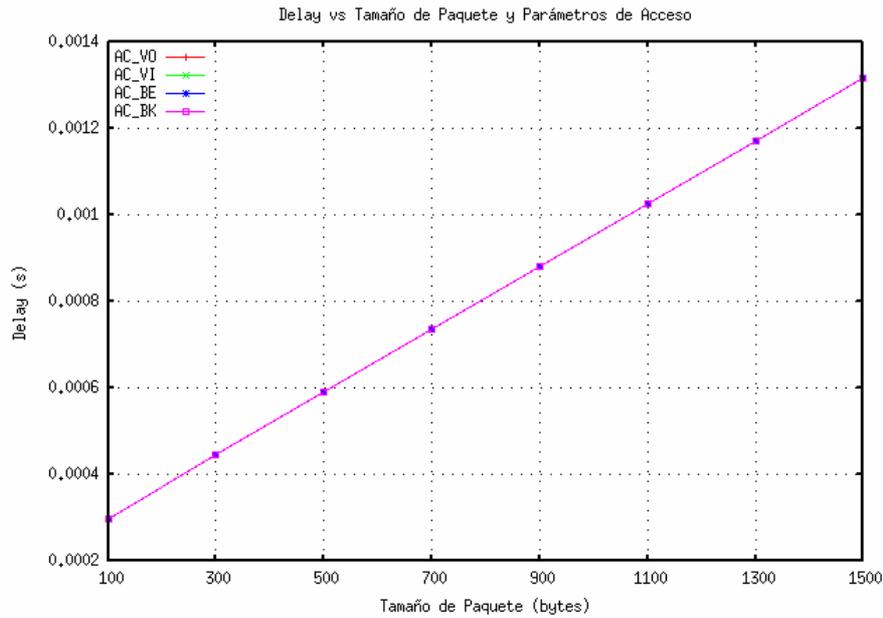


Figura A-5. Retardo de transmisión en función del tamaño de la trama

Tal y como cabía esperar este retardo es directamente proporcional al tamaño del paquete, y por otro lado observamos que el retardo de transmisión a este nivel no depende de la cola de acceso que estemos utilizando ya que la cola de acceso tan sólo afecta al tiempo que la trama tarda en acceder al medio, pero una vez que ha logrado el acceso el tiempo es invariable y depende de la tasa de transmisión configurada.

Si estudiamos el formato de cabeceras de una trama 802.11 podremos realizar fácilmente el cálculo teórico que nos lleva a corroborar los resultados obtenidos en esta simulación. En la figura A-6 mostramos el formato de una trama de datos 802.11.

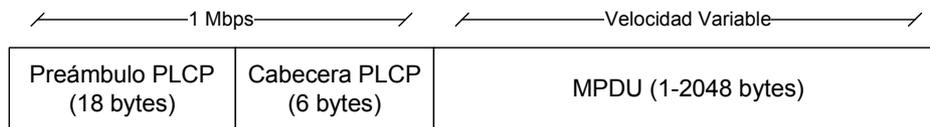


Figura A-6. Formato de trama 802.11 de datos

El retardo que sufrirá el paquete vendrá determinado por la ecuación A-1:

$$retardo = \frac{PLCP(bytes) \cdot 8(bits / byte)}{1Mbps} + \frac{TamañoMPDU(bytes) \cdot 8(bits / byte)}{velocidad(mbps)}$$

Ecuación A-1. Retardo de transmisión

Si aplicamos esta fórmula para los diferentes valores obtenidos a través de la simulación podemos comprobar como ambos valores coinciden. De esta forma queda validado el tiempo de transmisión para la trama de datos en el simulador NS2.

A título informativo mostraremos a continuación el retardo a nivel de físico usando como valores de velocidad de transmisión 1 y 11 Mbps según el tamaño de paquete (figuras A-7, A-8). Estas simulaciones nos permitirán comprobar en que medida afecta la velocidad de la red al retardo.

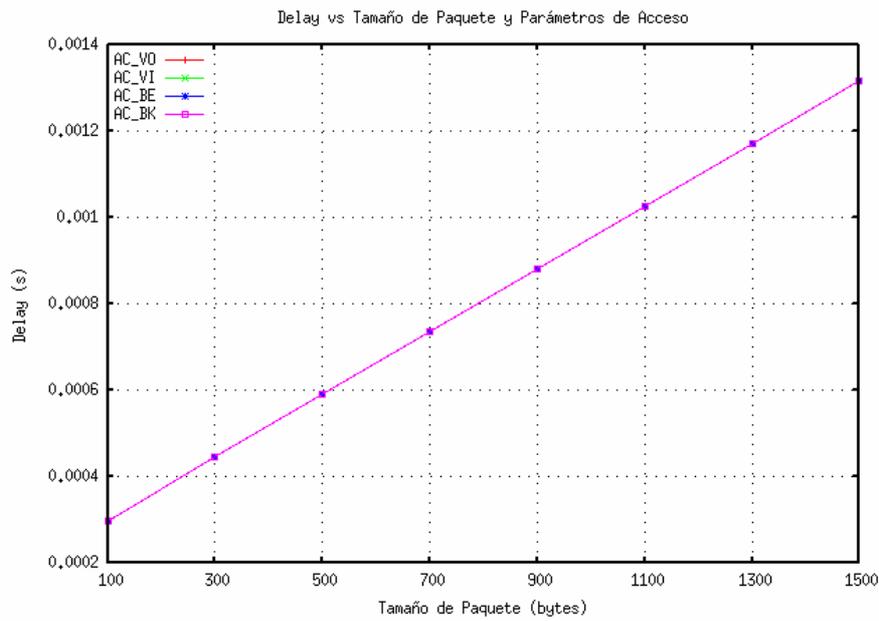


Figura A-7. Tiempo de transmisión de trama (11 Mbps)

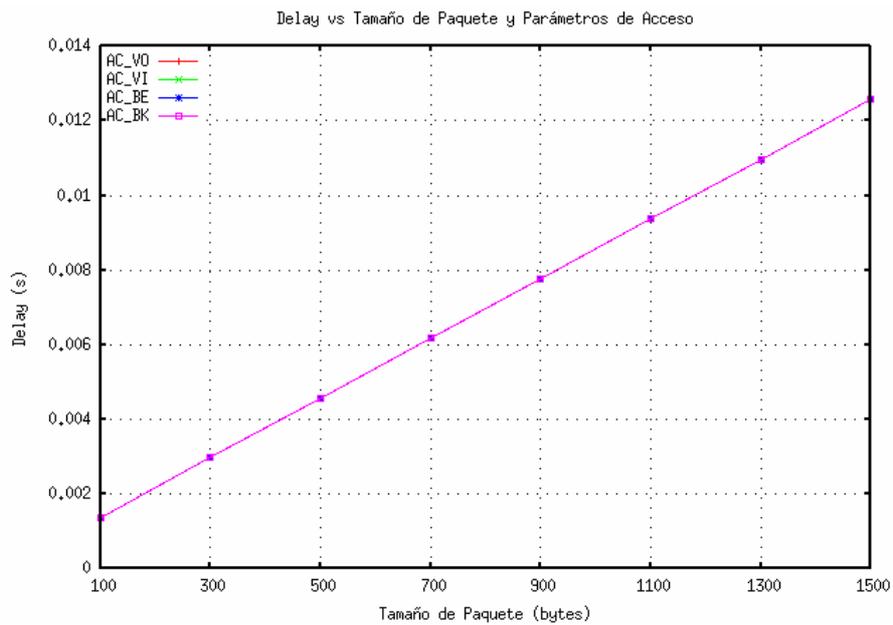


Figura A-8. Tiempo de transmisión de trama (1 Mbps)

A.2.2.3 Tiempo de transmisión de trama de asentimiento (ACK)

Sigamos analizando el archivo de trazas para validar el retardo de envío del paquete de asentimiento (ACK). A continuación resaltaremos las tramas relativas al envío de esta información.

```
s 1.422500000 _1_ AGT --- 5692 cbr 500 [0 0 0 0] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
s 1.525241927 _1_ MAC --- 5692 cbr 572 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
r 1.525832472 _0_ MAC --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
s 1.525842472 _0_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
```

```
r 1.525857472 _0_ AGT --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
r 1.526044654 _1_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
```

El retardo de transmisión a nivel físico de la trama de asentimiento es invariable a lo largo de todas las trazas. Al igual que hacíamos con la trama de datos, podemos analizar el formato del mismo determinando de esta forma el tiempo necesario para su transmisión. El formato de una trama de asentimiento 802.11 viene descrito en la figura A-9.

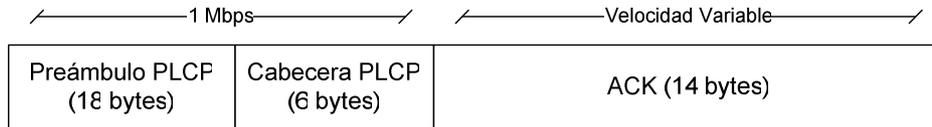


Figura A-9. Formato de trama 802.11 de asentimiento (ACK)

Tomando una velocidad de transmisión de 11 Mbps, que es la que se utilizó en la simulación, el retardo de transmisión vendría determinado por la ecuación A-2.

$$retardo = \frac{PLCP(bytes) \cdot 8(bits / byte)}{1Mbps} + \frac{TamañoACK(bytes) \cdot 8(bits / byte)}{velocidad(mbps)} = 202,182\mu s$$

Ecuación A-2. Retardo de transmisión de la trama de asentimiento

Efectivamente al comprobar en el fichero de tramas el retardo de transmisión que sufren los paquetes de asentimiento comprobamos que todos se ajustan a este valor.

A.2.2.3 Tiempo entre-tramas (AIFS) y Tiempo de *backoff* - sin colisiones

Una vez analizado el retardo que tenemos a nivel físico, el siguiente paso lógico sería intentar verificar que el retardo a nivel de enlace proporcionado por el simulador se ajusta con el esperado teóricamente. Sin embargo, el sistema de trazas que genera NS como resultado de una simulación no nos permite medir el retardo a nivel de enlace, sino que la información proporcionada en estas trazas se refiere al retardo a nivel de agente, lo que se correspondería con aplicación.

Veamos un ejemplo de un fichero de trazas, al igual que hacíamos en el apartado anterior, de forma que podamos ver con mayor detalle cual es la información proporcionada por el simulador.

```
s 1.422500000 _1_ AGT --- 5692 cbr 500 [0 0 0 0] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
s 1.525241927 _1_ MAC --- 5692 cbr 572 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 0 0
r 1.525832472 _0_ MAC --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
s 1.525842472 _0_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
r 1.525857472 _0_ AGT --- 5692 cbr 520 [d4 0 1 800] --- [1:0 0:0 32 0] [2845] 1 0
r 1.526044654 _1_ MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
```

El símbolo AGT hace referencia a los agentes que se utilizan en el simulador NS para enviar/recibir tráfico desde los nodos. El agente del simulador se corresponde con el nivel de aplicación de la torre TCP/IP. En este sentido el tráfico generado desde el agente sufrirá el camino descrito a continuación antes de alcanzar al agente correspondiente en el nodo destino.

En primer lugar es necesario transmitir la trama desde el agente al nivel de enlace (AGT), esta trama es encolada en un buffer de tamaño configurable y que por defecto permite almacenar hasta 50 tramas. Una vez que la trama alcanza la primera posición del buffer, esta será entregada al mecanismo de acceso EDCA de 802.11e. En este momento la trama debe esperar un tiempo prefijado para cada cola de acceso denominado tiempo entre-tramas AIFS. Posteriormente comenzará el proceso de *backoff* y, finalmente, la trama pasará al nivel físico para acceder físicamente al canal. Si desea una información más detallada, el funcionamiento de este mecanismo está descrito en el capítulo de estado del arte.

En la figura A-10 podemos apreciar los resultados obtenidos mediante simulación, considerando la presencia de un único nodo que envía tráfico CBR al punto de acceso, a una tasa lo suficientemente elevada como para que la red se encuentre en modo saturación. El resto de la configuración se describe a continuación.

Tasa de transmisión: 11 Mbps
 Nodo inmóvil situado virtualmente en el mismo punto que el AP
 Tamaño de paquete variable: 100 – 1500 bytes
 Mecanismo RTS/CTS desactivado
 Experimento realizado para cada cola de acceso: AC_VO, AC_VI, AC_BE y AC_BK

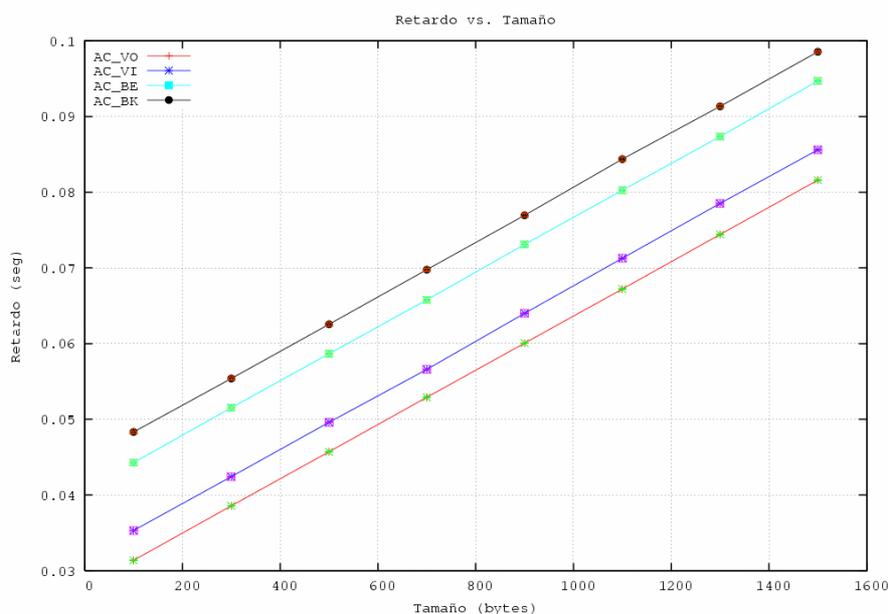


Figura A-10. Retardo de transmisión a nivel de aplicación en función del tamaño de paquete

A partir de esta figura podemos apreciar diferentes resultados. En primer lugar observamos como el comportamiento varía en función de la cola de acceso seleccionada, tal y como era esperable, ya que cada cola de acceso tiene unos parámetros de acceso al medio diferentes (estos se pueden comprobar en el archivo `priority.tcl`, el cual reproducimos al comienzo de este capítulo).

A nivel cuantitativo podemos apreciar como ha aumentado considerablemente el retardo sufrido por el paquete. Debemos destacar que en este caso el retardo conlleva una etapa de encolamiento (buffer de 50 posiciones), lo que indicaría que el retardo para una única trama sería una cincuentava parte del valor indicado.

Analicemos el retardo que debería sufrir una trama durante su transmisión siguiendo el esquema de acceso al medio descrito por EDCA. La ecuación A-3 describe este retardo en función del tamaño del paquete.

$$\begin{aligned} \text{retardo}_{AGT} = & (SIFS + AIFS_n \cdot \text{slottime}) + (CW_{\min} \cdot \text{slottime}) + \\ & + \frac{PLCP(\text{bits})}{1\text{Mbps}} + \frac{\text{TamañoMPDU}(\text{bits})}{\text{velocidad}(\text{mbps})} + \text{retardo_propagación} + SIFS + \\ & + \frac{PLCP(\text{bits})}{1\text{Mbps}} + \frac{\text{TamañoACK}(\text{bits})}{\text{velocidad}(\text{mbps})} + \text{retardo_propagación} \end{aligned}$$

Ecuación A-3. Retardo a nivel de aplicación

Teniendo en cuenta que el simulador NS2 utiliza un buffer de 50 tramas para obtener el valor de retardo mostrado en la anterior figura deberíamos multiplicar el valor obtenido por 50, que se corresponde con el tiempo que tendrá que esperar nuestra trama hasta que salga del buffer y acceda al medio de transmisión (ver ecuación A-4).

$$\text{retardo}_{AGT_{\text{origen}}-AGT_{\text{destino}}} = \text{retardo}_{AGT} \cdot 50$$

Ecuación A-4. Retardo incluyendo etapa en buffer

Una vez analizado el retardo, el cálculo del caudal efectivo cursado por la red es inmediato e inversamente proporcional al retardo. Repetiremos las simulaciones realizadas anteriormente centrándonos esta vez en la obtención del caudal efectivo para proceder a su posterior validación.

Simularemos una red inalámbrica compuesta por un único nodo móvil conectado a un punto de acceso. El nodo actuará como un transmisor enviando tráfico CBR al punto de acceso que será el nodo receptor. No existirá ningún otro tipo de tráfico en la red. El tráfico CBR se ha configurado con una tasa de transmisión lo suficientemente elevada como para asegurarnos de que la red se encuentra en modo de saturación.

El resto de parámetros que describen el escenario se resumen a continuación:

Tasa de transmisión: 11 Mbps

Nodo inmóvil situado virtualmente en el mismo punto que el AP

Tamaño de paquete variable entre 100 bytes y 1500 bytes con incrementos de 200 bytes

Mecanismo RTS/CTS desactivado

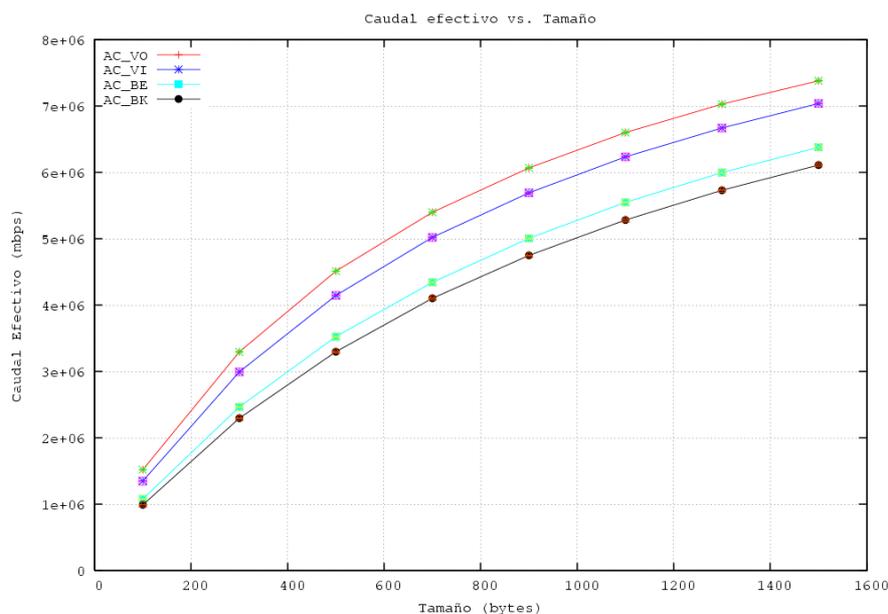


Figura A-11. Caudal efectivo en función del tamaño de trama

En la figura podemos apreciar como el tamaño de paquete determina completamente el caudal efectivo máximo que podrá cursarse, de forma que cuanto menor es el tamaño del mismo, menor será el caudal máximo cursado. Este comportamiento se encuentra dentro de las previsiones, ya que es necesario tener en cuenta que cualquier envío de una trama sobre 802.11e va acompañado de una cabecera de longitud fija – 192 bits, la cual es despreciable respecto del tamaño de datos cuando el paquete es grande, pero a medida que este disminuye comienzan a ser comparables, y el caudal efectivo se reduce.

Por otro lado apreciamos como la cola de transmisión utilizada, la cual identifica los parámetros de acceso al medio, determinará de igual forma el caudal máximo cursado, de manera que cuanto más prioritaria sea dicha cola mayor caudal lograremos cursar.

Como comentábamos anteriormente el valor esperado teóricamente una vez conocido el retardo vendría determinado por la siguiente ecuación matemática.

$$caudal - efectivo = \frac{tamaño(bits)}{retardo_{AGT}(segundos)}$$

Ecuación 5. Cálculo de caudal efectivo

Al comprobar el caudal efectivo esperado teóricamente y compararlo con el obtenido a través de simulaciones observamos ligeras diferencias inferiores a un 5%, que provocan una disminución de rendimiento en los resultados obtenidos mediante simulación. Este efecto viene provocado por el empleo del protocolo ARP para la resolución de direcciones de nivel de enlace en el simulador, parámetro que evidentemente, no se empleó para el cálculo teórico del caudal efectivo.

Según se puede comprobar en el archivo de trazas el envío de tramas entre los diferentes nodos no comienza hasta que no se ha resuelto la petición ARP, y de la misma forma, la resolución ARP se repite periódicamente a lo largo de la simulación. Este hecho provoca una ligera disminución de las prestaciones esperadas derivada de la capacidad de representación de un entorno real por parte del simulador NS.

Este hecho nos llevo a considerar durante la realización de la tesis la necesidad de la priorización de las tramas generadas por el protocolo ARP respecto de las tramas de datos, ya que la pérdida de estas tramas provocaría el bloqueo del envío de datos hasta la correcta resolución de la misma.

Finalmente y a título informativo hemos repetido estas mismas simulaciones modificando la velocidad de transmisión a la que los nodos están conectados al punto de acceso (figuras A-12 y A-13).

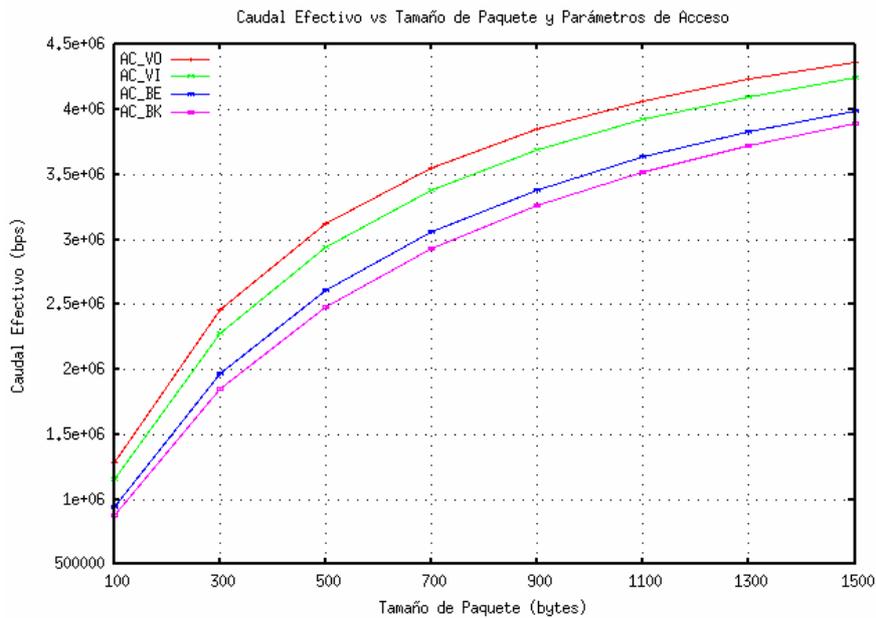


Figura A-12. Caudal efectivo en función del tamaño de trama (5,5 Mbps)

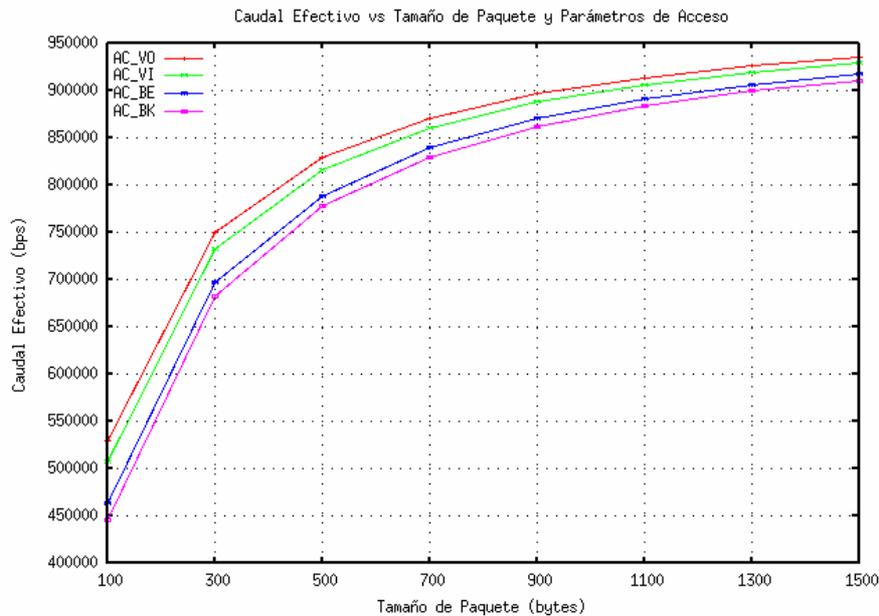


Figura A-13. Caudal efectivo en función del tamaño de trama (1 Mbps)

A.2.2.4 Tiempo entre-tramas (AIFS) y Tiempo de *backoff* - con colisiones

En este nuevo apartado introduciremos un nuevo parámetro a evaluar en la validación del simulador. El número de nodos conectados al punto de acceso es un factor determinante en el cálculo del caudal efectivo cursado, ya que la presencia de un mayor número de nodos de estos provoca un aumento del número de colisiones, y en consecuencia una disminución de la eficiencia de la red.

Para esta simulación usaremos nodos que transmitan tráfico CBR hacia el punto de acceso con una tasa tal que la red se encuentre en modo de saturación. El punto de acceso continuará en modo receptor sin generar ningún otro tipo de tráfico más que el derivado de la recepción (tramas de asentimiento – ACK).

La configuración del resto del escenario se resume a continuación:

Tasa de transmisión: 11 Mbps
 Nodos inmóviles situados virtualmente en el mismo punto que el AP
 Tamaño de paquete: 1500 bytes
 RTS/CTS desactivado

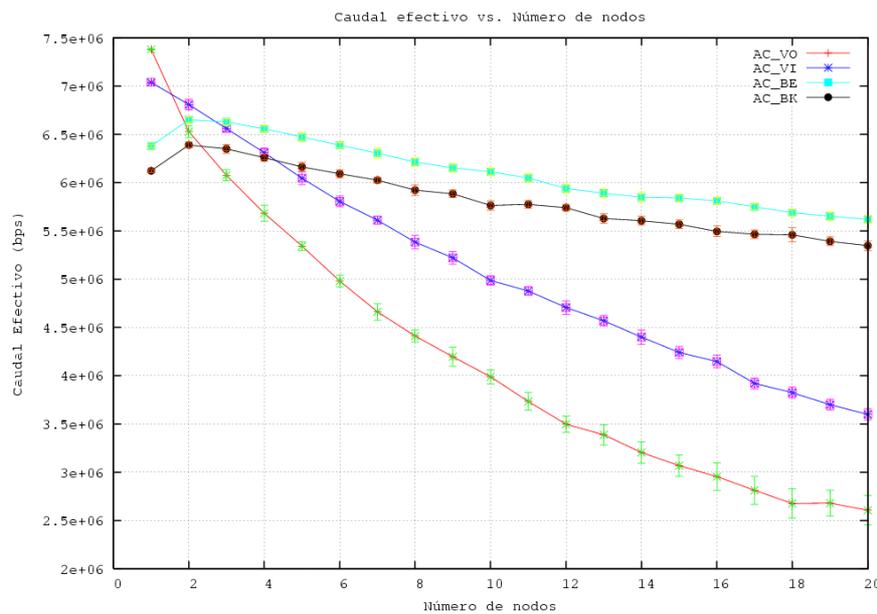


Figura A-14. Caudal efectivo en función del número de nodos

Los resultados obtenidos, mostrados en la figura A-14, pueden distar algo de las expectativas iniciales, si bien un conocimiento profundo del funcionamiento del mecanismo de acceso al medio EDCA nos permite comprender claramente el comportamiento del caudal efectivo cursado.

Las colas de acceso más prioritarias (AC_VI y AC_VO) utilizan valores para la ventana de contienda menores que los que usan el resto de colas (AC_BE y AC_BK). Cuando el número de estaciones es pequeño, las colisiones no son muy elevadas, y al disminuir el tiempo medio de acceso al medio se logra un aumento del caudal cursado. Sin embargo, cuando el número de estaciones es elevado, las colisiones aumentan radicalmente con valores de ventana de contienda pequeños, provocando que la eficiencia de la red se desmorone.

Las colas menos prioritarias (AC_BE y AC_BK) usan valores más elevados para CWmin y en consecuencia mantienen un rendimiento más constante, y no dependen tanto del número de nodos

presente. De hecho estas colas de acceso alcanzan sus mejores resultados con un número intermedio de nodos, ya que permiten un mejor aprovechamiento del proceso de *backoff*, sin llegar a aumentar sensiblemente el número de colisiones.

A continuación realizaremos estas mismas simulaciones a partir del modelo matemático descrito por Bianchi para comprobar el error que conlleva el uso del simulador. Los resultados los ofrecemos en la figura A-15.

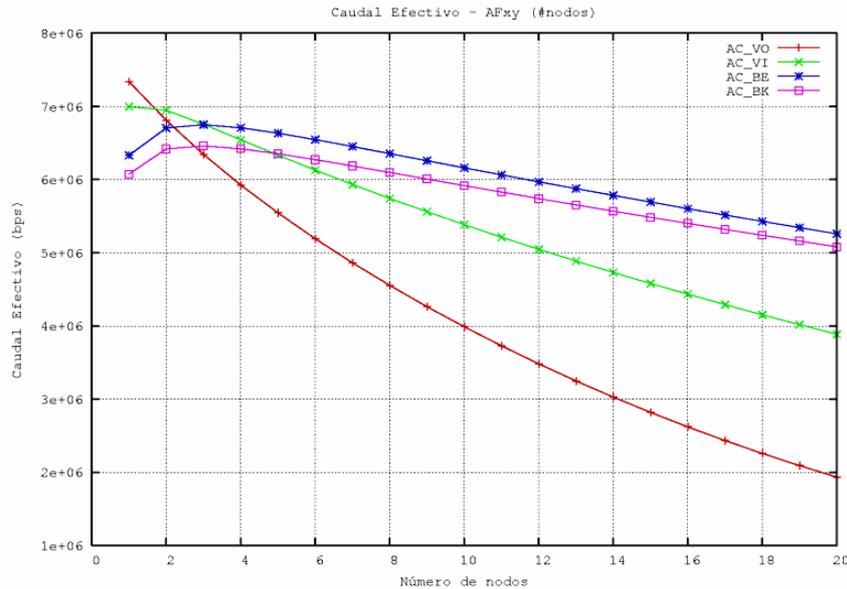


Figura A-15. Caudal efectivo teórico en función del número de nodos

Al igual que sucedía con la anterior simulación, observamos un ligero descenso de las prestaciones obtenidas teóricamente respecto a las obtenidas mediante simulación. Este efecto vuelve a aparecer debido a la presencia de tráfico ARP en las simulaciones, el cual no es considerado en el cálculo teórico.

Se puede observar como este efecto es más apremiante cuanto mayor es el número de estaciones, lo cual es lógico ya que el tráfico ARP aumenta con el número de nodos presentes en la red.

A título informativo repetiremos estas mismas simulaciones con diferentes valores para el tamaño de la trama de forma que se pueda apreciar la diferencia en el rendimiento alcanzado (figuras A-16 y A-17).

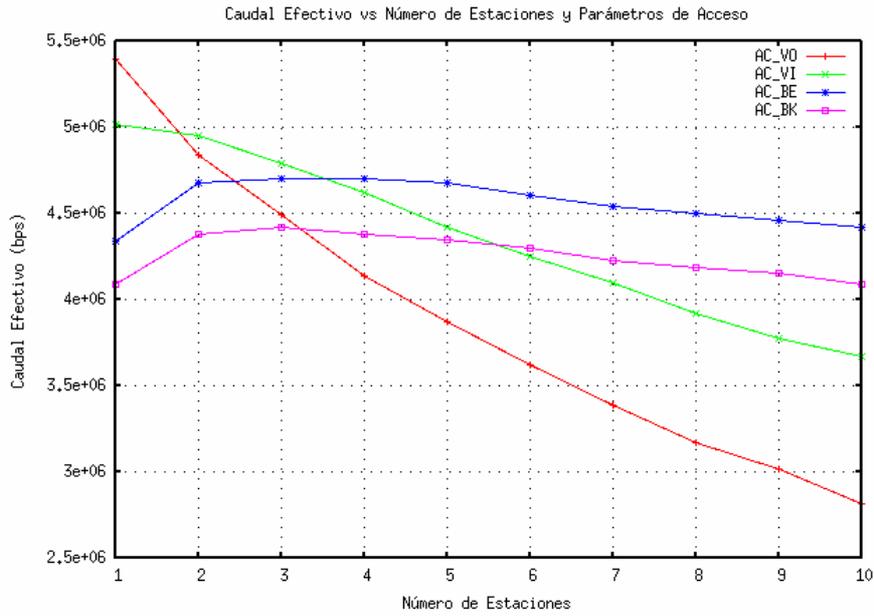


Figura A-16. Caudal efectivo con tamaño de trama 700 bytes

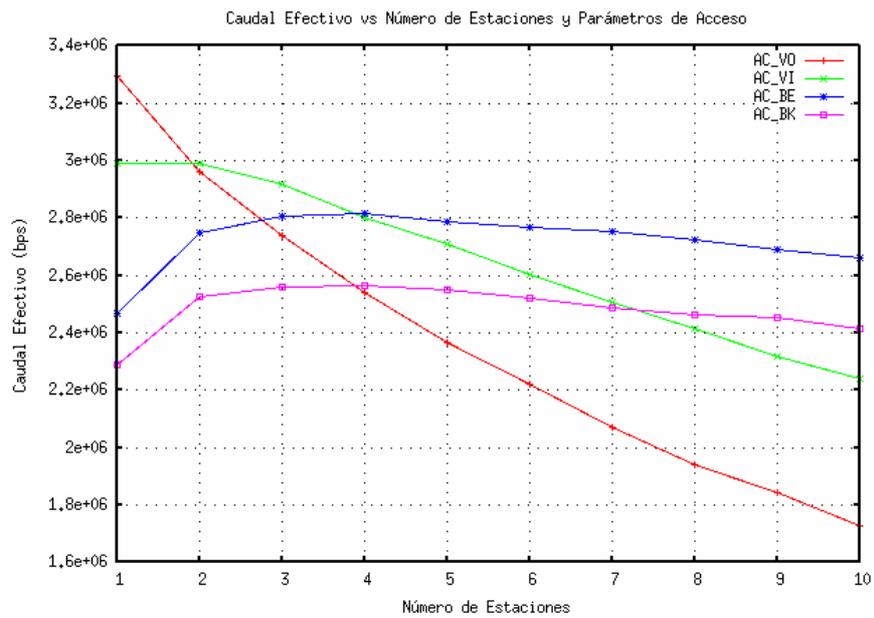


Figura A-17. Caudal efectivo con tamaño de trama 300 bytes

De igual forma representaremos el retardo que sufren las tramas a nivel de aplicación en función del número de nodos (figura A-18). Recordemos que este retardo incluía la etapa de encolamiento en un buffer de 50 tramas.

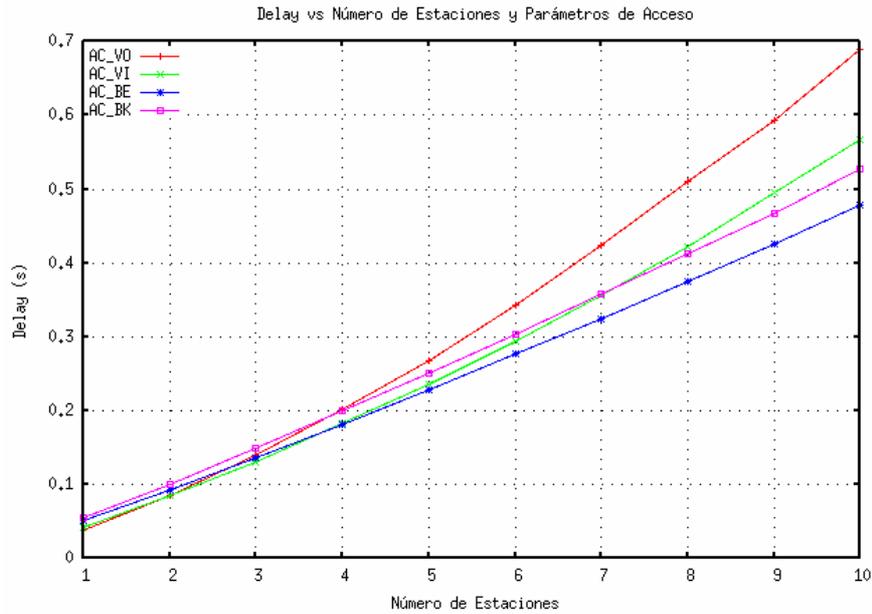


Figura A-18. Retardo en función del número de nodos

Tal y como cabía esperar el retardo aumenta progresivamente según el número de estaciones. Este efecto viene derivado del mayor número de colisiones que provoca el aumento de estaciones. En este sentido, las colas más prioritarias, que tienen menores valores del tamaño de ventana de contienda mínimo, registran los peores resultados en cuanto a retardo se refiere, ya que el número de colisiones aumenta considerablemente con el número de nodos.

A.3 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos a lo largo del presente apéndice podemos concluir que el simulador que emplearemos para proceder a la evaluación de la arquitectura propuesta en la tesis y la extensión para el soporte de redes inalámbricas 802.11e se encuentran completamente validados.

En el proceso de validación se han contrastado los valores obtenidos con el modelo matemático que describe el comportamiento de una red inalámbrica 802.11 y que fue descrito por Bianchi en su artículo [Bianchi2000]. La validez de este modelo ha sido igualmente comprobada en el propio artículo así como por múltiples investigadores, los cuales usan actualmente este modelo como base de sus propias investigaciones.

Una vez que el simulador ha sido completamente validado se puede proceder a la realización de cuantas simulaciones consideremos apropiadas teniendo la certeza de que el comportamiento observado será idéntico al que tendríamos trabajando sobre una red real.

Las ventajas derivadas de la simulación respecto a la implementación real son considerables. En nuestro caso nos habría resultado imposible trabajar con un escenario real, ya que al comienzo de la misma, el estándar 802.11e se encontraba en una fase de borrador, de manera que no era posible la localización de hardware con soporte 802.11e. Por otro lado la simulación te permite llevar a cabo implementaciones de escenarios muy elaborados, donde se puede variar fácilmente el número de nodos, o el tráfico generado por los mismos, lo cual resultaría bastante complejo en un escenario real.